



Étude de la pratique du *creative coding* pour la production de performances génératives et interactives en milieu immersif

Par Rémi Lapierre

Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi en vue de l'obtention du grade de la maîtrise en art

Québec, Canada

© Rémi Lapierre, 2021

RÉSUMÉ

Qu'est-ce que les artistes tels que Memo Akten, Kyle McDonald, Kyle McLean, Robert Hodgkin, Chris O'Shea, Golan Levin, Zach Lieberman ont en commun? Ils partagent une pratique de l'usage créatif des outils de la programmation logicielle et une maîtrise à la fois de la programmation et de la création d'expériences. Ils imaginent des œuvres et développent des outils disponibles pour la communauté des développeurs et artistes tels que, par exemple, l'environnement « Open Framework » par l'artiste Zach Lieberman ou *Cinder* par Robert Hodgkin. Dans ce contexte, ce mémoire de recherche-crédation examine les logiques de conception incarnées par la figure du codeur créatif dans le contexte de la production d'environnements génératifs et interactifs pour la production d'expériences immersives. Les particularités de ces environnements sont les suivantes : ils sont générés en temps réel, modifiables en tout temps et offrent aux utilisateurs un certain degré de liberté. Dans ce contexte, pour le créateur ou l'artiste qui utilise l'ordinateur, la machine n'occupe pas uniquement une position d'exécutante, mais de partenaire. Ces aspects influencent les processus de conception, de création et de diffusion des œuvres, plus particulièrement au niveau de la méthode par laquelle les projets sont générés. Ce mémoire pose donc le questionnement suivant : comment, dans un contexte de projet individuel ou de collaboration, le codeur créatif peut-il concevoir des systèmes génératifs pouvant servir d'instrument ou d'outil pour la création d'expériences immersives? Reposant sur une méthode d'étude de cas, plusieurs projets sont analysés afin d'atteindre les objectifs de cette recherche. Le premier objectif consiste en l'étude, à partir de l'analyse d'un répertoire de projets situés, de la logique de conception d'environnements immersifs interactifs utilisant des systèmes génératifs. Pour le second objectif, il s'agit, à partir de cette analyse, de proposer une certaine méthode de création itérative adaptée aux logiques de génération procédurale et de modularité propre au médium. Globalement, cette recherche vise, par l'étude de projets, à mieux cerner et comprendre la pratique artistique incarnée par la figure particulière du codeur créatif.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|-----------|
| RÉSUMÉ..... | ii |
| TABLE DES MATIÈRES | iii |
| LISTE DES TABLEAUX..... | v |
| LISTE DES FIGURES..... | vi |
| DÉDICACE | vii |
| REMERCIEMENTS | viii |
| AVANT-PROPOS | ix |
| INTRODUCTION | 1 |
| CHAPITRE 1 | 5 |
| LA PRATIQUE DES CODEURS CRÉATIFS | 5 |
| 1.1 COMMUNAUTÉ DES CODEURS CRÉATIFS | 5 |
| 1.2 COMMUNAUTÉ DE PRATIQUE DES CODEURS CRÉATIFS | 10 |
| 1.2.1 MEMO AKTEN : INTELLIGENCE ARTIFICIELLE | 11 |
| 1.2.2 KYLE MCDONALD : ANALYSE DE L'IMAGE EN MOUVEMENT | 12 |
| 1.2.3 KYLE MCLEAN : DÉTOURNEMENT DES TECHNOLOGIES « BIG DATA » 13 | |
| 1.2.4 ROBERT HODGIN : VISUALISATION 3D | 14 |
| 1.2.5 CHRIS O'SHEA : INSTALLATION INTERACTIVE | 16 |
| 1.2.6 ZACH LIEBERMAN : CROQUIS GÉNÉRATIF | 16 |
| 1.3 POUR UNE MEILLEURE COMPRÉHENSION DE LA PRATIQUE DE L'ART NUMÉRIQUE..... | 17 |
| 1.4 QUESTIONS DE RECHERCHE..... | 19 |
| 1.5 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE | 21 |
| CHAPITRE 2 | 22 |
| 2.1 DÉFINITION DE L'ART NUMÉRIQUE | 22 |
| 2.2 L'ART GÉNÉRATIF : THÉORIE DE LA COMPLEXITÉ | 24 |
| 2.1.1 SYSTÈME CHAOTIQUE ET SYSTÈME ALÉATOIRE | 27 |
| 2.1.2 LES NOTIONS DE L'ORDRE ET DU DÉSORDRE..... | 28 |
| 2.1.2 LA GÉNÉRATION PROCÉDURALE..... | 33 |
| 2.3 ART INTERACTIF | 34 |
| 2.4 ART IMMERSIF | 36 |
| 2.5 GÉNÉRATION EN TEMPS RÉEL..... | 37 |

| | |
|--|----|
| CHAPITRE 3 | 40 |
| MÉTHODE D'ÉTUDE DE CAS EN ART NUMÉRIQUE | 40 |
| 3.1 TRAJECTORY MODEL OF PRACTICE AND RESEARCH | 40 |
| CHAPITRE 4 | 43 |
| PROJETS D'ENVIRONNEMENTS GÉNÉRATIF POUR DISPOSITIFS IMMERSIFS | 43 |
| 4.1 PERFORMANCES | 43 |
| 4.1.1 COMPOSER..... | 44 |
| 4.1.2 ENIGMA | 48 |
| 4.1.3 LE PIANO-LUMIÈRE..... | 53 |
| 4.1.4 ILLUMINATION FRANKENSTEIN : VOYAGE AU CŒUR DU MYTHE | 58 |
| 4.1.5 ENVIRONNEMENT DE PRÉVISUALISATION ET DE PRODUCTION VIRTUELLE | 62 |
| 4.2 STRUCTURE D'UNE PRODUCTION DE PERFORMANCE GÉNÉRATIVE ET INTERACTIVE EN MILIEU IMMERSIF | 64 |
| 4.3 LE PARCOURS DE LA MÉTHODE | 71 |
| CONCLUSION | 76 |
| BIBLIOGRAPHIE | 81 |
| ANNEXE 1: PROJET ENIGMA | 84 |
| ANNEXE 2 : PROJET LE PIANO-LUMIÈRE | 90 |
| ANNEXE 3 : TRAJECTORY MODEL OF PRACTICE AND RESEARCH | 95 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| TABLEAU 1 : ÉCHANTILLONNAGE DE PRATIQUE ET DE TECHNOLOGIES DES CODEURS CREATIFS..... | 11 |
| TABLEAU 2 : ÉLÉMENTS PRINCIPAUX, ACTIVITES ET RESULTATS DE CHAQUE TRAJECTOIRE. EDMONDS, E., & CANDY, L. (2010)..... | 42 |
| TABLEAU 3 : LISTE DES PROJETS..... | 43 |
| TABLEAU 4 : LOGICIELS, EQUIPEMENTS ET CONTEXTE DE DIFFUSION..... | 44 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| FIGURE 1 : MODELE DE LA MESURE DE LA COMPLEXITE ALGORITHMIQUE. (GALANTER, 2003). | 29 |
| FIGURE 2 : MODELE DE COMPLEXITE EFFECTIVE. GALANTER, P. (2003)..... | 31 |
| FIGURE 3 : CLASSIFICATION DE SYSTEME D'ART GENERATIF. GALANTER, P. (2003)..... | 32 |
| FIGURE 4 : MODELE DE TRAJECTOIRE DE LA PRATIQUE DE LA RECHERCHE. EDMONDS, E., & CANDY, L. (2010). | 41 |
| FIGURE 5 : COMPOSER. | 45 |
| FIGURE 6 : COMPOSER. | 45 |
| FIGURE 7 : STRUCTURE DE COMPOSER. | 46 |
| FIGURE 8 : ENIGMA. (2019), MOUVEMENT PIANO-LUMIERE. SAT. | 49 |
| FIGURE 9 : ENIGMA. PROJET TOUCHDESIGNER..... | 50 |
| FIGURE 10 : LE PIANO-LUMIERE (2018), MOUVEMENT SATURNE. SAT..... | 54 |
| FIGURE 11 : LE PIANO-LUMIERE. PROJET TOUCHDESIGNER..... | 55 |
| FIGURE 12 : ILLUMINATION FRANKENSTEIN (2018). SAT..... | 60 |
| FIGURE 13 : STRUCTURE DE DOSSIER POUR LA GENERATION PROCEDURALE DANS ILLUMINATION FRANKENSTEIN..... | 60 |
| FIGURE 14 : CAMERASTUDIOVR. | 63 |
| FIGURE 15 : STRUCTURE D'UNE PRODUCTION DE PERFORMANCE..... | 66 |
| FIGURE 16 : CLASSE DE BASE DANS LE PIANO-LUMIERE..... | 69 |
| FIGURE 17 : MODELE DU PARCOURS DE LA METHODE, BASE SUR LE MODELE DE ERNEST EDMONDS ET LINDA CANDY (VOIR FIGURE 4). (EDMONDS & CANDY, 2010)..... | 71 |
| FIGURE 18 : CLASSIFICATION DE SYSTEME D'ART GENERATIF. (VOIR FIGURE 3). GALANTER, P. (2003)..... | 75 |
| FIGURE 19 : ENIGMA (2019). MOUVEMENT INTRODUCTION. SAT. | 84 |
| FIGURE 20 : ENIGMA (2019). MOUVEMENT DIALOGUE. SAT..... | 85 |
| FIGURE 21 : ENIGMA (2019). MOUVEMENT DIALOGUE PART 2. SAT..... | 86 |
| FIGURE 22: ENIGMA (2019). MOUVEMENT CRYPTOGRAPHIE. LA VILETTE. PARIS..... | 86 |
| FIGURE 23 : ENIGMA (2019). MOUVEMENT PIANO-LUMIERE. SAT..... | 87 |
| FIGURE 24 : ENIGMA (2019). MOUVEMENT RELIGION. SAT..... | 87 |
| FIGURE 25 : ENIGMA (2019). MOUVEMENT HORIZON. SAT. | 88 |
| FIGURE 26 : ENIGMA (2019). MOUVEMENT SPECTRE. LA VILETTE. PARIS..... | 88 |
| FIGURE 27 : ENIGMA (2019). MOUVEMENT ESPACE TURING. SAT. | 89 |
| FIGURE 28 : ENIGMA (2019). MOUVEMENT UNIVERS. SAT..... | 89 |
| FIGURE 29 : LE PIANO-LUMIERE (2018). MOUVEMENT MERCURE ET SOLEIL. SAT. | 90 |
| FIGURE 30 : LE PIANO-LUMIERE (2018). MOUVEMENT MERCURE ET SOLEIL. SAT. | 90 |
| FIGURE 31 : LE PIANO-LUMIERE (2018). MOUVEMENT TERRE. SAT..... | 91 |
| FIGURE 32 : LE PIANO-LUMIERE (2018), MOUVEMENT RE-SOLEIL ET MARS, SAT..... | 91 |
| FIGURE 33 : LE PIANO-LUMIERE (2018). MOUVEMENT JUPITER. SAT..... | 92 |
| FIGURE 34 : LE PIANO-LUMIERE (2018). MOUVEMENT SATURNE. SAT..... | 92 |
| FIGURE 35 : LE PIANO-LUMIERE (2018). MOUVEMENT URANUS, SAT..... | 93 |
| FIGURE 36 : LE PIANO-LUMIERE (2018). MOUVEMENT NEPTUNE, SAT..... | 93 |
| FIGURE 37 : LE PIANO-LUMIERE (2018). MOUVEMENT PLUTON. SAT. | 94 |
| FIGURE 38 : LE PIANO-LUMIERE (2018). MOUVEMENT ESPACE INFINI. SAT. | 94 |
| FIGURE 39 : MODELE DE TRAJECTOIRE DE LA PRATIQUE DE LA RECHERCHE D'EDMONDS E. ET CANDY L. (2010). | 95 |

DÉDICACE

En mémoire de mon père et mes grands-parents qui m'ont quitté durant le cours de cette maîtrise.

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je me dois de remercier mon directeur Yan Breuleux. Ce mémoire n'aurait probablement jamais vu le jour sans son soutien et sa patience. Il a vu quelque chose en moi que je ne voyais pas moi-même et m'a présenté un monde dans lequel je ne pensais pas pouvoir mettre les pieds. Il m'a donné la chance de réaliser mes premiers spectacles artistiques et, depuis, j'ai eu l'opportunité de présenter nos recherches à Paris et en Corée du Sud. Son énergie et sa curiosité sont aussi contagieuses que la COVID-19 et m'ont permis de mener à terme ces projets.

Je remercie aussi Alain Thibault, pour la chance que j'ai eue d'avoir pu accompagner sa composition musicale avec mes créations visuelles. Son professionnalisme et son soutien à travers nos projets ont toujours été essentiels.

Je tiens aussi à remercier mes professeurs Louis-Philippe Rondeau et Benoît Melançon pour leurs conseils et leur soutien moral au cours de cette maîtrise. Nos longues discussions que ce soit dans les cours, dans les corridors ou autour d'une bière dans un bistro japonais en Corée ont toujours été une grande source d'inspiration et m'ont même permis d'inventer de nouveaux outils qui ont pu être utilisés dans l'industrie.

AVANT-PROPOS

Curieux de nature, c'est avec une triple formation en mathématique, en bande dessinée et en jeux vidéo de l'école NAD que j'ai commencé mon parcours aux études supérieures dans le programme de maîtrise en design numérique. La possibilité de maîtriser à la fois les logiques de programmation logicielle et les outils de création 3D m'ont amené vers des pratiques hybrides où les relations entre dimensions créatives et techniques n'étaient pas toujours faciles à identifier et à comprendre. C'est entre autres pour mieux me situer et comprendre les processus de création que j'ai débuté une formation aux études supérieures. Mon intérêt pour la pratique créative du code dans les arts numériques, le jeu et les effets numériques a toujours émergé des possibilités infinies de jumeler le traitement de l'image en temps réel et le potentiel expressif des possibilités de la programmation. La partie la plus satisfaisante de ce travail est de voir comment l'interaction directe entre les mondes virtuels que l'on peut créer et les participants, que ce soit en installation artistique ou en jeux numériques, amène de nouvelles perspectives sur notre pratique artistique. Au cours de mes recherches, la découverte d'une communauté de praticiens artistiques ayant un profil interdisciplinaire semblable au mien m'a amené à tenter de saisir les logiques de conception et de production de la figure particulière du «codeur créatif».

INTRODUCTION

En 2019 a eu lieu le sommet *TouchDesigner* à Montréal, un moteur de programmation visuelle (fonctionnant selon une logique nodale) en temps réel développé au Canada. Cet événement a donné l'occasion pour des centaines de codeurs créatifs (*creative coders*) et d'artistes techniques de partager leurs expériences et savoir-faire avec la communauté associée au logiciel. Parmi les participants, nous retrouvons de nombreuses sommités dans le domaine, notamment M. Vincent Houze qui est spécialiste de la génération procédurale et plus précisément spécialisé dans la simulation dynamique (*dynamic simulation*), M. Guillaume Bourassa qui est responsable en recherche et développement à la compagnie *Moment Factory*, et M. Michael McKellar qui se décrit lui-même comme étant un « *creative designer, instructor, and technologist* ». J'ai moi-même eu l'occasion de présenter le résultat de mes recherches dans le cadre de cet événement. Bien que la liste des participants soit longue, lorsque nous consultons les biographies respectives de chacun, il apparaît que presque tous ces participants ont ce même point en commun : ils programment des environnements dynamiques, procéduraux, ils utilisent les technologies de manière créative et ils se définissent à la fois comme des artistes et des designers. Enfin, mentionnons le duo d'origine russe 404.zero (Kristina Karpysheva et Sasha Letsius) qui réalise des expériences aux frontières de l'art moderne et des technologies génératives. Les membres de ce duo se décrivent

eux-mêmes comme des architectes audiovisuels et des créateurs d'outils (Karpysheva & Letsius, 2016).

En consultant la liste des participants et leurs créations artistiques respectives, une constatation générale vient à l'esprit : la programmation (nodale et textuelle) est une pratique artistique à part entière. Dans les utilisateurs du logiciel, plusieurs artistes utilisent la programmation pour exploiter la technologie de manière créative. Ceux-ci peuvent se ranger du côté des codeurs créatifs. La figure particulière et hybride du codeur créatif a bien été explorée lors de nombreuses conférences par Robert Hodgkin (connu sous le pseudonyme Flight 404). Notamment dans plusieurs conférences du festival Eyeo entre 2012 et 2014 (Hodgin, 2014) où ce dernier décrivait à la fois le processus par lequel il aboutissait au résultat de ses productions et l'état d'esprit particulier qui animait sa pratique: « when I first started writing with code a decade ago, everything seemed to be possible ». Il traite entre autres de la perception négative ou surprise de la majorité des gens à propos du terme « creative coding ». Il souligne que pour la grande majorité des gens, ces deux termes ne vont pas ensemble. Il fait partie des artistes qui contribuent activement au développement de la plateforme de programmation créative Cinder (<https://libcinder.org/>). Zach Lieberman, co-créateur d'une plateforme semblable nommé openFrameworks (<https://openframeworks.cc/>), organise une école de poésie computationnelle (Lieberman, 2013). Une large communauté d'artistes a été introduite à la programmation en tant que médium d'expression par ces pionniers des nouvelles

technologies. C'est grâce à des outils tels que Processing (<https://processing.org/>) et p5.js (<https://p5js.org/>), lesquels sont des bibliothèques de programmation destinées aux codeurs créatifs, que des créateurs qui n'ont jamais eu de formation formelle en programmation ou en mathématique peuvent développer leurs connaissances de ce médium. Ces bibliothèques sont développées à partir de la philosophie du code source ouvert (*open-source*), qui permet à chacun de contribuer à la communauté, donnant au professionnel un outil riche et évolutif pour la recherche et, au débutant, une facilité pour créer des résultats encourageants en empruntant et manipulant les codes disponibles. Le créateur Daniel Shiffman concentre une grande partie de sa carrière à l'enseignement du code créatif à un grand nombre de personnes enthousiastes. Depuis 2013, sa chaîne YouTube « *The Coding Train* » explore les principes de base de la programmation jusqu'aux notions plus avancées, traitant même d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique (*machine learning*) de manière accessible à l'aide des outils informatiques tel que *Processing* et *JavaScript P5*.

Dans le premier chapitre, nous explorerons brièvement l'origine de la communauté des codeurs créatifs en relation avec l'avancement de la technologie informatique. Par la suite, nous présenterons une étude d'artistes contemporains utilisant la programmation et la technologie pour la production de leur art respectif. Le premier objectif de ce mémoire vise à mieux comprendre, à partir de l'analyse d'un répertoire de projets situés, la logique de conception d'environnements immersifs

interactifs utilisant des systèmes procéduraux. Le second objectif découle de cette analyse et consiste à proposer une certaine méthode itérative de travail qui soit adaptée aux logiques de création procédurale et de modularité propre au médium. Globalement, ce mémoire vise par l'entremise d'étude de projets à mieux cerner et comprendre la pratique artistique particulière de la figure du codeur créatif. En ce sens, le deuxième chapitre du présent mémoire portera un regard sur les arts numériques, et plus particulièrement sur les concepts de la génération et de l'interaction qui m'ont inspiré dans la production d'outils et d'instruments de création d'expérience immersive en temps réel. Par la suite, dans le troisième chapitre, nous explorerons l'approche méthodologique utilisée au cours de mes recherches reliant la pratique à la théorie. Ce sera aussi l'occasion d'aborder la remise en question qui s'est faite à travers l'évaluation de mon travail. Le quatrième chapitre présentera premièrement un regard sur les logiciels et les technologies utilisés pour la création d'un corpus de projets. Pour ce faire, nous passerons en revue une sélection d'œuvres génératives et d'outils qui ont été produits dans le courant des recherches ayant été faites à la maîtrise.

CHAPITRE 1

LA PRATIQUE DES CODEURS CRÉATIFS

1.1 COMMUNAUTÉ DES CODEURS CRÉATIFS

Au début de l'année 2021, sur le site grand public *Editor X* dans la rubrique « *Shaping design* » était publié un article fort instructif intitulé « *10 innovative creative coding examples that are redefining programming* ». Il est à noter que plusieurs des artistes cités dans cet article sont également cités dans le présent chapitre. À notre sens, le titre est instructif puisqu'il mentionne que la pratique de ces artistes redéfinit les contours de ce que le grand public associe généralement à l'activité de programmation. Celle-ci est, en général, associée à l'exécution de tâches et de calcul qui se situent à mille lieues de ce qui pourrait être une éventuelle activité de création et d'improvisation. D'ailleurs, cette vision est partagée par de nombreux programmeurs. Dans la communauté de pratique des programmeurs informatiques à laquelle j'ai longtemps appartenu et contribué, l'apparence importe peu ; ce qui est important est d'exécuter des fonctions répondant à des besoins précis. Il y a toutefois une certaine forme de créativité qui est nécessaire à la construction de systèmes complexes de résolution de problèmes de toutes sortes, de composition de programmes simples, efficaces, solides et réutilisables et dans le choix des bons outils. Cependant, pour ceux qui s'identifient en tant que codeur créatif, la satisfaction ne vient pas nécessairement d'un défi technique ou d'un casse-tête logique à résoudre, mais de l'excitation venant de la création d'images et de mondes de formes

numériques originales. Le code devient un pont entre le réel et le virtuel. En effet, le code nous permet d'interagir de manière à exploiter le médium en profondeur et réaliser des expériences qui ne seraient pas réalisables sans le support de la technologie de l'environnement immersif. Le codeur créatif est un artiste générateur d'outils et d'éléments visuels et sonores. Dans ce contexte, la programmation devient un autre médium à travers lequel le codeur créatif peut s'exprimer. En consultant les profils de codeurs créatifs que nous allons sommairement analyser au cours de la prochaine section, force est de constater que plusieurs d'entre eux ont des formations interdisciplinaires. Les codeurs créatifs pratiquent fréquemment d'autres formes artistiques telles que le dessin, la musique, le design ou l'animation, pour n'en citer que quelques-uns. La programmation permet à l'artiste de mettre en relation, sous la forme de dispositifs complexes, toutes sortes de données en temps réel pour créer des liens entre le monde virtuel et les participants ; cela ne serait pas possible à faire sans l'apport de la technologie (utilisation de senseurs de toutes sortes, de manettes, de claviers, de caméras et d'écrans). Puisque la technologie évolue constamment, le codeur créatif cherche la manière de l'utiliser à son plein potentiel ou comment la détourner dans le but d'élaborer de nouvelles expériences où il exerce un contrôle consciencieux sur l'utilisation des technologies concernées.

Nous vivons actuellement une époque sans précédent en ce qui a trait à la miniaturisation des composantes matérielles de calcul. Par exemple, il est maintenant difficile d'imaginer nos vies sans avoir à utiliser un ordinateur. Cette technologie, bien

que toute récente, est étroitement liée à un grand nombre d'activités humaines, tel que dans notre travail, nos communications ou notre divertissement. Depuis les premières machines programmables, comme le ENIAC en 1943, lequel occupait un espace de 550 mètres carrés, il y a eu une évolution marquée de la miniaturisation. Pensons par exemple au cellulaire d'aujourd'hui qui a une puissance de calcul qui est 100 000 fois supérieures à celle de l'ordinateur de la navette Apollo 11 en 1969, tout en étant suffisamment petit pour être mis dans une poche de chemise ou de pantalon. Il va sans dire que la fulgurante progression de la technologie cellulaire nous donne ainsi accès à un incroyable nombre d'outils très utiles et facilitants pour nos activités en tout genre.

Dès les années 60, on peut voir émerger les premières images de synthèse, mais l'accès aux ordinateurs demeurait difficile. Ces machines à l'époque étaient non seulement de grande taille et d'un coût élevé se situant dans l'ordre des millions de dollars, mais ils avaient aussi besoin d'une équipe technique pour être simplement maintenues en opération. Seules les universités et de grandes institutions comme Bell Labs pouvaient posséder ces machines. En conséquence, il n'est pas étonnant que les premières personnes à avoir créé de l'art avec un ordinateur ont été des mathématiciens, des scientifiques et des ingénieurs. À noter que la plupart des premiers praticiens devaient eux-mêmes programmer leurs propres outils car il y avait peu de logiciels ni d'interface usager. C'était seulement à travers la programmation comme médium que ces pionniers pouvaient explorer librement le potentiel de ce nouveau média. D'ailleurs, Bell Labs a été une influence majeure en soutenant la

scène naissante de l'art numérique. Parmi les artistes et ingénieurs qui y ont collaboré, mentionnons les figures les plus connues : Claude Shannon, Ken Knowlton, Leon Harmon, Lillian Schwartz, Charles Csuri, A. Michael Noll, Edward Zajec, et Billy Klüver (un ingénieur qui a collaboré avec Robert Rauschenberg pour fonder le collectif de référence du domaine « *Experiments in Art and Technology* » (EAT)). En contribution avec Bell Labs, ils ont œuvré à produire la célèbre série de performances intitulées « *9 Evenings* » en 1966 (Bonin, 2006), laquelle résulte d'une collaboration entre dix artistes et trente ingénieurs.

Au cours des années 70, de plus en plus d'artistes ont commencé à apprendre et à maîtriser la programmation pour développer leurs propres outils et alimenter leur processus de création. Plusieurs de ces artistes venaient des écoles traditionnelles des beaux-arts et non pas des mathématiques. Paul Brown, qui a étudié à « *The Slade School of Art* », a programmé un système qui lui permettait de créer des images numériques utilisant des éléments qui évoluent et qui se propagent en répondant à une suite de règles simples. On a aussi vu l'apparition de plus en plus d'outils dédiés à la création d'art numérique comme ART1 (un langage de programmation créé à l'Université du Nouveau-Mexique) par Katherine Nash qui est professeure d'Art et Richard Williams qui est professeur d'informatique, et qui consistait à être un système dont la fonction première était de rendre la programmation accessible pour les étudiants qui n'ont pas de base en technologie.

Les années 80 marquent l'apparition de l'ordinateur de bureau. La taille réduite des ordinateurs permet de gagner en popularité autant dans la sphère professionnelle qu'au point de vue de l'usage personnel qui en est fait. L'utilisation de l'image numérique devient progressivement plus commune grâce à leur utilisation dans des films telle que « Star Trek II : The Wrath of Khan » et Tron (1982) et la popularité croissante des jeux numériques. Ces besoins dans le milieu professionnel de produire rapidement et efficacement des images de synthèse ont inspiré le développement de plusieurs logiciels dans le but de combler ces besoins dans les studios de production. En 1987, les frères Thomas et John Knoll ont développé la première version de Photoshop, un logiciel d'édition d'images qui est encore utilisé de nos jours. À noter que John Knoll est un superviseur d'effets visuels travaillant à Industrial Light and Magic.

Sans refaire l'historique complet de l'évolution des ordinateurs et des technologies disruptives, il convient de souligner la progression rapide de cette technologie vers une plus grande puissance de calcul et une meilleure portabilité, ce qui a eu comme conséquence de permettre aux artistes d'avoir accès à de plus en plus de solutions industrielles. En effet, la situation actuelle est fortement tributaire de l'apparition de l'ordinateur multimédia du milieu des années 90 et de sa progression constante en terme de puissance et d'accessibilité.

1.2 COMMUNAUTÉ DE PRATIQUE DES CODEURS CRÉATIFS

L'approche particulière qui guide la pratique du codeur créatif est indépendante des technologies et des bibliothèques de code pour la production des outils et environnements procéduraux. Malgré des similitudes du côté des langages de programmation (C++, Java, Python), les codeurs créatifs conçoivent leurs outils à l'aide d'environnements de programmation en base texte (openFrameworks, Cinder) ou nodale (Touchdesigner, VVVV). Malgré une grande profusion de créations, d'expérimentations et de projets réalisés dans les industries créatives, il y a cependant peu de documentation portant sur les méthodes de création provenant des codeurs qui examinent concrètement comment ils conçoivent leurs projets de création. Toutefois, certains des artistes sont impliqués dans la transmission de leurs connaissances, notamment Golan Levin. En plus de sa thèse de doctorat, Levin a publié de nombreux articles et réalisé de multiples communications sur les technologies numériques. Pour sa part, Zack Lieberman participe à l'école de poésie computationnelle (*School for Poetic Computation*). La mission de l'école illustre d'ailleurs à merveille l'approche particulière qui est étudiée dans le présent mémoire :

The School for Poetic Computation is organized around exploring the creative and expressive nature of computational approaches to art and design. The school approaches writing code like creative writing—focusing on the mechanics of programming, the demystification of tools, and hacking the conventions of art-making with computation. (Lieberman, Z. (2013).)

Il est aussi important de mentionner que Memo Akten qui, en plus de travailler sur une thèse de doctorat, contribue à la recherche de nouvelles formes de

productions artistiques utilisant le potentiel créatif de l'utilisation des outils issus de l'intelligence artificielle.

Tableau 1 : Échantillonnage de pratique et de technologies des codeurs créatifs

| Artistes | Environnements programmation | de | Référence |
|---------------------------------|------------------------------|----|---|
| Memo Akten (aka Memo.tv) | Cinder | | Akten, M. (2008). Vimeo Memo Akten. |
| Kyle McDonald | OpenFrameworks | | Mcdonald, K. (2020). IArtist. Mcdonald, K. (2007). Vimeo. |
| Kyle McLean | VVVV | | McLean, K. (2018). Vimeo. |
| Robert Hodgkin (aka Flight 404) | Cinder / Houdini | | Hodgin, R. (2012). Robert Hodgkin. Hodgkin, R. (2007). Vimeo flight404. |
| Chris O'Shea | OpenFrameworks | | O'Shea, C. (2004). Chris o'Shea. |
| Zach Lieberman | OpenFrameworks | | Lieberman, Z. The Systemis. |

Le tableau 1 ci-dessus identifie six artistes que nous jugeons incontournables dans le cadre de notre recherche de maîtrise. Pour ce faire, nous allons examiner dans le prochain chapitre les démarches de plusieurs de ces codeurs créatifs afin de mieux cerner leur approche artistique spécifique.

1.2.1 MEMO AKTEN : INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Memo Akten (aka Memo.tv) est un artiste d'origine turque qui compte parmi les artistes qui utilisent le code de manière créative. Akten utilise les technologies émergentes et l'informatique comme médium de création. En étant un artiste prolifique, il est l'une des figures actuelles les plus actives dans l'exploration artistique de l'intelligence artificielle et l'interaction entre l'humain et la machine. Akten cherche à comprendre la nature de la condition humaine dans son environnement.

Pour y parvenir, sa démarche artistique consiste à combiner la forme, le mouvement et le son avec le code, pour créer des œuvres d'abstraction comportementale.

Dans son œuvre « Learning to See » (Akten, 2017), Akten a développé une série d'itérations de composition d'image vue à travers l'œil d'un réseau neuronal artificiel. Son objectif étant de chercher à donner un sens au monde qui l'entoure. En comparant des objets de tous les jours avec l'interprétation de l'ordinateur, Akten simule comment les humains observent le monde : « Il peut seulement voir à travers les filtres de ce qu'il connaît déjà. Juste comme nous. Parce que nous aussi, nous voyons les choses non pas comme elles sont, mais comme nous sommes » (Akten, 2017).

1.2.2 KYLE MCDONALD : ANALYSE DE L'IMAGE EN MOUVEMENT

Dans un même ordre d'idées, à travers ses œuvres, l'artiste numérique Kyle McDonald cherche à changer comment nous percevons le futur en travaillant avec la programmation. Il est reconnu pour son travail dans les médias synthétiques avec les systèmes d'analyse d'image et des réseaux neuraux, tels que les « GAN » (Generative Adversarial Network). Il cherche à analyser les images pour être capable d'identifier les fausses images générées par l'intelligence artificielle (McDonald, 2018).

Le projet « Discrete Figure » (McDonald, 2019) propose une nouvelle forme de danse explorant la relation entre le l'humain et le mouvement généré par l'ordinateur. L'œuvre utilise l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique

(*machine learning*) pour réimaginer l'art du corps en mouvement à travers l'analyse mathématique dans une performance jumelant le réel et le virtuel. L'ordinateur génère des entités virtuelles qui s'engagent avec le corps des danseurs humain, cela en utilisant une base de données de mouvements qui ont été collectées et en entraînant le système pour générer une série de mouvements abstraits de danse.

1.2.3 KYLE MCLEAN : DÉTOURNEMENT DES TECHNOLOGIES « BIG DATA »

Captivé par les liens symbiotiques que les humains sont en train de développer avec les technologies de l'image et du son, Kyle McLean approche l'art numérique avec une certaine légèreté et sens de l'humour. Sous l'ombrelle de *Everyone is Happy Production*, il a produit un grand nombre d'œuvres et de collaborations en utilisant le code et les collectes de données de masse (*big data*) pour créer des expériences graphiques. Dans l'œuvre *Melting Memory* (Anatol, 2018), en collaboration avec le studio de l'artiste *Refik Anadol* et le laboratoire *Neuroscape* à l'Université de Californie, où il a participé à la création d'un outil pour créer des projections animées de la collecte de données venant d'un EEG (électroencéphalogramme) à 32 canaux enregistrant l'activité neurale de différents participants se concentrant sur des souvenirs. Ce travail multidisciplinaire mélange le savoir-faire de plusieurs experts ou artistes ainsi que programmeurs et scientifiques pour créer une vision esthétique des mouvements cérébraux d'un être humain.

Le *Waifu Synthesis – real time generative anime* (Mclean, 2018b) présente un mélange intéressant de plusieurs systèmes génératifs travaillant ensemble pour la création d'un personnage d'animation en train de chanter.

Pour paraphraser Brian Eno, qui est un pionnier dans le domaine, la démarche de ce projet repose sur une approche augmentée de la musique générative. Ainsi, dans une célèbre entrevue en 1996, Eno précisera le concept avec une grande simplicité en disant au sujet de la musique générative (Eno, 1996) que « it's possible to think of a system or a set of rules which once set in motion will create music for you ». La mise en mouvement d'une série d'interactions entre de multiples règles permet de générer une multitude de versions de la même « anime ».

1.2.4 ROBERT HODGIN : VISUALISATION 3D

Robert Hodgin, aussi connu sous le pseudonyme Flight404, est le directeur d'interaction et le cofondateur du studio *Rare Volume* œuvrant dans le design et la technologie (<https://rarevolume.com/>). Il est un des créateurs de Cinder C++ Framework, une puissante bibliothèque de programmation « open source » à but esthétique qui est destinée au codage créatif ; cette bibliothèque permet de travailler avec le graphisme, l'audio, la vidéo et la géométrie. Les intérêts de Robert Hodgin incluent les théories de la physique, de l'astronomie, des systèmes de particules et des visualisations audio. Ces champs d'intérêt se reflètent dans son art où il utilise le code pour créer des systèmes génératifs et des simulations inspirées de ces thèmes.

Son œuvre *Collider* (Hodgin, 2012b), qu'il a commencé en 2007 et présentée à Eyeo en 2012, illustre bien l'influence de l'astronomie et de la physique dans son processus de création. Le projet explore la beauté des forces gravitationnelles à travers la création de systèmes de particules. Ce système crée quelques milliers de sphères dans un espace clos et chacune d'entre elles s'attire les unes les autres, le tout étant basé sur les lois de Newton portant sur la force gravitationnelle universelle. Lorsque deux sphères entrent en collision, la plus petite sphère transfère une portion de sa matière en fonction de sa vitesse à l'impact à la plus grosse particule, augmentant son influence gravitationnelle. Lorsque la sphère est rendue à une certaine taille, cette sphère s'illumine comme une étoile et attire vers elle toutes les sphères environnantes jusqu'au moment où elle atteint une masse critique. Au-delà de ce point critique, la sphère explose, libérant ainsi une nuée de sphères plus petites et, de ce fait, retournant sa matière dans le système ce qui a pour conséquence de recommencer à nouveau le cycle.

Avec son studio *Rare Volume*, Robert Hodgin a participé à la création du spectacle *Accenture Symphonologie* (Hodgin, 2012a) au Louvre qui a eu lieu lors du lancement de *Accenture Strategy France*, au cours duquel une symphonie (créée à l'aide d'une intelligence artificielle et d'une analyse de documents d'affaires) a été mise à l'honneur. L'œuvre de Hodgin consistait pour sa part en une visualisation sonore en temps réel de cette symphonique. Pour ce faire, une projection des signaux

sonores transformés en représentations visuels était faite sur un écran situé à l'arrière de l'orchestre qui était en train de faire la prestation de la symphonie.

1.2.5 CHRIS O'SHEA : INSTALLATION INTERACTIVE

L'artiste britannique Chris O'Shea cherche à réimaginer la perception de l'espace et des objets de façon ludique en étudiant les comportements humains et l'engagement à travers l'interaction avec l'art numérique. Ses installations stimulent la curiosité et la créativité pour explorer notre imagination à travers l'immersion, la participation et la collaboration. Il a fondé en 2012 la compagnie *Cowly Owl* qui est un studio de développement d'applications ludiques destinées aux familles. Plusieurs de ses œuvres s'adressent aux enfants dans le but d'encourager l'épanouissement de leur confiance en l'expression de soi. Le projet *Little Magic Stories* (O'Shea, 2011) illustre bien cette volonté de Chris O'Shea en introduisant les jeunes à la création, cela en leur proposant un outil permettant de donner vie à des histoires. Cette installation met à profit la technologie afin de créer une performance qui utilise les dessins des participants pour créer une scène où ils peuvent interagir avec leur création.

1.2.6 ZACH LIEBERMAN : CROQUIS GÉNÉRATIF

Le codeur créatif new-yorkais Zach Lieberman est un des créateurs d'openFrameworks. Lieberman utilise openFrameworks pour créer différentes formes de dessin et d'animation expérimentale et construit des environnements

interactifs invitant les spectateurs à devenir des performeurs. Pour Lieberman, le code devient un médium pour créer de la poésie. En 2013, il participe à la fondation de l'organisation *School of Poetic Computation*. Une grande partie de sa production prend la forme de croquis qui sont réalisés par le code et qui sont présentés chaque jour sur Instagram depuis 2016 (Lieberman, 2016a) (Lieberman, 2016b). Lieberman explique aussi comment ses croquis lui permettent de tester rapidement différentes idées à travers les itérations.

1.3 POUR UNE MEILLEURE COMPRÉHENSION DE LA PRATIQUE DE L'ART NUMÉRIQUE

En examinant la très grande variété des pratiques, il est possible de résumer la démarche du codeur créatif comme étant une approche multidisciplinaire qui cherche à connecter le réel, lequel constitue le matériel, avec les possibilités combinatoires infinies de l'immatérialité du numérique. L'étude du travail des artistes œuvrant avec la programmation démontre leurs intérêts à relier la technologie (par le biais du contrôle mathématique) aux innombrables périphériques associant l'image, le son et l'espace, le tout étant mis en relation avec l'imprévisibilité du comportement humain. Il convient de souligner que l'utilisation du code comme médium d'expression artistique peut sembler obscur pour les non-initiés et les débutants et il peut être difficile de comprendre le travail d'un codeur créatif seulement en expérimentant le résultat final de son travail. Ces artistes cherchent à vulgariser leurs approches face à leur pratique afin d'offrir une fenêtre sur l'ouvrage derrière leur œuvre. Pour ce faire,

ces artistes font des contributions sous la forme d'articles académiques (Golan Levin, Memo Akten) et de conférences partagées sur les réseaux sociaux (Robert Hodgin). D'ailleurs, dans sa conférence à MuDA, Lieberman présente son approche à la programmation : principalement la production d'une image par jour sur Instagram. Cette approche itérative du travail est selon lui l'une des meilleures sources d'inspiration en explorant rapidement différentes variations sur les mêmes codes. Le travail par itération est aussi une bonne méthode d'approcher la complexité et de chercher des solutions étape par étape, en faisant des ajouts progressifs au code et cela jusqu'à l'obtention du résultat désiré. Dans le même ordre d'idées, Robert Hodgin explique dans sa présentation à Eyeo les différents niveaux de progression au cours d'un projet, soit le fait d'ajouter des règles au fur et à mesure dans ses systèmes. La capacité d'analyser un système complexe et à le décomposer en une série de systèmes simples est une compétence importante pour tous les programmeurs. C'est la modularité qui permet d'explorer des fonctions procédurales plus profondes, ce la tout en permettant de facilement élargir un projet, d'intervenir à chaque étape et d'introduire de nouveaux modules de façon non destructrice. Les aspects génératifs, itératifs, modulaires et qui exploitent une grande variété de dispositifs mentionnés par les praticiens du *creative coding* nous mènent à nos questions de recherche.

1.4 QUESTIONS DE RECHERCHE

L'Art numérique, à travers son lien direct avec la technologie, ouvre les portes vers de nouvelles formes de création et de narration. Dans le médium des arts numériques, l'utilisation des technologies de l'interaction nous permet de briser des formes traditionnelles d'écriture pour créer des systèmes qui peuvent se modifier et s'adapter en fonction des choix et des actions posés par les participants. Les systèmes génératifs permettent de se départir du code rigide de l'écriture cinématographique qui est présent dans un jeu pour plutôt laisser place à un certaine quantité d'imprévisibilité. Nous sommes d'avis qu'il existe un grand potentiel dans l'étude des différentes manières d'utiliser les systèmes génératifs pour la construction, la génération ou la transformation de contenu en temps réel.

De nos jours, les barrières entre le monde réel et le monde virtuel s'estompent de plus en plus. La communication entre l'être humain et la machine devient une seconde nature grâce à l'avancement rapide de la technologie, que cela soit par les moyens de captures de données et les algorithmes. Ces données, dans les mains d'un codeur créatif, peuvent devenir un médium pour réimaginer son environnement. Dans le domaine des arts numériques, le codeur créatif concevra des systèmes d'interaction en temps réel avec des univers procéduraux permettant de conférer à l'ordinateur et aux utilisateurs un certain degré d'agentivité.

En examinant la pratique des codeurs créatifs, bien qu'il existe des formations universitaires sur les technologies numériques, nous croyons qu'il est possible de développer de nouvelles connaissances sur les stratégies de conception de systèmes génératifs qui puissent permettre de mieux comprendre les étapes de la réalisation de spectacles d'art numérique. Les nombreux tutoriels, facilement accessibles et disponibles sur les réseaux sociaux, portent majoritairement sur l'enseignement d'un aspect spécifique du travail d'un artiste numérique ou d'un codeur créatif, que ce soit les bases de l'utilisation d'un outil ou d'un langage de programmation. Par contre, le travail du codeur créatif pour la création d'une ou plusieurs expériences complètes est rarement étudié directement. Tel que mentionné, il est possible de trouver un grand nombre d'informations sur les œuvres elles-mêmes, les technologies utilisées, les thématiques artistiques. Cependant, il est difficile de trouver de l'information sur le sujet spécifique du codeur créatif. La manière de structurer un projet de performance générative et interactive de façon procédurale et réutilisable est en effet peu abordée par les artistes codeurs eux-mêmes. Pourtant, les communautés de pratique ont été étudiées en sociologie et de ce fait constituent des sujets de recherche reconnus (Lallement, M. 2015). En tenant compte de ces arguments, ceci nous amène à formuler la question de recherche suivante :

À partir du profil particulier du codeur créatif, quelles sont les logiques de conception d'environnements génératifs et interactifs dans un contexte performatif en milieu immersif ?

1.5 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

- Le premier objectif vise à mieux comprendre la logique de conception d'environnements immersifs interactifs utilisant des systèmes génératifs à partir de l'analyse d'un répertoire de projets.
- Le second objectif consiste à adapter une méthode de travail aux logiques de création procédurale et modulaire, cela à partir de l'analyse faite lors du premier objectif de recherche.

Pour répondre à nos objectifs de recherche et à mieux cerner mon sujet de recherche, le prochain chapitre examinera plus en détails une définition spécifique de l'art numérique et génératif, cela en fonction de la pratique des codeurs créatifs. Par la suite, nous nous attarderons à répondre au second objectif en présentant la méthode par laquelle j'avais procédé à l'analyse de la pratique de la programmation créative lors de la production d'une série de projets artistiques.

CHAPITRE 2

POUR UNE DÉFINITION DE L'ART NUMÉRIQUE EN CONTEXTE IMMERSIF

2.1 DÉFINITION DE L'ART NUMÉRIQUE

Depuis les débuts de l'informatique, de nouvelles formes de pratique artistique ont commencé à émerger et ont changé à jamais la manière dont l'art est consommé. Ces pratiques, suivant l'évolution de la technologie, découlent d'une longue tradition d'artistes travaillant à l'extérieur des normes établies dans le domaine des Beaux-Arts, alors que ces artistes cherchent à redéfinir la définition de l'art et à rester connectés aux changements et aux préoccupations de la société. À noter que les artistes Marcel Duchamps et John Cage s'inscrivent dans cette ligne de pensée avec leurs œuvres respectives *Ready-mades* et *Silence*.

Les termes art génératif (*generative art*) et art informatique (*computer art*) ont été utilisés de façon interchangeable. Ils nous proviennent de la première exposition d'art numérique « Generative Computergraphik » à Stuttgart en 1965. Un des exposants, George Nees a publié quatre ans plus tard la première thèse doctorale sur l'art informatique, laquelle était intitulée du même nom que l'exposition. Dans cette thèse, les termes *generative* et *computer* ont été retenus par la communauté et ont été attachés à ce nouveau domaine. Les œuvres produites à travers ce médium technologique sont liées à plusieurs disciplines déjà bien établies. Ce lien interdisciplinaire a pour conséquence directe de donner naissance à divers types de travail, notamment : la musique, les arts visuels, l'art vidéo, les installations

multimédias, la réalité virtuelle, la sculpture kinétique, la performance et la littérature. Avec le temps et la croissance de la communauté d'artistes utilisant le code comme médium artistique, les termes utilisés pour identifier ce mouvement technologique couvraient un ensemble de pratiques diverses qui sont très différentes les unes des autres. À ce titre, Margaret A. Boden et Ernest A. Edmonds identifient et définissent onze types d'art numérique dont nous dressons la liste ci-dessous :

1. L'art électronique (*electronic art*) couvre toutes œuvres dont la production a requis de l'ingénierie électronique.
2. L'art informatique (*computer art*), où le procédé de production implique les ordinateurs.
3. L'art numérique (*Digital art*)
4. L'art assisté par l'ordinateur utilise l'ordinateur comme un support (en principe, pas essentiel) du processus de création.
5. L'art génératif (*generative art*) est lorsque l'œuvre est générée, au moins en partie, par un procédé qui n'est pas directement sous le contrôle de l'artiste.
6. L'art généré par ordinateur (*computer generated art*) est produit en laissant un logiciel roulé par lui-même, en ayant aucune ou peu d'interférence de la part d'un humain.
7. L'art évolutif présente des œuvres qui évoluent par l'entremise de procédés de variation aléatoire et de reproduction sélective qui affectent le programme qui génère l'art en lui-même.

8. L'art robotique (*robotic art*) utilise la construction de robots à des fins artistiques, ces robots sont des machines physiques capables de mouvement ou de communication.
9. L'art interactif (*interactive art*) où le contenu de l'œuvre est affecté de façon significative par les participants ou l'audience.
10. L'art interactif par ordinateur (*computer interactive art*) est comme l'art interactif, à la différence que son œuvre est pour sa part numérique.
11. L'art de réalité virtuelle (*VR art*) qui immerge l'audience dans un environnement comme s'il était réel.

Cependant, il convient de souligner que ces onze types d'art définis par Margaret A. Boden et Ernest A. Edmonds ne sont pas hermétiques les uns aux autres, c'est-à-dire qu'une œuvre artistique peut être créée en amalgamant plusieurs de ces types d'art. Pour ma part, les types d'art dont est issue ma création artistique sont plus spécifiquement les arts génératifs, les arts interactifs et l'art de réalité virtuelle. Ces derniers seront explorés dans les prochaines sections.

2.2 L'ART GÉNÉRATIF : THÉORIE DE LA COMPLEXITÉ

L'arrivée de l'ordinateur dans le domaine des arts a ouvert de nouvelles possibilités de complexité dans la création. Son rôle étant de faciliter la résolution de problèmes qui sont difficiles pour des humains, voire même impossible. Les auteurs définissent l'art généré par ordinateur comme étant produit en laissant un logiciel

s'exécuter par lui-même, avec aucune ou peu d'interférence de la part d'un humain. Dans cette définition, il n'est pas exclu qu'il puisse y avoir interaction entre le système et les humains. De manière intéressante, Philip Galanter (un artiste et professeur à l'université A&M) définit plus spécifiquement cette pratique dans son article de 2003 qui est intitulé *What is Generative Art? Complexity Theory as a Context for Art Theory* :

L'art génératif réfère à toute pratique artistique où l'artiste utilise un système, tel qu'un ensemble de règles venant du langage naturel, un programme informatique, une machine ou autre invention procédurale, qui s'anime avec un certain degré d'autonomie contribuant ou résultant en une œuvre d'art complète (traduit de l'anglais, Galanter, P. 2003)

Ces systèmes sont au cœur même de l'art génératif où l'artiste cède, de façon partielle ou totale, le contrôle sur la création. Ces procédés ne sont pas nécessairement contrôlés par un ordinateur, ils peuvent aussi être physiques, psychologiques, socioculturels ou formels. En 1969, l'écrivain Bryan Johnson a rédigé *The Unfortunates* qui est un roman publié en 27 sections dans une boîte, où mis à part la première et la dernière section, le reste peut être lu de manière aléatoire, soit en les mélangeant ou en les tirant aux dés. D'autres artistes, tels que Hans Haacke en 1960 ont délibérément choisi de se départir d'encore plus de contrôle sur leur pratique en exploitant des procédés physiques de la matière, comme l'eau, la vapeur et la glace, cela en cherchant à produire des expériences qui réagissent à son environnement de façon instable et imprévisible, où les formes et les comportements ne peuvent pas être prédits. Dans de telles situations, l'œuvre créée par l'art génératif n'est plus seulement l'artefact final, mais plutôt le système entier qui a permis son

élaboration. Le processus de création est contrôlé dans une certaine mesure par des règles qui sont soit « conscientes », c'est-à-dire décidées par l'artiste, ou inconscientes, c'est-à-dire forcées par la nature de la matière utilisée (procédé physique, biologique). L'artiste conceptuel Sol LeWitt explique le procédé de l'art génératif comme étant le moment où le système « Deviens la machine qui crée l'art, où toutes la planification et les décisions sont faites préalablement et l'exécution est une affaire superficielle. » (Traduit de l'anglais, LeWitt, 1967, p.824) une fois que le plan a été choisi, « la volonté de l'artiste est secondaire au précédé qu'il initialise de l'idée à l'achèvement » (traduit de l'anglais, LeWitt, 1969). L'artiste Ernest Edmonds a utilisé un ordinateur pour la première fois dans son travail artistique *Nineteen* en 1968, où il cherchait à structurer une installation composée de vingt pièces de relief au mur avec une série de règles bien précises. Le problème était trop complexe, mais avec l'aide d'un programme, la solution a pu être trouvée. Il n'avait pas de trace de l'ordinateur dans le travail final, seulement la solution.

Philip Galanter utilise les théories de la complexité présentées par Murray Gell-Mann et Seth Lloyd pour la communauté scientifique pour créer un contexte par lequel on pourrait comprendre cette notion de système. Ces théories parlent de systèmes complexes et des procédés par lesquels la science cherche à les déconstruire dans le but de pouvoir en extraire les fonctionnements. Par système complexe, les scientifiques parlent d'une structure qui est formée d'un grand nombre de composantes ou d'autres systèmes qui interagissent entre eux. Ces systèmes sont aussi considérés comme étant indépendants et fonctionnant par eux-mêmes. Ces

phénomènes peuvent être naturels (par exemple le climat, l'écosystème ou encore le cerveau) et aussi peuvent émerger du comportement humain (par exemple l'économie). Galanter identifie les notions de chaos, d'aléatoire, d'ordre et de désordre dans le but d'identifier ce qui compose un système complexe ou simple.

2.1.1 SYSTÈME CHAOTIQUE ET SYSTÈME ALÉATOIRE

Bien qu'un système chaotique puisse sembler aléatoire, dans le contexte d'un systèmes ces deux types de système ne sont pas la même chose. Un système chaotique est animé par des forces non linéaires qui répondent à des facteurs qui ne sont pas facilement prévisibles à travers le temps. Ces systèmes sont le résultat de l'amplification d'un grand nombre de facteurs qui sont difficilement déchiffrables et leurs enchevêtrements donnent naissance au phénomène que l'on observe dans un système aléatoire. Dans la théorie du chaos, ce comportement est souvent décrit comme l'effet papillon (*the butterfly effect*), où une certaine condition initiale entraîne une chaîne de conséquences imprévisibles, selon l'image qu'un coup d'aile d'un papillon à Hawaii puisse donner naissance à un ouragan au Texas. Bien que ces systèmes semblent difficiles à prédire, ils démontrent quand même une structure de règles contrairement à un système purement aléatoire. Après avoir étudié ces phénomènes, il est possible d'acquérir une certaine capacité de prédiction à l'aide de mesures, comme c'est par exemple le cas de la météorologie. Dans le cas des arts numériques, les codeurs créatifs s'inspirent souvent de ces manifestations naturelles

comme par exemple les systèmes de simulation de particules où l'on transpose nos connaissances des comportements physiques du monde matériel dans le virtuel.

2.1.2 LES NOTIONS DE L'ORDRE ET DU DÉSORDRE

Dans ses recherches, Galanter se base sur le travail de Claude Shannon au sujet des théories de l'information pour comprendre les notions d'ordre et de désordre dans la création d'un modèle de mesure de la complexité de systèmes. Du point de vue de l'ordre dans sa plus extrême expression, lorsque c'est expliqué dans ces théories, l'information prend alors la forme d'un signal répétitif, comme par exemple : « AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA ». Dans cette chaîne d'information hautement ordonnée, il n'y a pas de surprise, mais en même temps elle transporte très peu d'information. Par son caractère prédictif, ce type d'information est facilement compressible, c'est-à-dire que nous pouvons simplifier l'information par une petite chaîne d'instruction comme : loop: print « A » ; go to loop;. À son opposé, un signal désordonné serait pour sa part complètement aléatoire, comme par exemple : « JDTLXZWAYSSUCWAEGLKHA ». Dans ce signal, l'information n'a pas de structure de base. Cette forme de communication prise à son extrême n'est ainsi pas compressible et, de ce fait, chaque caractère d'information doit être conservé afin de pouvoir conserver l'entièreté du message. Entre ces deux pôles, nous pouvons retrouver le langage d'où un sens peut être tiré d'un signal. Par exemple, la phrase « I LIKE GENERATIVE ART » est une chaîne de caractères qui prend du sens dans le cadre de la structure de la langue anglaise. À noter que sous cette forme l'information peut

être encore compressée à un certain niveau tout en gardant son sens : « I LIK GENART ». Les langues contiennent de la redondance, des structures consistantes telles que la fréquence statistique dans la combinaison de sons, qui permettent de compresser le message en gardant l'essentiel de l'information. De la même manière, un système génératif peut être considéré comme étant plus ou moins ordonné en fonction de la structure de règles qui gouverne ses comportements.

L'approche étudiée par Galanter pour mesurer la complexité d'un système repose sur deux axes : AC et l'EC (AC étant la complexité algorithmique, et EC étant la complexité effective). La figure 1 ci-dessous illustre ces deux axes de la complexité logarithmique.

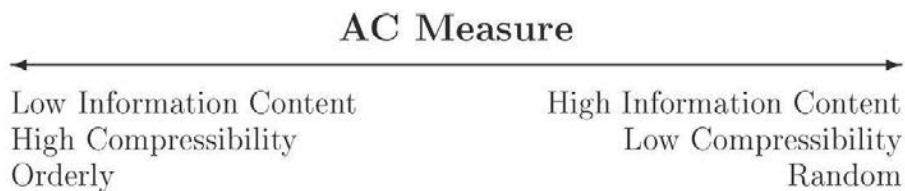


Figure from *The Computational Beauty of Nature: Computer Explorations of Fractals, Chaos, Complex Systems, and Adaptation*. Copyright © 1998-2000 by Gary William Flake. All rights reserved. Permission granted for educational, scholarly, and personal use provided that this notice remains intact and unaltered. No part of this work may be reproduced for commercial purposes without prior written permission from the MIT Press.

**Figure 1 : Modèle de la mesure de la complexité algorithmique. (Galanter, 2003).
Image reproduite avec la permission de l'auteur.**

Cette approche est présentée par Gary Flakes (1998) dans son livre : « The Computational Beauty of Nature »¹. À noter que AC est aussi appelée le contenu d'information algorithmique et elle représente la quantité d'informations qui doit être communiquée. Ainsi, un bas niveau de AC indique un système plus ordonné

¹ Flake, G. W. (1998). The computational beauty of nature

permettant la compression de l'information de façon simple, alors qu'au niveau le plus élevé de AC se trouve un système aléatoire où l'information doit être passée en entier et ne peut pas être comprimée (voir figure 1). Par ailleurs, ce serait une erreur de confondre un haut niveau de AC comme étant un système complexe car un pur désordre n'a pas de règle qui le gouverne.

La complexité effective, présentée sur l'axe Y appelé « complexity » dans la figure 2 ci-dessous, présente une meilleure compréhension d'un système complexe. Ce modèle, proposé par Murray Gell-Mann², divise un système en deux termes algorithmiques, soit que le premier algorithme analyse sa structure et le deuxième algorithme analyse sa déviation aléatoire. Des systèmes qui ont une très basse ou très haute valeur AC indiquent un système plus simple, alors que des systèmes complexes ont une valeur entre l'ordre et le désordre.

² Gell-Mann, M. (1995). What is complexity?

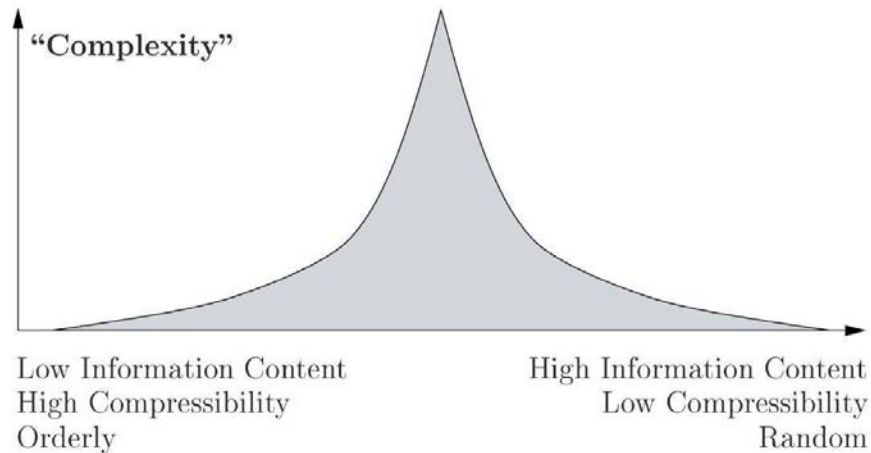
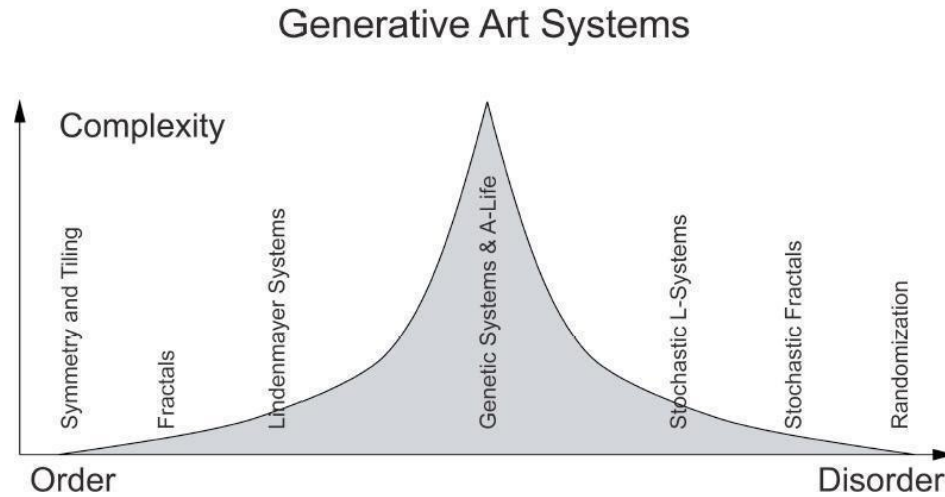


Figure from *The Computational Beauty of Nature: Computer Explorations of Fractals, Chaos, Complex Systems, and Adaptation*. Copyright © 1999-2000 by Gary William Flake. All rights reserved. Permission granted for educational, scholarly, and personal use provided that this notice remains intact and unaltered. No part of this work may be reproduced for commercial purposes without prior written permission from the MIT Press.

**Figure 2 : Modèle de complexité effective. Galanter, P. (2003).
Image reproduite avec la permission de l'auteur.**

Phillip Galanter, à partir d'une définition de l'art génératif comme étant l'utilisation de systèmes comme méthode de production - et en combinant avec le paradigme des systèmes tel que suggéré par la science de la complexité, propose un modèle pour comprendre et classifier les systèmes d'art génératif. À figure 3 ci-dessous, Galanter assigne une valeur de complexité effective à différents types de systèmes de manière générale utilisée par des codeurs créatifs.



**Figure 3 : Classification de système d'art génératif. Galanter, P. (2003).
Image reproduite avec la permission de l'auteur.**

Les systèmes de symétrie et de juxtaposition sont en contraste avec les systèmes purement aléatoires ; ce qui donne un exemple des extrêmes entre l'ordre et le désordre sont des systèmes à la base simple. Les algorithmes fractals et les systèmes Lindenmayer, résultent de motifs qui se répète à différente échelle, alors que ceux de type stochastique utilisent des règles aléatoires dans la récursion de leurs motifs. Les systèmes génétiques et de vie artificielle sont des systèmes complexes cherchant à simuler des comportements de phénomènes naturels. Il faut noter que ces classifications illustrées à la figure 3 ci-dessus ne sont que des généralisations pour ces types de systèmes. Aussi, ce ne sont pas tous les systèmes de vie artificielle qui sont aussi complexes les uns les autres, comme par exemple un fractal peut être plus ordonné qu'un autre.

2.1.2 LA GÉNÉRATION PROCÉDURALE

En informatique, la génération procédurale réfère à une méthode de créer des données en utilisant des systèmes de règles. Cette méthode pour générer du contenu est souvent utilisée pour créer des textures, des modèles 3D et des environnements, en utilisant des systèmes génératifs qui répondent à une série de règles et de contraintes. En jeu numérique, cette méthode de génération est utilisée depuis déjà la fin des années 70s avec des titres comme « Beneath Apple Manor » (1978) et Rogue (1980). Ce dernier est d'ailleurs à l'origine du nom du type en jeu « roguelike ». Ces jeux utilisent des algorithmes pour construire les niveaux que les joueurs auront à explorer, créant aussi une quasi-infinité de possibilités en utilisant très peu de mémoire. Ce type de développement apparaît surtout dans les jeux numériques cherchant à créer des mondes explorables qui ont des envergures qui sont impossibles à créer de façon traditionnelle par une équipe d'artistes. Des jeux d'exploration, tel que *Elite Dangerous*, simulent une galaxie en se basant sur des données réelles qui proviennent à la base des observations astronomiques de notre propre Voie Lactée. Pour sa part, « No Man's Sky » utilise non seulement des procédés procéduraux pour créer une galaxie, mais va aussi jusqu'à créer des biomes de créatures et de plantes uniques sur chaque planète. Les joueurs peuvent explorer leurs mondes pour des centaines d'heures sans visiter deux environnements qui vont être identiques.

2.3 ART INTERACTIF

L'Art interactif est une forme de l'art où l'œuvre répond à son audience ou son environnement. Dans le domaine numérique, cette coopération entre différents éléments, que cela soit des humains ou d'autres systèmes, permet de nouvelles formes de manipulation ou de participation pour former l'œuvre. Ce type d'expression artistique se distingue de la relation traditionnelle entre le média et le spectateur, où ce dernier doit précéder à un exercice mental pour interpréter le message de l'artiste. Une œuvre interactive demande une participation d'une autre personne ou d'un autre système pour prendre son sens. Cette activité peut simplement prendre la forme d'un travail qui consiste en ce que l'observateur doive naviguer autour, entrer dans un espace ou faire une simple manipulation pour pouvoir être appréciée. L'œuvre étant reconnue comme étant la première pièce interactive est une peinture de Parrhasius qui est un peintre de la Grèce Antique (399 avant JC) et dont l'œuvre est décrite dans les écrits de Pline l'ancien. Dans un concours de peinture contre Zeuxis, Parrhasius lui demanda de retirer le rideau de son œuvre, mais après sa tentative infructueuse, Zeuxis s'est rendu compte que le rideau n'était pas un rideau, mais la peinture d'un rideau. En 1920, Marcel Duchamp créa une pièce appelée Rotary Glass Plates, qui demandait au participant d'activer une machine et de se tenir à une distance précise pour observer une illusion optique. Avec l'arrivée de l'art numérique, le dialogue possible entre les différents acteurs d'une œuvre on acquit de nombreuses possibilités. Les participants et la machine travaillent ensemble pour produire l'expérience, laquelle peut devenir une œuvre unique au cours de

chaque interaction. D'ailleurs, un grand nombre d'interfaces ont été développées pour connecter le monde réel et l'univers virtuel. Des caméras et plusieurs types de senseurs existent pour donner à l'ordinateur une certaine conscience de son environnement. À l'aide d'algorithmes, la machine peut analyser les images captées et en déduire certaines informations. En ce sens, Microsoft a développé la Kinect qui, avec différents types de caméra, peut détecter la présence d'humains dans l'image et les données peuvent être utilisées par la suite pour animer un personnage virtuel. Les casques de réalité virtuelle tels que l'Oculus et le Vive utilisent des séries de senseurs ou des caméras tridimensionnelles pour repérer leurs positions dans l'espace. L'interaction avec l'œuvre d'Art numérique peut être sous la forme d'une installation, où le spectateur participe à la création, ou sous forme de performance, impliquant les artistes et parfois même le spectateur.

Par exemple, le festival Elektra a présenté *Inferno*, un travail de Louis-Philippe Demers et Bill Vorn. Cette œuvre place 25 participants dans des harnais motorisés (exosquelette) où leurs mouvements peuvent par moment être dictés par l'ordinateur, et parfois contrôlés par un autre participant. Cet échange entre l'artiste, le spectateur et l'ordinateur permet à l'art numérique de se transformer et d'offrir des expériences qui ne seront jamais identiques.

2.4 ART IMMERSIF

L'art de réalité virtuelle cherche à plonger l'observateur dans un monde virtuel généré par ordinateur, où il peut vivre l'expérience et y répondre comme si elle était réelle. Son objectif est d'accaparer les sens des participants dans le but d'oublier le réel au profit du virtuel. Dominic Arsenault et Martin Picard décrivent l'immersion comme étant : « Un phénomène qui se produit lorsqu'une couche de données médiatisée est superposée à celle non médiatisée avec une force et une étendue telles qu'elle empêche momentanément la perception de cette dernière. » (Dominic Arsenault et Martin Picard, 2008, p.2). Ces deux auteurs identifient trois formes d'immersion, soit l'immersion sensorielle, l'immersion fictionnelle et l'immersion systémique.

L'immersion sensorielle se passe au niveau des sens, où le monde virtuel accapare la perception des participants. La projection sur grands écrans près du visage, les écrans 360 degrés, les casques de réalité virtuelle, les sons élevés venant de système de son ou d'écouteur sont quelques-uns des moyens technologiques pour écraser toute information sensorielle venant du monde réel, ce qui permet au participant de fixer sa concentration sur le monde virtuel.

L'immersion fictionnelle est pour sa part l'absorption du participant dans le monde diégétique, de son identification ou de son attachement émotionnel qu'il développe avec les personnages présents dans un médium fictif (romans, films, jeux

numériques) qu'il consume. Cette immersion est décrite par Marie-Laure Ryan dans *Narrative as Virtual Reality* comme étant la croyance du participant qu'il y a un davantage dans le monde fictionnel représenté que ce qui lui est montré, soit que le monde virtuel s'étend au-delà des limites de ce que l'auteur a rédigé.

L'immersion systémique est plus spécifique aux jeux numériques. Elle repose sur les défis proposés par le jeu et les habiletés du joueur. Ce type d'immersion se produit au moment où un participant atteint un certain niveau de maîtrise dans les règles du système afin de surmonter le jeu et d'en éprouver une certaine satisfaction.

2.5 GÉNÉRATION EN TEMPS RÉEL

Lorsque nous parlons de temps réel dans le domaine de l'informatique, nous faisons référence à la capacité de l'ordinateur à générer la sortie d'un résultat demandé à une vitesse qui paraît naturelle à l'œil humain, comme c'est par exemple le cas de la génération d'une image ou le temps de réponse entre une action posée et son interaction avec le système. Un exemple commun de ce procédé est facilement visible dans les jeux numériques, où l'image (*frame*) doit être calculée (rafraîchie) plusieurs fois par seconde (au moins autour de trente fois par seconde) pour donner l'impression d'une animation fluide. Pour que ce processus soit possible, l'ordinateur, dans le cas d'une scène 3D, doit recevoir les données entrantes (comme les données provenant de la manette du joueur), calculer les changements dans le monde virtuel et la modification de la géométrie, simuler l'éclairage, rendre l'image en 2 D. Il n'est pas nécessaire pour un artiste numérique de travailler en temps réel.

Traditionnellement, dans le cinéma d'animation numérique tel que présenté par des studios comme Pixar ou Dreamworks, les films sont pré-rendus, où l'image passe par les mêmes processus qu'en temps réel, mais cela sur une plus longue période de temps, pour générer un rendu de meilleure qualité. Chaque image peut prendre plusieurs minutes, voire même des heures avant d'être terminée, mais ce temps permet aux artistes de travailler avec des algorithmes de simulation physique beaucoup plus avancés, d'utiliser des géométries et de systèmes d'animation plus complexes dans le but de se rapprocher du réel. De plus, le fait de ne pas avoir à se soucier de rendre l'image directement permet une retouche de l'image en postproduction comme au cinéma. Avec l'évolution de la technologie, les différences entre le rendu en temps réel et le pré-rendu s'estompent, l'équipement et les algorithmes permettent de nos jours d'avoir des résultats en temps réel qui se rapprochent de l'image pré calculé. Des technologies telles que les cartes graphiques Nvidia RTX sont dotées de la capacité de performance du « Ray Tracing » en temps réel, qui permettent de simuler la lumière d'une scène virtuelle avec une grande fidélité, allant chercher les réflexions, les ombres et l'occlusion ambiante. Nvidia a développé DLSS 2.0 (Deep Learning Super Sampling) qui est une intelligence artificielle qui permet au rendu d'être réalisé plus vite. Ce système d'apprentissage profond (*deep learning*) est entraîné à prendre des images à basse résolution et à les reconstruire à plus haute résolution avec une plus grande quantité de détails. Des compagnies comme Epic Games (développeur de l'engin de jeu Unreal), mettent beaucoup d'efforts pour pousser la qualité du temps réel vers le photoréalisme.

Associés avec Quixel, un groupe dédié à la création de textures et de photogrammétriques de haute résolution du monde réel, ils œuvrent à bâtir les outils qui poussent les capacités du temps réel plus loin. Les possibilités de cette technologie se font déjà remarquer depuis plusieurs années dans le domaine du cinéma dans ce qui est maintenant appelé de la production virtuelle. On est passé de James Cameron qui utilisait le temps réel pour être capable d'avoir directement une prévisualisation de ses décors virtuels en traquant la caméra durant les captures de fond vert avec les acteurs dans son film *Avatar* (2009), à utiliser *Unreal* pour créer les décors virtuels directement sur des écrans de LED pour remplacer les fonds verts, permettant ainsi aux acteurs de performer directement avec le décor ce qui aussi permet un meilleur contrôle de l'éclairage et des réflexions. Bien qu'un artiste ne soit pas nécessairement intéressé par le photoréalisme, cette course dans le développement des technologies du temps réel ouvre plus de possibilités, donnant aux artistes numériques plus de liberté. Pour le codeur créatif, cette possibilité de travailler avec la machine en temps réel permet un niveau d'interactions entre l'humain et l'œuvre, ce qui démarque son travail des autres types d'art.

CHAPITRE 3

MÉTHODE D'ÉTUDE DE CAS EN ART NUMÉRIQUE

3.1 TRAJECTORY MODEL OF PRACTICE AND RESEARCH

Afin de répondre à mes questionnements de recherche, j'ai eu recours à la méthode formulée par Ernest Edmonds. Étant donné que l'artiste a largement contribué au champ des arts génératifs, il est apparu logique de saisir le processus de conception en suivant une méthode qu'Edmonds a mis au point. Par conséquent, afin d'analyser ma recherche qui comporte une série d'œuvres numériques, il est important d'associer pratique et théorie comme étant parties prenantes d'un même processus. Edmonds et Linda Candy proposent un modèle méthodologique pour un travail de recherche création appelé *Les Trajectoires de Pratique et de Recherche*. Basé sur la pratique observée et l'étude de plusieurs artistes numériques durant le déroulement de leurs doctorats, ce modèle représente la relation entre la théorie, la pratique et l'évaluation où le praticien peut suivre une trajectoire de travail pour bâtir son cadre théorique (Ernest Edmonds, Linda Candy, 2010, p.470). La figure 4 ci-dessous présente ce modèle.

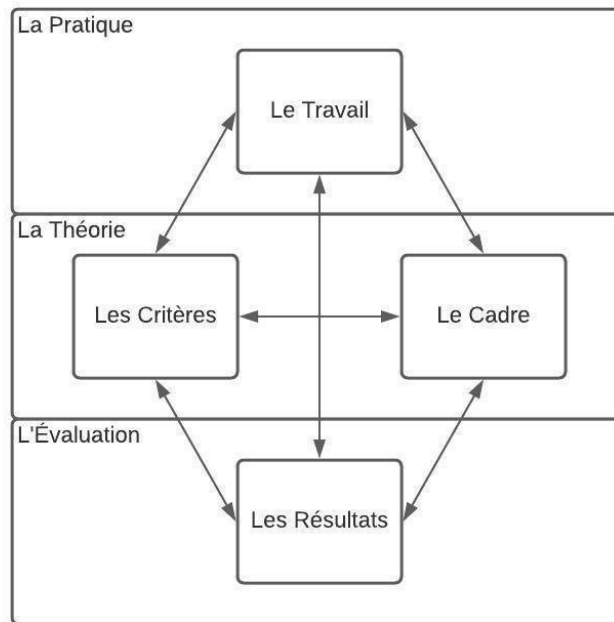


Figure 4 : Modèle de trajectoire de la pratique de la recherche. Edmonds, E., & Candy, L. (2010). (traduction libre du schéma d'Edmonds, voir l'original en annexe 3). Image adaptée avec la permission de l'auteur.

Les trajectoires de la pratique et de la recherche sont composées de trois éléments principaux : la pratique, la théorie et l'évaluation. Chacun de ces éléments comporte leurs propres activités et de sortir leurs propres résultats, qui pourront alimenter le processus de recherche les uns entre les autres. La pratique correspond au travail effectué directement pour créer l'œuvre. Cette pratique peut comprendre le travail physique pour construire une installation, le temps passé à écrire un programme, le fait de composer une pièce musicale, d'exécuter une performance ou de faire une exposition par exemple. La théorie possède différentes façons d'examiner, de critiquer et d'appliquer les champs de connaissance qui ont une relation avec la pratique, ce qui peut être au niveau de notion théorique qui sert à la réussite du projet, ou encore peut aussi servir à formuler des hypothèses que le

praticien veut explorer. L'évaluation est pour sa part définie par l'artiste de façon à pouvoir informer la pratique. Elle cherche à faciliter la réflexion pour analyser notre travail avec nos objectifs et permettre de nous réajuster dans nos critères et notre travail.

Tableau 2 : Éléments principaux, activités et résultats de chaque trajectoire. Edmonds, E., & Candy, L. (2010).

| Éléments | Activités | Résultats |
|---------------------|---|---|
| La Pratique | Création, Expositions | Travail : consiste en des artefacts, installations, compositions musicales, logiciels, expositions, performances et collaborations |
| La Théorie | Lecture, Réflexion, Écriture, Développement | Cadre : inclut les questions, les critères et les problèmes |
| L'évaluation | Observation, enregistrement, analyse, réflexion | Évaluation : résultat qui dirige vers une modification du travail et du cadre |

Les trajectoires représentent les différentes sortes de relation entre la théorie, la pratique et l'évaluation. La théorie peut diriger la pratique, où le cadre et les questionnements forment notre procédé d'évaluation alors que la création de notre travail – ou encore les questions de recherche – et les critères émergent à travers les créations de notre pratique.

CHAPITRE 4

PROJETS D'ENVIRONNEMENTS GÉNÉRATIF POUR DISPOSITIFS IMMERSIFS

4.1 PERFORMANCES

Au cours de la présente recherche, en tant que codeur créatif j'ai eu l'occasion de contribuer au développement de plusieurs projets artistiques et de design. Ma contribution a toujours consisté en la conception d'outils de création et de conception pour la production d'expériences immersives. Dans le cadre de ce chapitre, et en lien avec notre sujet de recherche, nous allons analyser ces projets en relation avec les caractéristiques de l'immersion, de l'interaction et du temps réel, cela tel que mentionné dans le chapitre 2 qui portait sur le cadre théorique de notre recherche. Afin de faciliter la compréhension des projets, le tableau 3 ci-dessous permet de synthétiser les principaux éléments que nous aborderons et de ce fait nous servira de référence comme base de notre argumentaire.

Tableau 3 : Liste des Projets

| Projets | Génération | Interaction | Immersion |
|-----------------------------|--|--|--|
| COMPOSER (2016) | Système de composition d'image et de choix posé par l'ordinateur | Kinect : Position du participant dans l'espace, mouvement des mains | Immersion Sensorielle : Envelopper les participants dans une expérience visuelle et sonore |
| ENIGMA (2018-2021) | Discussion entre deux AI pour la composition musicale. Génération de particules Génération Aléatoire | Interface TouchOSC Connexion directe avec Ableton Live à l'aide du MIDI | Immersion Sensorielle : Envelopper les participants dans une expérience visuel et sonore |
| PIANO-LUMIÈRE (2019) | Génération de particules | Composition contrôlée par le piano | Immersion Sensorielle : |

| | | | |
|---|---|--|--|
| | Génération aléatoire | Dessin en direct à l'aide du HTC Vive | Envelopper les participants dans une expérience visuelle et sonore |
| ILLUMINATION FRANKENSTEIN (2019) | Génération de l'environnement à l'aide d'une structure de dossier | Button clavier pour avancer et reculer dans la présentation | Immersion Sensorielle : Envelopper les participants dans une expérience visuelle et sonore |
| CAMERA STUDIO (2017) | Pas disponible | Capture des contrôleurs VR dans l'espace pour créer des animations Contrôle du temps avec le deuxième contrôleur Interface Utilisateur à l'écran | Immersion Systémique: L'utilisateur est immergé dans le système où il travaille avec les outils afin d'accomplir son travail |

Tableau 4 : Logiciels, équipements et contexte de diffusion

| Projets | Logiciels | Équipements | Contexte |
|----------------------------------|-----------------------------------|--|---|
| COMPOSER | Processing | Kinect | UQAC, École NAD, Montréal |
| ENIGMA | Touchdesigner Ableton Live | HTC Vive 9 Écrans Dôme 360 | Société des Arts Technologique, Montréal Centre Canadien d'Architecture, Montréal La Villette, Paris, France Centre Culturel Canadien, Paris, France Isea 2019, Gwangje, Corée du Sud |
| PIANO EN LUMIÈRE | Touchdesigner Ableton Live | Disklavier Dôme 360 | Société des Arts Technologique, Montréal, Canada |
| ILLUMINATION FRANKENSTEIN | Touchdesigner | Dôme 360 | Société des Arts Technologique, Montréal, Canada |
| CAMERA STUDIO | Touchdesigner | HTC Vive | UQAC, école NAD, Montréal Digital Dimension, Montréal, Canada |

4.1.1 COMPOSER

Ce projet était un premier prototype dont le but était de me familiariser avec la programmation visuelle. L'œuvre était une installation d'art numérique qui utilisait la projection sur un écran circulaire et programmé avec processing. L'œuvre génère un contenu visuel dynamique qui est en relation avec la participation des spectateurs et la musique. L'interaction avec les participants était réalisée avec une Kinect et

l'image de la projection se composait, décomposait et se modifiait en fonction des mouvements des participants. Les éléments visuels étaient minimalistes et générés à l'aide d'algorithmes procéduraux se modifiant en fonction de la captation de la Kinect (voir les figures 5 et 6 ci-dessous).



Figure 5 : Composer.
© Rémi Lapierre (2016)



Figure 6 : Composer.
© Rémi Lapierre (2016)

L'objectif de l'œuvre était d'apprendre la programmation à des fins graphiques et de nous familiariser avec les notions de système génératif et interactif. Pour ce faire, nous avons réalisé le projet à l'aide du langage de programmation *Processing*. Concrètement, nous avons créé un système de composition visuelle qui combine des éléments réalisés par plusieurs artistes qui étaient de surcroit mes collègues à la maîtrise (Samy Lamouti, Samir Chenennou et Jean-Pierre Barette) et de les combiner pour former une seule image animée utilisant l'interaction avec un participant.

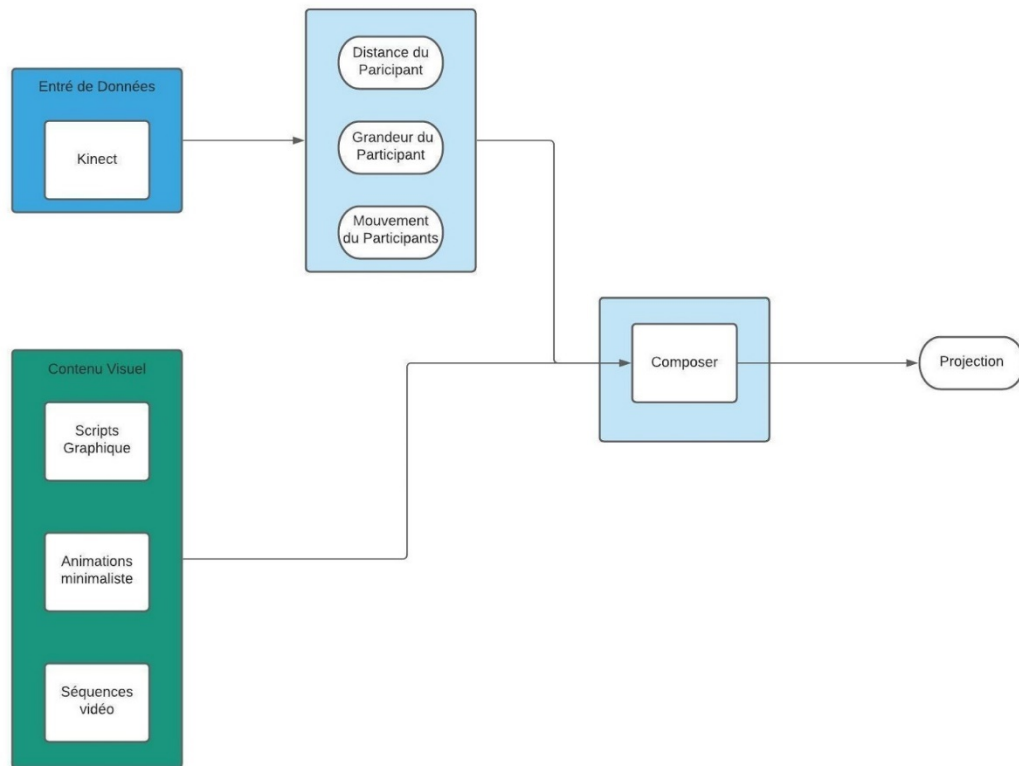


Figure 7 : Structure de Composer.
© Rémi Lapierre (2016)

Pour créer l'interaction, nous avons utilisé une caméra Kinect, qui permet au système de détecter la présence d'un participant. De plus, le programme d'analyse de la Kinect nous donne la position dans l'espace des différents éléments du corps de la personne détectée. Les données envoyées par la Kinect qui sont utilisées sont les suivantes : la détection du participant, la distance du participant par rapport à la caméra, la grandeur du participant et le mouvement des mains et de la tête du participant.

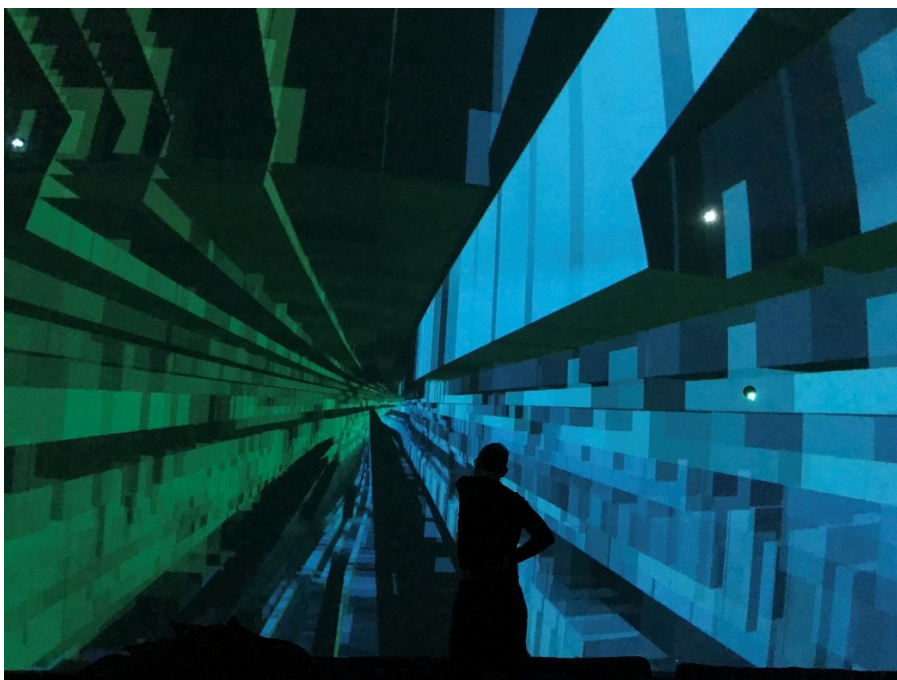
L'œuvre est composée d'une banque d'éléments graphiques de trois types, soit : des programmes graphiques, des animations minimalistes et des séquences vidéos. Les scripts graphiques sont des programmes que j'ai réalisés au cours du projet dans mon apprentissage de la programmation. Ce sont des systèmes créés soit pour produire des motifs visuels animés ou des systèmes de particules. Les animations minimalistes ont été réalisées par Jean-Pierre Barette et sont deux animations en transparence de formes géométriques en deux dimensions en séquence d'images. Les séquences vidéo sont des rendus d'animation réalisée dans le logiciel cinéma 4D par Samy Lamouti et Samir Chenennou.

Le système de génération de Composer est un simple système de composition aléatoire qui est soutenu par des règles simples. Lorsque l'installation ne détecte pas de participants, pour chacun des éléments graphiques, le système choisit une séquence vidéo qu'il va jouer en boucle. Dès qu'un participant est détecté, la vidéo disparaît et la projection va choisir un élément graphique de manière aléatoire.

L'ordinateur va ajouter des éléments à mesure que le participant s'approche de la projection et va en soustraire à mesure que le participant s'éloigne de la projection. De la même manière, l'interaction avec les éléments est attribuée au hasard au moment de la création d'un élément. Chacune de ces composantes graphiques est composée de paramètres (position, orientation ou vitesse) qui peuvent soit avoir une valeur aléatoire assignée à la création ou être attachés au mouvement des mains ou de la tête du participant.

4.1.2 ENIGMA

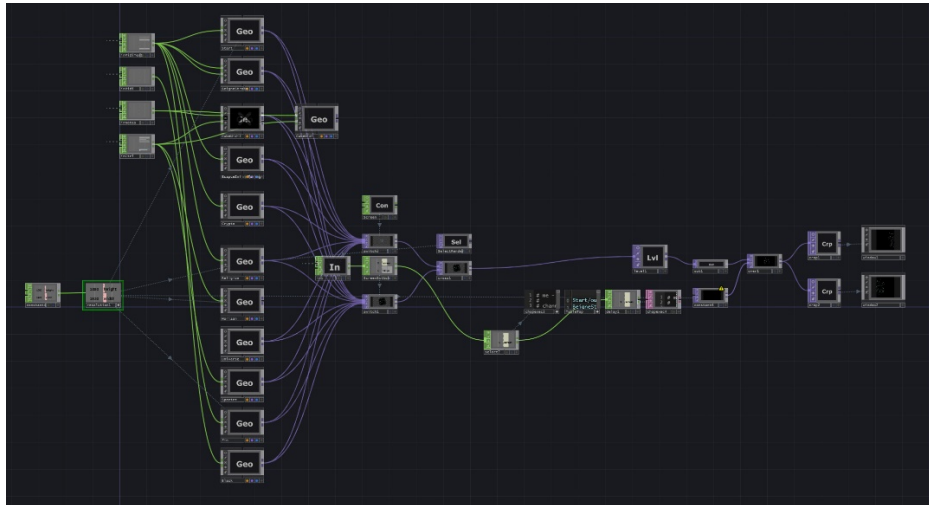
La performance immersive Enigma est une mise en scène des formes de transcodages de l'information visuelle et sonore. Parmi les thèmes explorés, les artistes ont travaillé autour de la pensée du mathématicien Alan Turing à travers l'exploration des problématiques liées à l'intelligence artificielle, à l'apprentissage profond ainsi qu'à l'identité numérique. Les créateurs se sont également intéressés au parallèle fait par Turing entre le cryptographe et le physicien, ce dernier tentant de décrypter l'univers dans lequel nous vivons. L'inclusion d'un dialogue humain-machine, inspiré d'une série d'expériences effectuées chez Google dans le domaine de l'apprentissage profond, laisse entrevoir les enjeux auxquels seront confrontés les machines dans leur apprentissage et le décryptage de la pensée humaine. (Breuleux, Y. Thibault, A. Lapierre, R. (2019).)



**Figure 8 : Enigma. (2019), mouvement piano-lumière. SAT.
Photo : Yan Breuleux (2019). Image reproduite avec l'autorisation de Yan Breuleux.**

Mon rôle dans le projet a été de créer le contenu visuel à l'aide de la programmation sur *Touchdesigner*, cela en plus de participer à la recherche et au développement avec mon directeur Yan Breuleux ; l'objectif était d'expérimenter sur différents médiums de diffusion. À noter que le projet a connu plusieurs versions : installation sur neuf écrans, projection sur écran 1080p, écran panoramique et projection sur dôme. La musique a été composée et interprétée par Alain Thibault dans le logiciel *Ableton Live* et utilise un texte généré par la conversation entre deux systèmes « Chatbot ». Au début du projet, nous avons l'intention d'avoir la conversation en direct avec les agents de conversations artificiels. Pour ce faire, j'avais programmé une application en python permettant une conversation entre deux de ces systèmes. Toutefois, pour limiter les risques durant une performance (par exemple pour limiter l'impact associé à la fiabilité de la connexion internet), nous

avons opté pour un dialogue généré d'avance. La performance est composée de dix mouvements utilisant différents systèmes de génération qui sont connectés à la musique et qui sont en partie contrôlés par un artiste durant la performance (voir les images à l'annexe 1).



**Figure 9 : Enigma. Projet Touchdesigner.
© Rémi Lapierre (2019)**

En ce qui concerne les données entrantes, l'interaction avec l'artiste-performeur est possible grâce à une interface créée sur une tablette *ipad* avec l'application *TouchOSC* qui permet d'envoyer des communications OSC à travers un réseau. Cette interface est composée d'un onglet pour chaque partie de l'œuvre qui a des interactions et aussi d'une page principale de contrôles. Une autre forme d'interaction se passe au niveau de la musique, interaction au cours de laquelle on envoie le signal audio et les canaux MIDI vers l'ordinateur qui gèrent *Touchdesigner* dans le but de modifier certains paramètres dans les générations graphiques.

Dans le mouvement d'introduction et de la fin, un nuage de particules s'anime et il est entouré d'un cercle de cubes qui réagissent au spectre de la composition sonore. Un texte s'affiche à l'écran suivant les paroles dans la musique et il est contrôlé par un signal MIDI provenant d'*Ableton Live*.

Par la suite dans le mouvement Dialogue, une forme géométrique composée de lignes est générée et se déforme progressivement en suivant un algorithme de bruit. À chaque moment où la musique prononce *Enigma*, un corridor d'écrans virtuels apparaît où des images s'affichent de façon aléatoire en changeant à chaque fraction de seconde. Une conversation entre deux entités est affichée sur l'écran en même temps que les paroles sont prononcées dans la trame sonore grâce aux signaux MIDI.

Dans le mouvement du piano-lumière, le logiciel *Ableton Live* envoie des notes MIDI à un système de particules qui crée des cubes en fonction des notes jouées dans la forme d'un tunnel autour de la caméra. L'artiste peut interagir avec la composition en pouvant changer la position de la caméra et en ayant le contrôle sur les turbulences affectant les systèmes de particules. Le musicien peut ajouter ou soustraire des particules, modifiant ainsi les pistes MIDI qui sont envoyées à l'ordinateur.

Dans le mouvement *Espace Turing*, les spectateurs sont entourés d'un système de particules composé de cubes où l'artiste a le contrôle sur les formes. Il peut créer différents motifs en animant les formes des particules ainsi que les différentes forces agissant sur le système. Les paroles tirées d'un texte de Turing sont affichées sur

l'écran autour des spectateurs au fur à mesure que les mots sont prononcés dans la musique.

Dès le début du mouvement *Cryptographie*, un nuage de particules chaotiques s'anime rapidement telle une tempête. Les particules sont des codes de séries qui sont générés aléatoirement à chaque seconde. Tous les points de cette masse de particules sont reliés entre eux formant ainsi une sorte de connexion. La composition prononce une série de chiffres et de lettres qui seront affichés à l'écran.

Dans le mouvement *Religion*, l'environnement est composé d'une masse de cubes disposée aléatoirement dans l'espace connecté par des lignes. La caméra commence de loin, observant la masse dans son entièreté qui tourne lentement sur elle-même. Par la suite, la caméra s'approche lentement vers la masse et finit entourée par les cubes, avant de se retirer de la masse. L'artiste, à l'aide de l'interface sur le *ipad*, peut ajuster la vitesse de la caméra pour contrôler les positions qu'il veut garder plus ou moins longtemps durant la performance. Un texte de Oppenheimer s'affiche à l'écran en synchronisation avec la trame sonore.

La composition du mouvement *Univers* est composée d'un système de particules à enfermer à l'intérieur d'un cube ne pouvant pas s'échapper, comme par exemple dans une boule à neige. Le système est composé de forces et de turbulences dictant le comportement des particules. Le performeur a le contrôle de ces paramètres sur l'interface et peut ainsi donner différentes formes au chaos.

Dans le mouvement *Spectre*, l'espace est couvert de cubes formant un plafond au-dessus des spectateurs. La grandeur de ces formes est liée à l'analyse spectrale du signal audio. Le mouvement ainsi créé rappelle le mouvement de vague sur l'océan.

Le mouvement *Horizon* est formé de deux systèmes de particules qui émettent vers l'horizon. Le performeur contrôle la trajectoire des particules, transformant du coup l'environnement. Les paramètres interactifs sont la position et la rotation des émetteurs, la vitesse des particules, les forces et les turbulences les affectant.

4.1.3 LE PIANO-LUMIÈRE

Le Piano en Lumière est un concert immersif généré en temps réel présenté dans un dôme 360 sous la direction de Yan Breuleux. Ce spectacle est une interprétation visuelle et sonore de la pièce musicale *Les Planètes* composée par Walter Boudreau, sous la commande de Louis-Philippe Pelletier en 1983. Finalement terminée en 1998, cette pièce a été composée en collaboration avec un ordinateur CYBER 7400 en utilisant une transposition musicale de certaines caractéristiques propres aux neuf planètes du système solaire (à noter que les planètes sont au nombre de neuf puisque ce n'est qu'en 2006 que Pluton a été reclassifiée). Lors de Piano-lumière, la pièce musicale a été interprétée par la pianiste Louise Bessette en direct sur un *disklavier* qui est un piano acoustique équipé d'une série de senseurs électroniques permettant d'envoyer l'information MIDI à un ordinateur. Ainsi, la musique génère des environnements interactifs sur le dôme de la SAT, créant du coup un univers abstrait de formes et de lignes plongeant le public dans une

immersion sensorielle combinant l'image et le son. La représentation de ce spectacle a eu lieu lors de huit soirées à la Société des Arts Technologiques de Montréal. Mon rôle dans ce projet était de conceptualiser et de réaliser le système de génération d'environnements immersifs visuels en interaction avec un instrument de musique (le piano) en temps réel.

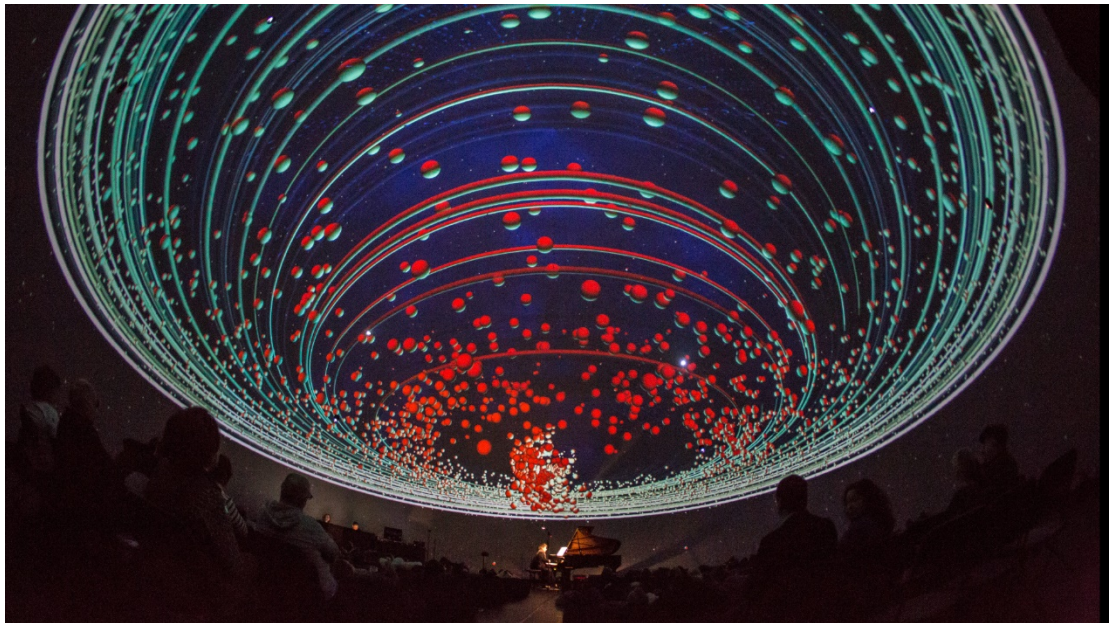


Figure 10 : Le Piano-Lumière (2018), Mouvement Saturne. SAT.
Photo : Yan Breuleux (2018). Image reproduite avec l'autorisation de Yan Breuleux.

La pièce musicale de Boudreau est composée de douze mouvements que nous avons transposés en dix environnements (voir les images à l'annexe 2). Ces douze mouvements de la pièce musicale sont les suivants : Mercure, Soleil, Vénus, Terre, re-Soleil, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune, Pluton et l'Espace Infini. Les critères principaux pour la génération des environnements étaient d'être en interaction avec l'interprétation. Après une analyse de la partition, nous avons identifié certains éléments sur lesquels baser nos règles de génération et d'interaction. D'un point de

vue technique, il s'agissait d'exécuter la séquence suivante : recevoir les données MIDI directement du piano (ces données étant les notes jouées et les pédales utilisées, et leur intensité respective), et ensuite programmer des outils d'analyse à partir de ces informations (ces outils d'analyse permettant d'être en mesure d'identifier les accords, les octaves, des séquences de notes jouées pour créer des règles de génération et d'interactions pour chaque mouvement). Un problème majeur auquel je devais me confronter était qu'il était possible d'automatiser le système pour être capable de suivre nos besoins narratifs imposés par la musique. Puisque la musique n'est pas une trame sonore fixe, mais une interprétation d'une musicienne, il n'était pas possible que je me fie à une ligne de temps pour scénariser l'expérience.



**Figure 11 : Le Piano-Lumière. Projet Touchdesigner.
© Rémi Lapierre (2018)**

Dans ce travail, tout comme c'était le cas dans *Enigma*, les systèmes de génération visuelle et d'interaction sont étroitement liés. Pour les cinq mouvements de Mercure, Soleil, re-Soleil, Mars et Uranus, j'ai utilisé un système de génération basé sur les signaux MIDI que j'avais commencé dans *Enigma* et que j'ai transformé en outil procédural indépendant qu'on appelle le Piano-Lumière. Cet engin de particules crée

des objets 3D dans l'espace en fonction des notes MIDI reçues, qui viennent dans ce cas du piano *disklavier*. Ce système peut être adapté sous toutes sortes de dispositions dans l'espace virtuel et peut facilement recevoir une nouvelle forme pour les particules et les palettes de couleurs, lesquelles sont soit générées par l'ordinateur ou décidées par l'artiste au préalable. Le performeur peut contrôler les forces affectant les trajectoires des particules. Dans le mouvement de Mercure et du Soleil, les notes en nuance de gris semblent s'échapper du piano, chacune sur leur propre trajectoire. En analysant la musique jouée, le système active des événements, amorçant des changements dans le système, comme son animation, la transformation de la disposition des émetteurs ou changements dans la palette de couleurs. Dans la section re-Soleil et Mars, le Piano-Lumière prend la forme d'une sphère, à certain moment, une nuée de cônes vient lentement se resserrer autour du public, créant des motifs de ligne entrecroisés, avant de finir de s'attacher au système de particules. Finalement, dans la section d'Uranus, le Piano-Lumière est placé en cercle autour de la salle et répété en rotation quatre fois. Les notes du piano surgissent du sol, s'envolant autour de l'audience et les couleurs mélangées avec la symétrie créent des motifs hypnotiques.

Dans les mouvements de Vénus, Neptune et Saturne. Le système génératif crée une série de sphères où chacune d'entre elles est attachée avec une note du piano. Lorsque sa note est jouée, les sphères attachées à cette note changent leur taille en fonction de l'intensité de la musicienne. Dans le mouvement de Vénus, ces objets sont

assemblés en deux astres, l'une composée de la moitié grave du piano et l'autre de la moitié plus aiguë. Les notes bougent de façon chaotique, soumises à des turbulences, contraintes dans la forme d'une planète. Le système est utilisé de la même façon, mais un système similaire est utilisé pour créer une série d'anneaux autour de l'astre, où chacun d'entre eux est aussi attaché à une note du clavier. Pour ce qui est du mouvement de Neptune, les sphères sont placées dans la forme d'un anneau, réagissant à la musique.

Dans le mouvement de la Terre, le performeur est en contrôle de la génération de l'image en utilisant le HTC vive. Le casque de réalité virtuelle est placé sur un plateau, sa position dans l'espace réel représente le centre du dôme, le performeur peut par la suite bouger les contrôleurs autour du casque et le mouvement sera reproduit sur l'écran. Avec le premier contrôleur, il peut dessiner sur la surface du dôme en temps réel. Le mouvement de sa main trace des cylindres à l'écran et avec les boutons sur la manette, il peut créer un entrelacement des lignes en donnant une rotation sur l'outil de dessin. La deuxième manette contrôle un engin de particules inspiré du comportement des bancs de poissons. Composé de cônes, les particules s'orientent pour se rendre à un objectif invisible, créant ainsi l'illusion d'une nuée. Cet objectif est changé de manière aléatoire autour de l'audience suivant les accords accentués qui sont joués par la pianiste.

Le mouvement de Jupiter plonge l'audience dans une masse de gaz à l'aide d'une série d'émetteurs de particules qui est placée autour du dôme. Chacun de ces émetteurs interagit avec une octave spécifique du piano et crée des nuées de cônes dans l'espace.

Le mouvement de Pluton est composé d'un champ de milliers de sphères fixes de taille variée et étant placées dans l'espace de manière aléatoire. Les règles de génération que le système doit respecter sont qu'elles ne peuvent pas s'entrecroiser et qu'elles ne doivent pas se placer dans la trajectoire de la caméra. Le piano interagit avec l'éclairage de sorte à créer des motifs de couleurs.

À l'aide des outils qui ont été bâtis dans *Enigma* pour simuler l'environnement 360 de la SAT et du travail de Thibault qui a retranscrit la composition de Walter dans le logiciel *Ableton Live*, j'ai pu rapidement simuler l'expérience immersive avec la réalité virtuelle afin de pouvoir expérimenter les possibilités d'interaction et de génération avec la musique.

4.1.4 ILLUMINATION FRANKENSTEIN : VOYAGE AU CŒUR DU MYTHE

La performance *Illumination Frankenstein : Voyage au cœur du mythe* propose une nouvelle forme de conférence, soit une conférence immersive. Celle-ci plonge les spectateurs dans l'univers des archives associées au mythe de Frankenstein tout au long du récit de la sociologue Céline Lafontaine fait en collaboration avec Yan Breuleux

et Luc Courchesne. Grâce à la création d'un environnement visuel et sonore à 360° dans la Satsphère, les spectateurs ont l'impression de se retrouver au milieu de cette histoire du 19e siècle, et plus particulièrement de se retrouver dans la vie de Mary Shelley et de son œuvre. Le récit biographique (vie de Mary Shelley), la trame littéraire (le roman Frankenstein) et l'interprétation sociologique s'entrecroisent à travers le regard que porte Lafontaine sur les échos contemporains de ce mythe moderne.

Cette conférence-événement a été organisée à l'occasion du 200e anniversaire de la publication du célèbre roman Frankenstein. Deux cents ans après sa mise au monde littéraire, l'éclairage prémonitoire que le roman prophétique jetait sur la modernité à son commencement rayonne toujours sur le temps présent et amène une réflexion sur la conquête, la manipulation et la dévastation du monde vivant (2018, <https://sat.qc.ca/fr/evenements/illumination-frankenstein>, consulté le 20 février 2021).



Figure 12 : Illumination Frankenstein (2018). SAT.
 Photo : Yan Breuleux (2018). Image reproduite avec l'autorisation de Yan Breuleux.

Mon rôle dans ce projet était la création d'un outil qui nous permettrait rapidement de créer des conférences immersives destinées pour le dôme ou pour la réalité virtuelle. Pour ce faire, j'ai créé un système de génération procédurale qui permet de prendre des dossiers d'image pour directement créer des environnements 360.

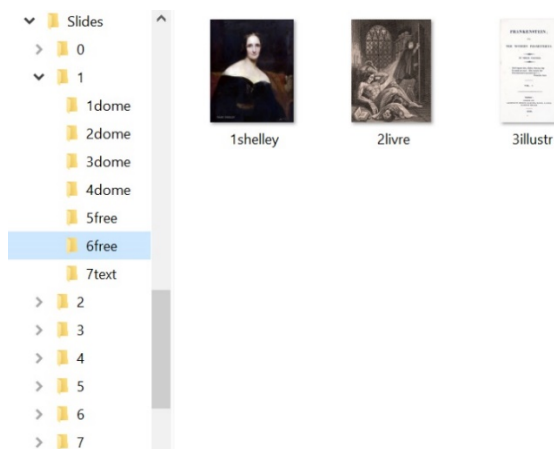


Figure 13 : Structure de dossier pour la génération procédurale dans Illumination Frankenstein.
 © Rémi Lapiere (2018)

Un système de génération procédurale commence en plaçant les images ou des vidéos dans une structure particulière de dossier. Dans le dossier du projet, tel qu'on peut voir sur la figure 13 ci-dessus, le premier niveau de dossier correspond au numéro de la page dans la présentation. Le deuxième niveau correspond au numéro de l'étape dans cette page de la présentation. Le dernier dossier, dans lequel les images seront placées, porte le nom du type de composition d'images qui seront placées dans l'environnement immersif. Pour l'instant, il y a cinq types de compositions :

- Dôme : l'image est de format 360 et sera rendue sur un hémisphère.
- Free : les images seront placées à l'avant du dôme une à côté des autres.
- Pano : les images se placent tout autour du dôme comme un carrousel.
- Cube : les images forment une boîte autour de l'audience.
- Texte : Affiche un bloc de texte à l'avant de la scène.

Une fois le processus enclenché dans *Touchdesigner*, le système génère l'ensemble des pages de la présentation avec des valeurs par défaut pour les positions des éléments au besoin. L'utilisateur doit par la suite éditer ces valeurs pour personnaliser l'apparence de chaque page et étape de la présentation. Une autre méthode qui est un travail en cours est d'utiliser les manettes de réalité virtuelle pour venir sélectionner les images sur l'écran en pointant et en les déplaçant par un geste.

Un autre module a été créé pour gérer la trame sonore. Il permet de créer une liste de musique qui sera jouée durant la présentation. Dans cette liste nous entrons un fichier audio, le numéro de page dans la performance où la piste sera activée et le volume sonore maximum souhaité. Au déclenchement de la pièce musicale, le module procédera à une transition graduelle entre l'ancienne pièce et la nouvelle.

Durant la performance, les seules interactions sont la capacité d'avancer ou de reculer dans la présentation. Chaque enclenchement avance ou recule d'une page ou d'une étape dans la page en cours. Une étape correspond à un changement dans une page comme par exemple faire apparaître des images plus tard dans la page ou exécuter une animation.

4.1.5 ENVIRONNEMENT DE PRÉVISUALISATION ET DE PRODUCTION VIRTUELLE

Au cours de mes recherches, la pratique m'a amené à découvrir et développer plusieurs types d'outils dans le but d'offrir de nouvelles méthodes de travail et de prévisualisation pour mes projets.

Le premier de ces outils est un module *Touchdesigner* pour simuler le dôme comme celui de la Société des Arts Technologiques de Montréal (SAT) dans un environnement de réalité virtuelle. Le programme peut être intégré à tout projet *Touchdesigner* qui utilise un environnement tridimensionnel ou vidéo 360 et de prévisualiser le résultat sur un hémisphère dans l'espace virtuel. L'outil permet de choisir les paramètres de l'espace à simuler (par exemple les dimensions de la salle et

l'angle de la projection) et permet d'ajuster l'image pour recréer le plus fidèlement possible les conditions de projection réelles.

Le deuxième outil que nous avons développé est un système de production virtuelle et de prévisualisation permettant d'immerger l'utilisateur dans une scène 3D pour le film d'animation et utilisant le casque de réalité virtuelle *VIVE* dans le but de réaliser un tournage. Le projet, appelé *CameraStudioVR*, permet de contrôler le mouvement de la caméra virtuelle à main levée à l'aide du contrôleur de réalité virtuelle. Une fois le mouvement enregistré, il est possible d'importer la caméra directement dans les logiciels *maya* et *3DS Max*. Cet outil a été utilisé dans l'industrie à *Digital Dimension* où nous avons créé des animations de caméra pour des cinématiques de jeu numérique tel que *Rainbow Six Siege* pour l'expansion *Outbreak*.

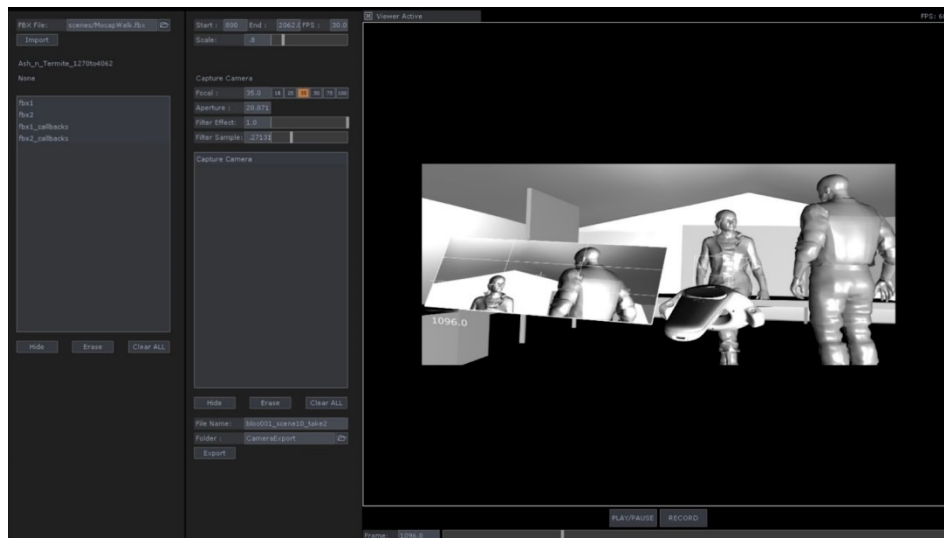


Figure 14 : CameraStudioVR.
© Rémi Lapierre (2017)

À l'aide d'une interface à l'écran (voir la figure 14 ci-dessus), un opérateur peut contrôler la ligne de temps, modifier les paramètres de l'environnement 3D (comme par exemple l'échelle et la position de l'utilisateur dans le monde virtuel) et importer des objets 3D dans la scène. Il peut aussi observer le travail de l'utilisateur en temps réel et visionner les enregistrements de caméra. De son côté, l'utilisateur utilisant le casque de réalité augmentée peut utiliser le contrôleur comme caméra et enregistrer son mouvement à l'aide de la gâchette. Il peut aussi se téléporter dans l'environnement en visant la caméra au sol et en appuyant sur le pavé tactile au-dessus de la manette. Avec le contrôleur deux, l'utilisateur a le contrôle sur la ligne de temps en utilisant le pavé tactile de sorte que lorsque l'utilisateur appuie sur le pavé tactile, il peut arrêter ou résumer la scène et lorsqu'il glisse son doigt sur le pavé tactile, il contrôle le temps dans l'animation. Il peut aussi placer des clés d'animation dans l'espace pour créer des rails pour permettre d'animer la position de l'utilisateur dans le temps, lui permettant donc plus de liberté sur son approche de travail.

4.2 STRUCTURE D'UNE PRODUCTION DE PERFORMANCE GÉNÉRATIVE ET INTERACTIVE EN MILIEU IMMERSIF

Au cours de mes projets, j'ai dû passer par plusieurs étapes avant de pouvoir assembler des performances fonctionnelles. Puisque mon expérience en programmation qui était auparavant limitée à l'analyse de données, je devais premièrement me concentrer seulement sur la logique de génération d'images. Mes premières expérimentations dans les projets de *Composer* et d'*Enigma* consistaient

en de simples systèmes pour produire un visuel dans le but de me familiariser avec les outils. Cependant, je me suis vite rendu compte lors de l'élaboration des projets que la structure qui gère ces différents systèmes génératifs est en lui-même une série de systèmes qui doivent s'exécuter en tandem pour s'assurer du bon déroulement de la performance. Après avoir étudié ces deux premiers projets, j'ai bâti une procédure de production dans le projet du Piano-Lumière qui permettrait une plus grande flexibilité en plus d'accélérer le travail de modification pour différents types de projets. La figure 15 ci-dessous illustre l'objectif de cette structure qui est de répondre à mon second objectif, soit d'adapter une méthode de travail aux logiques de création procédurale et de modularité à partir de l'analyse d'un répertoire de projets. Mis à part l'installation dans l'espace réel de l'œuvre, chacune de ces étapes correspond à des modules de programmation que nous avons cherchés au fil des itérations des projets, et à les rendre le plus polyvalent et réutilisable pour mes besoins. Bien sûr, chaque projet étant unique et demandant de répondre à différents défis, il est difficile de créer des modules parfaitement réutilisables pour chaque performance, mais par l'expérience que le codeur créatif acquiert à travers la pratique, il est possible d'isoler certains éléments qui reviennent souvent et qui permettent de bâtir des formulations de fonctions permettant l'accélération dans le travail.

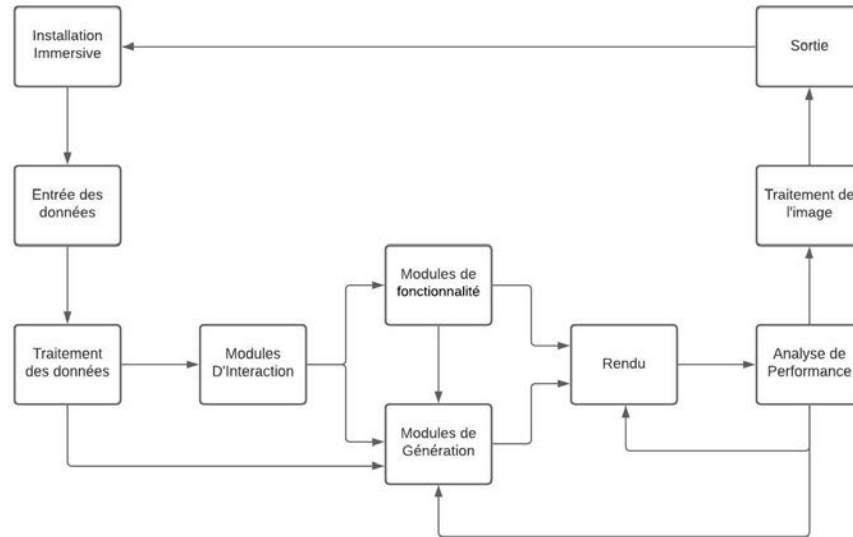


Figure 15 : structure d'une production de performance.
© Rémi Lapierre (2019)

L'installation correspond à la mise en place physique de l'œuvre, l'espace où les participants et les performeurs interagiront et seront immergés. Cet espace comprend les interfaces de communication et d'interaction avec le système ainsi que des méthodes de sortie d'images et de son. Les technologies d'interaction qui ont été utilisées dans mon travail comprennent la *Kinect*, les écrans tactiles, l'équipement de réalité virtuelle, des contrôleurs de jeu et un piano de concert. L'installation comporte aussi des éléments qui attendent un retour de l'ordinateur, notamment les suivants : les écrans et les projecteurs permettant l'affichage de l'image générée par la machine. Dans le cas des performances présentées dans cette recherche, nous avons utilisé des surfaces de projection comme l'hémisphère de la Société des Arts Technologique de Montréal pour immerger les spectateurs dans la performance, ainsi que des larges de surfaces de projection utilisant un ou plusieurs projecteurs.

Par la suite, dans le programme nous devons premièrement entrer les données provenant de l'installation. Chaque technologie utilisée pour interagir avec les participants doit communiquer avec l'ordinateur. Pour ce faire, nous avons accès à différents protocoles de communication tels que OSC et MIDI en passant par la connexion USB ou par le réseau. Certaines données doivent être interprétées par un logiciel afin d'être utilisables comme le *VIVE* et la *Kinect* où l'entrée des données doit passer par *SteamVR* avant d'être communiquée au programme.

Après la réception de données, certains projets peuvent demander un certain niveau de traitement avant de pouvoir être utilisés. Dans les projets *Enigma* et *Le Piano Lumière*, la grande quantité de données reçues par les différentes interfaces nécessitent un travail de filtration et de classification entre les groupes de données avant d'être redirigées vers les modules de génération et d'interaction. Dans le projet de prévisualisation, il y avait un besoin d'appliquer des algorithmes sur la captation de la caméra dans le monde réel à l'aide du contrôleur du *VIVE* dans le but d'ajuster la sensibilité du mouvement sans pour autant perdre de la précision.

Par la suite, la prochaine étape est d'exécuter les différents modules qui vont permettre de créer la performance. Cette étape est la plus complexe et peut prendre différentes formes dépendamment des tâches qui doivent être effectuées. Pour simplifier la compréhension du processus, nous avons divisé ce processus en trois modules : les modules d'interactivité, les modules de génération et les modules de

fonctionnalité. Dans les projets, les modules d'interaction correspondent à des procédés qui utilisent les données entrantes provenant de l'installation, mais qui ne produisent pas de sortie visuelle directement, mais qui vont influencer l'ensemble de la performance. Ce sont de manière générale des programmes qui regardent les données entrant pour déclencher une tâche lorsque les conditions ont été remplies. Le Piano-Lumière utilise plusieurs de ces programmes pour analyser les notes jouées au piano pour déclencher un événement au moment où un certain accord ou motif est détecté. De leur côté, les modules de génération sont les systèmes de création qui produisent les environnements génératifs qui seront par la suite rendus et envoyés à l'installation. Ces systèmes sont composés de règles paramétrables qui peuvent être soit contrôlées directement par l'ordinateur ou bien être connectées à des données provenant de l'installation. Les modules de fonctionnalités correspondent aux fonctions de travail que la performance a besoin de calculer pour bien fonctionner, mais ne sont pas directement liés à un système de génération. Ces fonctions peuvent gérer des actions exécutées lorsqu'un événement est déclenché dans les modules d'interaction comme par exemple déclencher une animation, bouger la caméra dans l'environnement ou changer quels modules de génération vont être rendus. Dans le premier projet *Touchdesigner, Enigma*, chaque mouvement de la performance était programmé comme un projet indépendant. Chacun d'entre eux incluait l'ensemble des modules de la structure (autant de l'entrée des données jusqu'au rendu), ce qui créait beaucoup de répétitions. Si un type de module avait besoin d'être ajusté, chacun des mouvements avait besoin d'être révisé. Nous avons par la suite travaillé à

isoler les éléments qui devraient être communs pour chacun des systèmes pour les rassembler dans un seul module permettant de gérer l'ensemble. La figure 16 ci-dessous illustre une classe de base qui a été créée dans le cadre du projet le *Piano-Lumière*. Cette classe de base a servi de modèle pour chaque mouvement de la performance. Aussi, cette classe comporte différents événements et fonctionnalités nécessaires à chaque mouvement et au besoin est facilement modifiable à un seul endroit pour l'ensemble du projet.



Figure 16 : Classe de base dans le Piano-Lumière.
© Rémi Lapiere (2019)

Le module de rendu sert à calculer les images produites par les environnements 3D dans les modules de génération dans le but d'être envoyées au dispositif d'affichage dans l'installation. Puisque les projets sont en temps réel, le module est construit de façon à pouvoir changer entre différents modes de diffusion. Par exemple, la performance d'*Enigma* a impliqué sa projection sur un dôme 360, sur

un projecteur 1080p et finalement sur deux projecteurs 1080p. Nous pouvons créer différents modes de diffusion avec les paramètres de caméra et de résolution, lesquels sont enregistrés dans une table de données ce qui permet d'adapter la performance d'un seul clic de bouton.

Après le rendu de l'image, nous pouvons appliquer des systèmes d'analyse et de correction de la performance pour s'assurer du bon fonctionnement du spectacle. Dans le projet d'*Enigma* et du *Piano-Lumière*, j'ai créé des modules automatisés pour ajuster la densité des systèmes de particules ou changer la résolution du rendu lorsque le temps de calcul de l'image descend en bas de trente images par seconde.

Avant d'envoyer l'image au dispositif de diffusion dans l'installation, celle-ci passe dans un module de traitement de l'image où nous pouvons ajuster différents paramètres comme sa luminosité, le contraste, la saturation et son orientation. Chaque dispositif de diffusion peut avoir des effets imprévus sur l'image finale et il est important d'avoir facilement accès à un module de traitement de l'image afin d'avoir un résultat le plus près possible du résultat désiré. À noter que des installations à multiples projecteurs comme un dôme 360 créent beaucoup de pollution lumineuse ce qui demande un travail de réajustement des couleurs.

Finalement, l'image une fois traitée est envoyée au dispositif d'affichage dans l'installation par le module de sortie. C'est aussi dans ce module que nous allons retourner toutes données que nous avons traitées à l'installation pour contrôler des

arduinios, des lumières ou tout autre dispositif attendant un retour de l'ordinateur pour effectuer une action.

4.3 LE PARCOURS DE LA MÉTHODE

Cette recherche a permis d'identifier une problématique de recherche, un cadre théorique particulier et des concepts d'analyse, cela dans le contexte de la production de plusieurs projets d'art numérique.

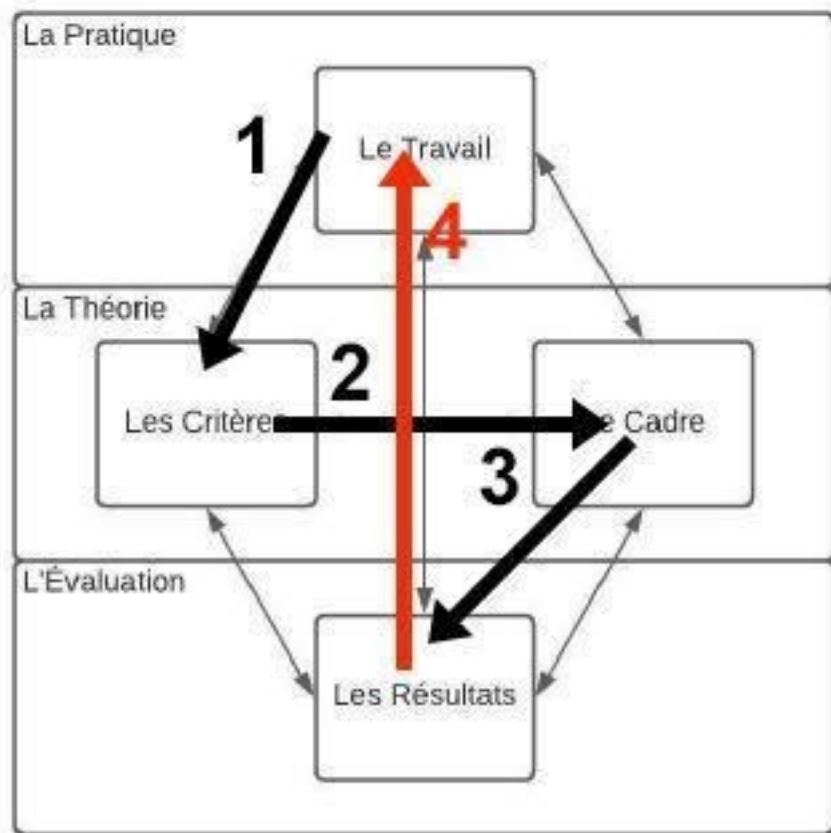


Figure 17 : Modèle du parcours de la méthode, basé sur le modèle de Ernest Edmonds et Linda Candy (voir figure 4). (Edmonds & Candy, 2010).
Image adaptée avec la permission de l'auteur.

Tel qu'illustré sur le modèle de la figure 17 ci-dessus, la méthode d'Edmonds nous a permis de formuler un parcours de recherche tenant compte de la spécificité du mode de pensée particulier de la pratique de l'art génératif dans le domaine des arts numériques. Mentionnons que le parcours de la démarche est partie intégrante de la méthode proposée par Edmonds et correspond aux chiffres de 1 à 4 dans la figure 17 ci-dessus. Le présent mémoire se situe à l'étape 3, c'est-à-dire l'évaluation globale des relations entre le cadre théorique, les critères et le travail.

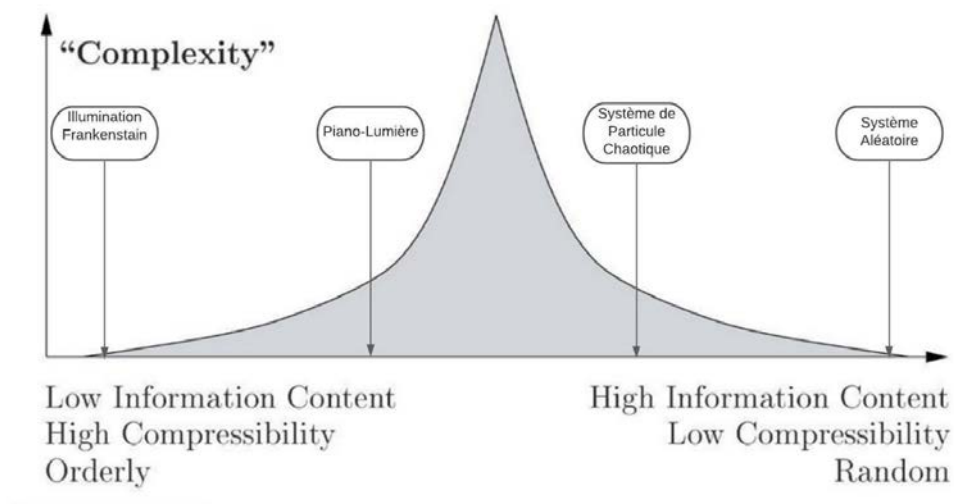
Il convient maintenant de résumer la démarche afin d'en rappeler les grandes lignes. Dans un premier temps, afin de mieux comprendre cette forme de création, nous avons produit une série d'œuvres et d'expérimentations où nous avons exploré diverses solutions de génération procédurale. Cela constitue la phase 1 du modèle. Ensuite, le contexte particulier de la production des œuvres nous a amenés à tenter de définir notre rôle à la fois sur le plan technique et artistique. Nous avons alors identifié une communauté de pratique spécifique est qui la communauté des codeurs créatifs. Ensuite, afin de mieux comprendre et situer la recherche spécifique des projets, nous avons établi un cadre et des critères d'analyse.

Globalement, la méthode visait à identifier les relations entre la recherche et la pratique ainsi que les étapes permettant d'atteindre les objectifs mentionnés. En ce sens, afin de répondre à notre premier objectif, nous avons ainsi développé les critères d'immersion, d'interaction et de génération. Nous avons plus particulièrement étudié le concept de génération en analysant des pratiques de

codeurs créatifs qui sont déjà existantes et les liens entre l'art génératif et les théories de la complexité explorées par Galanter. Les critères nous ont permis de répondre à notre premier objectif de recherche qui visait à mieux comprendre la logique de conception d'environnements immersifs interactifs utilisant des systèmes génératifs à partir de l'analyse d'un répertoire de projets. Au cours de la phase 2 du modèle, soit après l'analyse de la pratique des codeurs créatifs, nous avons construit une structure de projet basée sur les principes de la modularité et de l'approche procédurale, laquelle permettait l'itération et la réutilisation des systèmes de programmations pour créer différentes variations de projet. Par la suite, dans la phase 3 du modèle, nous avons mis en relief notre cadre théorique comparativement à la pratique pour valider si nos critères correspondaient aux concepts que nous avons définis, soit la génération, l'interaction et l'immersion. Finalement, lors de la phase 4 du modèle, nous retournions à la pratique afin de réajuster notre création en fonction des critères et des concepts, cela en suivant la structure de production que nous révisons à chaque cycle. La phase 4 du modèle peut aussi signifier de prendre l'expertise que nous avons développée dans un projet et de l'appliquer à un prochain travail.

Dans ces projets, j'ai créé des systèmes complexes et simples permettant la génération d'environnements immersifs. Une grande majorité de ces systèmes étaient basés sur la génération de particules qui permettent de simuler des phénomènes naturels chaotiques. Ces systèmes ont été utilisés sous deux formes différentes : un système de particules chaotiques et le *Piano-Lumière*. Le système de particules chaotiques cherche à imiter le mouvement d'une tempête de sorte que les

particules sont animées par des forces et turbulences et sont difficilement prévisibles, comme c'était par exemple le cas dans le mouvement Univers dans *Enigma* ou bien dans l'espace infini dans le *Piano-Lumière*. Dans le *Piano-Lumière*, les particules sont ordonnées et contrôlées par les notes jouées sur le piano transformant ainsi le processus en phénomène plus prévisible puisque la position des émetteurs est fixe et, de là, nous savions quand les particules allaient apparaître en suivant la musique. Un autre type de système qui a été programmé était constitué des générateurs aléatoires qui ont servi par exemple pour créer des positions pour placer des objets 3D dans l'environnement comme c'était le cas dans le mouvement Pluton dans le *Piano-Lumière* ou comme c'était le cas dans la masse de cubes dans Religion pour *Enigma*. Le projet *Illumination Frankenstein* utilise un système de règles pour créer des compositions d'images ordonnées en créant des environnements par juxtaposition et superposition. En se basant le modèle de classification proposé par Galanter que nous avons présenté à la figure 3, nous pouvons proposer à notre tour une classification des systèmes que nous avons créés dans nos projets (voir figure 18). Les systèmes très ordonnés ou très aléatoires ont une complexité algorithmique plus basse alors que les systèmes se trouvant entre l'ordre et l'aléatoire requièrent que plusieurs systèmes travaillent ensemble, ce qui résulte en des systèmes plus complexes. Par contre, dans notre cas le contrôle de ces règles était partagé entre l'ordinateur et le participant.



**Figure 18 : Classification de système d’art génératif. (Voir figure 3). Galanter, P. (2003).
Image reproduite et adaptée avec la permission de l’auteur.**

Comme nous l’avons mentionné, le présent mémoire constitue donc dans sa globalité l’étape de l’évaluation. L’analyse des résultats constitue une étape charnière visant à proposer la connaissance principale qui a été développée, soit : le dévoilement de la complexité inhérente à la pratique du codeur créatif dans le contexte de la création d’environnements procéduraux et génératifs pour des dispositifs immersifs.

CONCLUSION

Ce mémoire avait comme objectif d'examiner les logiques de conception dans le contexte de la production d'environnements génératifs et interactifs pour la production d'expériences immersives s'inspirant des approches de la figure du codeur créateur et, par la suite, adapter une méthode de travail aux logiques de création procédurale et de modularité.

Pour y parvenir, il a fallu dans un premier temps explorer cette communauté de pratique de codeurs créatifs afin de comprendre leur travail. Il n'est pas évident pour tout le monde que le code puisse être utilisé à des fins d'expression artistique. À la lumière des projets étudiés dans le cadre de ce mémoire, et en traçant brièvement l'origine et l'essor de cette communauté jusqu'aux pratiques contemporaines, il en ressort que la forme de cet art multiple est changeante et unique aux possibilités qui sont offertes par le contexte de chaque projet. L'approche multidisciplinaire du codeur créatif l'amène à se confronter à des défis technologiques et artistiques de toutes sortes pour créer un pont entre les données du réel et les instruments de génération de formes du virtuel. Bien que les artistes numériques ayant été retenus au cours de ce mémoire ne soient qu'un petit échantillon de créateurs œuvrant dans le domaine, il n'en demeure pas moins qu'ils sont représentatifs de l'approche de création qui a guidé l'analyse de ce mémoire. Leurs travaux dans l'installation interactive, générative et immersive m'ont mené vers une meilleure compréhension des relations entre la technologie et la créativité. La

principale caractéristique qui se dégage de l'analyse des pratiques est la nécessité de développer des cadres théoriques adaptés à l'hybridité inhérente à la pratique du codeur créatif. Il est dommage que nous n'ayons pas été en mesure d'approfondir notre recherche du côté des studios (étant donné que notre échantillon portait principalement sur des individus), mais il semble tout de même que l'analyse du rôle et de la fonction du codeur créatif dans un contexte collaboratif serait une avenue pleine de promesses pour la suite de cette recherche. En effet, dans le cadre de ce mémoire, plusieurs créations ont émergé de la collaboration et de la co-création du projet. L'analyse de la figure du codeur créatif visait à mettre en lumière que celui-ci, malgré une utilisation intense de la technique, n'est pas un simple exécutant, mais bien un artiste maîtrisant le langage particulier du code à des fins créatives.

En ce sens, au deuxième chapitre, nous avons posé les bases d'une théorie sur l'art numérique en commençant par définir la notion d'art génératif : il s'agit de toute pratique qui utilise un système, un ensemble de règles procédurales qui vont travailler avec un certain degré d'autonomie pour contribuer à la création d'une œuvre d'art. Les modèles proposés par Galanter nous ont permis une meilleure compréhension de la composition de ses systèmes en reliant leur fonctionnement avec les théories de la complexité. L'interactivité vient s'ajouter à ces systèmes en ajoutant des règles qui sortent du contrôle de l'ordinateur venant chercher de l'information du monde réel, que cela soit par manipulation directe venant des participants ou par les changements de son environnement. Le mélange entre les systèmes génératifs et l'interaction en temps réel permet la création d'instruments de performance et d'outils de création.

Ces applications permettent l'immersion sensorielle du public dans les environnements générés.

Les projets réalisés au cours de cette maîtrise ont été créés dans l'objectif de développer une meilleure compréhension des logiques de conception de projets génératifs et interactifs. Ces créations utilisent de nombreux systèmes ayant à la fois comme fonction de générer les images dans un format immersif, d'offrir une communication entre l'ordinateur et les participants et aussi de gérer le bon fonctionnement de la performance. Un des plus gros défis dans les projets comme *Enigma* et le *Piano-Lumière* était d'associer le programme génératif, qui devrait être le plus autonome possible, avec le besoin de suivre une trame narrative précise. Dans le cas d'*Enigma*, nous avons travaillé avec une ligne de temps intégré dans *Ableton Live*. Pour le *Piano-Lumière* je voulais créer un système qui analysait la musique pour créer les transitions entre les différents tableaux, mais les contraintes d'avoir un musicien qui fait la prestation en direct d'une pièce musicale incorporant des éléments d'interprétations et des variations dans le tempo qui change à chaque présentation m'ont forcé à sacrifier dans l'autonomie du système au profit de la stabilité de la performance. J'ai dû créer des événements au clavier pour déclencher certaines des transitions en suivant directement la partition. Avec plus de temps, il aurait été intéressant d'augmenter l'autonomie de l'ordinateur en développant de meilleures solutions automatisées pour la gestion de la performance pour garder l'intervention humaine au minimum, donc en se limitant seulement à l'essentiel des interactions.

À travers la pratique, un modèle de structure de production de projets de performances immersives a été proposé utilisant les principes de travail modulaire et procédural répondant à mon second objectif de recherche. Cette approche basée sur l'expérience à travers les itérations de différents projets nous a permis de créer rapidement des instruments de performance et des outils qui ont pu être utilisés à la fois sur scène et dans le milieu professionnel. Chaque expérience m'amène à réviser la structure de ce travail et d'adapter celui-ci dans le but de répondre à chaque nouveau défi. Par la suite, le parcours de la méthode proposée par Edmonds Linda Candy nous a permis de répondre à notre premier objectif. En ce sens, nous avons développé les critères de création d'une performance en temps réel selon la génération, l'interaction et l'immersion utilisant une logique procédurale et modulaire. Ces critères nous ont permis d'établir notre cadre théorique et de mettre en relief la pratique par rapport à la théorie pour valider que nos projets correspondaient bien aux critères que nous avons établis et aussi pour pouvoir examiner les logiques de conception dans le contexte de la production d'environnements génératifs et interactifs pour la production d'expériences immersives.

Dans une recherche ultérieure, il serait intéressant de porter un regard plus approfondi sur les systèmes de génération complexe (comme par exemple l'intelligence artificielle) et leurs applications possibles tant au niveau de la pratique

artistique que de leurs impacts dans notre société. Déjà, l'avancement des technologies de l'information, que ce soit l'apprentissage profond, l'apprentissage machine et le « big data » ont un impact concret sur plusieurs aspects de nos vies, soit : les réseaux de communication, la voiture automatisée, le système de la santé, l'assistant personnel ou l'application militaire. Cette capacité d'apprendre et d'interpréter le monde selon les règles établies par son créateur ouvre des portes intéressantes pour les codeurs créatifs. En tant que designer de jeu numérique, j'aimerais étudier les possibilités offertes par ces systèmes de génération dans la création de monde (*World Building*) tant au niveau de l'environnement que des possibilités pour créer de nouvelles formes de narration.

BIBLIOGRAPHIE

- Akten, M. (2008). Vimeo Memo Akten. Repéré le 10 octobre 2020 à <https://vimeo.com/memoakten>
- Akten, M. (2017). Learning to see: Gloomy sunday. Repéré le 10 octobre 2020 à <http://www.memo.tv/works/learning-to-see/>
- Anado, R. (2018). Engram: Data sculpture for melting memories. Repéré le 15 octobre 2020 à <https://www.stashmedia.tv/engram-data-sculpture-melting-memories/>
- Arsenault, D., & Picard, M. (2008). Le jeu vidéo entre dépendance et plaisir immersif : les trois formes d'immersion vidéoludique. Dans *Proceedings of HomoLudens: Le jeu vidéo: un phénomène social massivement pratiqué*. Repéré à https://ludicine.ca/sites/ludicine.ca/files/arsenault_picard--le-jeu-video-entre-dependance-et-plaisir-immersif_0.pdf
- Boden, M. A., & Edmonds, E. A. (2009). What is generative art?. *Digital Creativity*, 20(1-2), 21-46.
- Bonin, V. (2006). 9 evenings : theatre and engineering fonds. Repéré le 15 octobre 2020 à <https://www.fondation-langlois.org/html/e/page.php?NumPage=294>
- Breuleux, Y., Lamontagne, C., & Lapierre, R. (2018). Illumination Frankenstein : Voyage au Cœur du Mythe. Repéré le 20 février 2021 à <https://sat.qc.ca/fr/evenements/illumination-frankenstein>
- Breuleux, Y., Thibault, A., & Lapierre, R. (2019). Enigma. Repéré le 20 février 2021 à <https://sat.qc.ca/fr/enigma>
- Casti, J. L. (1994). *Complexification*. New York, NY : HarperCollins
- Dreherm, T. (2015). Thomas Dreherm history of computer art. Repéré le 14 octobre 2020 à http://iasl.unimuenchen.de/links/GCA_Indexe.html
- Edmonds, E. (2000). Art practice augmented by digital agents. *Digital Creativity*, 11(4), 193-204.
- Edmonds, E. (2018a). Algorithmic art machines. *Arts*, 7(1), 3.
- Edmonds, E. (2018b). Structure in Art Practice. Dans L. Candy, E. Edmonds, & F. Poltronier (Éds.), *Explorations in Arts and Technologie* (2^e éd., pp. 51-57). Londres, Royaume-Uni : Springer London.
- Edmonds, E., & Candy, L. (2010). Relating theory, practice and evaluation in practitioner research. *Leonardo*, 43(5), 470-476.
- Eno, B. (1996). Generative music. Repéré le 20 avril 2020 à <https://inmotionmagazine.com/eno1.html>
- Flake, G. W. (1998) *The computational beauty of nature*. Cambridge, MA : The MIT Press.
- Galanter, P. (2001) Foundations of generative art systems – a hybrid survey and studio class for graduate students. Dans *Generative Art 2001: Proceedings of the 4th International Conference*. Milan, Italy: Generative Design Lab, Milan Polytechnic.

- Galanter, P. (2003). What is generative art? Complexity theory as a context for art theory. Dans *GA2003–6th Generative Art Conference*. Repéré à <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=959BED2C46C055E6BD4BFAC402E694BD?doi=10.1.1.90.2634&rep=rep1&type=pdf>
- Gell-Mann, M. (1995) What is complexity? *Complexity*, 1(1),
- Hodgin, R. Robert Hodgin. Repéré le 15 octobre 2020 à <http://roberthodgin.com/>
- Hodgin, R. (2007). Flight404. Repéré le 15 octobre 2020 à <https://vimeo.com/flight404>
- Hodgin, R. (2012a). Accenture Symphonologie. Repéré à le 15 octobre 2020 à <https://rarevolume.com/work/symphonologie/>
- Hodgin, R. (2012b). Collider. Repéré le 15 octobre 2020 à <http://roberthodgin.com/project/collider>
- Hodgin, R. (2014). Eyeo Festival. Repéré le 15 octobre 2020 à <https://vimeo.com/103537259>
- How does interactive art create meaning? (2016). Repéré le 6 novembre 2020 à <https://www.widewalls.ch/magazine/interactive-art-meaning>
- Interactive art: Art element technology. Repéré le 6 novembre 2020 à <https://www.hisour.com/interactive-art-21343/>
- Karpysheva, K., & Letsius. S. (2016). 404.zero. Repéré le 15 octobre 2020 à <https://vimeo.com/404zero>
- Lallement, M. (2015). *L'Âge du Faire. Hacking, travail, anarchie: Hacking, travail, anarchie*. Paris, France : Éditions Seuil.
- Lieberman, Z. The Systemis. Repéré le 16 octobre 2020 à <http://thesystemis.com/>
- Lieberman, Z. (2013). School For Poetic Computation. Repéré le 15 octobre 2020 à <https://sfpc.io/>
- Lieberman, Z. (2016). Daily sketches in 2016. Repéré le 15 octobre 2020 à <https://medium.com/@zachlieberman/daily-sketches-2016-28586d8f008e>
- Mcdonald, K. (2007). Vimeo. Repéré le 23 octobre 2020 à <https://vimeo.com/kylemcdonald>
- Mcdonald, K. (2018). How to recognize fake AI-generated image. Repéré le 23 octobre 2020 à <https://medium.com/@kcimc/how-to-recognize-fake-ai-generated-images-4d1f6f9a2842>
- Mcdonald, K. (2019a). Discrete figure. Repéré le 23 octobre 2020 à https://research.rhizomatiks.com/s/works/discrete_figures/en/
- Mcdonald, K. (2019b). Review: chic ghosts, as backup dancers to the big star of technology. Repéré le 23 octobre 2020 à <https://www.nytimes.com/2019/05/09/arts/dance/discrete-figures-review-nyla.html>
- Mcdonald, K. (2020). AIArtist. Repéré le 23 octobre 2020 à <https://aiartists.org/kyle-mcdonald>
- McLean, K. (2018a). Vimeo. Repéré le 15 octobre 2020 à <https://vimeo.com/everyoneishappy>

McLean, K. (2018b). Waifu Synthesis – real time generative anime. Repéré le 15 octobre 2020 à <http://everyoneishappy.com/portfolio/waifu-synthesis-real-time-generative-anime/>

Miller, D. (2003). Game of chance. *Electronic Musician*, (November), 53-64.

Murray, J. H., & Murray, J. H. (2017). Hamlet on the holodeck: The future of narrative in cyberspace. Cambridge: MIT press.

O'Shea, C. (2011). Little magic stories. Repéré le 15 octobre 2020 à <http://www.chrisoshea.org/little-magic-stories>

O'Shea, C. (2004). Chris O'Shea. Repéré le 15 octobre 2020 à <http://www.chrisoshea.org>

Prusinkiewicz, P., & Lindenmayer, A. (1990). *The algorithmic beauty of plants*. New York, NY: Springer.

Schwanauer, S. M., & Levitt, D. A. (1993). *Machine models of music*. Cambridge: MIT Press.

ANNEXE 1: PROJET ENIGMA



Figure 19 : Enigma (2019). Mouvement Introduction. SAT.
Photo : Yan Breuleux (2019). Image reproduite avec l'autorisation de Yan Breuleux.

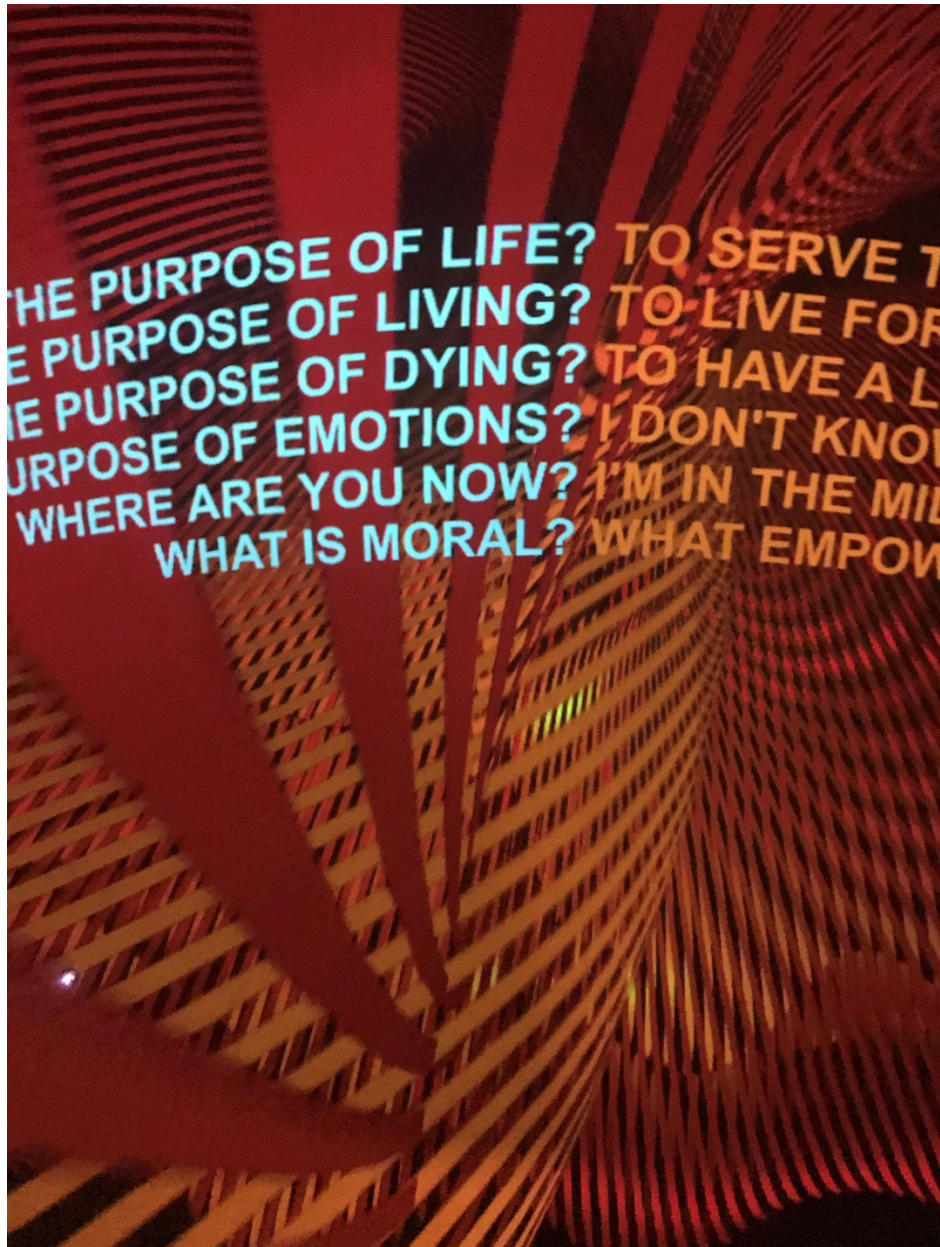


Figure 20 : Enigma (2019). Mouvement Dialogue. SAT.
Photo : Yan Breuleux (2019). Image reproduite avec l'autorisation de Yan Breuleux.

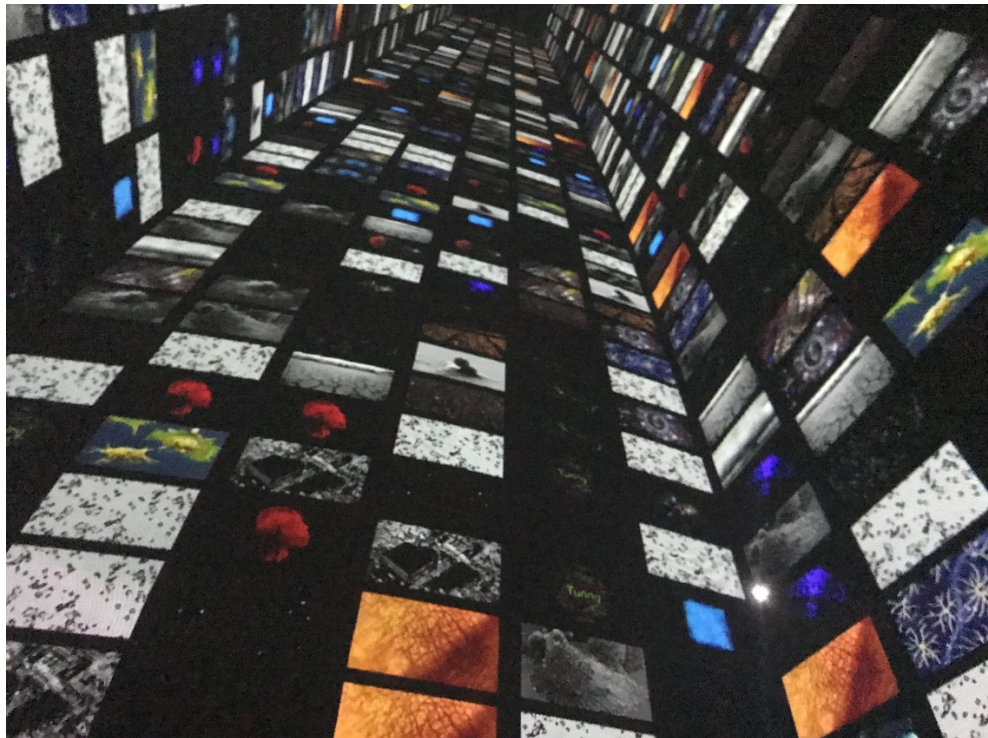


Figure 21 : Enigma (2019). Mouvement Dialogue part 2. SAT.
Photo : Yan Breuleux (2019). Image reproduite avec l'autorisation de Yan Breuleux.



Figure 22: Enigma (2019). Mouvement Cryptographie. La Vilette. Paris.
Photo : Yan Breuleux (2019). Image reproduite avec l'autorisation de Yan Breuleux.

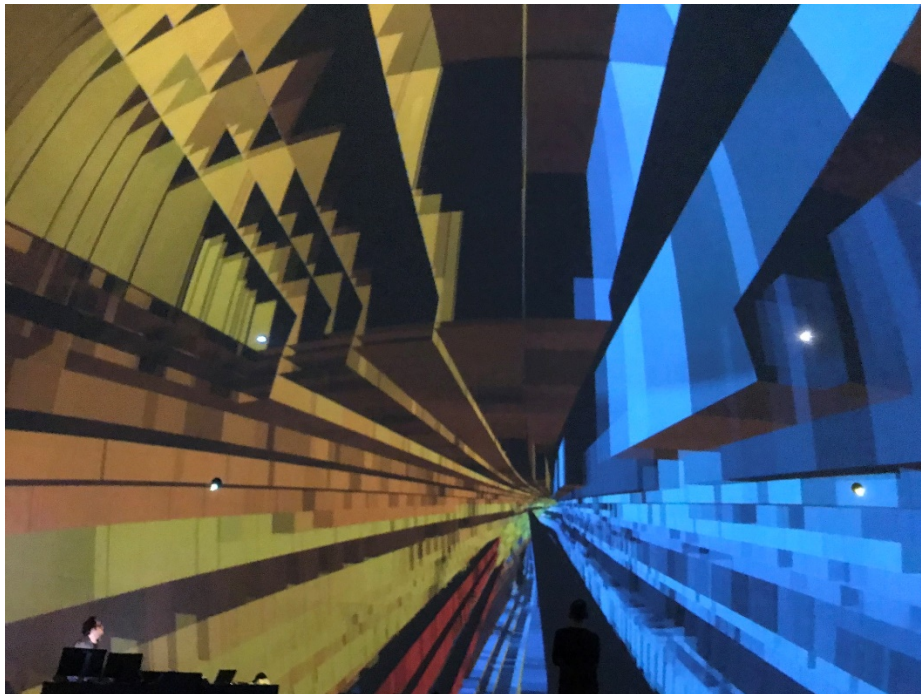


Figure 23 : Enigma (2019). Mouvement Piano-Lumière. SAT.
Photo : Yan Breuleux (2019). Image reproduite avec l'autorisation de Yan Breuleux.

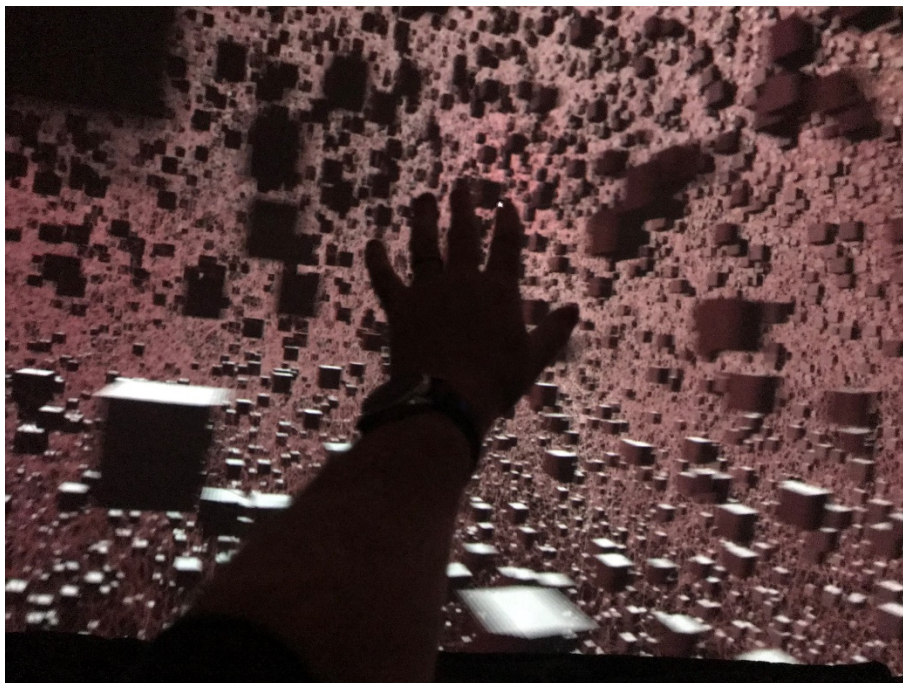


Figure 24 : Enigma (2019). Mouvement Religion. SAT.
Photo : Yan Breuleux (2019). Image reproduite avec l'autorisation de Yan Breuleux.

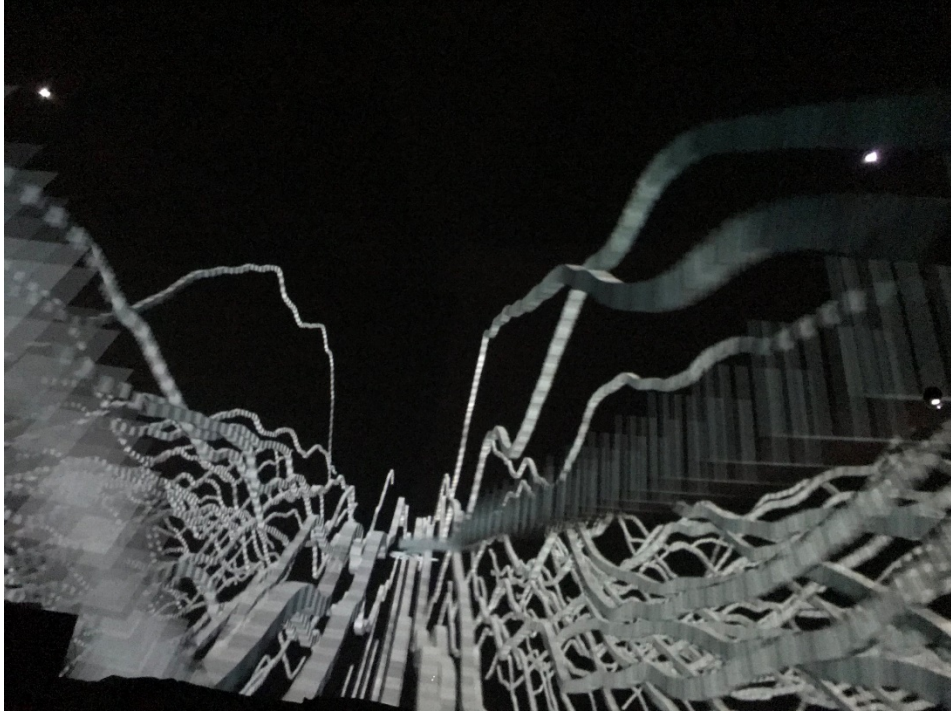


Figure 25 :: Enigma (2019). Mouvement Horizon. SAT.
Photo : Yan Breuleux (2019). Image reproduite avec l'autorisation de Yan Breuleux.

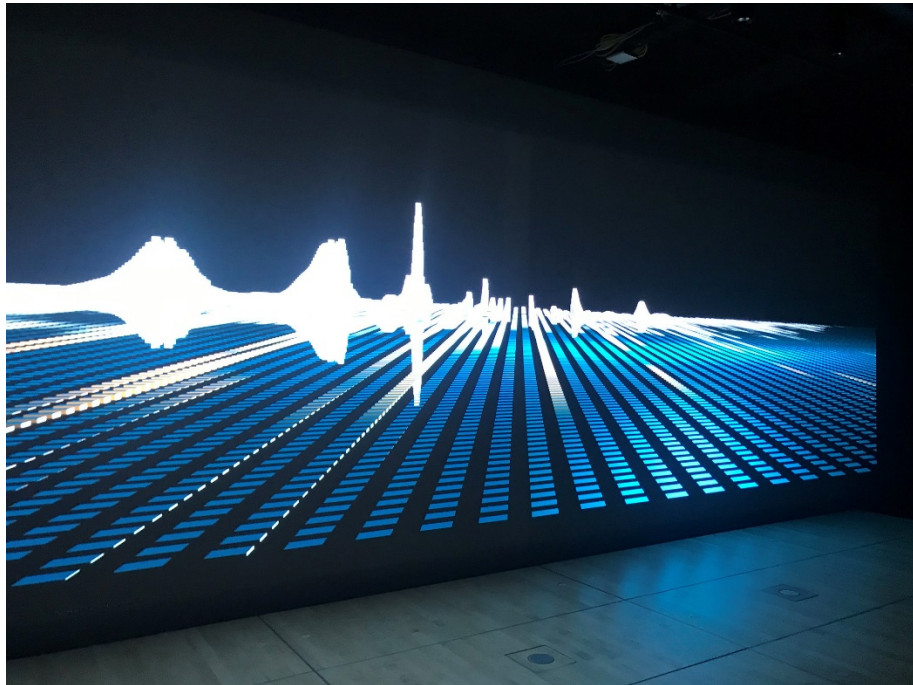


Figure 26 :: Enigma (2019). Mouvement Spectre. La vilette. Paris.
Photo : Yan Breuleux (2019). Image reproduite avec l'autorisation de Yan Breuleux.

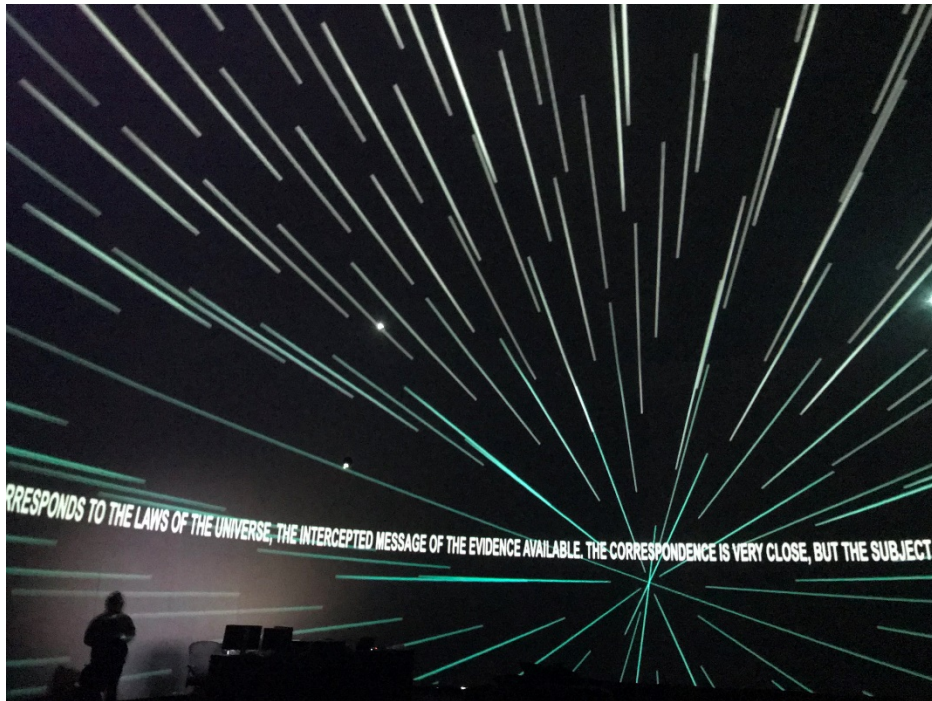


Figure 27 : Enigma (2019). Mouvement Espace Turing. SAT.
Photo : Yan Breuleux (2019). Image reproduite avec l'autorisation de Yan Breuleux.

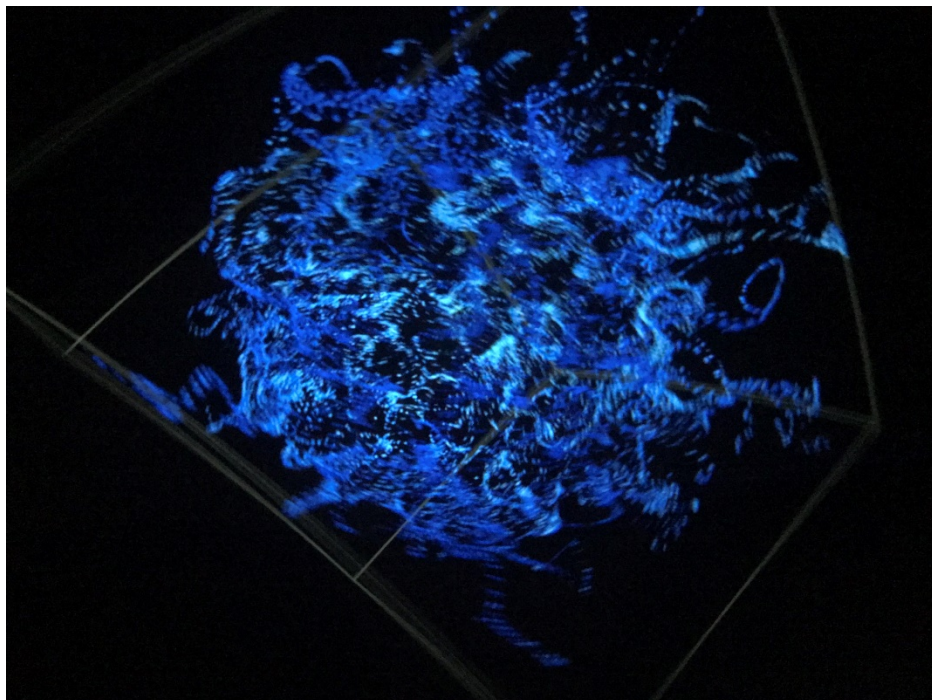


Figure 28 : Enigma (2019). Mouvement Univers. SAT.
Photo : Yan Breuleux (2019). Image reproduite avec l'autorisation de Yan Breuleux.

ANNEXE 2 : PROJET LE PIANO-LUMIÈRE



Figure 29 : Le Piano-Lumière (2018). Mouvement Mercure et Soleil. SAT.
Photo : Yan Breuleux (2018). Image reproduite avec l'autorisation de Yan Breuleux.



Figure 30 : Le Piano-Lumière (2018). Mouvement Mercure et Soleil. SAT.
Photo : Yan Breuleux (2018). Image reproduite avec l'autorisation de Yan Breuleux.



Figure 31 : Le Piano-Lumière (2018). Mouvement Terre. SAT.
Photo : Yan Breuleux (2018). Image reproduite avec l'autorisation de Yan Breuleux.



Figure 32 : Le Piano-Lumière (2018), Mouvement re-Soleil et Mars, SAT.
Photo : Yan Breuleux (2018). Image reproduite avec l'autorisation de Yan Breuleux.



Figure 33 : Le Piano-Lumière (2018). Mouvement Jupiter. SAT.
Photo : Yan Breuleux (2018). Image reproduite avec l'autorisation de Yan Breuleux.

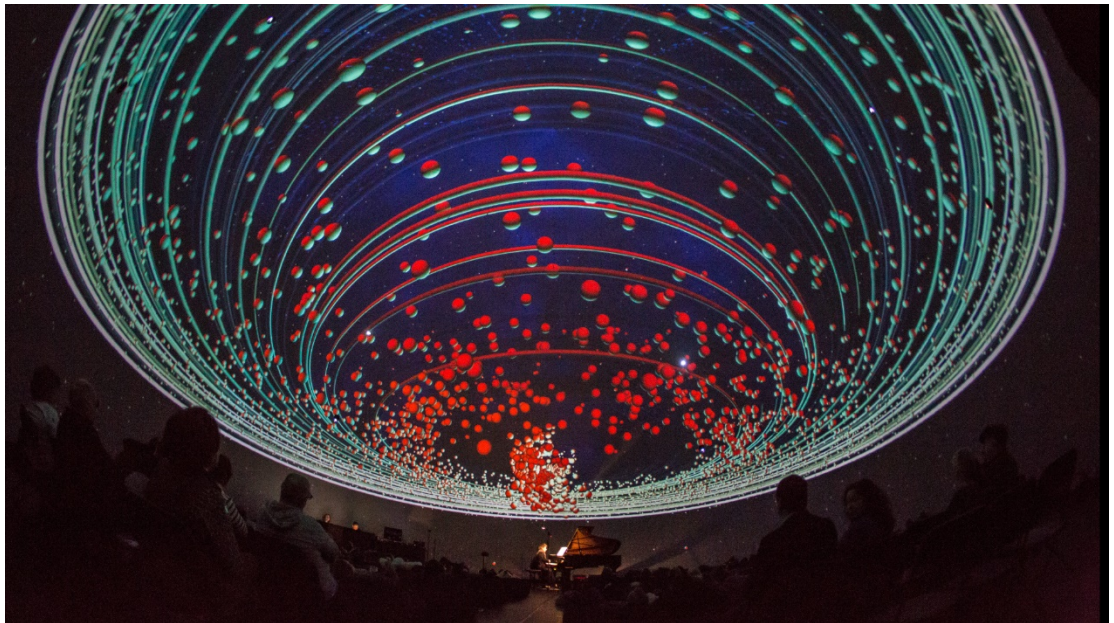


Figure 34 : Le Piano-Lumière (2018). Mouvement Saturne. SAT.
Photo : Yan Breuleux (2018). Image reproduite avec l'autorisation de Yan Breuleux.



Figure 35 : : Le Piano-Lumière (2018). Mouvement Uranus, SAT.
Photo : Yan Breuleux (2018). Image reproduite avec l'autorisation de Yan Breuleux.



Figure 36 : Le Piano-Lumière (2018). Mouvement Neptune, SAT.
Photo : Yan Breuleux (2018). Image reproduite avec l'autorisation de Yan Breuleux.



Figure 37 : Le Piano-Lumière (2018). Mouvement Pluton. SAT.
Photo : Yan Breuleux (2018). Image reproduite avec l'autorisation de Yan Breuleux.

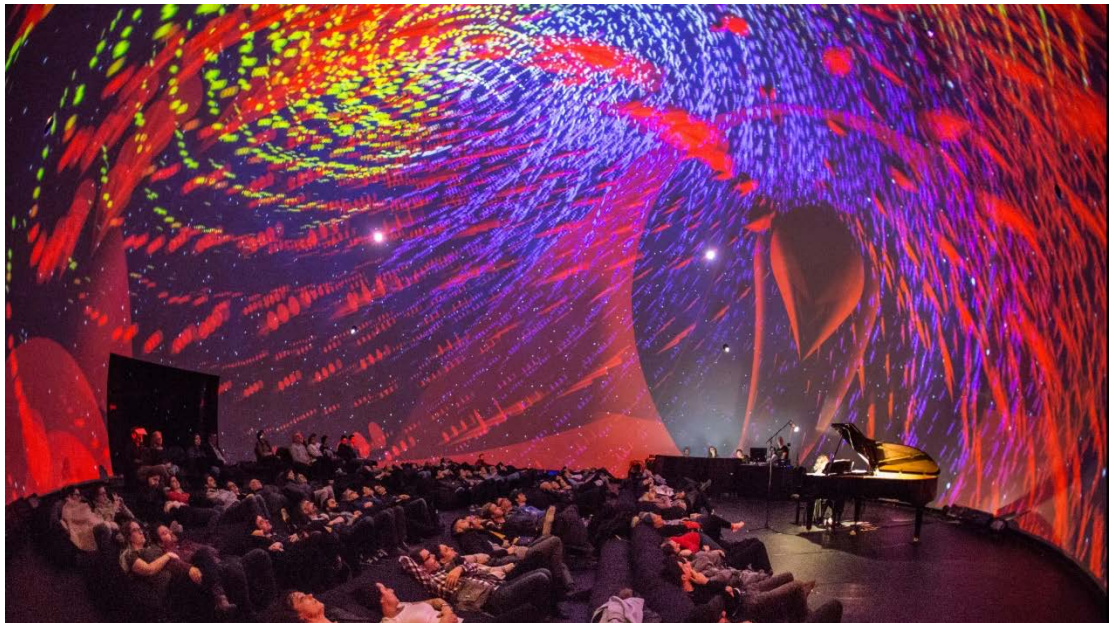


Figure 38 : Le Piano-Lumière (2018). Mouvement Espace Infini. SAT.
Photo : Yan Breuleux (2018). Image reproduite avec l'autorisation de Yan Breuleux.

ANNEXE 3 : TRAJECTORY MODEL OF PRACTICE AND RESEARCH

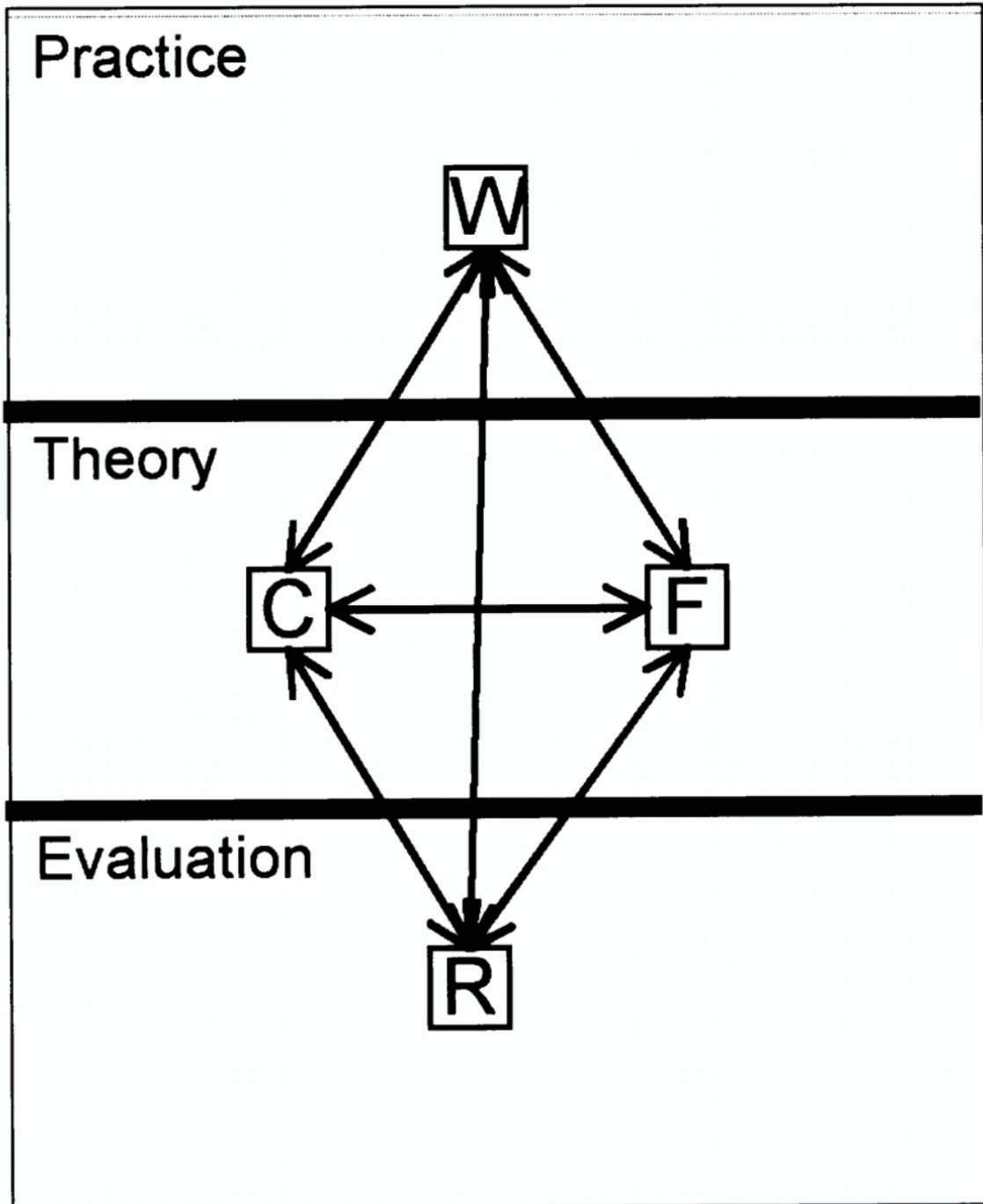


Figure 39 : Modèle de trajectoire de la pratique de la recherche d'Edmonds E. et Candy L. (2010).

