



Hétérotopie virtuelle : processus de création d'une œuvre numérique immersive utilisant la technologie des nuages de points

par : **Samy Lamouti**

**Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi
en vue de l'obtention du grade de Maître des Arts en Maîtrise en art**

Québec, Canada

© Samy Lamouti , 2021

RÉSUMÉ

Le projet artistique Hétérotopie virtuelle, qui est au centre du présent mémoire de recherche-création, constitue un terrain d'expérimentation pour mieux saisir les processus de création-production à l'aide des technologies de captation de lieux physiques réels par nuages de points.

Dans ce contexte, il s'agit d'étudier l'utilisation du Scan 3D comme une technologie menant à une pratique de création artistique émergente, en examinant d'abord quelques cas de productions récentes, puis en documentant le processus de réalisation d'une œuvre inédite utilisant une archive massive de nuages de points obtenus par la technologie de type Lidar. Le concept d'hétérotopie y est posé en tant que cadre interprétatif pour définir, sous la forme d'une production artistique, les possibilités amenées par cette technologie. Le praticien tente ici de comprendre comment l'utilisation de cette technologie peut influencer ou renouveler le processus de réalisation d'œuvres numériques immersives en introduisant une méthode de travail itérative.

Contrairement à une chaîne de production audiovisuelle traditionnellement hiérarchisée de type «waterfall», l'usage de ces technologies tend à amener un mode de conception et de création moins linéaire et résolument itératif, notamment par l'introduction récente des logiciels traditionnellement dédiés au domaine des jeux vidéo. Cet aspect tend à favoriser une pratique expérimentale basée sur la production de multiples prototypes.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	II
TABLE DES MATIÈRES	III
LISTE DES FIGURES	IV
LISTE DES SIGLES ET ABBRÉVIATIONS	V
DÉDICACE	VI
REMERCIEMENTS	VII
AVANT-PROPOS	VIII
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1	4
LA CRÉATION ARTISTIQUE ET L'USAGE DES TECHNOLOGIES DE NUAGES DE POINTS	4
1.1 MISE EN CONTEXTE DE LA RECHERCHE	4
1.2 DÉFINITION ET BREF HISTORIQUE DE LA TECHNOLOGIE LIDAR	5
1.3 UTILISATION DU LIDAR EN ART NUMÉRIQUE	6
1.3.1 EXAMEN DE PRODUCTIONS ARTISTIQUES INDÉPENDANTES	7
1.3.2 JOANIE LEMERCIER	8
1.3.3 MARSHMALLOW LASER FEAST	10
1.3.4 FRANÇOIS QUÉVILLON	11
1.4 PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE	13
1.4.1 QUESTION DE RECHERCHE	14
1.4.2 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE	14
1.4.3 HYPOTHÈSE DE RECHERCHE	15
CHAPITRE 2	17
MÉTHODE DE PRODUCTION ITÉRATIVE	17
2.1 RECHERCHE-CRÉATION	17
2.2 MÉTHODE DU PROJET HÉTÉROTOPIE	17
2.2.1 PRÉ TERRAIN: EXPÉRIMENTATIONS PRÉLIMINAIRES	18
2.2.2 TERRAIN D'ÉTUDE: OBSERVATION DE LA PRATIQUE DU PROJET	18
2.3 ATTEINTE DES OBJECTIFS	19
2.3 SCHÉMA HEURISTIQUE DU PROJET	19
CHAPITRE 3	20
RECHERCHE DU PROJET HÉTÉROTOPIE	20
3.1 LE CONCEPT DE L'HÉTÉROTOPIE SELON FOUCAULT	20
3.2 PRÉ-TERRAIN	22
3.2.1 PREMIÈRE APPROCHE DU PROJET HÉTÉROTOPIE VIRTUELLE	23
3.2.2 TRAVAIL PRÉPARATOIRE	24
3.2.3 LE CHOIX DES LIEUX	24
3.3 LES ITÉRATIONS DU PROJET HÉTÉROTOPIE VIRTUELLE	25
3.3.1 ITÉRATION1 : CINEMA 4D - MAXWELL (2016)	25
3.3.2 ITÉRATION 2: MAYA - ARNOLD (2016)	28
3.3.3 ITÉRATION 3: RETOUR À CINÉMA 4D - OCTANE (2017)	29
3.3.4 RECHERCHE AVEC LE LOGICIEL 3D BLENDER (2018)	31
3.3.5 ITÉRATION 4: UNREAL ENGINE (2019-2020)	32
CHAPITRE 4	35
ANALYSE DES RÉSULTATS	35
4. 1 INFLUENCE DE L'ENVIRONNEMENT DE NUAGES DE POINTS SUR LA PRATIQUE	35
4.2 NOUVELLES POSSIBILITÉS COLLABORATIVES ET PROCHAINES ÉTAPES	36
CONCLUSION	38
BIBLIOGRAPHIE	40

LISTE DES FIGURES

Figure 1: «Nimbes» (Lemercier, 2014b).....	8
Figure 2: Schéma heuristique du projet Hétérotopie virtuelle.	19
Figure 3: Rendu de l'itération 1 sur Cinema 4D.	25
Figure 4: Schéma de production de l'itération 1.	27
Figure 5: Schéma de production de l'itération 2.	29
Figure 6: Schéma de production de l'itération 3.	31
Figure 7: Rendu de l'itération 4 sur Unreal Engine.	32
Figure 8: Schéma de production de l'itération 4.	34

LISTE DES SIGLES ET ABBRÉVIATIONS

- CPU:** De l'anglais Central Processing Unit. Processeur principal d'un ordinateur.
- GPU:** De l'anglais Graphical Processing Unit. Processeur graphique qui gère les performances et fonctions avancées d'affichage sur un ordinateur.
- LIDAR:** De l'anglais, contraction des mots Light Detection And Ranging. Technologie de captation 3D utilisant des pulsations lumineuses (Laser) et un capteur numérique. Par extension, l'expression définit également l'appareil de captation lui-même ou dans le jargon technique le type de fichiers numériques encodant un «nuage de points» ainsi généré.
- RAM:** De l'anglais Random Access Memory. Mémoire vive sur un ordinateur.

DÉDICACE

À mes parents, ma famille et Kamy.

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont à toutes les personnes qui m'ont soutenu durant cette longue période de recherche-création. Je tiens à remercier tout particulièrement mon directeur de mémoire, le Professeur Yan Breuleux pour toute son aide et ses enseignements et de même qu'aux professeurs de l'école NAD. Merci à mon collègue et ami Sam Chennenou, qui a d'ailleurs contribué aux débuts de ce projet.

J'offre ma reconnaissance envers mes amis et collègues du NAD qui m'ont apporté un précieux support moral et intellectuel tout au long de ma démarche. Je tiens de plus à mentionner l'aide de mes amis Mathieu Gagnon, notamment pour son aide à la rédaction, ainsi que Mathilde Forest-Rivière.

Mes remerciements particuliers à ma mère Yamina Louafi pour son aide et son soutien indéfectible, ainsi qu'à ma tante Aichouche Louafi qui fut d'un grand support au début de mes études à l'école NAD.

J'exprime toute ma reconnaissance à ma femme Kamy pour sa patience et son soutien. Merci également aux membres du personnel de la compagnie Neweb pour leur confiance.

AVANT-PROPOS

En tant que professionnel et artiste en arts médiatiques, après la réalisation de plusieurs projets personnels et indépendants (*mapping* vidéo, animation 3D, création à l'aide de systèmes de simulation de particules) et avec plus de dix années d'expérience dans la création industrielle pour des projections vidéos *in-situ*, des installations visuelles à grand déploiement et des expériences immersives pour des évènements corporatifs, j'ai développé une réflexion visant à mieux comprendre ce langage visuel en émergence, mais surtout les logiques de production qui y sont à l'œuvre. C'est donc dans un contexte journalier que j'ai travaillé avec les nuages de points provenant de relevés Lidar, notamment pour la prévisualisation dans le domaine des effets visuels pour le cinéma et plus récemment la production avec décors virtuels en temps réel (*Virtual production* (Epic Games, 2021) (Rogers, 2020)).

La recherche de ce mémoire se situe dans le contexte d'une production individuelle. Je cherche à créer des expériences permettant à la fois de raconter des histoires et faire vivre des émotions transmises par les sens à des spectateurs par l'usage de dispositifs audiovisuels de spatialisation, transposant ainsi des expériences visuelles à l'intérieur d'espaces immersifs. Lors de la production de multiples projets, j'ai développé des stratégies pour utiliser de nouvelles technologies de manière créative en observant les influences potentielles de ces outils sur la chaîne de production tout en développant une réflexion plus fondamentale sur les limites qu'elles peuvent imposer pour de plus petites équipes de production ou pour des artistes indépendants.

En somme, en suivant une perspective d'artiste-designer-praticien dans le champ des industries créatives, ce mémoire vise à contribuer à la connaissance par une meilleure compréhension des possibilités créatives des technologies numériques de captation et de modélisation de l'espace réel.

INTRODUCTION

Ce mémoire se situe dans le domaine particulier des arts numériques consacrés à la production d'expériences visuelles immersives et s'inscrit dans le contexte des développements récents des industries créatives. Ces industries sont constituées des domaines du jeux vidéo, des effets visuels des arts numériques et des médias interactifs (Quintas, 2016). La conjecture actuelle présente de plus en plus des ponts entre ces domaines, notamment par des usages créatifs innovants des moteurs de jeux, ceux-ci étant utilisés de plus en plus dans le domaine des effets visuels. Dans ce vaste champ d'activité, il existe des technologies qui transitent d'un domaine à l'autre et c'est le cas de celles au centre de ce mémoire : les technologies de captation à base de nuages de points (*point clouds, ou 3D Scan*). Celles-ci sont particulièrement utilisées dans un domaine encore en émergence: la production virtuelle - un procédé qui permet de filmer en direct les acteurs dans un décor sur de très grands écrans composés de diodes électroluminescentes (DEL).

Dans ce contexte, la présente recherche se concentre sur l'exploration du potentiel expressif et des procédés de production utilisant ces technologies sur de multiples projets de créations. On entend ici les nuages de points générés par l'enregistrement tridimensionnel d'espaces réels - soit par Lidar, photogrammétrie ou autres procédés et appareils de captation telles que les différentes versions du périphérique de jeu vidéo Kinect de la compagnie Microsoft.

Les nuages de points sont utilisés par de nombreux artistes s'étant approprié ou ayant développé des méthodes innovantes pour en exploiter le potentiel créatif. Cette technologie est utilisée en particulier par des artistes de la scène des arts numériques et de la performance audiovisuelle (A/V). Ceux-ci capturent des lieux, les animent et les transforment en manipulant les coordonnées des points à l'aide de divers types de transformations ou en appliquant différents types de rendus (*shaders*).

Dans le domaine de la production virtuelle pour le cinéma et les jeux vidéo, notons que les nuages de points sont utilisés pour capter et modéliser des lieux afin de recréer des décors d'un réalisme inégalé ou encore pour enregistrer avec précision la configuration d'un site ou d'un studio de tournage afin d'y intégrer des éléments virtuels à posteriori.

Le projet artistique au cœur de ce mémoire se concentre principalement sur l'utilisation du *Light Detection and Ranging* (Lidar) dans les pratiques immersives en art numérique - considérant que cette technologie étant encore relativement émergente tant en industrie que pour les créateurs eux-mêmes.

À titre de rappel historique, mentionnons quelques figures historiques du domaine des œuvres numériques immersives. Il comprend les technologies de la projection architecturale, multi-écrans ou poly-écrans, la réalité virtuelle et augmentée. À l'origine de ces formes artistiques, mentionnons les artistes Charlotte Davies (*Osmose*, 1995), les œuvres de l'artiste Luc Courchesne (entre autres directeur de la Société des Arts Technologiques de 1996 à 2005, et commissaire du *Symposium IX*), Jeffrey Shaw (pionnier de la réalité augmentée et des expériences immersives), Maurice Benayoun (*Le tunnel sous l'Atlantique*, 1995).

En premier lieu, en suivant une approche de recherche-création, ce mémoire analysera une série de créations artistiques présentées comme autant d'itérations d'une même exploration, afin d'en dégager le processus de production. Pour le premier chapitre, en lien avec les recherches expérimentales explorant les technologies de captation numérique de l'espace, je me suis intéressé aux productions de la jeune génération des artistes immersifs avec des artistes tels que Joanie Lemercier, François Quévillon, David Quayola, Maotik, Can Büyükerber, les collectifs Marshmallow Laser Feast et Ouch. Ceux-ci utilisent les technologies de captation par nuages de points pour créer la matière première dans leur pratique artistique. Le travail de plusieurs de ces créateurs a été répertorié dans le catalogue des œuvres immersives réalisé par la Société des Arts Technologiques

(SAT) à Montréal, auquel j'ai aussi contribué à plusieurs reprises (Société des arts technologiques, 2015a)

Ces expériences ont mené au questionnement suivant: comment saisir le processus de conception d'une expérience immersive à l'aide des nuages de points en analysant les rétroactions que l'outil technologique employé produit sur le processus création ?

Ce même processus sera ensuite étudié, en suivant une méthode itérative (celle-ci sera exposée au deuxième chapitre) pour l'étude de la création d'une série de prototypes se présentant comme une série d'animation 3D.

Ces prototypes serviront ici d'objet d'étude pour le troisième chapitre, il s'agira ainsi de saisir et transférer le savoir et l'expertise acquis en art numérique pour la création d'œuvres utilisant une archive massive de nuages de points. Globalement, cette recherche vise à mieux saisir comment se construit le dialogue entre art et technologie dans les créations immersives et de quelle manière l'utilisation d'outils technologiques nouveaux peut enrichir le processus de création et la chaîne de production (*pipeline de production*).

CHAPITRE 1

LA CRÉATION ARTISTIQUE ET L'USAGE DES TECHNOLOGIES DE NUAGES DE POINTS

1.1 MISE EN CONTEXTE DE LA RECHERCHE

À l'époque actuelle, certaines transformations apparaissent dans les schémas de productions audiovisuelles, non seulement via l'utilisation des technologies de téléprésence pour les équipes de production mais également par les techniques de modélisation 3D de l'environnement (lasergrammétrie et photogrammétrie par exemple), et par l'importance et l'influence grandissante des moteurs de jeux vidéo sur la production cinématographique. Les processus de production de type «*waterfall*» ou «du haut vers le bas», qui suivent un processus linéaire, semblent de moins en moins s'appliquer aux nouvelles pratiques de productions de types expérimentielles et immersives, puisque l'on constate l'apparition de processus plus circulaires, permettant d'apporter des modifications à des éléments normalement situés au début de la chaîne de production en affectant minimalement le reste de la production.

Les projets de productions immersives indépendants ayant souvent un fort côté expérimental et amenant des créateurs provenant d'horizons disciplinaires variés à travailler de concert, il nous apparaît souhaitable d'explorer cette approche plus ouverte de la chaîne de production. Il est souvent difficile de concilier le processus de collaboration avec des exigences créatives telles que l'unité de l'œuvre, la vision artistique, l'expérience esthétique, une scénarisation précise et y insérer de surcroît l'utilisation des nuages de points ou d'une autre technologie novatrice encore en développement.

La progression constante des technologies engendre des transformations de l'organisation des compagnies et studios des industries créatives qui influencent les processus de création et la chaîne de production. On fera l'examen de ces processus en tant qu'objet de recherche, en décrivant d'abord dans le présent chapitre l'utilisation des nuages de points dans les pratiques d'artistes et de studios qui font cas de figures. Dans chacun de ces cas, un imaginaire est sollicité, un espace symbolique se dégage et une méthode est développée pour traiter les données brutes de nuages de points ou de Lidar pour en faire une expérience sensorielle esthétique malgré les contraintes techniques présentes dans ce domaine de la création. En effet, l'utilisation de numérisations 3D d'environnements réels complexes demeure relativement difficile ou laborieuse, d'abord parce que les logiciels de production audiovisuelles conventionnels ne sont pas ou peu adaptés pour en faire la lecture ou le rendu.

L'utilisation du Lidar et du scan 3D est désormais prise en compte comme un espace de recherche valide puisque tout un domaine artistique, bien qu'il soit méconnu, s'est approprié cette technologie, surtout au cours de la dernière décennie.

1.2 DÉFINITION ET BREF HISTORIQUE DE LA TECHNOLOGIE LIDAR

Le LiDAR ou Lidar (acronyme des mots anglais Light Detection And Ranging), est une méthode de télédétection et un instrument de télémétrie permettant, entre autres, de créer des modélisations tridimensionnelles de haute résolution d'un environnement en émettant un signal lumineux, normalement infrarouge, illuminant les objets qu'il touche puis en enregistrant la réflexion ou «retour» de ce signal sur un capteur numérique. Le résultat est généralement une trame de points ou pixels définis sur les axes X, Y, Z étant captés très rapidement, soit par milliers ou millions de points par seconde. Ces numérisations peuvent avoir une densité de points variable selon la portée de l'appareil utilisé. Différents types d'informations sont associés par défaut à ces points, dont la distance, l'intensité (noir et blanc), et la couleur (RVB), les appareils étant désormais munis de caméras couleur numériques. Les systèmes Lidar peuvent être terrestres ou aéroportés.

Une des premières utilisations du Lidar remonte aux années 1960 (Gregersen, 2016). Toutefois, la commercialisation des appareils et le développement des logiciels pour en traiter l'information sont des faits récents. Cette technologie étant similaire et succédant immédiatement au radar, l'origine du mot est en fait une contraction de «*light*» et «*radar*» (Office québécois de la langue française, 2021). Le terme lasergrammétrie est également applicable mais peu répandu. (Maumont, 2010)

Les applications du Lidar se sont multipliées durant les dernières décennies : architecture, préservation du patrimoniale numérique (Digital heritage), ingénierie, géographie et domaines connexes, sismologie, foresterie, recherche atmosphérique, applications militaires, en plus d'être maintenant la technologie maîtresse derrière le développement fulgurant de l'industrie des véhicules autonomes.

1.3 UTILISATION DU LIDAR EN ART NUMÉRIQUE

Les artistes ont le plus souvent été à l'avant-garde de l'utilisation créative des technologies mais parfois pour aboutir à des fins pour lesquelles elles n'étaient pas forcément destinées. L'utilisation artistique des modélisations 3D issues de la photogrammétrie et du Lidar en est probablement un bon exemple car les créateurs qui les utilisent doivent souvent résoudre des difficultés liées à la gestion des données des nuages de points, ou même se heurter à leur nouveauté pour les exploiter pour des œuvres vidéo ou des performances en direct.

Bien que plusieurs outils logiciels aient été développés, il demeure que les étapes pour en arriver à réaliser une œuvre expérimentale à partir de ces données tridimensionnelles ne sont pas explicites, il existe peu de documentation à ce sujet ou celle-ci reste fragmentaire. Dans un pipeline de rendu conventionnel en effets visuels ou pour l'impression 3D, le nuage de points obtenu est converti en polygones formant des maillages triangulés (*polygon mesh*) pour être lus dans un logiciel

de rendu selon une série d'étapes successives et standardisées. Toutefois, cette méthode exclut complètement le champ de recherche ici détaillé qui consiste à travailler directement à partir des données brutes de nuages de points: des pixels et non des polygones placés dans un espace 3D.

La nature des nuages de points reste à la fois une qualité intrinsèque qui définit l'esthétique du médium, mais elle pose des problèmes pour leur utilisation. Les logiciels d'animation 3D traditionnels ne sont, pour la plupart, pas dotés d'outils dédiés à en exécuter le rendu visuel ou ne peuvent simplement pas lire les différents formats de fichiers associés aux nuages de points. De plus, utiliser un système de particules appliquées aux nuages de points semble difficile pour une utilisation en temps réel ou pour de très grands environnements virtuels. Actuellement, dans le contexte de la progression fulgurante du domaine de la production virtuelle, les solutions les plus adaptées pour produire des œuvres avec des données en format Lidar et obtenir un certain degré d'immersion se trouvent en fait de plus en plus du côté des moteurs de jeux vidéo. En effet, les possibilités des moteurs de jeux vidéo permettent de parcourir des environnements virtuels maintenant très vastes; c'est le concept du monde ouvert (*Open World*). Ce genre de jeux vidéo nécessite la création d'environnements complexes qui utilisent souvent des numérisations par Lidar d'espaces réels de très grandes dimensions (Yin-Poole, 2018).

1.3.1 EXAMEN DE PRODUCTIONS ARTISTIQUES INDÉPENDANTES

Il existe un répertoire important de créateurs utilisant les technologies à base de nuages de points. Des artistes reconnus tels que Rioji Ikeda, Ryoichi Kurokawa, Herman Kolgen, Carsten Nicolai, ou Otolab ont utilisé ces technologies dans leurs œuvres. Cependant, l'usage se situait plutôt en périphérie de leurs productions et des thématiques explorées. Pour ce chapitre, nous avons sélectionné quelques cas de figures exemplaires de création où la technologie mentionnée dans ce mémoire a joué un rôle central. Nous allons donc examiner le travail de Joanie Lemercier, Marshmallow Laser Feast, François Quévillon et David Quayola.

1.3.2 JOANIE LEMERCIER

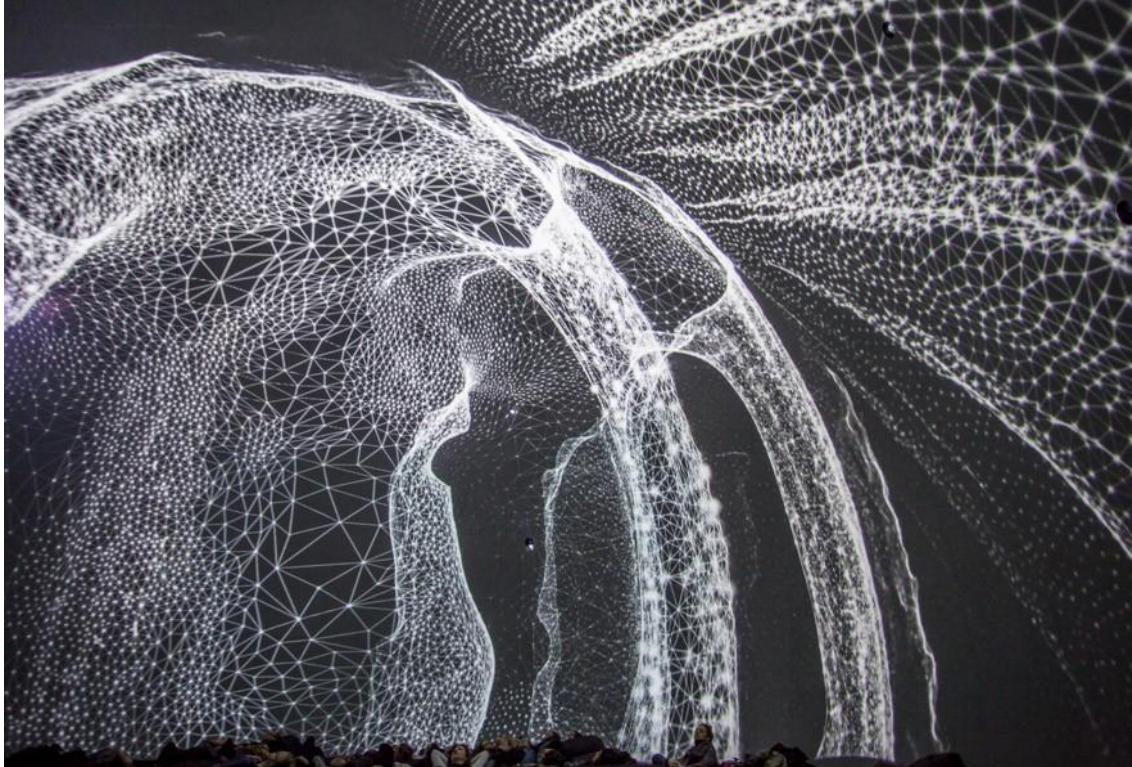


Figure 1: «*Nimbes*» (Lemercier, 2014b). Image Creative Commons.

Le travail de l'artiste français Joanie Lemercier s'inscrit dans la mouvance des productions audio-visuelles à grand déploiement utilisant la projection vidéo in-situ tout en ayant une pratique personnelle explorant également des dispositifs liant la lumière à la perception de l'espace dans des œuvres de moins grande taille ou présentées en galerie. Une grande part de la pratique de l'artiste est donc reconnue à l'international dans les champs du vidéo-jockey, du *mapping* vidéo et de la projection vidéo architecturale, en plus de travailler dès 2008 avec le collectif Anti VJ qu'il a cofondé avec Yannick Jacquet, Romain Tardy et Olivier Ratsi. Lemercier a également été associé de près au festival Mutek de Montréal et de Mexico. Notons également en 2010 son exposition au China Museum of Digital Art à Pékin, puis une œuvre monumentale de vidéo en *mapping* pour Art Basel

Miami en 2013, puis une autre œuvre la même année au Sundance Film Festival. Lemercier a fondé son propre studio créatif en 2013, d'abord basé à New-York puis maintenant à Bruxelles avec à sa tête Juliette Bibasse. Le studio se spécialise dans la production et l'expérimentation avec les technologies de projection, d'interactivité par captation de mouvement mais également l'animation et la modélisation 3D procédurales. C'est lors de ce tournant que l'artiste s'est intéressé davantage à la création avec les nuages de points.

En 2014, Lemercier présentait *Nimbes*, une œuvre audiovisuelle immersive d'une durée de 15 minutes, combinant une trame sonore de l'artiste James Ginzburg (alias Emptyset) et réalisée en coproduction avec la Société des Arts Technologie de Montréal (SAT) pour le Symposium IX. Comme dans la plupart des pièces qui y sont présentées, la vidéo était projetée à l'intérieur du dôme de la SAT en utilisant huit projecteurs, couvrant ainsi la totalité de cet espace hémisphérique de 18 mètres de diamètre. L'œuvre a également eu d'autres diffusions (Zhang, 2014). Les différentes scènes de l'œuvre défilent les images en mouvement d'espaces architecturaux et d'environnements naturels, reconnaissables par une multitude de points ou de particules lumineuses et de lignes inter-reliées formant des amas ou des contours plus ou moins nets. Il s'agit en fait de deux types de rendus de nuages de points similaires: les séquences de forêts sont des numérisations 3D effectuées par le collectif Ecosynth (Dandois, Baker, Olano, Parker, & Ellis, 2017a), les éléments architecturaux quant à eux, ont été créés par photogrammétrie par Lemercier lui-même. Les lieux ont ainsi été numérisés en utilisant un dispositif spécialement conçu pour porter cinq caméras miniatures de type GoPro enregistrant simultanément, captant donc au départ ces espaces numérisés avec un point de vue de 360 degrés (Rosenthal, 2014). Une des stratégies de l'artiste pour traiter une partie des nuages de points du projet a été d'effectuer une triangulation résultant en polygones formant des maillages triangulés. Pour certaines séquences, cela a donc permis d'utiliser des outils logiciels d'animation plus standards. Le résultat visuel rappelle également les dessins classiques de constellation rappelant donc le thème cosmique de l'œuvre et personnalisant d'autant plus l'esthétique du projet, Lemercier utilisant souvent des trames de motifs géométriques dans sa signature visuelle. La stratégie d'utilisation des nuages de point décrite ici est donc une avenue intéressante: bien que

spécifique à cet artiste, le résultat conserve l'aspect fantomatique souvent associé aux nuages de points tout en ajoutant des éléments graphiques nouveaux et personnalisés.

1.3.3 MARSHMALLOW LASER FEAST

Marshmallow Laser Feast est un studio créatif fondé à Londres par trois artistes, Barney Steel, Robin MC Nicholas et Ersin Han Ersin. Leurs réalisations sont surtout des installations lumineuses et des projections vidéographiques interactives à échelles variables. Ils sont notamment reconnus internationalement pour leurs récentes productions de réalité virtuelle utilisant la technologie du Lidar - *In the Eyes of the Animal* (2015), *TreehuggerWawona* (2016), XYZ (Quartier de spectacles de Montréal, 2018). Leur équipe de production est formée de plusieurs employés et indépendants dont le nombre varie selon les mandats à réaliser.

Dans une interview publiée sur la plateforme MIT Open Documentary Lab (Beyza, 2016), Han Ersin explique que le Lidar a été utilisé pour numériser des zones entières de la forêt de Grizedale au Royaume-Uni pour créer l'œuvre *In the Eyes of the Animal*, une commande réalisée pour diffusion lors du festival *Abandon Normal Device* (Marshmallow Laser Feast, 2015). L'œuvre expérientielle était présentée en extérieur aux spectateurs à l'aide de casques de réalité virtuelle, dans le parc de sculpture de la forêt même qui a été numérisée pour ce projet. Le dispositif immersif de présentation inclut également un module de vibration portatif (SubPac).

Les étapes de production sont les suivantes : enregistrement de l'espace réel à l'aide d'un numérisateur Lidar (emplacements multiples), alignement des différentes scènes avec les logiciels Point Tool ou Faro Scene, importation des nuages de points dans un logiciel exclusif basé sur l'engin de programmation nodale VVVV (codage C#) pour la colorisation(vvvv group, 2015) . pour la colorisation, les effets, l'enregistrement des animations et pour exporter les séquences vidéo.

1.3.4 FRANÇOIS QUÉVILLON

François Quévillon est un artiste qui crée des installations audiovisuelles interactives, des œuvres vidéo et des images qui sont à l'intersection de procédés d'observation scientifique et d'exploration esthétique de phénomènes environnementaux. Il s'intéresse en particulier à la visualisation de données environnementales, à la photogrammétrie et plus récemment à l'intelligence artificielle en lien avec les véhicules autonomes.

De 2010 à 2015 l'artiste a développé *Dérive*, une œuvre vidéo immersive utilisant des nuages de points d'espaces urbains réalisés par photogrammétrie et incorporant l'affichage de données météorologiques et topographiques. *Dérive* transporte donc le spectateur dans un parcours, qu'il peut partiellement influencer, ou l'on semble voler au-dessus puis dans une ville selon la version présentée. La trame sonore est aussi dictée par ce type de données. Le projet a été présenté en différentes formules soit sur écran, en projection vidéo grand format soit par casque de réalité virtuelle (VR). Ces différents modes de présentation ont changé selon l'ajout des lieux captés et les occasions de diffusion qui s'ajoutaient : Orléans, Lyon, Montréal, Sherbrooke, New York, Albuquerque.

La vidéo et la visualisation de données météo y sont effectuées en temps réel et les mouvements des spectateurs sont de plus captés par un dispositif optique pour influencer les plans de la caméra virtuelle. Les déplacements vers l'avant vont mener à un zoom vers l'avant (détails au sol) ou vers l'arrière (vue aérienne). Les déplacements latéraux permettent de déplacer la caméra dans un sens ou dans l'autre.

L'œuvre est donc toujours changeante, les nuages de points présentés étant utilisés comme coordonnées pour produire des traînées lumineuses qui varient selon des données météorologiques qu'un logiciel traite en temps réel. L'ensemble des données transforment dynamiquement l'apparence des environnements. Voici une liste de ces variables numériques utilisées (Quévillon, 2019) :

- Heure locale : Taille et luminosité des points (relatif au lever et coucher du soleil)
- Température : Valeurs colorimétriques des points
- Nébulosité : Saturation et luminosité des points
- Vent : Déplacements des points reflétant la vitesse et la direction du vent
- Visibilité : Intensité d'un effet de profondeur de champ et transparence des points
- Humidité : Distance du focus de la profondeur de champ et netteté des points
- Précipitations : Lignes tracées du ciel au sol et déstabilisation des points
- Phases lunaires : Luminosité des lignes la nuit

Cette œuvre de François Quévillon n'utilise pas directement la technologie du Lidar mais les modélisations produites pour ce projet en ont toutes les mêmes caractéristiques. En fait, selon l'expérience de l'artiste, en début de projet les Lidar étaient encore moins répandus ou accessibles, donc hors de la portée des créateurs indépendants. Les nuages de points sont ici avant tout issus de numérisations photogrammétriques réalisées par l'artiste, de modélisations 3D à partir de photos aériennes, de données topographiques ou de plans de villes ou de régions converties en nuages de points. De plus, le résultat du nuage généré est assez imprévisible ou parfois même erratique par rapport à la régularité des relevés produits par Lidar, car il dépend de beaucoup d'éléments, notamment la prise de vue, la qualité et résolution des images et les logiciels utilisés.

La méthode de Quévillon a été itérative, débutant par des expérimentations avec le langage Java (avec le logiciel Processing) pour poursuivre ensuite plutôt en programmation C++. Les étapes de production pour les différentes versions de Dérive sont comme suit: l'artiste débute par un choix de sites spécifiques pour la photogrammétrie. Les nuages de points sont produits sans valeurs colorimétriques, il procède alors à l'intégration d'autres données spatiales (topographie, plan de ville, modélisations, etc.) pour assembler un nuage de points pouvant être perçu à différentes échelles. Au besoin, il recommence les étapes de numérisation de l'environnement. Enfin, il intègre les données

des nuages de points à l'application créée pour Dérive qui permet de transformer la visualisation à l'aide de données environnementales locales (des données météorologiques par exemple).

1.4 PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE

En étudiant les projets artistiques précédemment mentionnés, il apparaît que chaque artiste ou studio développe sa propre méthode de production en fonction d'un contexte particulier justifiant une certaine configuration particulière des technologies de captation à l'aide de nuages de points. Tout en demeurant relativement dans la même famille de produits (par exemple avec les logiciels Processing et VVVV), on constate un mode de production axé sur le résultat mais dont il est difficile de dégager une méthode systématique. Ayant une expérience en production immersive et en effets visuels, je pense qu'une réflexion plus poussée sur les technologies et les méthodes de conception d'œuvres immersives constitue un terrain d'étude riche à explorer. Il apparaît important de mieux comprendre le processus de conception associé aux technologies de nuages de points en sachant que celui-ci est à la fois guidé par des pratiques industrielles et par un imaginaire artistique qui permet d'en dévoiler le potentiel expressif. Ce potentiel est bien entendu lié à la perception de l'espace de l'être humain et on peut le comprendre de manière théorique comme un double de la réalité, d'où l'utilisation du concept d'hétérotopie qui reviendra pour encadrer la réflexion dans les chapitres suivants.

Ce mémoire devrait donc contribuer à systématiser et mieux cerner une pratique qui, pour l'instant, repose trop souvent sur une constellation de stratégies individuelles puisque chaque artiste ou studio développe ses techniques et processus au détriment du partage des connaissances, qui pourrait être davantage mis en avant. En effet, il est possible de trouver des informations sur les œuvres elles-mêmes dans des répertoires d'œuvres numériques immersives mais il n'y a souvent que peu de données pertinentes au sujet des processus de travail des créateurs. Il n'existe souvent pas de documentation sur leur pipeline de production, l'organisation et le développement de projets immersifs ou encore sur les solutions de travail propres à cette technologie bien particulière que sont les nuages de points. Pourtant, la création dans ce domaine est dynamique et en pleine expansion

(Société des arts technologiques, 2015c). Procédant à l'inverse, selon mon expérience, je pense qu'il est possible d'adapter certains pipelines de production provenant des effets visuels pour la conception de projets immersifs.

Le principal problème que je constate est donc le suivant : il existe peu ou pas d'outils de conception permettant de mieux articuler le dialogue entre art et technologie pour la création d'expériences immersives utilisant les technologies de nuages de points. Pourtant, comme le démontre le précédent chapitre, l'usage de cette technologie est très répandu et est utilisé dans une très grande variété de situations et de contextes. Par exemple, François Quévillon utilise une méthode de traitement des échantillons de données numériques. Son approche itérative peut s'appliquer plus généralement à la création de multiples projets. De même, la méthode de traitement des données pour les dispositifs *Full Dome* (Lemercier, 2014a) de Joanie Lemercier permet de comprendre comment les données sont acquises et traitées.

Pour ma part, en tant que praticien du domaine et directement en contact quotidien avec des technologies complexes en industrie, il semble logique d'appliquer un processus de conception systématique dans le cadre d'un projet d'exploration des outils liés aux nuages de points menant à la création d'une œuvre inédite.

1.4.1 QUESTION DE RECHERCHE

Comment saisir le processus de conception d'une expérience immersive à l'aide des nuages de points en analysant les rétroactions que l'outil technologique employé produit sur le processus création ?

1.4.2 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

Cette recherche est divisée en trois objectifs:

Premièrement, l'objectif est d'ancrer la recherche dans une création. Il s'agit d'utiliser le contexte de la production d'une œuvre artistique vidéo réalisée avec les nuages de points pour documenter l'influence que peut exercer cette technologie sur un processus de création en art numérique.

Deuxièmement, en relation avec le premier objectif, cette recherche vise à appliquer le concept d'hétérotopie selon Foucault comme une métaphore générative permettant d'orienter les expérimentations artistiques sur le plan de l'exploration d'espaces numérisés - le schéma heuristique du projet permettra d'en visualiser les ramifications.

Troisièmement, il s'agit de développer un savoir situé: en procédant aux deux objectifs précédents, ce projet permettra de dégager un processus de conception (*workflow*) d'usage des technologies de nuages de points qui pourrait s'appliquer à de multiples pratiques artistiques.

1.4.3 HYPOTHÈSE DE RECHERCHE

Les technologies de captation à l'aide de nuages de points permettent d'enregistrer des lieux réels, que ce soit pour des décors virtuels, la prévisualisation en effet visuels ou pour la numérisation d'une archive urbanistique. Ces fonctions ouvrent une foule de possibilités tant en industries que pour les créateurs indépendants. La prémissse de cette recherche est que ces technologies influencent de plus en le processus de conception des artistes en art numérique ainsi que des praticiens de l'industrie créative. Poussés par l'utilisation et l'accessibilité grandissante des technologies de nuages de points, ceux-ci explorent, sous la forme de productions artistiques innovantes, les possibilités créatives de ces outils, souvent en format immersif.

Nous pensons qu'en appliquant le modèle de la recherche-création nous serons en mesure de mieux documenter et saisir comment la pratique artistique peut être influencée par l'utilisation des technologies de captation afin d'en définir les méthodes et les pistes de résolution de problèmes appliquées. Cela est fait dans l'optique de dégager un modèle de pipeline de production.

Nous tenterons également de définir ce qu'impliquent ces possibilités technologiques dans une démarche créative s'intéressant à la perception de l'espace et de son double virtuel par le cadre théorique que nous permet la notion d'hétérotopie émise par le philosophe Michel Foucault.

Tel que souligné dans l'avant-propos, de par notre profil, entre les arts numériques et les effets visuels, nous pensons qu'il est possible d'opérer un transfert de méthodes de conception de l'art vers l'industrie et vice-versa. En d'autres termes, une approche de recherche-création permettrait de développer une méthode de conception utilisant l'approche propre à la prévisualisation en production virtuelle applicable à des créations visuelles dans d'autres champs connexes.

CHAPITRE 2

MÉTHODE DE PRODUCTION ITÉRATIVE

2.1 RECHERCHE-CRÉATION

Concernant l'approche de recherche-création suivie dans ce projet, il s'agit d'une recherche basée sur la pratique. Il a été entrepris de tenter de dégager des idées nouvelles et une réflexion issue de la pratique d'une technologie, en s'appuyant sur des périodes d'expérimentation successives. C'est également une approche réflexive: les modifications apportées à la pratique et les pistes de recherches nouvelles ont été observées et documentées.

2.2 MÉTHODE DU PROJET HÉTÉROTOPIE

La méthode de recherche-création appliquée ici est itérative: des prototypes, ou versions de séquences animées ont été réalisés avec différents outils logiciels choisis pour mieux comprendre comment travailler avec les technologies de nuages de points. Les séquences produites, ainsi que les images fixes, correspondent à des situations de productions pour chaque version du projet : chacune correspond à l'utilisation d'un outil logiciel permettant de traiter, d'explorer ou d'animer des nuages de points issus d'un appareil Lidar).

Il s'agit donc d'une méthode d'observation de la pratique lors de situations de production et des réflexions que ce travail provoque pour poursuivre l'exploration, parfois dans de nouvelles directions. Les résultats ont ensuite donné des informations pour interpréter les particularités de ce médium et de ses possibilités artistiques. L'intention est de documenter comment cette technologie change notre perception de lieux et d'espaces et comment cela peut contribuer à générer des œuvres d'arts ou d'autres avenues de recherches. Autrement dit, il ya après chaque situation de production,

l'anticipation d'une nouvelle étape d'exploration dont les paramètres exacts étaient encore inconnus en début de projet. Ce processus est guidé par la rétroaction entre l'usage de cette technologie et les idées que cela amène au praticien. Cette observation de la pratique s'appuie sur un journal de bord audio, de notes ou de tests rendus en images fixes ou en séquences vidéo. Ces éléments constituent le récit de conception du projet alors que les réflexions au dernier chapitre permettront de synthétiser ce qui en ressort, sous la forme de réflexion et de schémas.

Par rapport à la méthodologie du projet, le concept d'hétérotopie a guidé la recherche aux étapes charnières. En gardant en tête ce «filtre» intellectuel lors de mes expérimentations avec la technologie de nuages de points, j'ai pu établir un fil conducteur entre ce concept, le choix des lieux explorés de manière virtuelle et les possibilités soulevées par le projet.

2.2.1 PRÉ TERRAIN: EXPÉRIMENTATIONS PRÉLIMINAIRES

Le pré terrain est constitué de l'analyse de projets artistiques antérieurs à la recherche qui ont permis de formuler la problématique, la question de recherche et l'hypothèse.

2.2.2 TERRAIN D'ÉTUDE: OBSERVATION DE LA PRATIQUE DU PROJET

Le terrain d'étude consistera ici à faire de l'observation de la pratique en revisitant les versions du projet *Hétérotopie* produites en observant comment, de manière itérative, cela a changé ou influencé la manière de travailler. Nous verrons comment le travail s'est fait sur le plan technologique et les idées et pistes de solutions qui en ont émergé. Il s'agit en particulier de valider s'il y a une modification de la pratique lors du travail avec les nuages de points en utilisant différents outils logiciels, et quelles sont les implications de ces changements.

2.3 ATTEINTE DES OBJECTIFS

L'atteinte des objectifs s'est d'abord faite par l'analyse de productions artistiques utilisant les nuages de points qui ont permis de dégager des méthodes de traitement des nuages de points.

À partir d'informations clés sur les différentes versions du projet *Hétérotopie virtuelle* notés dans le journal de bord audio enregistré lors de la création des différentes versions, de notes de production et de schémas et ont été produits pour identifier les constantes et les variables de chaque étape de création avec les nuages de points. L'importance du concept d'hétérotopie selon Foucault pour orienter la démarche créative est argumentée sous forme de réflexions et étayée dans le schéma heuristique.

2.3 SCHÉMA HEURISTIQUE DU PROJET

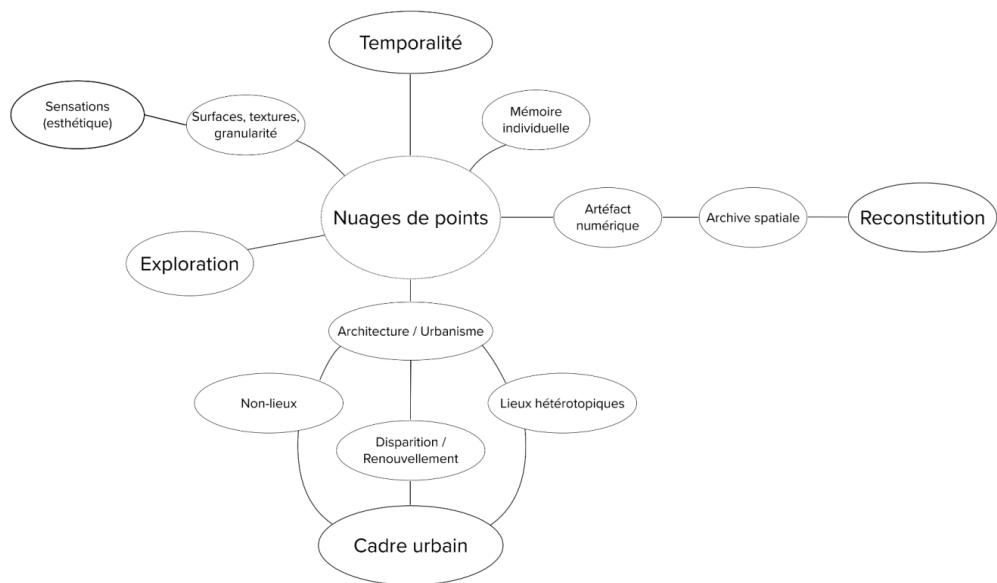


Figure 2: Schémas heuristiques du projet *Hétérotopie*. © Samy Lamouti

CHAPITRE 3

RECHERCHE DU PROJET HÉTÉROTOPIE

3.1 LE CONCEPT DE L'HÉTÉROTOPIE SELON FOUCAULT

« Je crois qu'il y a, et ceci dans toutes sociétés, des utopies qui ont un lieu précis et réel. [...] Or parmi tous ces lieux il y en a qui sont absolument différents... Ce sont en quelque sorte des contre-espaces. » (Foucault, 2004)

Le concept d'hétérotopie s'est avéré une source d'inspiration dans ma pratique personnelle depuis un certain nombre d'années, en particulier dans le cadre d'une réflexion sur les divers espaces que je documentais d'abord par la photographie puis par des expérimentations avec la photogrammétrie. Je travaillais alors à mettre sur pied une méthode de travail efficace pour documenter certains lieux en captant des centaines de photographies d'espaces réels pour ensuite les incorporer en nuages de points virtuels, testant ainsi divers logiciels. Les lieux qui m'intéressaient le plus dans cette démarche - lieux vacants de la ville d'Alger, éléments de topographie dans le désert ou dans des ruines romaines - avaient toujours une certaine altérité en commun, c'est-à-dire soit d'être plus ou moins en marge des règles ou de la normalité de la ville elle-même ou de son quotidien. L'idée de mettre au centre d'un projet de création un concept particulier forgé par le philosophe Michel Foucault a ensuite pris davantage de sens en réfléchissant à la dimension temporelle qu'il permet d'aborder et à son lien direct avec l'architecture de la ville.

Afin de démontrer les liens entre les archives, les lieux et les espaces, il est essentiel de s'arrêter à ce que le philosophe a exprimé par rapport à l'idée d'archive:

«... l'idée de tout accumuler, l'idée en quelque sorte d'arrêter le temps, ou plutôt de le laisser se déposer à l'infini dans un certain espace privilégié, l'idée de constituer l'archive générale d'une culture, la volonté d'enfermer dans un lieu tous les temps, toutes les époques, toutes les formes et tous les goûts, l'idée de constituer un espace de tous les temps - comme si cet espace pouvait être lui-même définitivement hors du temps - c'est là

une idée tout-à-fait moderne; le musée et la bibliothèque sont des hétérotopies propres à notre culture.» (Foucault, 2004)

Cette citation porte à réfléchir au concept d'archive dans le sens où ici, les nuages de points provenant d'espaces réels numérisés peuvent devenir cette trace d'un temps donné que l'on peut consulter et analyser hors des contraintes spatiales ou temporelles. La numérisation 3D est la chose qui se rapproche probablement le plus de la mémoire spatiale humaine, étant à la fois la trace d'espaces et un non-lieu virtuel.

L'auteur Pascal Krajewski a proposé, dans le champ de la recherche en art numérique et architecture, une typologie des hétérotopies. Pour résumer succinctement son propos, celles-ci se diviseraient en hétérotopies domestiques, collectives, et écologiques. En fait, cette classification en trois groupes permet de classer le concept en fonction de l'échelle de ces lieux ou non-lieux. Ainsi, l'hétérotopie domestique concerne l'espace de jardin, une chambre, un lit, dans une maison donnée. Les hétérotopies collectives, ce sont les lieux communs de nos échanges :les cimetières, les musées, les bibliothèques, et les prisons. Enfin, nous avons les hétérotopies écologiques se rapportant aux parties communes de natures et d'aménagement appartenant à l'ensemble de l'humanité :les plages, les ruines et les jardins. L'auteur utilise ainsi cette typologie pour analyser et classer différentes formes d'interventions d'artistes tels que Marilena Skavara, Christa Sommerer & Laurent Mignonneau (collectif Scenocosme). Il décrit en fait comment, de par leurs interventions ou usages des lieux, ils activent le concept d'hétérotopie dans ses différentes dimensions.

En rapport avec notre projet, l'auteur traite de ce qui est l'essence de la présente proposition: la création d'espaces intermédiaires, entre le réel et le virtuel, entre l'usage humain et le traitement automatisé des machines:

« De par ses caractères dynamiques et interactifs, l'architecture technologique devient génératrice d'extra-territorialité : elle crée des objets qui contiennent des puissances génétiques d'autres espaces, elle bâtit des lieux qui ouvrent sur d'autres réalités, formant comme un nexus de contenus et d'informations volatiles. La communication qui se met en branle se fait entre, d'un côté, un environnement à la fois élargi et réduit (l'algorithme de l'œuvre définit ce qui, dans l'espace du réel, sera accepté comme input et information) et de l'autre, un individu sollicité et comme cobaye ouvrier et comme hôte désirant. L'architecture n'est plus seulement fonctionnelle (même « multi-fonctions »), elle est encore fictionnelle »(Krajewski, 2013).

Il est intéressant de souligner, dans le cas de l'usage du concept en tant que métaphore, que la transformation du lieu de par ses captations le pousse progressivement du côté non plus de sa fonction mais de l'imaginaire, de la fiction.

3.2 PRÉ-TERRAIN

Certains projets ont au préalable orienté mes recherches vers la technologie des nuages de points. Après plusieurs expérimentations avec la photogrammétrie ainsi que des projets de vidéos produits avec des systèmes de simulation de particules c'est le cas de *Nuée | Swarm* (Breuleux, Chenennou, & Lamouti, 2013) et *Re-génération* (Société des arts technologiques, 2015b), j'ai voulu poursuivre la création avec des technologies similaires tout en réfléchissant aux défis rencontrés lors de la production au niveau de la séquence du pipeline de production.

Nuée | Swarm a été créé avec le logiciel Cinema 4D. L'œuvre immersive a en partie été créée lors d'une résidence de création à la SAT et a été présentée lors du Symposium IX en format 360 degrés (8 projecteurs) dans le dôme de la Satosphère. La pièce audiovisuelle montre un grand nombre de composantes formant des groupes en mouvement, synchronisés et fluctuants en vitesse et en densité, rappelant les déplacements libres et instinctifs de grands groupes d'animaux tels que le font des bancs de poissons. Lorsque présenté en direct, le spectateur semble être englouti graduellement par ce qui semble être des centaines de poissons. Ces nuées simulées et leurs tracés complexes ont été produits avec la technologie de génération de particules virtuelles et la technique de synthèse granulaire pour la trame sonore.

Comparativement au projet qui sera décrit plus loin, à cause d'un environnement technologique nouveau, la séquence de production fonctionnait par essai-erreur puisqu'il n'était pas possible de réaliser de prévisualisation exacte. En effet, bien que certains mouvements effectués par les groupes de particules étaient d'abord basés sur des courbes vectorielles extraites de vidéos de

référence d'animaux réels, ces simulations « physiques» ne pouvaient être reproduites à cause des paramètres de calcul de randomisation combinée à la grande quantité de particules.

D'autres aspects ont été développés lors de ce projet : enregistrer des vidéos en 360 degrés et gérer le rendu et sa qualité sur plusieurs ordinateurs. De plus, l'équipe de production avait développé des stratégies pour produire l'effet de continuité de la simulation. Par exemple, le montage vidéo était nécessaire pour qu'une nuée disparaîsse d'un côté et semble revenir de l'autre. Ces éléments sont à souligner puisqu'ils peuvent constituer des exemples de nœuds problématiques dans la séquence de production de projets vidéo utilisant des technologies 3D.

Il y a cependant un certain nombre de caractéristiques, au niveau de la création, qui nous ont amenées à notre recherche sur la créativité à l'aide de nuages de points: une esthétique minimaliste, un grand nombre de points (ici des nuages de particules) pouvant produire un effet d'immersion. Ce projet m'a donc amené à vouloir investiguer comment les systèmes de génération de particules virtuelles pourraient interagir avec les nuages de points et les scans 3D. Entreprendre un projet utilisant des nuages de points semblait être une suite logique et permettrait de revenir à mon intérêt pour l'architecture et l'exploration urbaine.

3.2.1 PREMIÈRE APPROCHE DU PROJET HÉTÉROTOPIE VIRTUELLE

En 2016, après avoir participé à un appel à projet pour l'évènement Printemps numérique en collaboration avec le Quartier de l'innovation, j'ai eu le mandat de réaliser un projet qui permettrait de visualiser des numérisations de cette zone de la ville de Montréal. Ces «scans» totalisant approximativement 3.5 km²ont été réalisés par la firme Olameter Inc. pour l'inspection et la construction à partir d'un appareil Lidar de marque Leica installé sur un véhicule routier. Cette archive 3D du «Quartier de l'innovation» est en fait constituée de plusieurs fichiers d'une taille variant de 2 à 10 gigabits en format de type .laz contenant également des informations colorimétriques (RGB).

Mon expérience avec la photogrammétrie m'avait d'abord permis de comprendre les problématiques propres aux nuages de points. Le but de l'appel à projet était de trouver un moyen d'explorer ces numérisations et d'en restituer des portions en séquences vidéo amenant un aspect esthétique et d'en faire une interprétation artistique.

3.2.2 TRAVAIL PRÉPARATOIRE

La préparation du projet a impliqué que la création à l'aide de cette archive de nuages de points se ferait en choisissant des emplacements comme points de repères pour produire des séquences de mouvements de caméra : *zoom-in*, *travelling*, etc. Il a été déterminé qu'il serait probablement nécessaire d'expérimenter avec plusieurs logiciels d'animation 3D et de rendu graphique.

La version finale de l'œuvre à réaliser n'était pas déterminée. Le travail a été de se concentrer sur l'expérimentation pour valider les possibilités de différents outils 3D selon trois sous-critères : possibilités esthétiques (rendu, apparence des points, résolution, éclairage, effets visuels en parallèle), convivialité d'utilisation (fluidité de la navigation, temps de latence) et compatibilité avec les différents supports de diffusion (écrans, projecteurs, mur Led, Dôme, multi-écrans, etc.).

À partir de la documentation des résultats des situations de production il a été entrepris de schématiser les étapes de production en une séquence d'étapes simplifiées et explicites. Les résultats de recherches pour chaque situation de production ont été documentés dans un journal de bord audio, de 2017 à 2020.

3.2.3 LE CHOIX DES LIEUX

À cette étape, il a fallu travailler avec des portions découpées du nuage de points du quartier - le manipuler sa totalité était alors impossible. Le choix de certains lieux au préalable était donc de mise, et une bonne connaissance de ce secteur y a contribué. C'est l'axe autour du boulevard René-

Lévesque entre les rues Atwater et Guy-Concordia qui semblait bien convenir car c'est une zone avec des repères visuels saisissants avec d'une part son interface routière composée de grandes structures de béton brut, et d'autre part des bâtiments contemporains et modernes semblant cohabiter avec des habitations basses. C'est un ensemble qui caractérise bien le paysage urbain nord-américain par ses contrastes d'échelles. Parmi cet environnement, l'hôpital de Montréal pour enfants (le *Children's*, un édifice démoli depuis) avec sa gigantesque cheminée et d'autres endroits familiers divers qui ont également servi de points de repères. Dans les débuts de cette exploration virtuelle de la ville, j'ai donc voulu reproduire les effets de l'exploration de la ville mais également tenter de reproduire l'effet d'une perception «autre» du temps. C'est en explorant les visualisations des données numériques de captation que l'idée de travailler à partir du concept d'hétérotopie est apparue. En effet, si les modélisations reposent sur des données réelles, elles transforment les lieux en une sorte d'espace fantomatique étrange. Nous circulons en choisissant n'importe quelle perspective. Le Quartier de l'Innovation, en tant que regroupement de lieux d'enseignement, de recherche et d'entreprises, constitue une forme d'espace hétérotopique fictif. Sa transformation en nuage de points accentue la virtualisation de l'architecture. Nous visitions un lieu qui existait en termes de données réelles mais modélisé comme une pure représentation virtuelle.

3.3 LES ITÉRATIONS DU PROJET HÉTÉROTOPIE VIRTUELLE

3.3.1 ITÉRATION1 : CINEMA 4D - MAXWELL (2016)

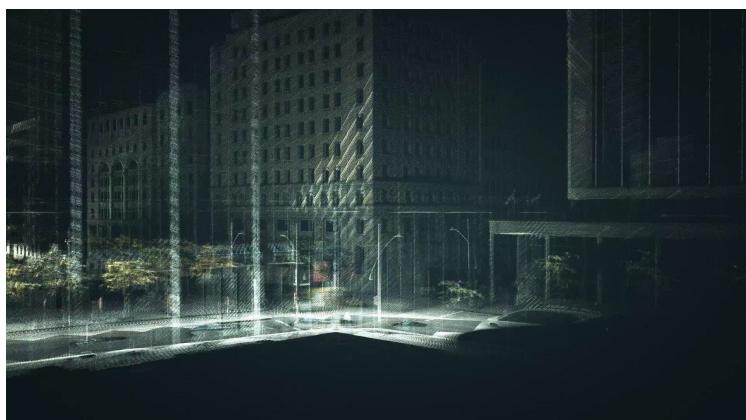


Fig. 3 : Rendu de l'itération 1: Cinema 4D. © Samy Lamouti

Puisque le logiciel Cinema 4D s'est imposé, lors du projet Swarm pour la simulation de particules, l'outil nous semblait comme étant le choix le plus logique pour la génération de la première version du projet. À l'époque, il n'était pas possible d'importer les nuages de points du projet directement dans le logiciel. Le format .laz ou .las n'était pas «natif» ou n'était pas compatible avec la plupart des logiciels d'imagerie de synthèse 3D. Tenter de convertir les nuages de points en maillage triangulés était alors une solution qui était encore envisagée mais il fut impossible de recevoir les numérisations du Quartier de l'Innovation dans un format polygonal lisible (*polygon mesh*). La recherche d'une solution nous a donc contraints à explorer des modules externes (plugiciels) existants pour lire les formats de nuages de points à même Cinema 4D. Pour l'ensemble des versions, la zone explorée est réduite à environ 1km², soit environ 25 800 000 de points. Pour cette itération, le module LazPoint 2 a été utilisé pour générer des séquences satisfaisantes visuellement. Par contre, étant donné que les environnements de la plupart des logiciels n'étaient pas configurés pour ce type d'usage, de nombreux problèmes d'affichage, de calcul, et de gestion des données sont apparus lors de la prévisualisation de la composition (*layout*) et du rendu. En général les manipulations dans le logiciel étaient difficiles et avec un temps de latence important. Le temps de rendu mobilisait alors beaucoup de ressources matérielles. Malgré l'usage d'un ordinateur spécialement configuré pour la tâche à effectuer, les rendus contenaient de nombreux problèmes d'affichage: scintillement de certains points, apparition et disparition de certains blocs de pixels (*flickering*). En revanche, ces problèmes et accidents de parcours ont généré des idées créatives, pour les contourner ou les utiliser à bon escient. Nous avons alors pensé qu'il serait intéressant de pouvoir contrôler ces effets. Certains de ces effets d'interférence (*glitch*) ajoutaient un aspect rythmique intéressant à la séquence. Ce type d'effet est constitutif du médium des nuages de points. Peut-être que le nuage de points pourrait être découpé pour afficher ces blocs successivement. Pour mitiger les problèmes de temps de rendu cette étape nous avons utilisé un nouveau mode de calcul en basant notre rendu sur le processeur graphique (GPU) et non plus le CPU. Le moteur de rendu 3D utilisé était Maxwell.

La création s'est poursuivie pour la première version avec le module Sintrix, un outil qui est désormais discontinué. Ce module a permis de traiter les nuages de points comme des polygones en conservant l'apparence de points. Il est donc possible de placer de l'éclairage de type *point light* seulement. La qualité et la finesse des rendus ont été améliorées mais il n'était pas possible d'afficher les couleurs, ces informations n'étant pas prises en charge par le module.

Spécifications de l'ordinateur utilisé : Processeur i7, 2600 K. Carte graphique: GTX 970. Mémoire vive: 32 GB RAM. Système d'Exploitation: Windows 10. Logiciel: Cinema 4D R16.

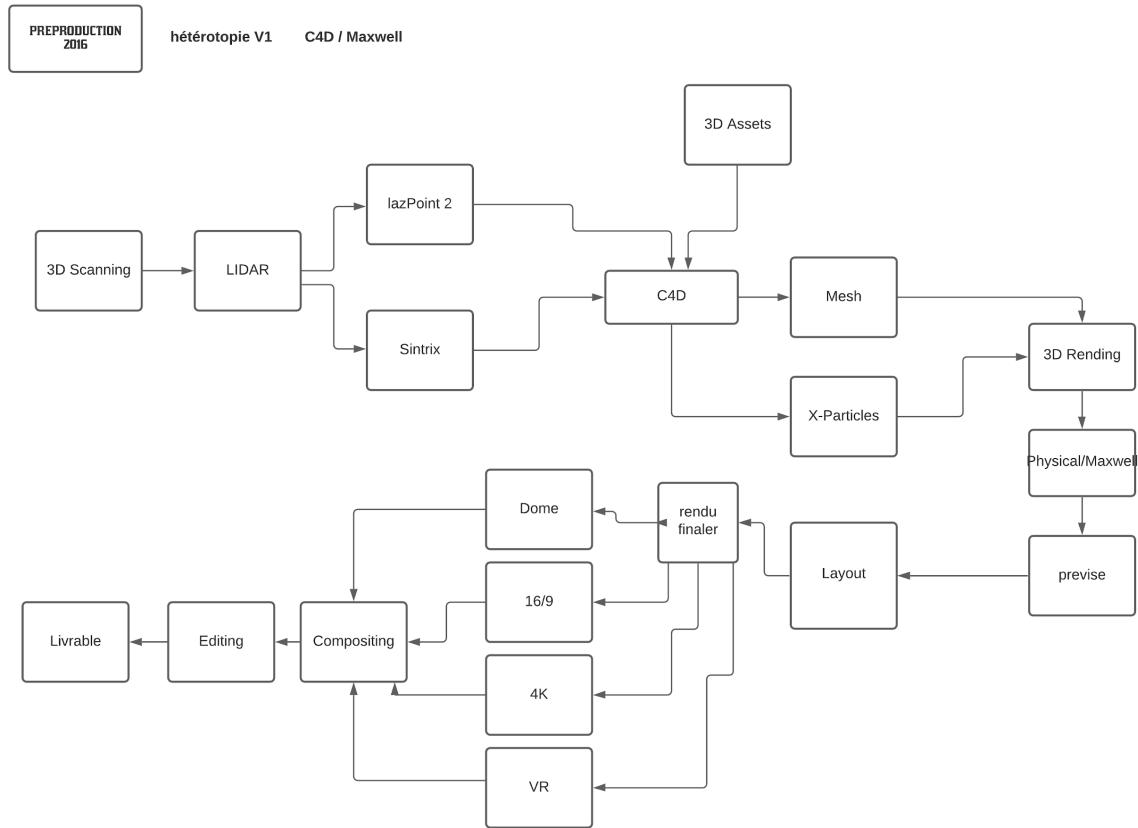


Figure 4 : Schémas de production de l'itération 1. © Samy Lamouti

La figure 5 montre le processus par lequel le projet a été rendu, complété et conceptualisé. Selon notre conception du projet, une fois le *layout* complété, il était possible de transposer les modélisations pour de multiples formats (dôme de projection, cinéma et réalité virtuelle). On observe toutefois que le processus a reposé sur une série d'étapes en cascades.

3.3.2 ITÉRATION 2: MAYA - ARNOLD (2016)

L'idée d'expérimenter sur le logiciel Maya couplé au moteur de rendu Arnold est venu du fait de mon expérience de travail en effets visuels pour le cinéma pour un département d'enregistrement de mouvement de caméra (*matchmoving*) qui utilise cet outil. Les lieux de tournage pour certaines scènes nécessitant des effets visuels complexes sont souvent numérisés en 3D pour ensuite servir de surfaces pour interagir avec les simulations d'effets physiques (ex.: collisions). Dans le travail en industrie, ces fichiers 3D de décor réel sont déjà convertis en formats polygonaux (FBX, OBJ, etc.). Les scènes numérisées doivent alors être découpées puisque certaines scènes sont très complexes, puis elles sont intégrées dans le pipeline de production.

Pour les essais de cette version du projet je me suis inspiré de ces méthodes. J'ai donc expérimenté avec Las Tool, un logiciel permettant de convertir les nuages de points en polygones pour travailler les nuages de points directement dans Maya. Ce type de technique est intéressant mais le problème de l'utilisation directe des nuages de points restait entier. Sur Maya, avec les moyens d'un petit studio créatif il reste très laborieux de mener un travail d'exploration fluide d'un environnement 3D composé de nuages de points massifs et surtout, les problèmes de rendus restent les mêmes. De plus, les artistes indépendants n'ont pour la plupart pas accès à des serveurs en grappes dédiés au rendu (*renderfarm*). Quelques tests sont faits avec l'importation de points auxquels sont appliquées des particules simulées (MEL dans Maya). Les problèmes de rendus et d'affichages de la couleur demeurent.

Certains modules externes existent pour Maya mais ils demeurent souvent des solutions partielles faites «maison». Le problème noté à cette étape avec les plugiciels est qu'ils risquent souvent d'être discontinués ou de n'être plus supportés par de nouvelles versions des logiciels

Spécifications de l'ordinateur utilisé : Processeur i7, 2600 K. Carte graphique: GTX 970. Mémoire vive: 32 GB RAM.

Système d'Exploitation: Windows 10. Logiciel: Maya 2017.

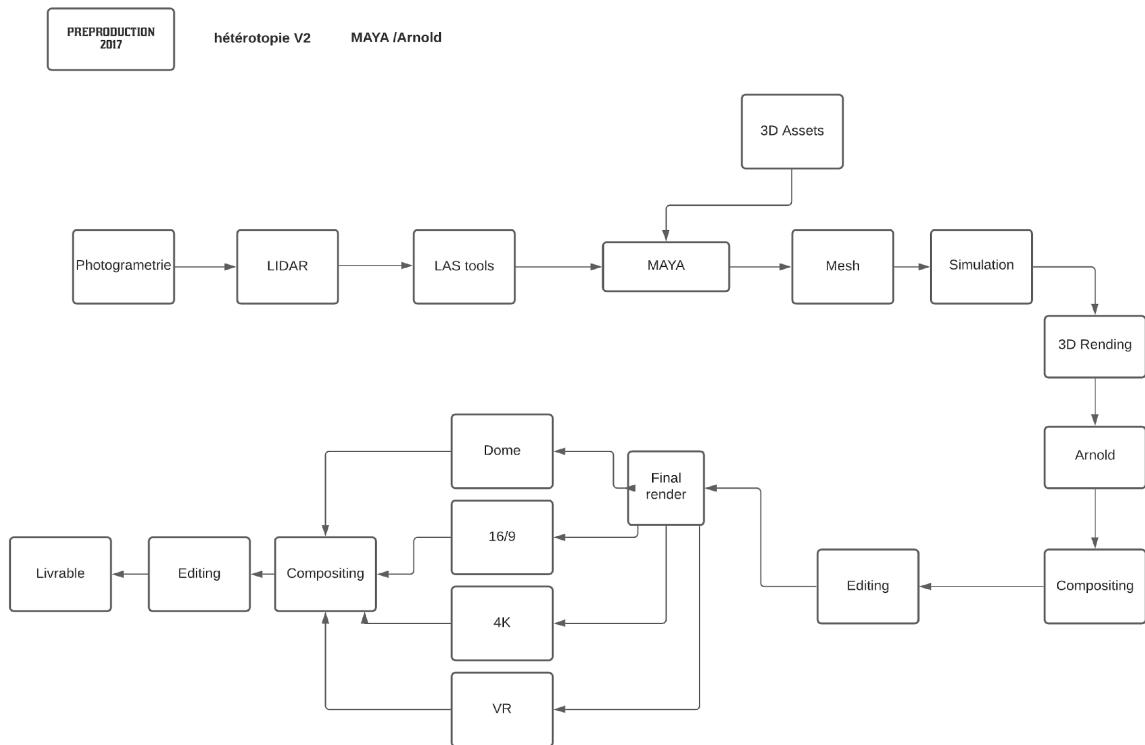


Figure 5 : Schémas de production de l'itération 2. © Samy Lamouti

Dans la figure 6 nous voyons que l'idée était de simplifier la chaîne d'utilisation des nuages de points avec un seul outil de type «*plug-in*» soit LAS Tools. L'étape suivant celle du logiciel 3D est l'utilisation des points convertis en polygones (*mesh*). Toutefois, la complexité de la gestion de plusieurs formats de rendus demeure, ainsi que l'ordre unidirectionnel de la séquence de production.

3.3.3 ITÉRATION 3: RETOUR À CINÉMA 4D - OCTANE (2017)

Le début de 2017 marque le retour des expérimentations avec Cinema 4D. Certains éléments sont prometteurs : les moteurs de rendus Octane et Redshift peuvent maximiser l'utilisation des fonctions GPU par les fonctions complexes d'adaptabilité (*scalability*) permettant d'harmoniser les performances du côté logiciel avec les ressources matérielles. Les avantages d'utiliser le moteur de rendu Octane permettent un gain significatif dans le temps de rendu, jusqu'à 10 fois le temps requis dans la première itération du projet. Le module Sintrix est tout de même utilisé pour importer les nuages de points dans le logiciel. Les gains de temps sur la prévisualisation sont également bons. Il est aussi possible d'expérimenter avec les simulations (avec X Particles). La visualisation se fait également plus rapidement, permettant d'explorer l'archive de la ville.

Cette situation de production a donc été intéressante pour de nouvelles idées d'effets visuels à appliquer et tester d'autres méthodes de rendu plus accessibles pour une petit équipe de production, mais pour la séquence de production un problème fondamental demeure: le processus de création-production est trop linéaire. Les rendus prennent beaucoup de temps et doivent être refaits s'il y a des modifications à apporter. De plus, toute cette problématique ne pose pas la base d'un travail plus collaboratif.

Spécifications de l'ordinateur utilisé : Processeur i7, 2600 K. Carte graphique: GTX 1080. Mémoire vive: 32 GB RAM. Système d'Exploitation: Windows 10. Logiciel: Cinema 4D R17.

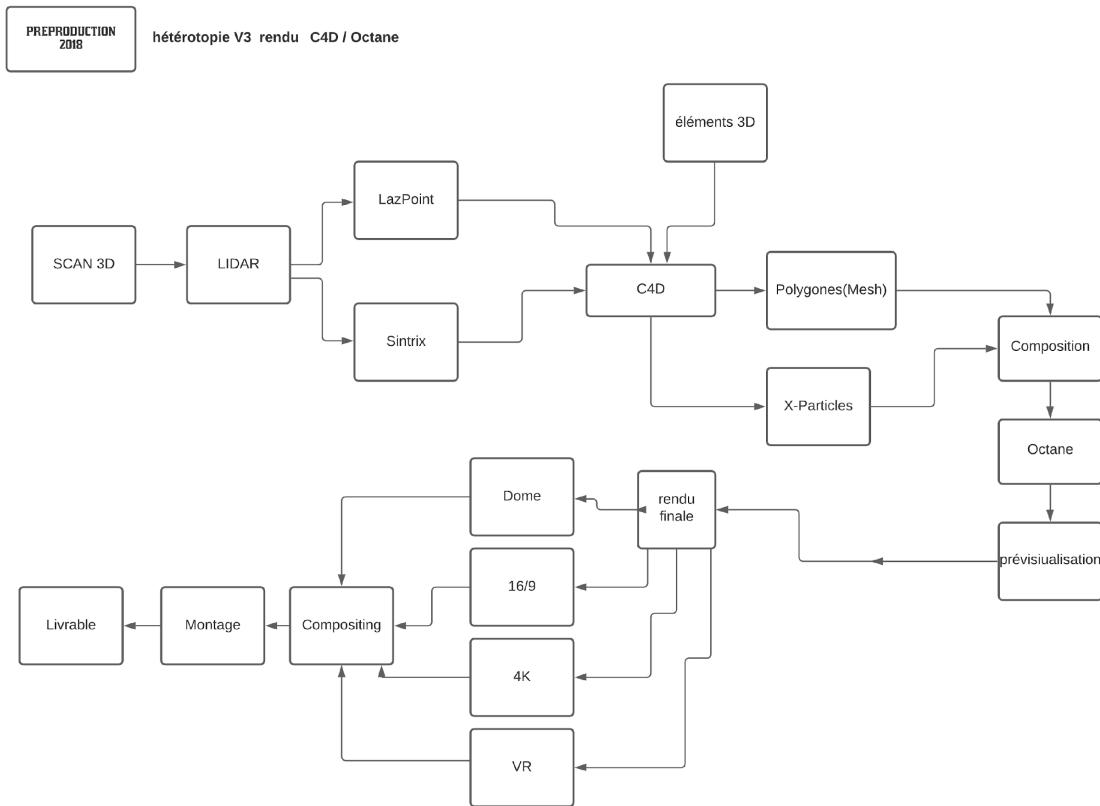


Figure 6 : Schémas de production de l'itération 3. © Samy Lamouti

La figure 6 montre une conception qui ramène davantage d'options pour traiter les nuages de points et ajouter des effets : Laz Point, Sintrix, X Particles. La réflexion sur la chaîne de production progresse sans toutefois qu'il y ait de changements majeurs à la fin du processus de rendu.

3.3.4 RECHERCHE AVEC LE LOGICIEL 3D BLENDER (2018)

Une brève période d'expérimentation a été faite avec le logiciel Blender. Ce logiciel libre et gratuit de modélisation et de rendu a connu dans les dernières années un regain d'intérêt pour les communautés d'utilisateurs de nuages de points dans le domaine de la cartographie 3D, de la géographie et de la géolocalisation. Il est notamment utilisé en complément de plateformes telles que ArcGIS ou QGis. Par défaut, Blender ne supporte pas l'affichage des fichiers de nuages de points pour l'éclairage ou la colorisation. Par contre, la communauté d'utilisateurs du logiciel a permis de distribuer des scripts simples pour les visualiser en couleurs. Les tests réalisés pour le projet suivent

une méthode similaire à la version utilisant Maya: il est possible d'appliquer les formes polygonales de base (cubes, sphères, etc.) à chaque point ou sous-groupes de points - au lieu d'une simulation de particules. D'un point de vue créatif, les résultats sont intéressants mais ils sont limités. Toutefois le problème du temps de rendu est inchangé.

3.3.5 ITÉRATION 4: UNREAL ENGINE (2019-2020)



Fig. 7 Rendu de l'itération 4: Unreal Engine. © Samy Lamouti

Le travail à l'aide du logiciel de création de jeux vidéo Unreal s'est fait en plusieurs séquences de travail. Les méthodes de production itératives dans le domaine des jeux vidéo et les innovations des moteurs de jeux (notons également Unity) et de nouvelles expériences de travail en entreprise pour la production virtuelle ont poussé mes recherches à expérimenter avec Unreal puis à changer le paradigme de production du projet.

Tout d'abord les expérimentations du projet avec Unreal débutent par la méthode de conversion des nuages de points en polygones, ce qui n'est pas concluant puisque trop long. En revanche, il est possible de lire en direct l'archive de nuages de points du projet à l'aide d'un script écrit en code C et Python. L'outil de codage nodal du logiciel permet également de le faire.

La prévisualisation et le rendu se font maintenant simultanément. Il est maintenant possible de changer le nombre de points affichés et leur dimension sans refaire le rendu. Il est aussi possible d'intégrer des données provenant de sources différentes pour modifier les points, générer des tracés lumineux et animer la caméra à partir d'un périphérique de jeu. Brièvement, le pipeline devient fluide et permet de travailler d'une manière plus circulaire. Des essais sont réalisés pour simuler la spatialisation 3D pour une mise en scène immersive en 360 avec un casque de réalité virtuelle HTC Vive. L'idée est de tester cette fonctionnalité pour préparer une scène modèle pour poursuivre le travail sur écran régulier et ensuite revenir en mode VR pour une éventuelle présentation.

La seconde série d'expérimentation sur Unreal est marquée par la parution du plugiciel Lidar Point Cloud (Epic Games, 2019). Cela constitue un tournant puisque les nuages de points peuvent être lus directement dans le logiciel et appliquer des effets d'éclairage - ce qui n'était pas possible avant. L'inconvénient de Unreal est de devoir faire des compromis sur la qualité du rendu au profit de l'utilisation en temps réel, mais également pour éviter les problèmes d'affichage. La recherche se poursuit pour améliorer la qualité visuelle en vue de préparer la présentation finale, soit en réalité virtuelle ou sur écrans.

Parallèlement, le travail d'exploration se poursuit pour générer des mouvements de caméra autour du centre que constitue l'ancien Hôpital pour Enfants. La quasi entièreté de l'archive de nuages de points du Quartier de l'innovation peut maintenant être pré-chargée dans la mémoire vive de l'ordinateur pour l'explorer ensuite en temps réel. Certains lieux et détails des quartiers de la Petite Bourgogne et de Griffintown sont explorés. L'utilisation d'une carte graphique GTX 2080 Ti améliore grandement les performances de l'affichage.

Spécifications de l'ordinateur utilisé : Processeur i7, 2600 K. Cartes graphiques: GTX 1070 / GTX 2080 Ti. Mémoire vive: 32 GB RAM. Système d'Exploitation: Windows 10. Logiciel: Unreal Engine 4.26.1

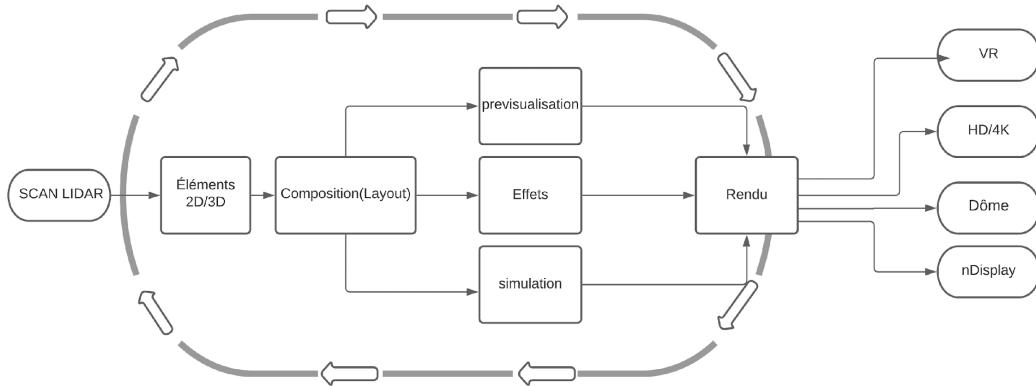


Figure 8 : Schémas de production de l'itération 4. © Samy Lamouti

La figure 8 montre qu'avec un logiciel de type « engin de jeu » tel que Unreal, il est possible de concevoir le processus de production-réalisation avec des étapes se déroulant simultanément, et sans perdre le travail effectué en amont si des changements doivent être apportés. Les flèches indiquent que le processus est circulaire, le rendu et les modifications pouvant être réalisés en temps réel. Pour chaque format de présentation vidéo (réalité virtuelle, haute définition, dôme ou *nDisplay*) on procède à un enregistrement au format voulu et non à un nouveau calcul de rendu.

CHAPITRE 4

ANALYSE DES RÉSULTATS

4. 1 INFLUENCE DE L'ENVIRONNEMENT DE NUAGES DE POINTS SUR LA PRATIQUE

D'abord, l'environnement virtuel tel qu'utilisé pour le projet a influencé l'exploration et la réflexion sur l'espace de la ville plutôt que de simplement reproduire fidèlement une documentation et un code visuel préétabli. Dans la nouvelle itération sur Unreal, j'ai travaillé en particulier sur les déplacements de caméra donnant l'effet de flottement dans une ville fantôme. L'esthétique des nuages de points renforce déjà cette impression. Les «scans» produits à partir du sol donnent l'impression que les bâtiments sont éclairés par quelques sources directionnelles, et renforcent l'impression d'explorer une ville en partie tapie dans l'obscurité.

Par rapport aux premières itérations, cette nouvelle version du projet amène une interactivité à tous les niveaux: caméras multiples en temps réel, possibilité de faire du multi écrans en temps réel et éditer en temps réel (*fonction n-display*). La technologie utilisée est maintenant en phase avec l'idée d'exploration, par rapport à un début de production laborieux, il s'agit maintenant plus d'un environnement de création que d'un logiciel de production linéaire. Je suis beaucoup plus influencé maintenant à faire du travail exploratoire comme cela se ferait en réel sans les contraintes physiques.

Concernant le modèle de processus de production, j'ai pu identifier les constantes et les variables de chaque étape et contourner les problèmes de rendu pour me concentrer sur l'aspect

créatif. Il est aussi maintenant plus simple de songer à différents formats de présentation (HTC Vive par exemple).

4.2 NOUVELLES POSSIBILITES COLLABORATIVES ET PROCHAINES ETAPES

Au cours du processus il est apparu important de faire une place pour intégrer des collaborateurs qui ne sont pas nécessairement des professionnels avancés en 3D, aspect collaboratif permis par l'approche itérative et l'outil de jeux vidéo.

Je veux maintenant travailler dans le paradigme de l'idée de reconstitution de lieux disparus dans la ville. Cette nouvelle avenue dans ma démarche ouvre la porte à des collaborateurs qui peuvent aussi avoir une pratique créative en 3D mais n'étant pas nécessairement des professionnels avancés. L'outil utilisé à l'itération 4 devrait permettre d'intégrer d'autres éléments visuels et des numérisations de bâtiments provenant d'autres sources, et surtout de le faire au moment voulu dans la chaîne de production. Plusieurs zones de la ville ont changé depuis 2016 (notamment le Petite Bourgogne et de Griffintown) et ces transformations pourraient être ainsi révélées dans une nouvelle version du projet.

Certaines avancées techniques sont au centre des prochaines étapes. La recherche se poursuit en effet pour utiliser les fonctions de lumière volumique et de *raytracing* grâce à la nouvelle génération de cartes graphiques RTX. Concernant la diffusion de la version finale, les expérimentations sont en cours pour utiliser les formats de présentation VR, écrans LED et projection grand format, en utilisant des contrôleurs de jeux pour se déplacer dans l'espace virtuel.

On le voit, le moteur de jeu vidéo utilisé pour l'itération 4 permet davantage de souplesse dans le passage entre différentes étapes de production. En fait, tel que le montre le modèle de production circulaire dégagé à la section 3, certaines étapes de production sont fusionnées par rapport au pipeline de production vidéo traditionnel. Il faudrait en fait tenir compte de l'avantage de la simultanéité de la prévisualisation et de la conception qu'offre un outil logiciel proposant le travail

interactif en temps réel : modifications d'éléments en direct, déplacements de la caméra selon les mouvements de l'utilisateur à partir de mouvements captés par des périphériques divers, les possibilités sont nombreuses pour permettre d'expérimenter de nouveau sur différentes versions du projet à compléter.

CONCLUSION

La présente recherche a permis de dégager différentes approches créatives et solutions pour l'utilisation artistique des nuages de points et de la technologie du Lidar. On assiste sans doute à une convergence dans le milieu de la création audiovisuelle tel que le montre la fusion d'approches que représente la production virtuelle pour la production de décor virtuelle utilisant le logiciel Unreal. Cette tendance est à observer avec attention pour éventuellement permettre à la communauté créative de mieux s'en approprier les avantages, ce qui devrait permettre d'éviter certains écueils de la production d'œuvres numériques immersives. Les nouveaux moteurs de jeux vidéo tel que Unreal et Unity, auront probablement un effet marquant sur certains aspects des productions utilisant les technologies 3D de captation, mais également la chaîne de production en effets visuels plus traditionnelle. Il est probablement trop tôt pour en mesurer la portée. Cependant, après avoir expérimenté à l'aide d'une gamme d'outils logiciel couvrant ces deux domaines, il apparaît souhaitable de considérer l'apport des moteurs de jeux pour ouvrir le champ des possibilités créatives. On peut tracer un lien direct entre les développements logiciels pour traiter les nuages de points et le fait que l'industrie des jeux vidéo fait une utilisation maintenant très répandue des scans 3D pour reproduire des environnements de jeux réalistes. La technologie des nuages de points est probablement le sous-domaine qui permet de marquer un pont entre une approche linéaire liée au cinéma et l'autre, plus itérative, dédiée à la production de jeux vidéo. Les numérisations 3D étant de plus en plus présentes en effets visuels, nous pouvons espérer que ces outils seront davantage présents dans les deux domaines. De plus, un troisième domaine, celui des productions audio-visuelles en arts numériques, devrait en bénéficier, en tenant compte des exemples cités dans cette recherche de plusieurs studios créatifs indépendants qui suivent leurs propres cheminements de production ou choix d'outils créatifs.

Pour ma part, je crois avoir abouti à une étape prometteuse pour me permettre de combiner mes intérêts créatifs et donner un sens renouvelé au projet en cours. La vision des possibilités à venir est en effet beaucoup plus nette, soit en considérant l'idée de créer des reconstitutions architecturales ou en travaillant davantage en mode collaboratif.

Le concept d'hétérotopie a permis de définir certains lieux réels qui sont fondamentalement différents des autres, il permet d'aiguiser la sensibilité de l'explorateur autant dans le réel que dans le virtuel. Il permet aussi de caractériser certains aspects des espaces numérisés en nuages de points puisqu'ils ont également un côté hétérotopique: le temps y est figé, c'est un double de la réalité où l'observateur attentif peut se déplacer d'un point de vue différent de la réalité. Le concept ouvre le champ exploratoire en soulignant ce qui est intéressant voire même nécessaire de voir ou de comprendre dans le cadre urbain : il justifie l'exploration d'espaces hors du commun. En prenant un pas de recul depuis les premières itérations du projet, il apparaît clair que les numérisations du Quartier de l'innovation obtenu ne sont plus seulement un artefact numérique difficile à travailler, mais une archive navigable et explorable à l'aide d'un outil approprié.

Pour les studios créatifs ou les artistes indépendants, il serait intéressant de considérer d'adopter des outils logiciels qui permettent d'intégrer des collaborateurs plus facilement et si possible de faire des changements aux étapes plus avancées dans le pipeline de production. Si les projets de production vidéo et les œuvres numériques ont historiquement suivi un modèle linéaire de conception héritée du cinéma ou de la vidéo, celui-ci semble désuet considérant les nouvelles possibilités maintenant présentes. De plus, considérant l'aspect monétaire dans l'épanouissement des petites entreprises créatives naissantes, il est intéressant de constater le faible coût d'utilisation des engins de jeux vidéo par rapport aux logiciels d'animation 3D cinématographiques, ce qui pourrait permettre pour certains d'investir d'abord dans des ressources matérielles plus performantes et favoriser entre autres le travail en temps réel ou les performances de rendu.

Toutefois, il appartient à la communauté créative de poursuivre la recherche à l'aide des technologies de numérisation 3D pour en exploiter et en découvrir le potentiel.

BIBLIOGRAPHIE

- Beyza, E. H. E. (2016). Interview with Marshmallow Laser Feast. Repéré à <https://docubase.mit.edu/lab/interviews/interview-with-marshmallow-laser-feast/>
- Breuleux, Y., Chenennou, S., & Lamouti, S. (2013). Nuée | Swarm. Repéré à <https://sat.qc.ca/fr/evenements/nuee-swarm>
- Chapman, P. (2019). *The art of the point cloud*. Glasgow, Royaume-Uni: Wild Harbour Books.
- Chen, F., Cheng, I., & Basu, A. (2009). *Distortion metric for robust 3D point cloud transmission*. Communication présentée au 2009 IEEE International Conference on Multimedia and Expo, New York, NY.
- Clark, B., Spohr, S., Higginbotham, D., & Bakhru, K. (2019). *The guide to managing postproduction for Film, TV, and digital distribution: managing the process*. Londres, Royaume-Uni: Routledge.
- Cooper, Z. (2020). The future of art: 8 digital installations and interactive spaces. Repéré à <https://architizer.com>
- Dandois, J. P., Baker, M., Olano, M., Parker, G. G., & Ellis, E. (2017a). Ecosynth: 3D tools for ecology. Repéré le 29 janvier 2021, à <https://ecotope.org/projects/ecosynth/>
- Dandois, J. P., Baker, M., Olano, M., Parker, G. G., & Ellis, E. (2017b). What is the point? Evaluating the structure, color, and semantic traits of computer vision point clouds of vegetation. *Remote Sensing*, 9(4), 355.
- Dunlop, R. (2014). *Production pipeline fundamentals for film and games*. Londres, Royaume-Uni: Routledge.
- Epic Games. (2019). *Lidar Point Cloud* [logiciel].
- Epic Games. (2021). Unreal Engine virtual production. Repéré le 29 janvier 2021, à <https://www.unrealengine.com/en-US/virtual-production>
- Foucault, M. (2004). Des espaces autres. *Empan*, (2), 12-19.
- Foucault, M., & Defert, D. (2009). *Le corps utopique: suivi de Les hétérotopies*. Fécamp, France: Nouvelles éditions lignes.

- Gregersen, E. (2016). Lidar. *Encyclopedia Britannica*. Repéré à <https://www.britannica.com/technology/lidar>
- Hidaka, K., Qin, H., & Kobayashi, J. (2017). *Preliminary test of affective virtual reality scenes with head mount display for emotion elicitation experiment*. Communication présentée au 2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), Jeje, Corée du Sud.
- Hoyt, A. (2010). Entering a new era of immersive art. Repéré à <https://www.theatlantic.com/technology/archive/2010/12/entering-a-new-era-of-immersive-art/68057/>
- Krajewski, P. (2013). Architecture technologique et genèse d'hétérotopies ? *Appareil*, (11).
- Lemercier, J. (2014a). Dome projections. Repéré le 29 janvier 2021, à <https://joanielemercier.com/dome-projections/>
- Lemercier, J. (2014b). Quantum & Nimbos. Repéré à <https://sat.qc.ca/albums/quantum-nimbos>
- Marshmallow Laser Feast. (2015). In the eyes of the animal Repéré à <https://www.andfestival.org.uk/>
- Maumont, M. (2010). L'espace 3D: de la photogrammétrie à la lasergrammétrie. *In Situ Revue des patrimoines*, (13).
- McRobert, L. (2016). *Char Davies's immersive virtual art and the essence of spatiality*. Toronto, ON: University of Toronto Press.
- Moulon, D. (2018). *Art beyond digital*. Lulu.com.
- O'Donohoe, S., & Pulman, S. (2011). *The art of immersion: how the digital generation is remaking Hollywood, Madison Avenue, and the way we tell stories*. Oxford, Royaume-Uni: Taylor & Francis.
- Office québécois de la langue française. (2021). Lidar. Dans *Grand dictionnaire terminologique*. Repéré à http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8351812
- Organisation des Nations Unies. (2016). Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement. Repéré à <https://unctad.org/fr>
- Quévillon, F. (2019). Dérive. Repéré le 29 janvier 2021, à <http://francois-quevillon.com/w/?p=379&lang=fr>

- Quintas, E. (2016). *Comprendre et valoriser l'écosystème montréalais de la créativité numérique: un levier pour le développement local et le rayonnement international de la métropole*. Montréal, QC: Printemps numérique.
- Rogers, S. (2020). Virtual production and the future of filmmaking—An interview with Ben Grossmann, Magnopus. Repéré à <https://www.forbes.com/sites/solrogers/2020/01/29/virtual-production-and-the-future-of-filmmakingan-interview-with-ben-grossman-magnopus/?sh=3e60ec8175d4>
- Rosenthal, E. (2014). Enter a digitized forest in this new audiovisual installation. Repéré le 29 janvier 2021, à <https://www.vice.com/en/article/8qvg9b/enter-a-digitized-forest-in-this-new-audiovisual-installation>
- Schreier, J. (2017). *Blood, sweat, and pixels: The triumphant, turbulent stories behind how video games are made*. New York, NY: Harper New York.
- Schroeder, R. (2008). Defining virtual worlds and virtual environments. *Journal For Virtual Worlds Research*, 1(1).
- Société des arts technologiques. (2015a). Nuée | Swarm. Repéré à <https://sat.qc.ca/catalog/preview.php?id=66>
- Société des arts technologiques. (2015b). *Re-génération* Repéré à <https://sat.qc.ca/fr/regeneration>
- Société des arts technologiques. (2015c). Symposium IX Repéré le 12 janvier 2021, à <https://ix.sat.qc.ca>
- Spence, J. (2008). Demographics of virtual worlds. *Journal for Virtual Worlds Research*, 1(2).
- vvvv group. (2015). vvvv [logiciel].
- Whitehurst, A. (2021). VFX pipeline. Repéré à <http://www.andrew-whitehurst.net/pipeline.html>
- Wigley, M. (2016). Discursive versus immersive. *Stedelijk Studies*, 4.
- Yin-Poole, W. (2018). Why Hideo Kojima fans reckon Death Stranding is set in Iceland. Repéré à <https://www.eurogamer.net/articles/2018-05-26-why-hideo-kojima-fans-reckon-death-stranding-is-set-in-iceland>
- Zhang, J. (2014). Projected 360 installation immerses viewers in breathtaking virtual universe. Repéré le 29 janvier 2021, à <https://mymodernmet.com/joanie-lemercier-nimbes/>