

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE LOUIS-LUMIÈRE

L'être humain en image de synthèse

Maxime BERTON

Sous la direction de Claire Bras : Professeure d'arts plastiques appliqués à la photographie

*Membres du jury : Pascal Martin – Professeur des Universités à l'ENS Louis-Lumière /
Véronique Figini - Maîtresse de conférence à l'ENS Louis-Lumière / Jérôme Battistelli, Co-
fondateur d'Armada Studios - VFX & 3D Scan*

Spécialité Photographie - Promotion 2024



L'être humain en image de synthèse

Maxime BERTON

Sous la direction de Claire Bras : Professeure d'arts plastiques appliqués à la photographie

*Membres du jury : Pascal Martin – Professeur des Universités à l'ENS Louis-Lumière /
Véronique Figini - Maîtresse de conférence à l'ENS Louis-Lumière / Jérôme Battistelli, Co-
fondateur d'Armada Studios - VFX & 3D Scan*

Spécialité Photographie - Promotion 2024

Remerciements

J'aimerais sincèrement remercier :

Claire Bras pour avoir soutenu mon projet et apporté ces précieux conseils et références sur ce sujet de l'être humain en image de synthèse. Je la remercie également pour sa disponibilité et le temps qu'elle a pu m'accorder.

Stéphanie Solinas pour m'avoir épaulé dans la recherche de ma partie pratique de mémoire.

Les membres du jury : Pascal Martin, Véronique Figini et *Jérôme Battistelli*.

Mon maître de stage Florian Croquet et toute l'équipe de Scan Engine et d'Unit Image, Bastien Amar, Mélodie Tanier et Lanson Zhang pour leurs précieux conseils autour de la modélisation 3D, leur aide et disponibilité sur ma partie pratique.

Les enseignants de la spécialité Photographie pour m'avoir transmis un grand nombre de connaissances.

L'équipe administrative de l'Ecole Nationale Supérieure Louis-Lumière pour la formation.

Résumé

Ce mémoire explore la représentation du visage humain dans l'histoire de l'art et la modélisation 3D. Il commence par une analyse historique de la caractérisation du visage, depuis l'idéalisation classique de l'Apollon du Belvédère jusqu'au réalisme expressif des portraits du Fayoum. Il poursuit avec l'évolution de la représentation du visage au XXe siècle, marquée par la déconstruction cubiste de Picasso. Le mémoire examine ensuite comment les artistes modernes, tels que Van Gogh et Richard Avedon, ont capturé l'impact des conditions de vie sur l'expression faciale. Enfin, il aborde les avancées techniques en modélisation 3D, soulignant l'importance de la photogrammétrie, des techniques de shading, et de la capture de mouvement pour créer des personnages numériques réalistes et expressifs. Une étude de cas pratique illustre ces concepts par la transformation d'un individu en Homme-Fleur, démontrant la capacité de la technologie à reproduire et à transformer fidèlement l'apparence humaine.

Mots Clefs

Représentation du visage, Modélisation 3D, Photogrammétrie, Expressions faciales, Uncanny Valley, Réalisme numérique, Capture de mouvement, Shading et éclairage, Techniques de sculpture numérique, Anatomie faciale

Abstract

This thesis explores the representation of the human face in the history of art and 3D modeling. It begins with a historical analysis of facial characterization, from the classical idealization of the Belvedere Apollo to the expressive realism of the Fayum portraits. It continues with the evolution of facial representation in the 20th century, marked by Picasso's cubist deconstruction. The thesis then examines how modern artists like Van Gogh and Richard Avedon have captured the impact of living conditions on facial expressions. Finally, it addresses technical advances in 3D modeling, emphasizing the importance of photogrammetry, shading techniques, and motion capture to create realistic and expressive digital characters. A practical case study illustrates these concepts through the transformation of an individual into a Flower-Man, demonstrating the technology's ability to faithfully reproduce and transform human appearance.

Keywords

Facial representation, 3D modeling, Photogrammetry, Facial expressions, Uncanny Valley, Digital realism, Motion capture, Shading and lighting, Digital sculpting techniques, Facial anatomy

Sommaire

Remerciements	3
Résumé	4
Mots Clefs	4
Abstract	5
Keywords	5
Sommaire	6
Introduction	7
I. La caractérisation d'un visage humain dans l'histoire de l'art	9
I.A. L'apparence du visage immobilisé : tension entre les traits du visage générique et idéal	10
I.B. Le Visage et l'Expression du Vécu	27
I.C. L'Expression des Émotions: La Typologie et ses Limites	31
II. Techniques et Flux de Production en Modélisation 3D de Personnages	39
II.A. Introduction à la Modélisation 3D de Personnages	39
II.B. Processus de Création de Personnages et Inspirations Artistiques Externes	54
II.C. Techniques Avancées de Sculpture et Traitement de la Géométrie.....	66
II.D. Rendu et Techniques d'Éclairage.....	71
III. Retranscription d'une figure humaine par photogrammétrie et aléatoire du réel	85
III.A. Introduction à la technique photogrammétrique dans le cadre de captation d'êtres humains.....	85
III.B. Utilisation de la photogrammétrie d'être humain dans les différentes industries	98
III.C. Importance de l'élément aléatoire du réel capturé avec la photogrammétrie	112
III.D. Les êtres humains numériques hyperréalistes et le concept d'Uncanny Valley	117
Conclusion	130
Bibliographie	132
Index	136
Table des matières	139
Table des illustrations	141
Table des sigles et abréviations	146
Table des Sigles et Abréviations.....	146
Présentation de la partie pratique	147
Étude de cas pratique : Modélisation et représentation numérique d'un être humain avec des éléments végétaux.....	147

Introduction

La représentation de l'être humain dans l'art a toujours été un défi, oscillant entre la quête de fidélité et l'expression de la singularité individuelle. Depuis l'Antiquité, les artistes ont cherché à capturer les traits distinctifs des visages humains, en tentant de trouver un équilibre entre les caractéristiques universelles et les particularités individuelles.

Aujourd'hui, ce défi se perpétue et se transforme avec l'avènement des technologies numériques telles que la modélisation 3D et la photogrammétrie. Ces techniques offrent de nouvelles perspectives et outils pour reproduire la figure humaine, tout en soulevant des questions sur la capacité de ces méthodes à capturer la complexité de l'être humain sans intervention humaine directe. La modélisation 3D nécessite une précision technique et une maîtrise des logiciels pour créer des représentations qui peuvent paraître vivantes et expressives. Cependant, cette méthode repose fortement sur la compétence et la vision de l'artiste numérique, ce qui peut introduire des biais et des simplifications.

D'autre part, la technique de photogrammétrie permet de capturer des objets en trois dimensions à partir de photographies multiples, ce qui offre une fidélité remarquable aux détails et aux textures d'un modèle 3D. Cette technique pose néanmoins la question de savoir si elle peut vraiment saisir la singularité et les défauts des sujets qu'elle reproduit, ou si elle se limite à une reproduction superficielle des apparences.

Ces réflexions mènent à des questions plus profondes sur la nature de la représentation humaine : Peut-on véritablement répliquer l'unicité de chaque individu à travers des modèles numériques ? Jusqu'où la technologie peut-elle aller pour capter les émotions, les expressions et les nuances de l'humanité ?

La problématique centrale de ce mémoire se concentre sur l'exploration de ces questions : Peut-on répliquer fidèlement et saisir la singularité de l'être humain à travers la modélisation 3D sans l'intervention de l'humain, et comment cela se compare-t-il à la retranscription photogrammétrique des figures humaines ? En examinant les évolutions artistiques et les avancées technologiques, ce mémoire vise à offrir une compréhension approfondie des potentiels et des limites de la

modélisation numérique dans le cadre précis de l'être humain, tant sur le plan technique qu'artistique et philosophique.

I. La caractérisation d'un visage humain dans l'histoire de l'art

La représentation de l'être humain dans l'art a évolué à travers les époques, avec comme enjeux principaux la reproduction fidèle de son image. Depuis l'Antiquité, le souci de la reproduction fidèle et de la caractérisation du visage et du corps humain a été étudié. Représenter un modèle de manière fidèle et réaliste a toujours été un défi pour les artistes. La quête de représenter fidèlement un visage humain soulève la question de l'équilibre entre les traits universels de l'humanité et la singularité propre à chaque individu, résultant de l'interaction complexe entre les caractéristiques génétiques et les expériences personnelles. Ce défi presque inatteignable de représenter un personnage le plus fidèlement possible peut être vu sous différents aspects. En effet, représenter le vivant, les variations d'états ponctuels, les variations d'états de vivant et les états d'âme dues aux circonstances passent par la fidélité des traits de visages propres à un individu, altérés par son vécu mais aussi par son expression consciente ou non. Ces trois aspects doivent ainsi être compris et pensées ensemble par l'artiste pour obtenir une représentation plausible d'un être humain. Nous allons ici étudier de manières indépendante ou réunis ces différents aspects de représentation, à commencer par un visage générique souvent idéalisé, puis un visage statique qui se singularise par des traits pour terminer par un visage qui s'exprime.

I.A. L'apparence du visage immobilisé : tension entre les traits du visage générique et idéal

L'Apollon du Belvédère : L'Idéalisation du Visage

L'histoire de l'art offre un vaste panorama sur la manière dont les civilisations ont appréhendé et représenté le visage humain. Dans l'Antiquité, la caractérisation du visage humain s'est concentrée sur des modèles idéalisés, reflétant les valeurs, les croyances et les connaissances de cette période. La sculpture de l'Apollon du Belvédère incarne l'apogée de l'idéalisation dans l'art grec. L'Apollon du Belvédère est une sculpture qui incarne l'idéalisation du visage humain dans l'art classique.¹ Représentant Apollon, le dieu grec de la lumière, du soleil, de la musique et de la prophétie, cette œuvre est une pièce majeure de l'Antiquité qui a influencé l'art occidental. Réalisée pendant la période de la Rome antique, bien qu'étant une copie romaine d'un original grec perdu, elle symbolise la quête de la perfection et de l'idéal de la beauté qui caractérisent l'art classique. Le visage de l'Apollon du Belvédère, tout en étant unique, pourrait être remplacé par celui d'une autre sculpture grecque de l'époque sans que l'on perçoive de différence notable, tant l'idéalisation tend à uniformiser les traits du visage.

¹ Musée du Vatican, cour octogonale du Belvédère, inv. 1015.



Figure 1. *Léocharès attribué à, Apollon dit « du Belvédère »* : Copie en marbre d'une statue en bronze, v. 330 av. J-C.; 2,24 m (h), Époque romaine, Rome, Musée du Vatican, cour octogonale du Belvédère, inv. 1015.

L'Apollon du Belvédère représente un exemple de l'idéalisation de l'être humain dans l'art antique, où la beauté n'est pas simplement reproduite de manière fidèle mais élevée et idéalisée à un niveau de perfection. Les proportions du visage d'Apollon sont calculées et reflètent ainsi les canons de beauté de l'époque, qui valorisent la symétrie et l'équilibre. Ces proportions idéales sont guidées par la philosophie grecque de la "mesure" et du "nombre", où chaque élément du visage comme les yeux, le nez, les lèvres, la mâchoire et la chevelure sont conçus pour refléter une perfection divine et intemporelle.

En traçant les lignes du visage de l'Apollon du Belvédère sur un schéma, on en ressort des proportions régulières et caractéristiques d'un visage dessiné. En effet, l'écart entre les yeux et l'espacement entre les oreilles est sensiblement régulier, tout comme l'écart entre le haut du crâne, la partie supérieure des yeux et le bas du menton. Malgré ces proportions standardisées, le visage de l'Apollon du Belvédère possède quelques irrégularités subtiles comme son nez qui n'est pas parfaitement droit et une légère asymétrie faciale. Cependant, ces détails ne suffisent pas pour en faire un visage particulier et paraît alors standardisé. De manière générale, le visage de l'Apollon du Belvédère suit des traits de visages conventionnels et tendants vers un modèle idéal. Un modèle idéal passe en effet par une synthèse des traits qui vise à réduire au maximum les irrégularités et toute abstraction propres à la singularité. Cette sculpture paraît réaliste par les légères irrégularités induites par son créateur mais entre de manière générale dans la définition d'un visage générique.

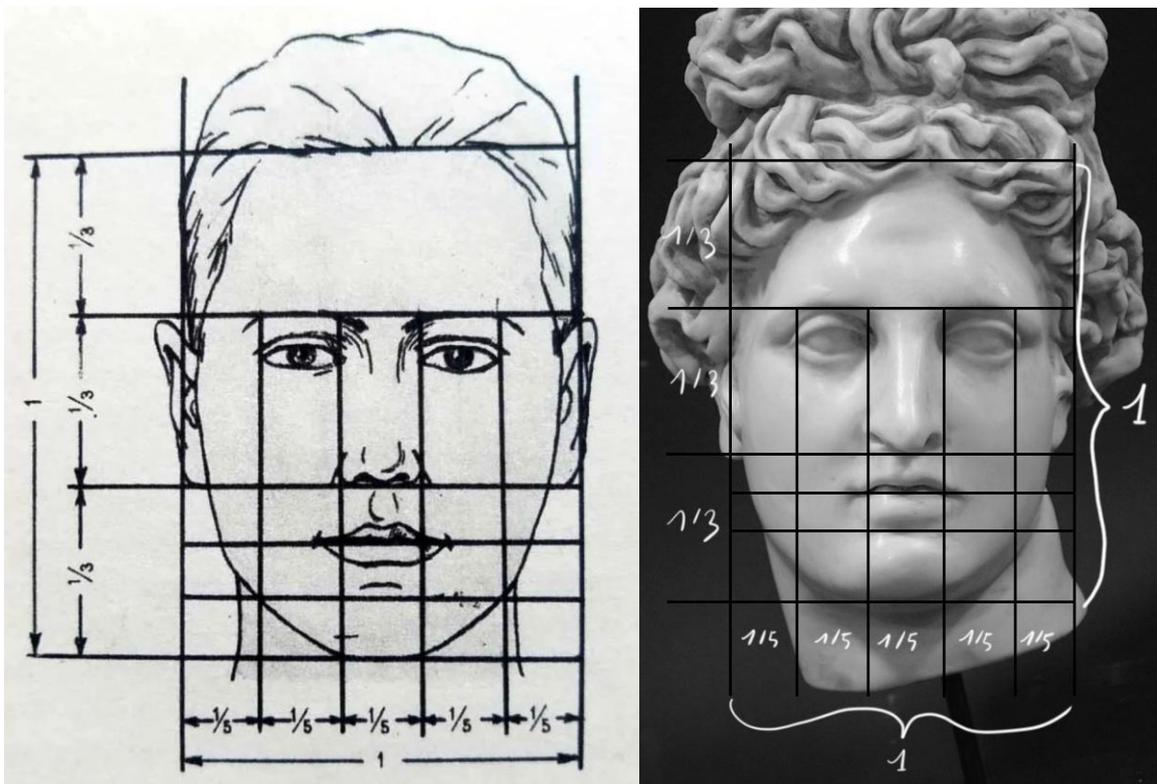


Figure 2. Proportions d'un visage générique en dessin mis en parallèle avec le visage idéal de l'Apollon du Belvédère

Pour ce qui est de l'expression du visage d'Apollon, elle est imprégnée de sérénité et de noblesse matérialisées par son inexpression, évoquant sa nature divine et sa supériorité sur les mortels. Son regard est dirigé vers l'horizon, suggérant une contemplation éloignée ou une vision éclairée sur l'avenir. Cette expression transcendante de l'Apollon établit une distance entre le divin et l'humain, reflétant les croyances et les valeurs de l'époque qui plaçaient les dieux et les demi-dieux dans une catégorie bien au-delà de la compréhension humaine.

La sculpture de l'Apollon du Belvédère présente une occasion d'explorer la transition d'un visage impersonnel à un visage personnel. En effet, le visage de l'Apollon, presque dénué d'expression, peut être comparé à un dessin didactique utilisé pour l'apprentissage des proportions faciales. Ce type de dessin, souvent simple et générique, sert de base pour comprendre les traits communs de l'anatomie humaine. Il constitue un socle commun à partir duquel les particularités et les singularités peuvent être projetées et développées. Ce modèle de base, avec sa neutralité apparente, soulève la question de la personnalisation dans l'art. Un visage comme celui de l'Apollon, dépourvu de traits distinctifs spécifiques, sert de canevas sur lequel les artistes peuvent ajouter des détails pour insuffler de la vie et de l'individualité. Les petites asymétries et les inflexions subtiles dans les traits permettent de suggérer des expressions et des émotions, transformant ainsi un visage statique en une représentation vivante. L'Apollon du Belvédère, avec son caractère universel, montre comment les artistes peuvent partir d'une forme générique pour arriver à une représentation unique. La maîtrise technique des proportions classiques combinée à une observation attentive des nuances de l'expression humaine permet de dépasser la simple reproduction pour capturer l'identité d'un individu.

L'Apollon du Belvédère, au-delà de la simple recherche de la beauté physique, neutralise les singularités et l'expression du vivant, devenant ainsi un modèle qui

pourrait être qualifié d'universel. En effaçant les traits individuels distinctifs, cette sculpture crée un visage idéalisé qui incarne le modèle d'une représentation commune de l'humanité occidentale. En ce sens, l'Apollon du Belvédère questionne la définition et l'usage du modèle parfait dans l'art. Plutôt que de célébrer l'unicité et les particularités de l'être humain, il propose une vision de la beauté qui dépasse les différences et imperfections personnelles pour atteindre un idéal esthétique abstrait et s'éloignant de la réalité. Cette standardisation des traits, loin d'être une simple recherche de perfection physique, montre un désir de créer un modèle de perfection qui soit reconnu et apprécié par tous. Ainsi, ce visage exemplaire interroge la manière dont l'art peut à la fois représenter et idéaler l'humanité, en uniformisant les caractéristiques individuelles pour créer un modèle de perfection intemporelle.

L'Apollon du Belvédère établit une distance délibérée entre le modèle représenté et le commun des mortels. Ce détachement suscite l'admiration plutôt que l'identification, en inspirant respect et humilité chez le spectateur face à sa propre imperfection. En contemplant cette perfection idéalisée, les individus sont encouragés à aspirer à des idéaux de beauté, de grâce et de sagesse, stimulant leur croissance personnelle et la recherche de l'excellence. L'Apollon du Belvédère, en servant de pont entre le divin et l'humain, permet de créer une connexion avec des concepts tels que la divinité et la perfection artistique.

En situant l'Apollon du Belvédère dans le contexte de son époque, cette œuvre nous invite à réfléchir sur les mutations des critères de beauté, de perfection et d'humanité dans l'histoire de l'art. Une représentation comme celle-ci permet d'appréhender l'évolution des idéaux esthétiques ainsi que la manière dont ils ont été influencés par les croyances religieuses, les valeurs culturelles et les tendances artistiques propres à une époque.

Les Portraits du Fayoum : Réalisme et Expressivité

La recherche de représentation de la figure humaine se perpétue et évolue dans d'autres traditions artistiques et périodes historiques. Un exemple significatif de l'évolution des représentations de l'être humain est celui des portraits du Fayoum, une série de peintures funéraires datant de l'Égypte romaine. Contrairement à l'Apollon du Belvédère, ces portraits mettent en lumière l'individualité et la réalité humaine plutôt que l'idéalisation de la figure divine. Les artistes de cette période ont utilisé des techniques appropriées pour représenter chaque détail du visage du défunt, avec la vocation de raconter une partie de son expérience humaine.

Les portraits du Fayoum, trésors de l'Égypte gréco-romaine, incarnent une avancée importante dans la représentation réaliste et expressive du visage humain dans l'histoire de l'art. Datant du 1er au 4ème siècle après J.-C., ces portraits sont des représentations d'un grand réalisme et des documents historiques précieux qui offrent un aperçu des individus et des traditions de la société de l'époque.

En contraste avec l'Apollon du Belvédère, la présence de ces portraits est renforcée. Ces derniers sont liés à des êtres humains ayant réellement existés, contrairement à un être divin éloigné du commun des mortels. La singularisation de chaque visage présent sur les portraits du Fayoum permet de créer un lien plus puissant entre le sujet et son spectateur qu'un personnage n'ayant pas réellement existé.



Figure 3. *Le Tondo des deux frères* : 2e siècle après J.-C., peinture sur bois, Antinopolis, Égypte. Musée du Louvre, Paris. Photographie de S. Vannini/Corbis/Getty Images.

Par exemple, le "Tondo des deux frères", découvert à Antinoupolis, une cité romaine sur le Nil, et peint au 2^e siècle après J.-C., illustre à la fois la ressemblance et la différence entre les deux sujets. Le frère à gauche a un visage plus doux et rond, peut-être indiquant une jeunesse relative. Son regard est naïf et son sourire, bien que subtil, semble involontaire en raison de la forme de sa bouche. En contraste, le frère à droite apparaît plus bronzé et mûr, avec une bouche qui suggère une légère moue et un regard empreint de mélancolie. Ces visages, bien qu'immobiles, révèlent la proximité et la différence entre deux individus distincts.

Le réalisme des portraits du Fayoum est intrinsèquement lié aux techniques utilisées pour leur création. Les archéologues ont relevé que les artistes du Fayoum maîtrisaient deux méthodes principales : l'encaustique, où les pigments sont mélangés à de la cire chaude, et la tempéra, une technique où les pigments sont liés avec un agent aqueux. Ces techniques permettaient une richesse de détails et de nuances dans la texture de la peau, les cheveux, et les vêtements, capturant alors avec précision l'apparence unique de chaque sujet. Les portraits du Fayoum ne sont pas de simples représentations; ils sont intégrés dans le contexte culturel et religieux de l'Égypte gréco-romaine. Initialement destinés à être placés sur les momies, ces portraits servaient de lien entre le monde des vivants et celui des morts, conformément aux croyances égyptiennes sur l'au-delà. Cette pratique marque l'importance de l'individu dans le processus funéraire de l'époque et montre une vision de l'identité et de la mémoire qui dépasse la mort. La représentation fidèle des sujets va au-delà de leur simple apparence physique. Le réalisme de ces portraits est lié en grande partie à l'attention particulière portée aux yeux, souvent dépeints avec un regard pénétrant qui semble établir une connexion directe avec son spectateur. Cette focalisation sur les yeux, combinée à la précision des traits du visage, donnent aux portraits une présence vivante et une individualité marquée.

Concernant l'expressivité des portraits du Fayoum, elle se manifeste grâce à la capacité de leur créateur à capturer les traits physiques et les nuances émotionnelles et psychologiques de leurs sujets. Chaque portrait est une ouverture sur l'identité et l'histoire du sujet, reflétant des émotions souvent complexes comme la sérénité, la mélancolie, ou la dignité. Cette expressivité est renforcée par la

subtilité et la variation des expressions faciales ainsi que le réalisme des regards qui mis bout à bout, créent un portrait complet et fidèle de l'individu représenté.

En effet, les portraits du Fayoum dépassent leur contexte historique et géographique. Ils représentent un moment clé dans l'histoire du portrait, marquant une transition vers une représentation plus réaliste et personnelle du sujet qui influencera ainsi les pratiques artistiques ultérieures. Leur expressivité et leur réalisme anticipent les représentations de la Renaissance et au-delà, témoignant de la capacité de l'art à capturer et à retranscrire l'être humain à travers les âges.

La force des portraits du Fayoum réside dans leur manière de provoquer avec des techniques avancées de peinture une sensation de présence humaine. Ce qui est paradoxale quand on associe ces portraits évoquant une présence humaine forte à leur support : le tombeau du défunt momifié. Ces portraits marquent en quelque sorte l'empreinte des défunts avant leur mort pour les faire perdurer éternellement.

Ainsi, le défi présenté à l'artiste est de faire le pont entre le monde des morts et des vivants par la représentation du visage humain en exécutant une reproduction de ce dernier avant sa mort de manière presque parfaite pour que l'illusion de vie soit réussie. Contrairement à l'Apollon du Belvédère représentant un idéal, les sujets représentés dans les portraits du Fayoum sont individualisés et identifiables comme des êtres vivants ayant réellement existés à une époque. Dès lors, cela provoque un lien plus intime entre le sujet représenté et son spectateur.

En comparant des œuvres comme l'Apollon du Belvédère, symbole de l'idéalisation dans l'art antique, et les portraits du Fayoum, qui marquent un tournant vers le réalisme et l'expressivité, on révèle une évolution significative dans la représentation du visage humain. Cette transition se matérialise par le passage d'une quête de la perfection formelle à l'exploration de l'individualisation d'un sujet. Les portraits individualisés du Fayoum communiquent ainsi plus facilement avec leur spectateur,

cela passe principalement par le regard, ce qui crée une sensation d'empathie envers ces derniers.

En effet, l'Apollon du Belvédère incarne l'idéal de beauté et de perfection de l'Antiquité, avec des traits symétriques, une expression harmonieuse et un équilibre directement lié au divin. En contraste, les portraits du Fayoum illustrent un engagement envers le réalisme, capturant la singularité de chaque individu avec une fidélité impressionnante. Alors que l'Apollon du Belvédère cherche à représenter un idéal inatteignable, les portraits du Fayoum mettent en valeur la diversité et l'importance de l'expérience humaine. Cette expérience se traduisant par une mise en relation de soi à l'autre, passant par un échange direct en face à face. C'est en effet cette sensation qui est simulée dans les portraits du Fayoum et qui en fait leur force.

Ces portraits représentent une étape importante dans l'histoire de la représentation humaine. Leur réalisme et leur capacité à capturer les individualités des sujets en font des pionniers dans le domaine de la reproduction du visage humain. Ils nous invitent à réfléchir à la manière dont les artistes de l'Antiquité se sont essayés au défi complexe de représenter fidèlement l'être humain. Les portraits du Fayoum ont laissé l'empreinte d'individus et plus largement de leur époque dans leur représentation. L'étude de ces portraits dans le cadre de la reproduction du visage humain dans l'art, amène à comprendre leur capacité à dépasser les limites du temps et de l'espace.

La fidélité de reproduction d'un visage humain passe ainsi par la justesse des proportions du visage, par l'individualisation du sujet mais aussi par la recherche approfondie de la traduction des émotions sur un visage, même immobile. Les artistes vont en effet chercher à maîtriser cette notion, comme par exemple Léonard de Vinci dans la Mona Lisa.



Figure 4. DA VINCI, Léonard : *Mona Lisa*, Huile sur panneau de bois de peuplier, 77 cm x 53 cm, Peinte entre 1503 et 1506, Conservée au Musée du Louvre, Paris, France.

L'exemple de La Mona Lisa de Léonard De Vinci, avec son célèbre sourire énigmatique, reprend les codes explorés par les portraits du Fayoum. Cette œuvre majeure captive les spectateurs par son mystère et sa complexité émotionnelle.

L'ambiguïté propre à l'expression de la Mona Lisa peut être vue comme une évolution naturelle de la quête d'individualité et de réalisme dans la représentation du visage humain. Alors que les portraits du Fayoum mettent l'accent sur la restitution fidèle de l'apparence et de la présence humaine, la Mona Lisa se concentre sur les émotions subtiles du visage humain et invite son spectateur à l'interprétation et à la réflexion. L'expression ambiguë de la Mona Lisa, à la fois joyeuse et mélancolique, reflète la complexité de la figure humaine et du vécu. Cela marque en effet un point important dans la représentation artistique de l'émotion et de l'identité.

La Mona Lisa de Léonard de Vinci sert de pivot pour explorer l'ambiguïté des expressions faciales. Le sourire énigmatique de la Joconde soulève la question de la nature de l'expression : est-ce un sourire de communication ou un rictus figé ? Cette ambiguïté ouvre une réflexion sur la distinction entre les traits permanents et les émotions ponctuelles.

Dans son œuvre, Léonard de Vinci a utilisé la technique du sfumato pour créer des transitions douces entre les couleurs et les ombres, ce qui donne de la douceur à l'expression de la Mona Lisa. Cette technique permet un mélange subtil de lumière et d'ombre, invitant son spectateur à interpréter l'expression du sujet selon son propre point de vue. L'utilisation du sfumato, ainsi que d'autres techniques telles que la perspective atmosphérique, contribue à l'atmosphère mystérieuse qui entoure le portrait, rendant le sourire de la Mona Lisa insaisissable et sujet à diverses interprétations. Le sourire de la Mona Lisa a en effet captivé le public et les chercheurs pendant des siècles, devenant l'un des aspects les plus discutés de l'œuvre. Certains voient dans ce sourire une expression de joie ou de contentement,

tandis que d'autres y perçoivent une tristesse ou une mélancolie. Cette multiplicité d'interprétations reflète la complexité de l'expression humaine et la capacité de l'art à susciter une réflexion profonde.

Cette indétermination quant à l'expression de la Mona Lisa questionne sur la nature des expressions faciales humaines. Est-ce que son sourire est sincère ou feint ? Est-ce une expression de bonheur ou de tristesse ? L'ambiguïté du sourire de la Joconde invite son spectateur à projeter ses propres émotions et interprétations sur l'œuvre. Cela révèle en quelque sorte la subjectivité de la perception d'un visage

Le sourire énigmatique est vu pour certains comme une manifestation de la joie et de la satisfaction, tandis que tristesse ou mélancolie pour d'autres. Cette diversité d'interprétations témoigne de la complexité de l'expression humaine et du large champ d'interprétations des émotions dans les portraits. Le sourire de la Joconde demeure un mystère irrésolu, mais c'est précisément cette incertitude qui en fait sa richesse et sa crédibilité.

Pour représenter un visage humain de manière fidèle, il est important de capturer la singularité d'un sujet, que ce soit des traits de visages ou des expressions.

Le point de départ pour comprendre la singularité d'un visage humain est d'examiner comment les proportions, le volume, et les traits de visage immobiles sont composés et répartis sur un individu. Il est ainsi important d'analyser la manière dont les artistes classiques ont abordé la représentation du visage humain. Cela passe par exemple par la mise en valeur de l'harmonie et l'idéalisation d'un sujet comme l'Apollon du Belvédère, ou alors avec la représentation plus réaliste et individualisée des portraits du Fayoum mettant en avant les traits uniques de chaque sujet.

Pour représenter un visage humain, il est par ailleurs important de prendre en considération l'impact du vécu et le contexte décrit sur l'évolution des traits du visage. Les expériences de vie, les émotions ressenties, et les contextes sociaux et

historiques dans lesquels les individus évoluent peuvent profondément influencer la manière dont leur visage est représenté. Par ailleurs, la capture des émotions instantanées et fugitives représente un défi artistique majeur. L'étude de l'expression des émotions dans l'art, de la subtilité du sourire de la Mona Lisa à la douleur exprimée dans une œuvre comme le Laocoon, illustre la capacité des artistes à saisir des moments d'émotion intense. L'expression des émotions fugitives nécessite une compréhension profonde de la psychologie humaine et de la capacité de traduire ces instants éphémères en art visuel.

Déconstruction et Reconstruction du Visage au XXe siècle

L'étude de l'évolution de la représentation du visage dans l'histoire de l'art révèle une transformation importante au XXe siècle, marquée par la déconstruction et la reconstruction du visage. Cette période voit émerger des mouvements artistiques qui remettent en question les conventions traditionnelles de la beauté, de la forme et de la perspective. Au cœur de cette transformation, l'œuvre "La Femme qui pleure" de Pablo Picasso offre un exemple emblématique de cette révolution artistique.



Figure 5. PICASSO, Pablo : *La Femme qui pleure (Guernica)*, Huile sur toile, Peinte en 1937, Actuellement exposée au Museum of Modern Art (MoMA), New York, États-Unis.

"La Femme qui pleure" est une œuvre de Picasso, réalisée en 1937, qui incarne le style et les techniques du cubisme, un mouvement fondé par Picasso. Cette œuvre dépeint Dora Maar, photographe et compagne de Picasso, dans un état d'émotion intense. Le visage est fragmenté et recomposé en formes géométriques et en surfaces fracturées, reflétant une gamme complexe d'émotions et d'expressions. Ici, Picasso ne se contente pas de déconstruire le visage sur le plan physique; il le

reconstruit pour exprimer une profondeur psychologique, capturant la douleur, la tristesse et la tension intérieure.

Le cubisme, en brisant l'illusion de la profondeur et en explorant la simultanéité des perspectives, a changé de manière radicale la façon dont les artistes représentent le visage humain. En décomposant et en réassemblant le visage, les artistes comme Pablo Picasso remettent en question la notion même d'identité et d'expression, ouvrant la voie à une exploration plus libre de l'émotion et de la personnalité. La déconstruction et la reconstruction du visage dans l'œuvre de Picasso montre un changement dans la perception de l'identité humaine, de l'expression et de la psyché. Les artistes de la période du cubisme ont utilisé la fragmentation, la déformation, et la réinterprétation du visage pour explorer des thèmes tels que l'angoisse existentielle, la fragmentation de la personnalité, et la multiplicité des perspectives intérieures et extérieures. En focalisant sur l'expression de l'individu, le cubisme situe son sujet à la croisée de la subjectivité et de l'objectivité. Les traits qui singularisent le visage se mêlent aux émotions qu'il exprime, tandis que l'artiste et le spectateur interprètent et perçoivent cette dualité. Dans des œuvres comme celles de Picasso, l'identité du modèle s'estompe dans une multitude de facettes émotionnelles et psychologiques, reflétant à la fois la présence de l'individu et les perceptions subjectives qui en découlent.

Pour ce qui est de l'expressivité du personnage représenté dans le tableau de Picasso, le sentiment de tristesse décrit par un visage en pleurs est directement identifiable. Picasso prend des distances avec la quête de la ressemblance pour ne montrer que la souffrance de sa compagne. Cette émotion, exacerbée par les perceptions et sentiments de Picasso envers Dora Maar, déforme ses traits au point de la rendre méconnaissable. Plus son visage semble torturé, moins elle est identifiable, ce qui questionne l'empathie de l'artiste. Cette perte d'humanité apparente interroge la relation entre Picasso et Dora, où le modèle devient un objet

de souffrance pour le peintre. Ainsi, l'identité de la femme disparaît sous les distorsions, reflétant davantage la vision subjective et la douleur perçue par l'artiste que la singularité du visage humain.

Par comparaison avec un visage avec des traits identifiables et marqués décrivant une émotion violente prononcée comme le Laocoon, le portrait déstructuré de Picasso isole l'émotion de tristesse chez son sujet. Il s'agit en effet de deux approches pour représenter les émotions humaines, avec des points de vue plus ou moins éloignés des singularités humaines.

À travers quelques exemples clés, l'évolution de la représentation du visage dans l'art a été explorée : de l'idéalisation classique incarnée par l'Apollon du Belvédère, au réalisme expressif des portraits du Fayoum, jusqu'à la déconstruction radicale du visage au XXe siècle avec des œuvres comme "La Femme qui pleure" de Picasso. Cette exploration soulève des questions sur les limites de la représentation du visage humain. Comment ces aspects perdurent-ils à la surface d'un visage et s'effacent-ils aussitôt ? Comment se mêlent indistinctement les traits pérennes et les éléments transitoires ? L'Apollon du Belvédère incarne une aspiration à un idéal de beauté universel et intemporel, mais la part de projection de l'artiste et du spectateur face à ces visages est essentielle à considérer. Les portraits du Fayoum, avec leur réalisme saisissant, célèbrent l'unicité de l'individu et soulignent l'importance de la rencontre empathique entre le portrait et le spectateur. Ces visages, issus d'un passé lointain, se présentent comme des êtres ayant peut-être vécu, s'adressant depuis un au-delà qui échappe à toute certitude. En abordant la déconstruction du visage par Picasso, il devient pertinent de questionner jusqu'où peut aller la déformation avant que l'identité ne disparaisse totalement. Comment les émotions profondes de l'artiste se superposent-elles aux traits du modèle, brouillant ainsi les frontières entre le vécu et la représentation artistique ? Ces réflexions sur la projection artistique et la perception spectatrice mettent en lumière la complexité de la représentation du visage humain. Elles ouvrent à questionner les influences du

vécu et de l'environnement sur les traits et les expressions. Ces notions permettent d'introduire de nouveaux éléments importants à la compréhension de l'art du portrait.

I.B. Le Visage et l'Expression du Vécu

La représentation artistique du visage et du corps humains ne se limite pas à une reproduction fidèle de la réalité physique, elle est effectivement influencée par l'environnement dans lequel l'individu évolue et par son état de santé ou son état physique et psychologique. Il sera étudié ici la manière dont les artistes prennent en considération et intègrent ces éléments pour créer des œuvres qui mettent en lumière l'expérience humaine.

La manière dont les expériences de vie, le contexte social et l'environnement affectent l'expression du visage et du corps est un point crucial d'analyse. Il est essentiel d'examiner comment les artistes représentent les marques laissées par le vécu, telles que la maladie, la fatigue ou la détresse. Par exemple, des traits tirés ou des regards fatigués peuvent communiquer l'expérience vécue par le sujet. En prenant en compte ces détails, l'art devient un moyen de capturer l'apparence extérieure et l'état intérieur de l'individu, offrant ainsi un aperçu détaillé de son expérience personnelle.



Figure 6. VAN GOGH, Vincent : *Les Mangeurs de pommes de terre*, Huile sur toile, 82 cm x 114 cm, Peinte en avril 1885, Conservée au Musée Van Gogh, Amsterdam, Pays-Bas.

Les Mangeurs de pommes de terre de Vincent Van Gogh constitue un exemple pertinent de la manière dont les expériences de vie marquent les visages et les corps. Ce tableau représente des moments de la vie rurale et la rudesse du quotidien des paysans. Les visages des personnages sont marqués par la fatigue et la dureté de leur vie. Les traits tirés, les regards fatigués et les expressions austères donnent l'impression d'une vie de labeur et de privations. Van Gogh, par son utilisation de couleurs sombres et terreuses, accentue l'atmosphère pesante de la scène. La lumière de la lampe au centre de la composition éclaire partiellement les visages, ce qui met en évidence les rides et les traits maigres des personnages. Chaque visage raconte une histoire et amène à penser à un vécu de travail ardu et de résilience face aux difficultés. Les mains des personnages ajoutent une dimension supplémentaire à l'expression du vécu, révélant l'empreinte du labeur sur leur corps. Le choix de Van Gogh de représenter ces paysans dans un moment de

repas simple souligne leur humanité malgré des conditions de vie difficiles. Les visages, bien que marqués par la fatigue, expriment une sorte de quiétude. En plaçant les personnages dans un environnement familier et en les représentant de manière brute et authentique, Van Gogh permet au spectateur de ressentir une profonde empathie pour ces individus. Le tableau devient ainsi un témoignage de la condition humaine, où chaque visage porte les marques d'une vie difficile. La capacité de Van Gogh à transmettre des émotions à travers ses personnages permet à son œuvre de refléter des expériences vécues. Ce tableau, en insistant sur les détails spécifiques des visages et des corps, illustre comment l'artiste parvient à exprimer le vécu à travers la représentation d'être humain.

En lien avec le tableau de Van Gogh, la série de portraits Visages de l'ouest de Richard Avedon appuie l'idée que les conditions économiques et sociales d'un individu laissent des marques profondes et durables sur le corps, et plus particulièrement le visage. Pendant cinq ans et demi, Avedon se détache de la photographie de mode pour laquelle il était reconnu et parcourt l'Amérique de l'ouest pour réaliser 752 portraits dépeignant les visages des habitants de cette région.

Un portrait notable de cette série est celui de William Casby, un ouvrier agricole. Le visage de Casby, marqué par les années de dur labeur et les conditions difficiles, raconte une histoire sans nécessiter de contexte extérieur. Les rides profondes, la peau marquée par le soleil et le vécu, et l'expression résignée traduisent une vie passée dans la marginalité. Avedon, en isolant son sujet sur un fond neutre, met en avant les traits et la posture qui révèlent son mode de vie et le poids de son environnement.



Figure 7. AVEDON, Richard : *William Casby*, Baton Rouge, Louisiana, 1963, photographie en noir et blanc, tirée de la série *Visages de l'ouest*, actuellement exposée au Museum of Modern Art (MoMA), New York, États-Unis.

Ce portrait montre comment Avedon utilise une composition simple et efficace pour mettre ses sujets en lumière. Le visage de Casby, avec ses yeux fatigués et son regard direct, transmet des émotions fortes au spectateur. Chaque ride, chaque marque pourrait raconter une histoire de survie, de lutte et de résilience. Cette manière de représenter ses sujets permet à Avedon de souligner l'impact de

l'environnement et des conditions sociales sur l'identité et l'expression individuelle. Avedon, par son utilisation de la lumière naturelle et du traitement contrasté de son image, accentue les détails du visage, rendant visible chaque nuance de texture et d'expression. En se concentrant uniquement sur les traits du visage et la posture, il élimine les distractions contextuelles, obligeant le spectateur à regarder directement l'histoire inscrite sur le visage de son sujet. Cela renforce l'idée que le corps, même isolé de son contexte immédiat, porte des indices révélateurs du mode de vie et des conditions environnementales. La série Visages de l'ouest de Richard Avedon, à travers des portraits comme celui de William Casby, offre une réflexion sur la manière dont l'art peut retranscrire les réalités sociales et économiques d'individus.

I.C. L'Expression des Émotions: La Typologie et ses Limites

Duchenne de Boulogne et la Science de l'Expression

Duchenne de Boulogne, pionnier dans l'étude scientifique des expressions faciales au 19^{ème} siècle, a cherché à établir une typologie des expressions à travers des expérimentations impliquant la stimulation électrique des muscles faciaux.² Ces travaux visaient à fournir une base anatomique et physiologique pour comprendre comment les émotions sont exprimées par le visage, offrant ainsi un outil précieux pour les artistes de son époque.

² Duchenne de Boulogne, G. B. (1862). The Mechanism of Human Facial Expression.



Figure 8. DUCHENNE DE BOULOGNE, Guillaume : *The Mechanism of Human Facial Expression (ou Mécanisme de la Physionomie Humaine)*, Plusieurs photographies de patients pendant les expériences sur les expressions faciales, Publié pour la première fois en 1862, Paris, France.

La Méthodologie de Duchenne et ses Implications Artistiques

Duchenne de Boulogne s'est démarqué par son utilisation pionnière de la stimulation électrique pour étudier le fonctionnement des muscles faciaux, une démarche scientifique qui lui a permis d'isoler et d'identifier les expressions faciales humaines associées à leur réaction musculaire. Parallèlement, il a adopté la photographie, une technologie émergente à l'époque, pour capturer et documenter ces expressions de

manière objective. Ce mariage de la science et de la technologie a jeté les bases d'une compréhension plus approfondie de la physiologie des expressions.

Au-delà de ses aspirations scientifiques, Duchenne visait à fournir aux artistes un guide précis pour la représentation des émotions. Il croyait que sa typologie des expressions, basée sur des principes anatomiques et physiologiques, pourrait aider les peintres et sculpteurs à reproduire avec une plus grande fidélité les subtilités des émotions humaines. Cette ambition reflète une reconnaissance de l'importance de la précision anatomique dans l'art. La réception de la méthodologie de Duchenne dans la communauté artistique a été mitigée. Si certains ont vu dans ses travaux une avancée permettant une représentation plus authentique des émotions, d'autres ont critiqué le caractère forcé et artificiel des expressions induites électriquement. Cette divergence de perception souligne la tension entre l'exactitude anatomique et l'authenticité émotionnelle dans l'art, une question qui reste pertinente dans les débats contemporains sur la représentation des émotions.

L'influence de Duchenne s'étend au-delà de son époque, inspirant des artistes modernes et contemporains intéressés par l'exploration des frontières entre la science et l'art. Ses travaux préfigurent des pratiques artistiques qui intègrent la technologie et la science, comme l'art bioéthique et les installations interactives qui exploitent la neuroscience pour créer des expériences immersives basées sur les émotions.

Par exemple, dans la série de vidéos intitulée *Les Passions*, Bill Viola explore l'expression des émotions humaines en revisitant des techniques de la Renaissance. Les œuvres de cette série présentent des acteurs filmés en très haute définition, leurs expressions faciales et gestes corporels ralentis jusqu'à l'extrême, permettant une observation minutieuse de chaque nuance émotionnelle. Cette méthode met en évidence la complexité des émotions humaines et montre les limites des typologies traditionnelles. En ralentissant le temps, Viola met en lumière les phases de transformation des émotions, allant de la colère à la tristesse, de la joie à la douleur.

Cela révèle ainsi les liens entre des sentiments souvent perçus comme distincts. L'immersion dans les émotions d'un personnage met en avant les limites de la classification rigide des expressions faciales et montre que les émotions humaines ne peuvent être réduites à des catégories simples et fixes. Par son approche, Bill Viola démontre que l'art peut nuancer et compléter les approches scientifiques des typologies émotionnelles traditionnelles.



Figure 9. VIOLA, Bill : *The Quintet of the Astonished*, Vidéo couleur, sans son, 2000, tirée de la série *Les Passions*, actuellement exposée au J. Paul Getty Museum, Los Angeles, États-Unis.

Fragonard et la Capture des Expressions Fugitives

Jean-Honoré Fragonard, artiste emblématique du XVIII^e siècle, incarne la capacité à capturer des expressions fugitives et des moments d'émotion pure à travers ses œuvres. Contrairement à l'approche mécanique et expérimentale de Duchenne de Boulogne, Fragonard réussit à capturer les émotions humaines de manière instantanée et vivante, révélant ainsi la spontanéité du vivant sans avoir recours à la technologie.

Fragonard se distingue par sa capacité à combiner technique et sensibilité artistique, utilisant des coups de pinceau fluides et expressifs pour donner vie à ses sujets. Son utilisation de la lumière et de la couleur contribue à la transmission d'émotions dans ses scènes, où chaque détail, du pli d'un vêtement à l'ombre d'un visage, sert à accentuer l'expression représentée. L'œuvre de Fragonard est souvent composée de personnages capturés dans des moments d'abandon émotionnel, que ce soit dans la joie, la surprise, l'amour ou la mélancolie. Ses portraits et scènes de genre dépeignent des expressions fugitives qui semblent échapper au temps.

Par exemple, dans son tableau *Le Verrou*, Fragonard capture une scène intense entre deux amants, où la lumière dramatique met en relief les expressions de désir et de passion. Le visage de la femme, partiellement éclairé, montre une émotion complexe, mêlant surprise et abandon. Les traits de son visage, sa posture, et même les plis de sa robe, contribuent à une scène où chaque élément est en mouvement, figé dans un instant de tension.



Figure 10. FRAGONARD, Jean-Honoré : *Le Verrou*, Huile sur toile, vers 1777-1778, actuellement exposé au Musée du Louvre, Paris, France.

Bien avant l'ère de la photographie, Fragonard, par son attention minutieuse aux expressions fugaces, anticipait une préoccupation qui deviendra centrale dans les travaux de Duchenne de Boulogne. Duchenne, au XIXe siècle, utilisera la photographie pour étudier scientifiquement les expressions faciales en isolant et en capturant les mouvements musculaires responsables des émotions. Cette démarche trouvera ses prémices dans les œuvres de peintres comme Fragonard, qui, par leur capacité à saisir les émotions éphémères, ouvrent la voie à une exploration plus systématique et analytique des expressions humaines.

Authenticité contre expérimentation

La juxtaposition des œuvres de Fragonard avec les expériences de Duchenne met en lumière une dichotomie fondamentale dans la représentation des émotions : l'authenticité émotionnelle contre la rigueur expérimentale. Tandis que Duchenne cherche à catégoriser et à reproduire les expressions par des moyens scientifiques, Fragonard capture une expression éphémère d'une émotion spontanée à travers une observation attentive et une interprétation artistique. L'approche de Fragonard souligne l'importance de l'intuition artistique et de la spontanéité dans la représentation des émotions. Ses œuvres rappellent que les expressions les plus authentiques et les plus touchantes sont souvent celles qui sont saisies dans l'instant, reflétant la complexité et la fluidité de l'expérience émotionnelle humaine.

La peinture, contrairement à la photographie, offre une liberté unique dans la création et la manipulation des émotions, en permettant à l'artiste de dépasser la simple captation pour explorer une interprétation personnelle. Cette capacité à fabriquer des émotions artificiellement, sans passer par un outil de captation, est essentielle pour aborder les notions de représentation humaine par différents médiums. La peinture ne se contente pas de représenter une réalité figée, elle la

recompose à partir de la perception et de la sensibilité de l'artiste, ce qui confère à chaque œuvre une certaine profondeur émotionnelle. D'un côté, la photographie peut capter une expression, qu'elle soit explicitement inscrite ou simplement fugitive. Cependant, comme le démontre l'approche de Duchenne de Boulogne, la photographie peut parfois manquer de capturer la nature d'une émotion. Duchenne, en isolant les mouvements musculaires pour provoquer des expressions faciales, produit parfois des rictus qui manquent de sincérité. Ces expressions, bien que techniquement correctes, manquent souvent du ressenti du modèle, ce qui les rend artificielles et peu convaincantes. La puissance de l'art, comme observée avec la Mona Lisa de Léonard de Vinci, réside dans sa capacité à susciter un doute, une émotion authentique, grâce à la vision subjective de l'artiste. Bill Viola, à travers ses vidéos au ralenti, tente de capturer ce qu'il appelle un "mouvement de l'âme". En étirant le temps, Viola décompose le processus par lequel un visage inexpressif devient expressif, rendant visible la transformation intérieure. Son œuvre "The Quintet of the Astonished" montre particulièrement bien cette démarche, où l'étonnement se lit sur des visages qui s'ouvrent à une expérience invisible mais palpable. Ce procédé, bien que basé sur la captation, reste une forme théâtrale où l'authenticité perçue dépend de la volonté du spectateur d'y croire.

Opposition entre la Méthode Scientifique et l'Expression Naturelle

Les expériences de Duchenne de Boulogne, bien que novatrices pour l'époque, ont parfois produit des images qui semblent exagérées ou caricaturales, tout comme dans les vidéos de Bill Viola. Cette perception découle de la méthode de stimulation électrique, qui, bien qu'efficace pour isoler les muscles faciaux et leurs fonctions, ne permet pas de capturer la source des émotions spontanées telles qu'elles se manifestent naturellement dans la vie quotidienne.

La caricature, en tant que forme d'art, exagère intentionnellement certains traits pour un effet humoristique ou critique. Dans le contexte des travaux de Duchenne, la "caricature" involontaire des expressions soulève des questions sur la fidélité de la

représentation des émotions humaines à travers des méthodes strictement scientifiques. Cette tension entre exactitude scientifique et authenticité émotionnelle invite à une réflexion sur les limites des approches mécanistes dans la compréhension et la représentation des expressions faciales.

Réflexions sur la Typologie des Expressions

Duchenne aspirait à établir une science des émotions à travers une typologie des expressions faciales. Son objectif était de décomposer les émotions en éléments discernables et mesurables, offrant ainsi un vocabulaire visuel pour les artistes. Cependant, cette ambition se heurte à la complexité inhérente des émotions humaines, qui résistent souvent à une catégorisation simplifiée. La tentative de Duchenne de systématiser les expressions émotionnelles met en lumière les défis de capturer la gamme complète et la nuance des états émotionnels à travers des modèles fixes. Les émotions humaines, influencées par un éventail de facteurs psychologiques, sociaux, et contextuels, ne se prêtent pas facilement à une classification rigide. Cette complexité est parfois perdue ou simplifiée dans les efforts pour créer une typologie exhaustive. La juxtaposition des travaux scientifiques de Duchenne avec l'approche plus intuitive et empathique des artistes comme Fragonard met en relief la nécessité d'une approche plus holistique et nuancée pour comprendre et représenter les émotions humaines. Alors que la science offre des outils précieux pour déchiffrer les mécanismes des expressions faciales, l'art capture souvent avec plus de fidélité la profondeur et la vérité des expériences émotionnelles.

L'analyse des travaux de Duchenne de Boulogne, juxtaposée à l'approche artistique de Fragonard, met en lumière les défis et les possibilités de représenter les expressions faciales dans l'art. Elle révèle que, bien que les typologies expressives puissent offrir un cadre utile, l'art de capturer les émotions transcende les frontières de la science, nécessitant une sensibilité aux nuances de l'expérience humaine qui ne peut être pleinement saisie à travers une photographie.

Dans la peinture, l'artiste part d'une toile blanche, un espace où chaque trait est délibérément choisi pour exprimer une émotion. Ce processus de création à partir de rien, ou plutôt à partir d'un modèle artificiel, est similaire à la création d'images en 3D et en animation. Dans ces domaines, comme dans la peinture, il s'agit de rendre un modèle artificiel vivant et expressif. Toutefois, il est souvent difficile d'éviter l'artificialité des expressions. Ainsi, la peinture est intéressante, voire essentielle, dans l'étude des émotions parce qu'elle permet de maîtriser et d'explorer les nuances émotionnelles de manière subjective et contrôlée. Elle ne se contente pas de capter une expression ; elle la crée, la modèle, et en fait quelque chose de profondément humain et sincère. Cette capacité à manipuler les émotions de manière si fine et détaillée est ce qui fait la richesse de la peinture par rapport à la photographie. C'est cette maîtrise de l'expression que les artistes cherchent à atteindre dans les images de synthèse et l'animation.

II. Techniques et Flux de Production en Modélisation 3D de Personnages

II.A. Introduction à la Modélisation 3D de Personnages

L'exploration des émotions à travers la sculpture, la peinture, la photographie et la vidéo permet d'introduire les défis rencontrés dans la modélisation 3D de personnages. La modélisation 3D est le processus de création d'objets tridimensionnels numériques, utilisés dans divers domaines tels que le cinéma, les jeux vidéo, l'architecture et la médecine. En utilisant des logiciels adaptés, les artistes numériques construisent des modèles virtuels en manipulant des points dans un espace en trois dimensions pour former des surfaces et des volumes. Ces modèles peuvent ensuite être texturés, animés et rendus pour produire des images ou des animations réalistes. La modélisation 3D permet de visualiser et de manipuler des objets de manière interactive, offrant des possibilités infinies pour la création artistique et technique.

Dans la modélisation 3D, le défi est de traduire la complexité émotionnelle et la sensibilité artistique en modèles numériques. Chaque détail, chaque nuance doit être soigneusement sculpté et animé pour donner de la vie à des personnages créés de toutes pièces. La transition de la toile blanche à l'écran de l'ordinateur implique d'avoir des compétences artistiques mais aussi une compréhension technique des outils et des flux de production.

Cette partie se concentre sur les techniques de modélisation 3D permettant la création de personnages virtuels. Elle détaille les processus et les méthodologies utilisées pour capturer et exprimer les émotions humaines dans un contexte numérique. En s'inspirant des principes artistiques étudiés plus tôt, cette partie examine comment ces concepts peuvent être appliqués dans la modélisation 3D, en explorant les outils et les techniques qui permettent de créer des personnages expressifs et convaincants. Le passage de la théorie à la pratique soulignera l'importance de l'intégration des compétences artistiques et techniques pour atteindre un niveau de réalisme satisfaisant dans les personnages de synthèses.

Débuts et Évolution de la Modélisation 3D

La modélisation 3D, aujourd'hui incontournable dans la représentation de l'être humain sur ordinateur, trouve racine dans les premières expérimentations académiques des années 1970. La modélisation 3D définit l'art et la science de créer des représentations graphiques de figures géométriques dans un espace tridimensionnel calculé par un ordinateur. Ce processus permet de visualiser et de manipuler des objets dans une interface virtuelle, ce qui était autrefois limité aux capacités du dessin et de la sculpture traditionnels.

Les premières apparition de visages humains dans un moteur 3D marquent une étape importante dans l'évolution de l'image de synthèse. Contrairement aux images capturées en photographie ou aux visages dessinés et peints par imitation, une image de synthèse est générée entièrement par un ordinateur. Ce processus commence par la création d'une "coquille vide" : un modèle volumétrique inexpressif et générique, souvent basé sur des standards anatomiques. Les expressions faciales, appliquées à ces modèles, sont également génériques et dérivées de travaux comme ceux de Duchenne de Boulogne, qui isolait les mouvements musculaires responsables des expressions. Ce modèle inexpressif de base, une fois animé, permet d'explorer et de manipuler les expressions faciales de manière précise, mais il peut aussi montrer les limites sur l'authenticité des émotions.

Au cœur des premières recherches autour de la modélisation 3D d'être humain se trouve l'Université de l'Utah, qui est rapidement devenue un pôle d'innovation pour la visualisation numérique. Parmi les pionniers, Edwin Catmull et Fred Parke ont fondé les premières bases de la modélisation 3D avec la création du court métrage *A Computer Animated Hand* en 1972, qui a modélisé pour la première fois une partie du corps humain en 3D, explorant ainsi les possibilités de capturer fidèlement et de reproduire les détails complexes des mouvements humains.

A Computer Animated Hand illustre les premières recherches dans l'animation par ordinateur, en mettant en scène une main animée et des visages humains. Ce projet pionnier, reconnu pour son innovation et inscrit au National Film Registry en 2011, a été produit à une époque où l'animation par ordinateur était considérée comme marginale, selon Fred Parke, à l'époque étudiant en doctorat. La puissance de

calculs des ordinateurs était à peine capable de produire des images fixes, ce qui fait de ce film une prouesse technique. Pour créer ce court métrage, Edwin Catmull a utilisé sa propre main gauche comme modèle, commençant par créer un moulage en plâtre. Il a ensuite créé un modèle en plâtre à partir du moule et a dessiné 350 petits triangles et polygones sur le modèle à l'encre. A noter que cette série de points sont plus tard appelés Vertex, et demeurent un principe fondamental de la modélisation 3D que l'on retrouve encore à l'heure actuelle. Ces polygones représentent alors la surface de sa main sur l'interface de l'ordinateur. Catmull et Parke ont consacré beaucoup de temps à mesurer les coordonnées de chaque point des polygones et à les saisir dans la machine via un clavier Teletype. Grâce à un programme d'animation 3D écrit par Catmull, ils ont pu reproduire la main virtuelle sur un écran et la faire bouger. Parke a également créé une animation du visage de sa femme, qui apparaît dans le film. Ce modèle représente un des premiers portraits humain réalisé sur ordinateur avec un système à trois coordonnées.

Ce court métrage a prouvé la faisabilité technique de la capture des mouvements de la main et a également établi les bases pour la compréhension des nuances subtiles requises pour la représentation humaine en animation 3D. En numérisant la main de Catmull et en animant les visages, ils ont démontré que les ordinateurs pouvaient simuler et capturer des formes et des mouvements humains avec une grande précision. Ces recherches ont par leurs innovation de la modélisation 3D influencées des entités telles que Pixar, co-fondée par Edwin Catmull et Industrial Light & Magic, structure majeur des effets spéciaux dans le cinéma.

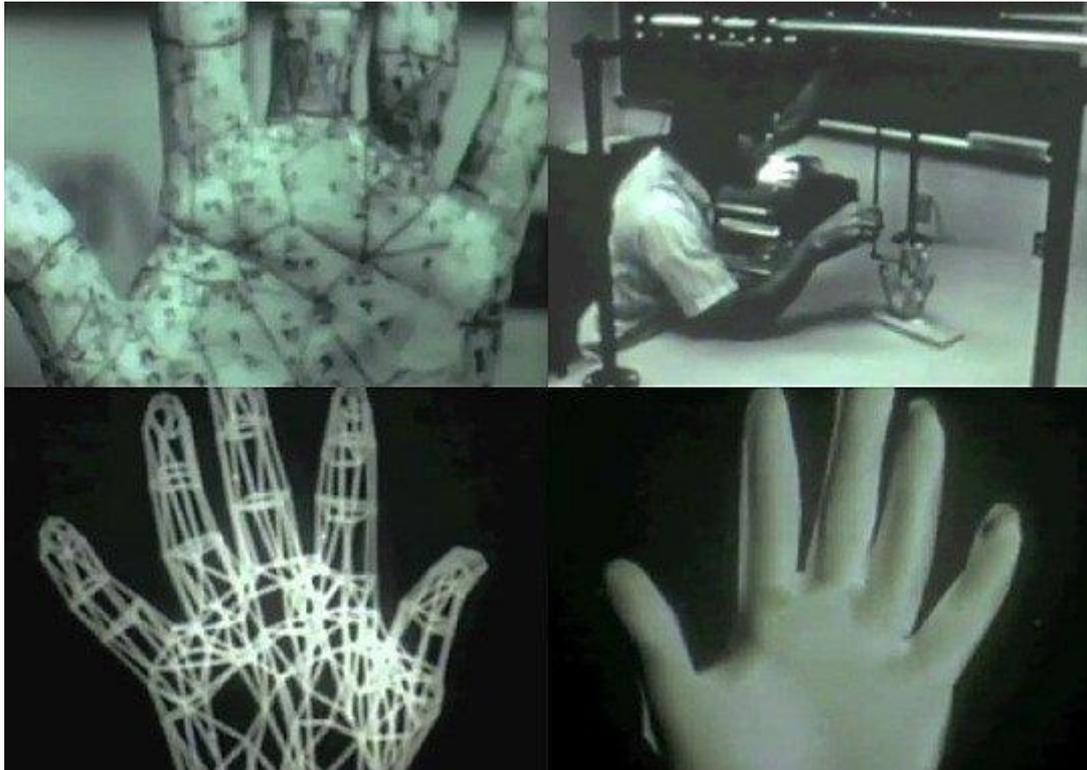


Figure 11. CATMULL, Ed : *A Computer Animated Hand*, 1972, animation 3D, University of Utah, États-Unis.

Plus tard, en 1974, Fred Parke sera le premier à représenter un visage humain expressif et le premier à réaliser un morphing 3D. Dans son projet intitulé *Faces and Body Parts*, court métrage introduit dans le cadre de sa thèse sur la modélisation faciale à l'Université de l'Utah, Fred Parke mène une recherche gravitant autour du concept de l'Uncanny Valley. Le concept d'Uncanny Valley, ou vallée de l'étrange en français, décrit un phénomène psychologique où des répliques d'êtres humains, par exemple des robots, mannequins, des visages animés en 3D, etc... qui ressemblent presque parfaitement à des humains réels, mais avec de légères imperfections, provoquent un sentiment de malaise ou de répulsion chez le spectateur. Ce sentiment est généralement moins intense lorsque la ressemblance est moins précise.

Parke a dans son projet créé un modèle 3D d'un visage et d'une tête en utilisant le principe de vertex, précédemment utilisé dans le court métrage *A Computer Animated Hand*. Ces vertex ont été reliés pour former des polygones, décrivant ainsi

les contours du visage. Ce modèle s'intègre dans les premières réalisations où la géométrie de la tête humaine a été numérisée en 3D. L'aspect révolutionnaire de son travail a été l'animation de ce visage ressemblant à un masque pour montrer diverses expressions faciales et mouvements des lèvres, simulant la parole. Pour ce faire, il a modifié les coordonnées des vertex du modèle manuellement pour animer les expressions et le mouvement, créant ainsi un effet de morphing avant que le terme même ne soit couramment utilisé dans les effets spéciaux au cinéma.



Figure 12. PARKE, Fred : *Faces and Body Parts*, 1972, animation 3D, University of Utah, États-Unis.

La modélisation de personnage sur ordinateur a par la suite suscité l'intérêt et été utilisée par de grands studios d'animation. A l'inverse des recherches de Edwin Catmull et Fred Clarke, l'intérêt de la 3D sur ordinateur pour ces studios était de rendre des personnages avec des formes détachées du réel. Le premier court métrage rendu intégralement en image de synthèse et représentant des personnages fictifs est réalisé par Pixar en 1984 et est intitulé *Les Aventures d'André*

et Wally B. (1m39s). Pixar devient un acteur majeur dans l'animation 3D et révolutionne l'industrie par ses recherches autour de cette technologie encore jeune pour l'époque. Dans *Les Aventures d'André et Wally B.*, on retrouve un personnage principal modélisé intégralement sur ordinateur avec des formes géométriques très simplistes rappelant les bases du dessin de personnage. Une sphère pour constituer les traits de son visage et son nez, un cylindre pour son chapeau, un cône pour son corps. Pour l'époque, le court métrage révolutionne non pas pour son réalisme mais pour sa novation. On ne passe plus par des images filmées ou par le dessin mais par un nouveau médium qu'est l'image de synthèse pour représenter l'aventure d'un personnage. La force de ce court métrage réside aussi dans son éclairage et son animation développée. Le personnage d'André fonctionne grâce à un jeu d'expressions exacerbées.



Figure 13. PIXAR : *Les Aventures d'André et Wally B.*, 1984, animation 3D (1m39s), Pixar, États-Unis.

Ces premières ébauches de modèles 3D sont considérées comme des performances techniques et représentent des accessoires technologiques ayant un rôle décoratif. Ce n'est que dans les années 80 et 90 que cette technologie apparaît au cinéma, dans un premier temps dans les films de science fiction, et est

considérée comme un médium artistique avec les premiers longs métrages réalisés uniquement sur ordinateur. Des films comme *Toy Story* ont transformé l'industrie en montrant que les personnages entièrement numériques pouvaient porter des films à succès, en modélisant à la main les formes humaines ainsi que leurs expressions et émotions de manière convaincante.



Figure 14. PIXAR : *Toy Story*, 1995, animation 3D, 81 minutes, réalisé par John Lasseter, Pixar Animation Studios, États-Unis.

La sortie de *Toy Story* en 1995, produit par Pixar, constitue le premier long métrage à succès réalisé entièrement avec de l'image de synthèse et de la modélisation 3D. Ce film d'animation représente une étape révolutionnaire dans l'histoire du cinéma, étant le premier long métrage entièrement modélisé et animé par ordinateur. *Toy Story* a d'une part démontré la viabilité commerciale et artistique des films d'animation produits en 3D, mais a également posé les fondations des techniques modernes de narration visuelle utilisant des personnages entièrement modélisés en 3D. Dans *Toy Story*, chaque personnage a été pensé et conçu pour refléter des traits de personnalité uniques, ce qui a été rendu possible grâce à des avancées significatives dans la technologie de modélisation 3D. En effet, il a fallu plus de vingt ans après les recherches d'Edwin Catmull et de Fred Clarke pour que ce long

métrage voit le jour. Les personnages, de Woody le cowboy à Buzz l'astronaute, ont été créés avec des expressions faciales et des mouvements qui pouvaient transmettre une large gamme d'émotions chez le spectateur, établissant ainsi une nouvelle norme pour l'engagement émotionnel dans les films d'animation. Contrairement aux dessins animés traditionnels en 2D, Toy Story permet des mouvements plus fluides et réalistes, grâce à la manipulation précise des modèles 3D. Ainsi, les expressions faciales y gagnent en subtilité et en complexité, chaque micro-expression étant finement pour couvrir un champ plus large d'émotions. De plus, l'interaction des personnages avec leur environnement est rendue de manière plus naturelle et immersive, grâce à la simulation de la physique et des lumières. Les dessins animés traditionnels, bien que très expressifs, dépendent du talent de l'animateur pour chaque image clé, limitant parfois le réalisme des interactions des personnages.

Malgré leur apparence s'éloignant du réel, les personnages de Toy Story sont dotés d'émotions qui permettent aux spectateurs de toutes les générations de s'identifier à eux et de se plonger dans le récit animé. L'approche de Pixar pour Toy Story a également mis en lumière comment la modélisation 3D pouvait être exploitée pour créer des mondes immersifs et interactifs. En effet, les personnages mais aussi les environnements de Toy Story sont entièrement modélisés en 3D, ce qui participe à la cohérence visuelle et à l'univers du long métrage. Cela a ouvert la voie à des explorations narratives plus dynamiques et interactives dans les films d'animation, où les environnements et les personnages pouvaient être parfaitement intégrés pour enrichir l'histoire.

Cette phase pionnière a permis de démontrer que la modélisation 3D, avec des avancées technologiques, pouvait dépasser les représentations traditionnelles pour

atteindre des retranscriptions plus fidèles de l'être humain. En effet, cela a posé les bases méthodologiques et techniques pour des développements futurs.

Cette période d'innovation n'a pas seulement vu l'amélioration des aspects techniques mais a également intégré de plus profondes connaissances artistiques dans le processus de création numérique. Les animateurs et les concepteurs ont commencé à utiliser des références tangibles issues de photographie ou de modèles anatomiques pour guider la création de leurs modèles numériques, cherchant à reproduire avec exactitude les nuances de la physionomie humaine. Ces recherches ont permis de réaliser des progrès importants dans la manière dont les modèles 3D pouvaient restituer l'apparence et les émotions humaines. Une étape importante dans le domaine de l'animation est l'arrivée de technologies de capture de mouvement. Ces outils développées pendant cette période fournissent aux artistes 3D des outils encore plus précis pour enregistrer et reproduire les dynamiques et les expressions humaines.

Ces avancées montrent le potentiel de la modélisation 3D d'une part comme un outil de réplique des formes humaines mais aussi comme un moyen de saisir et de transmettre la singularité des expressions et des comportements individuels. Ces développements ont progressivement permis d'explorer de manière plus approfondie les capacités de la modélisation 3D à se rapprocher le plus possible d'images provenant du réel. Les avancées et expérimentations constantes dans ce domaine permettent de mettre en avant une question essentielle : jusqu'à quel point peut-on reproduire l'être humain en utilisant la modélisation 3D, et comment ces représentations se comparent-elles aux images obtenues par les médiums qui procèdent de la captation du réel ? En explorant les innovations techniques et les progrès artistiques dans ce domaine, des réponses à cette question pourront être dressées.

Les avancées des techniques et des outils de modélisation 3D et d'animation

L'avancement des techniques et des outils de modélisation 3D a ouvert de nouvelles portes pour explorer et répliquer la complexité de la figure humaine avec grande précision et fidélité. L'évolution des logiciels et des algorithmes a permis de simuler avec une grande précision des aspects variés comme la texture de la peau, le mouvement des tissus, des muscles et même les subtiles nuances de l'expression faciale. En effet, l'artiste 3D cherche constamment à comprendre comment fonctionne l'objet qu'il représente virtuellement dans le monde réel. Ainsi, une connaissance accrue de l'anatomie humaine, faciale ou corporelle, est nécessaire pour créer un modèle humain virtuel. Le perfectionnement des outils de sculpture numérique, comme ZBrush ou Mudbox, a fourni aux artistes de puissants outils pour façonner des détails anatomiques précis sur un modèle 3D, tout comme dans la sculpture traditionnelle. Ces outils, qui permettent une modélisation avec un haut niveau de détail, sont essentiels pour aborder la question de la fidélité dans la représentation humaine. Par exemple, ils permettent de sculpter des muscles, des veines et des textures de peau qui sont adaptés à la position et aux expressions d'un personnage. Cette pratique requiert beaucoup d'expérience et seuls très peu d'artistes parviennent à pousser le réalisme de leurs modèles à l'extrême.

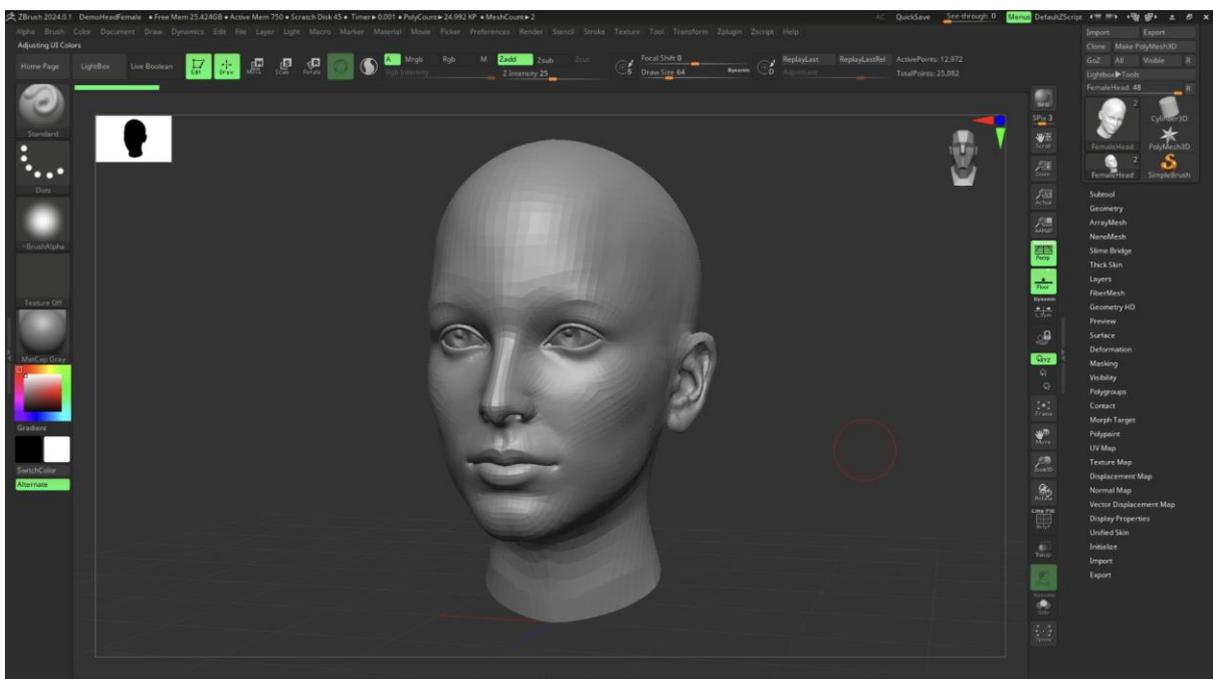


Figure 15. Capture d'écran de l'interface logicielle de *Zbrush*, 2024, logiciel de modélisation 3D, Pixologic Inc.

En parallèle, le domaine de la 3D a connu des avancées dans les techniques d'éclairages et de textures d'objets, tout comme les moteurs de rendu des images qui ont constamment été améliorés de manière à améliorer la qualité des images de sortie. Ces notions présentes en fin de chaîne de production permettent aux artistes de simuler des effets de lumière naturelle et des interactions matérielles complexes, ce qui représente une étape clé dans le réalisme d'un personnage modélisé en 3D. En effet, si un modèle est parfaitement sculpté mais rendu avec un mauvais éclairage, de mauvaises textures et un moteur peu performant, toute l'artificialité du personnage sera révélée. C'est pour cela que dans le domaine de la 3D, toutes les étapes du flux de production, qui seront explorées en détail par la suite, doivent être maîtrisées et être cohérentes les unes des autres pour pouvoir fonctionner.

Pour ce qui est de l'animation d'un personnage, des logiciels de rigging³ et d'animation sont utilisés par les artistes. Leur développement a également eu un impact important sur la capacité à animer des modèles de visages et des corps humains avec une précision de plus en plus fidèle à la réalité. Les squelettes devenant de plus en plus sophistiqués, ils peuvent maintenant mieux simuler les mouvements physiques naturels du corps humain, en tenant compte des limites anatomiques réelles. Cela permet d'obtenir une animation plus réaliste mais aussi une étude plus approfondie de la manière dont les mouvements peuvent être fidèlement reproduits en 3D.

Le développement constant des logiciels de modélisation 3D et les recherches autour de ce domaine a permis à ce médium de devenir un outil pour créer des représentations visuelles avec une grande liberté. De plus, la modélisation 3D constitue un moyen d'explorer et de comprendre en profondeur le fonctionnement de l'être humain. En effet, la complexité des outils présents dans logiciel de

³ Un logiciel de rigging est un outil utilisé en animation 3D pour créer un squelette numérique. Ce squelette permet aux animateurs de déplacer et de poser des modèles 3D avec des mouvements précis et réalistes en définissant les articulations et les os du modèle.

modélisation 3D actuels permet de reproduire les objets organiques ou inorganiques du monde réel, à condition de comprendre en détail leur constitution et leur réaction avec son environnement.

L'intersection de l'art et de la technologie dans la modélisation 3D a ouvert des horizons nouveaux pour la représentation de l'être humain, en alliant la précision technique au regard artistique. L'apport des arts traditionnels tels que la sculpture, la peinture et la photographie a enrichi le domaine de la modélisation 3D et a permis aux artistes d'avoir des références sur le plan physique, sensoriel et psychologique des sujets humains. Cette association de disciplines est essentielle pour progresser vers une reproduction plus authentique et détaillée de l'être humain. Dans le domaine de la sculpture, par exemple, les techniques de modélisation 3D ont bénéficié de la compréhension des formes, des volumes et de la dynamique des matériaux traditionnels. En adaptant ces techniques au numérique, les artistes peuvent créer des modèles 3D qui imitent la réalité visuelle et qui véhiculent des imperfections qu'on retrouve traditionnellement dans les œuvres sculptées à la main. De même, l'influence de la peinture et du dessin a introduit des concepts de couleur, de texture, et d'ombre, enrichissant ainsi les inspirations des artistes 3D pour créer des rendus plus réalistes et expressifs. La photographie, en particulier, a joué un rôle crucial en fournissant des références visuelles de haute fidélité qui aident à affiner la texture de la peau, les jeux de lumière et les nuances subtiles des expressions faciales dans les modèles 3D. Les techniques d'éclairage empruntées à la photographie de portrait, par exemple, ont permis de mettre en avant les traits des modèles.

Développements de nouveaux outils permettant d'améliorer le réalisme

L'évolution des outils de modélisation 3D a considérablement influencé la capacité des artistes et des techniciens à capter avec une grande précision les détails anatomiques complexes des êtres humains. Parmi ces avancées, l'intégration du rendu avec Subsurface Scattering (SSS)⁴ représente un grand avancement dans le rendu de peau. Cette technique, qui simule la manière dont la lumière pénètre et se diffuse à travers des surfaces translucides comme la peau humaine, a permis de produire des effets d'un réalisme plus poussé, simulant désormais la qualité organique de la peau et sa réaction avec la lumière, un élément crucial pour reproduire la vraisemblance humaine.

En outre, l'amélioration des algorithmes de simulation de cheveux et de vêtements a joué un rôle important dans la modélisation de personnages 3D. Les artistes peuvent désormais créer des cheveux qui se déplacent et réagissent de manière réaliste aux interactions environnementales, comme le vent ou les mouvements du corps, ce qui ajoute une impression supplémentaire de réalisme à la représentation numérique. De même, les simulations de tissus ont évolué pour restituer avec précision le drapé et s'adapter de manière fluide au corps humain.

Par ailleurs, une plus grande justesse des expressions faciales des personnages modélisés en 3D a été rendue possible par des avancées dans la capture de mouvement et les rigs faciaux (HMC)⁵. Ainsi, en progressant vers des simulations toujours plus avancées, la modélisation 3D ne se contente pas d'imiter la réalité, elle offre un moyen d'explorer et de comprendre les aspects les plus subtils de l'humain.

⁴ technique de rendu qui simule la manière dont la lumière pénètre dans des matériaux translucides (comme la peau, la cire ou le marbre), se disperse à l'intérieur, puis ressort. Cette technique est essentielle pour rendre des matériaux réalistes en reproduisant leur apparence douce et diffuse lorsqu'ils sont éclairés.

⁵ Dispositif spécialement conçu pour capturer les mouvements et expressions du visage et de la tête humaine. Il est souvent équipé de caméras ou de capteurs positionnés autour de la tête pour enregistrer avec précision les détails des expressions faciales, utilisés ensuite pour animer des personnages 3D dans les films, les jeux vidéo, et d'autres applications de réalité virtuelle.

Perfectionnement des logiciels de modélisation

Les logiciels de modélisation 3D ont subi une transformation radicale au cours des dernières décennies, évoluant de simples outils de création de formes géométriques à des systèmes capables de détailler chaque pore de peau sur un modèle humain. Des logiciels tels que Autodesk Maya et ZBrush ont marqué en popularisant le domaine de la sculpture numérique, permettant aux artistes de créer des modèles avec un degré de précision et de réalisme autrefois inimaginable. Ces logiciels offrent désormais des fonctionnalités avancées qui simulent les propriétés physiques des matériaux, comme la souplesse de la peau ou la rigidité des ongles, permettant une représentation plus naturelle et fidèle des êtres humains. Par exemple, ZBrush utilise des outils de brosses dynamiques qui imitent l'interaction du pinceau avec de l'argile ou d'autres matériaux, ce qui permet aux sculpteurs numériques de manipuler leurs modèles avec la même intuition et sensibilité qu'ils le feraient dans un environnement physique. La précision dans la modélisation des détails anatomiques est particulièrement importante pour capturer la singularité de chaque sujet. En permettant aux artistes de modéliser des détails fins comme les rides d'expression, les cicatrices ou même les subtiles variations de texture de la peau, ces outils aident à transmettre les traits caractéristiques des individus. Ce haut niveau de détail rendu possible par le logiciel ne renforce pas seulement le réalisme visuel, il permet également d'apporter de la complexité aux personnages modélisés. En outre, l'intégration de ces logiciels avec d'autres technologies comme la capture de mouvement permet une synchronisation entre la création du modèle et son animation. Cela implique que les subtiles nuances imaginées dans la sculpture statique d'un personnage sont préservées et correctement restituées dans l'animation. En améliorant continuellement ces outils, l'artiste 3D a accès à un champ de représentation presque infini et possède tous les éléments pour mettre en image ce qu'il a à l'esprit.

II.B. Processus de Création de Personnages et Inspirations Artistiques Externes

La photographie joue un rôle important dans la modélisation 3D, en particulier dans l'appréhension des textures et de l'éclairage, qui sont des notions essentielles pour reproduire des personnages humains de manière fidèle. Des références visuelles précises sont accessibles aux artistes 3D et influencent directement la manière dont ils approchent la texture de la peau, les expressions de visage, et la réaction d'une source lumineuse avec la peau.

Les portraits photographiques de haute qualité sont des ressources importantes pour les artistes 3D travaillant sur des personnages. Les œuvres de photographes renommés, comme Andrew Zuckerman, illustrent cette pratique. Dans son projet "Wisdom" (2008), Zuckerman capture des portraits détaillés de figures publiques, offrant une clarté et une profondeur qui sont particulièrement utiles pour les modélisateurs cherchant à reproduire de manière fidèles ces protagonistes ou tout simplement recréer des textures de peau authentiques et des expressions faciales dynamiques. Ces images servent de référence pour développer des techniques de shading⁶ avancées qui reflètent fidèlement la manière dont la lumière interagit avec les surfaces organiques.

⁶ Définit la luminosité, la couleur et la texture des surfaces d'un objet 3D en fonction de la source lumineuse et des propriétés du matériau. Cela inclut des techniques pour simuler des effets tels que les ombres, la réflexion de la lumière, et la translucidité, contribuant à la perception de la profondeur et du réalisme de l'objet.



Figure 16. ZUCKERMAN, Andrew : *Wisdom*, Portrait réalisé en studio de Vanessa Redgrave, Ouvrage regroupant cinquantes portraits de célébrités, Edition Abrams, livre publié en plusieurs langues, long métrage documentaire et exposition itinérante permanente organisée à New York, Los Angeles, Dublin, Sydney et Toronto, 2008.

En outre, la précision des détails capturés dans de tels portraits permet aux artistes 3D de comprendre et de reproduire les subtilités anatomiques, essentielles pour des rendus photoréalistes. Par exemple, les photographies en ultra haute résolution présentent sur des sites comme celui de Daniel Boschung⁷ fournissent une ressource précieuse pour étudier la complexité des textures faciales, des rides, des

⁷ BOSCHUNG, Daniel, Photography for 3D Art: High-Resolution Portraits

pores, et de l'interaction lumineuse sur la peau. Les photographies de Boschung poussent à l'extrême les détails de visages humains, au point de remarquer l'aspect tubulaire de la pilosité faciale, ou encore d'observer les différentes strates de la peau dans des zones tatouées. En effet, ces images permettent une étude approfondie des détails humains qui sont souvent invisibles à l'œil nu, tels que les textures les plus complexes de la peau, les subtiles variations de couleur et les effets de la lumière sur différentes surfaces.



Figure 17. BOSCHUNG, Daniel : *Photography for 3D Art: High-Resolution Portraits*,
Source : <https://www.danielboschung.com/>

Pour les artistes 3D, accéder à des portraits détaillés comme ceux de Daniel Boschung est indispensable. Ces portraits offrent un aperçu des caractéristiques macroscopiques comme les expressions et les formes générales, mais aussi les micro-détails de peau, les petites rides, et même les subtiles nuances de la pigmentation. Cette richesse de détails permet aux artistes de récupérer des motifs et de développer des textures de peau les plus réalistes possible et de simuler des réactions de la peau à diverses conditions d'éclairage. Cette compétence est en effet essentielle pour tout projet visant le photoréalisme.

L'utilisation de telles références photographiques augmente également la précision avec laquelle les artistes peuvent modéliser les interactions de la lumière avec la peau humaine. Les techniques comme le subsurface scattering, qui simule la manière dont la lumière pénètre dans la peau humaine et se disperse à l'intérieur, peuvent être affinées grâce à l'étude de ces images. Les artistes peuvent ajuster les paramètres de leurs shaders pour capturer la translucidité de la peau, un élément clé pour reproduire des visages humains qui semblent vivants et expressifs. En plus de la texturation et du shading, ces références photographiques sont nécessaires pour la simulation des cheveux et des textiles, mais aussi pour comprendre comment la lumière interagit avec différents matériaux. Des portraits photographiques de très haute résolution permettent aux artistes de voir et de reproduire la façon dont les cheveux réfléchissent et absorbent la lumière, ce qui est indispensable pour créer des personnages aux cheveux réalistes et naturellement fluides. En définitive, les portraits photographiques de haute qualité ne sont pas seulement des outils pour améliorer la fidélité d'un personnage modélisé en 3D, ils sont essentiels pour enseigner et affiner les compétences techniques des artistes 3D. En fournissant un libre accès à des détails complexes et variés, ces références permettent une meilleure compréhension des propriétés physiques réelles des sujets modélisés, faisant ainsi progresser l'ensemble du champ de la modélisation 3D vers des réalisations toujours plus photoréalistes.

Utilisation des Techniques Photographiques pour l'Éclairage

Les techniques photographiques pour l'éclairage jouent un rôle indispensable dans la modélisation 3D, surtout pour les artistes cherchant à capturer et à recréer l'ambiance et l'intensité des scènes réelles. L'éclairage n'est pas seulement une question technique; il est également un puissant outil narratif qui peut influencer la perception et l'émotion d'un personnage ou d'une scène. Dans la photographie,

l'éclairage est utilisé pour mettre en valeur ou atténuer certaines caractéristiques physiques, cela passe par le positionnement des sources et leur dureté. Ces connaissances peuvent aider les artistes 3D à comprendre comment positionner et régler les sources lumineuses dans un environnement virtuel. Par exemple, les sources concentrées dites dures sont souvent utilisées dans les portraits pour créer un contraste dramatique qui révèle la forme du visage. Cet effet peut être appliqué dans la phase d'éclairage en modélisation 3D pour renforcer la présence d'un personnage ou pour mettre en relief des émotions complexes difficilement identifiables sur le modèle sculpté. Les nuances subtiles de l'éclairage dans les films montrent comment la lumière peut être utilisée pour ajouter une dimension temporelle ou psychologique, enrichissant ainsi la narration visuelle. Enfin, la compréhension avancée de la lumière acquise par l'étude de la photographie permet aux artistes 3D de simuler des environnements plus réalistes et captivants. Cette capacité à manipuler l'éclairage pour reproduire des conditions spécifiques est essentielle pour les productions qui nécessitent un haut degré de réalisme et d'immersion.

La maîtrise des techniques photographiques est essentielle en modélisation 3D pour créer des images réalistes qui ressemblent à des clichés photographiques ou à des extraits de film. Par exemple, la gestion de la profondeur de champ permet de simuler le flou d'arrière-plan et de mettre en avant le sujet principal, ajoutant une dimension de réalisme à la scène. L'étude du cadre et de la composition aide à diriger l'œil du spectateur et à renforcer l'impact visuel de l'image.

Sculpture: Transmission des Formes et Volumes

La sculpture, en tant qu'art de transformer les matériaux concrets pour créer des formes tridimensionnelles, offre des références importantes pour la modélisation 3D, en particulier dans la reproduction fidèle des formes humaines. Les principes de la sculpture classique et contemporaine sont essentiels pour les artistes 3D souhaitant donner vie à des personnages numériques réalistes. Les œuvres de Ron Mueck, célèbre pour son hyper-réalisme et son attention méticuleuse aux détails, sont particulièrement instructives pour les artistes 3D. Mueck crée des sculptures qui

capturent les détails anatomiques minutieux ainsi que les émotions des sujets, des éléments que certains artistes 3D aspirent à reproduire. Sa sculpture "Mask II" (2001-2002), une représentation surprenante de son propre visage avec une précision rarement vue en sculpture, montre une maîtrise de la texture de la peau, des expressions faciales et des nuances subtiles qui peuvent être directement appliquées dans la domaine de la modélisation 3D. Pour ce faire, Ron Mueck a réalisé une maquette en argile avant de réaliser sa sculpture en fibre de verre, en silicone et en résine. Cette œuvre démontre comment les sculptures peuvent servir de références directes pour la création de textures de peau réalistes et la simulation de l'éclairage naturel sur les surfaces biologiques. L'approche de Mueck, qui combine une observation aigüe avec une technique de sculpture extrêmement détaillée, inspire les artistes 3D à pousser les limites de ce qui est possible dans le numérique. En intégrant les techniques utilisées par Mueck, les modélisateurs 3D peuvent améliorer la précision de leurs propres créations, notamment en ce qui concerne les micro-détails des textures et les variations subtiles de couleur qui sont essentielles pour le photoréaliste. En adoptant des méthodes propres au champ de la sculpture dans la modélisation 3D, les artistes peuvent comprendre de manière concrète la manière de reproduire des formes humaines. Les sculptures contemporaines de Mueck, avec leur précision et leur expressivité, illustrent la manière dont les techniques traditionnelles peuvent enrichir et informer les pratiques modernes.



Figure 18. MUECK, Ron : *Mask II*, Sculpture en silicone, résine et cheveux, Dimensions 80 x 146 x 51 cm, Créée en 2001-2002, Collection privée; exposition fréquente dans divers musées internationaux, notamment à la Fondation Cartier pour l'art contemporain, Paris, France.

Les principes propres à la sculpture sont essentiels dans la modélisation de personnage en 3D pour atteindre un haut niveau de réalisme et d'expression. En s'appuyant sur les techniques présentes dans la sculpture traditionnelle, les artistes 3D peuvent mieux comprendre et manipuler les formes, les volumes et les interactions de la matière pour donner vie à des créations virtuelles convaincantes. La première étape dans l'intégration de ces techniques de sculpture est l'analyse des formes de base qui composent le corps humain. Comme dans la sculpture traditionnelle, la modélisation 3D commence souvent par une ébauche grossière, une forme simplifiée qui est progressivement affinée. Les logiciels modernes de modélisation, tels que ZBrush ou Mudbox, offrent des outils qui imitent les actions de sculpture, permettant aux artistes de "tailler" et de façonner leurs modèles

numériques avec une précision et une sensibilité qui étaient autrefois réservées aux sculpteurs travaillant des matériaux comme l'argile ou le marbre.

Traditionnellement, en sculpture, un modèle était fabriqué en argile puis le sculpteur avait deux possibilités pour le dupliquer et créer son œuvre finale. Soit le modèle est fondu dans un moule en plâtre réalisé sur la pièce d'argile, ce qui est souvent le cas pour le bronze. Soit il est taillé dans le marbre avec des outils de report millimétrés pour transférer les dimensions du modèle en argile à un bloc de marbre. Le bloc était disposé à côté du modèle pour assurer une précision maximale, permettant une reproduction exacte.

8

A la différence de la sculpture traditionnelle, la capacité à ajuster minutieusement les modèles 3D en temps réel offre une très grande liberté créative. Les artistes peuvent expérimenter avec des proportions et des textures, ajustant les détails des muscles, le positionnement des os, et finalement l'expression des personnages. Par exemple, l'utilisation de maillage dynamique dans Zbrush (Dynamesh⁹) permet aux artistes de créer des rides d'expression qui réagissent de manière réaliste aux mouvements faciaux, ajoutant une couche de réalisme qui rend les personnages numériques plus réalistes et vivants.

Cinéma: Influence de la Narration Visuelle et Composition

Les plans cinématographiques sont utilisés par les artistes 3D pour observer sous différents angles et différentes mises en scène un personnage. Par exemple, Marco Di Lucca a étudié de nombreux plans de la série Breaking Bad de Vince Gilligan pour pouvoir créer en 2021 une reproduction presque parfaite de Walter White, personnage emblématique de la série télévisée. Pour cela, Marco Di Lucca a utilisé le logiciel Mudbox pour la sculpture et Maya avec le moteur de rendu Arnold pour le

⁸ <https://www.pierres-info.fr/copie/index.html>

⁹ L'outil Dynamesh de ZBrush permet de sculpter et remodeler librement une surface en fusionnant automatiquement les zones étirées, facilitant ainsi les ajustements sans perdre la topologie de base

rendu final. Cette création illustre comment une documentation accrue autour d'un personnage de fiction, grâce à l'analyse approfondie de visuels cinématographiques, permet une reproduction extrêmement fidèle. L'analyse des plans permet aux artistes de mieux comprendre les aspects physiques des personnages, tels que la structure osseuse et les traits du visage, tout comme leur dynamique émotionnelle, qui sont contrairement à la photographie décomposés sur des séquences en mouvement. Cette analyse est cruciale pour représenter de manière fidèle et crédible Walter White, figure instantanément identifiable par les téléspectateurs de la série. En utilisant des références visuelles précises extraites directement des plans du film ou de la série, les artistes peuvent créer des modèles numériques qui ressemblent physiquement aux acteurs et qui restituent également leurs performances.



Figure 19. DI LUCCA, Marco : *Walter White*, Image de synthèse, personnage sculpté sur le logiciel Mudbox et rendu sur Maya avec le moteur de rendu Arnold, Boulder, Etats-Unis, 2021.

Anatomie: Base Scientifique pour le Réalisme

La maîtrise de l'anatomie humaine est fondamentale pour les artistes 3D dédiés à la création de personnages réalistes. Une compréhension précise de la structure

anatomique, des os, des muscles, et des tissus permet aux artistes de modéliser des personnages qui ressemblent visuellement à des êtres humains réels en image fixe et qui se comportent aussi de manière cohérente avec les lois physiques et biologiques en animation. Pour les concepteurs de personnages 3D, l'anatomie n'est pas simplement une question de reproduction fidèle des formes humaines, elle est essentielle pour donner de la vie à un personnage numérique fictif. En effet, la précision anatomique requise pour concevoir un personnage le plus réaliste possible va au-delà de la simple création de figures attrayantes pour l'œil, elle se doit d'être de ne laisser aucun détail en retrait, ce qui pourrait trahir le réalisme du personnage. Par exemple, la bonne représentation des systèmes musculaires et articulaires est cruciale pour créer un personnage en mouvement ou qui exprime des émotions.

L'ouvrage "Anatomy of Facial Expression" d'Uldis Zarins s'avère être une ressource très intéressante pour les artistes 3D s'intéressant aux visages humains. Ce livre représentant et décrivant une série d'expressions humaines de la manière la plus détaillée possible offre aux artistes des visualisations de la façon dont les muscles faciaux interagissent pour former des expressions. L'ouvrage combine des illustrations en 3D et des modèles vivants pour expliquer le fonctionnement et la structure des muscles faciaux, abordant la topographie du visage et du crâne, la fonction et la forme des muscles faciaux, ainsi que les différences liées à l'âge, au sexe et à l'ethnicité. Zarins détaille également l'impact du tissu adipeux et connectif¹⁰ sur l'apparence et les mouvements du visage.

Zarins illustre avec des photographies, des modèles 3D représentant les muscles, des schémas, comment des mouvements subtils des muscles faciaux peuvent constituer une gamme complexe d'émotions, allant de la joie à la colère. En prenant en compte l'intégralité des expressions qu'il représente dans son livre, il est possible

¹⁰ Le tissu adipeux est un type de tissu conjonctif composé principalement de cellules graisseuses (adipocytes), servant de réserve d'énergie et d'isolant thermique. Le tissu connectif, quant à lui, soutient et structure les autres tissus et organes du corps, incluant divers composants comme les tendons, les ligaments, et le cartilage, ainsi que les fibres collagènes et élastiques

en les combinant toutes de constituer un spectre restituants toutes les émotions d'un personnage, en passant par des étapes intermédiaires ou extrêmes. Dans le cadre de l'animation, on appelle cette série d'expression des Blendshape¹¹. Elles permettent d'animer un personnage de manière libre et fidèle avec grande précision. De manière traditionnelle, ces animations faciales sont réalisées à la main, mais une autre manière permettant d'atteindre un niveau de réalisme supérieur est la motion capture. En effet, lorsqu'un acteur joue en direct dans le but d'animer son personnage virtuel, ses expressions faciales vont être capturées à très haute fréquence d'image et vont être appliquées au modèle 3D pour chaque image clé. C'est le plus souvent avec cette méthode que les personnages virtuels animés avec le plus haut niveau de réalisme sont produits.

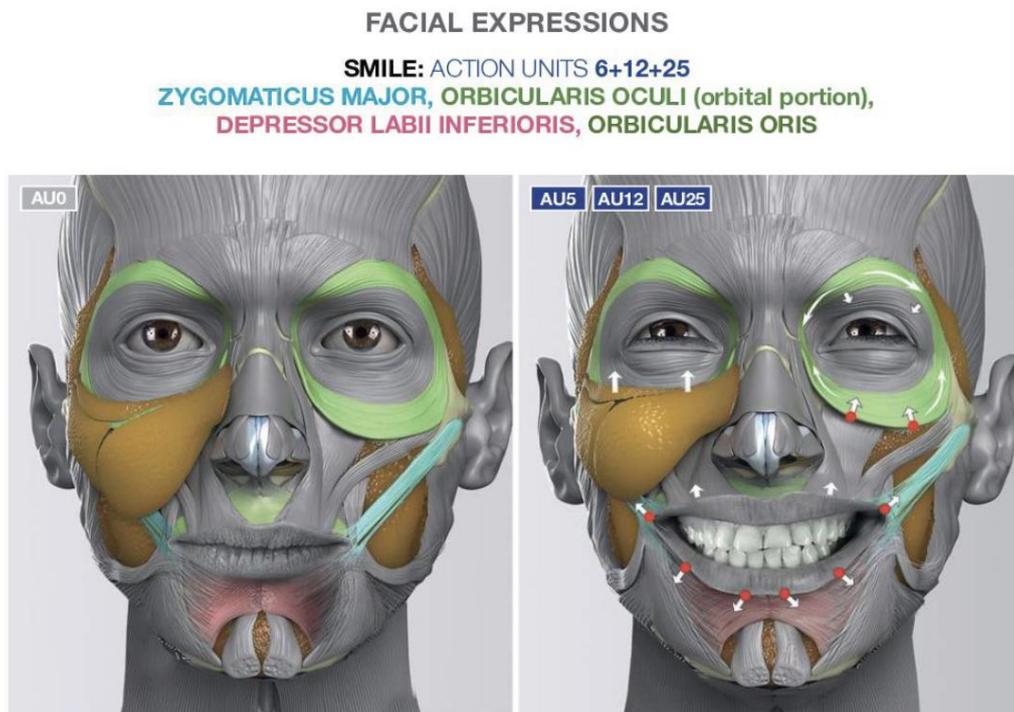


Figure 20. ZARINS, Uldis : *Anatomy of Facial Expression*, Analyse détaillée des expressions faciales humaines, ouvrage illustré et didactique, Edition Anatomy Next, 2017.

¹¹ Un blendshape en modélisation 3D est une technique permettant de déformer un modèle en interpolant entre différentes formes cibles, souvent utilisée pour animer des expressions faciales

L'ouvrage "Anatomy of Facial Expression" d'Uldis Zarins peut être comparé au travail de Duchenne de Boulogne et ouvre des perspectives complémentaires sur l'étude des expressions faciales. Zarins analyse en détail la structure anatomique des muscles faciaux et leur rôle dans la formation des expressions. Il combine des illustrations détaillées avec des descriptions techniques, facilitant la compréhension des mécanismes sous-jacents à chaque expression. Duchenne de Boulogne, au XIXe siècle, utilise la photographie pour documenter les effets de la stimulation électrique sur les muscles faciaux, isolant les mouvements spécifiques responsables des expressions. Son approche scientifique et expérimentale permet d'identifier les muscles impliqués dans chaque émotion, offrant une première typologie des expressions faciales. En parallèle, Zarins approfondit cette exploration en fournissant des outils visuels et des explications anatomiques, permettant une application plus intuitive et artistique de ces connaissances. Les deux œuvres se rejoignent dans leur objectif commun de déchiffrer les mystères de l'expression humaine, mais Zarins intègre une perspective moderne, axée sur l'art et la modélisation 3D, facilitant ainsi la transition de la théorie à la pratique pour les artistes contemporains.

L'utilisation de références anatomiques précises aide également à éliminer les erreurs courantes dans la modélisation qui peuvent rendre les expressions ou mouvements des personnages irréalistes ou mécaniques. Cela est particulièrement important dans les productions où l'authenticité des personnages influence la suspension de l'incrédulité chez le spectateur, comme dans les films d'animation et les jeux vidéo. Par ailleurs, une bonne compréhension de l'anatomie assure que les personnages interactifs répondent de manière réaliste aux environnements virtuels, ce qui renforce l'immersion et l'engagement du public. En définitive, l'intégration de connaissances anatomiques détaillées dans le processus de création de personnages 3D permet d'une part d'améliorer le rendu visuel sur de l'image fixe et la fonctionnalité des personnages dans de l'animation mais aussi d'enrichir les narrations visuelles en offrant des personnages qui agissent et réagissent de manière authentique. Cela souligne l'importance cruciale de l'étude approfondie de

l'anatomie pour tout artiste 3D qui aspire à exceller dans la création de personnages numériques vivants et convaincants.

II.C. Techniques Avancées de Sculpture et Traitement de la Géométrie

Techniques de Sculpture Numérique

La sculpture numérique de visages humains est une discipline qui requiert une compréhension artistique approfondie tout comme une maîtrise technique des outils modernes.¹² Les artistes utilisent principalement des logiciels comme ZBrush ou Mudbox, qui sont conçus pour offrir une expérience proche de la sculpture traditionnelle tout en fournissant les avantages du numérique, tels que les retours en arrière sans limite et la modification flexible de détails à n'importe quel stade du processus créatif. Ces logiciels spécialisés permettent aux sculpteurs numériques de manipuler des maillages complexes mais optimisés avec une grande précision, en ajoutant ou en soustrayant de la matière de manière intuitive. L'interface graphique permet aux artistes de travailler avec des pinceaux numériques, qui imitent divers outils de sculpture réelle tels que les couteaux, les boucles, et les ébauchoirs.

¹² Bridson, R. (2015). Fluid Simulation for Computer Graphics. CRC Press. ISBN 978-1482232833.

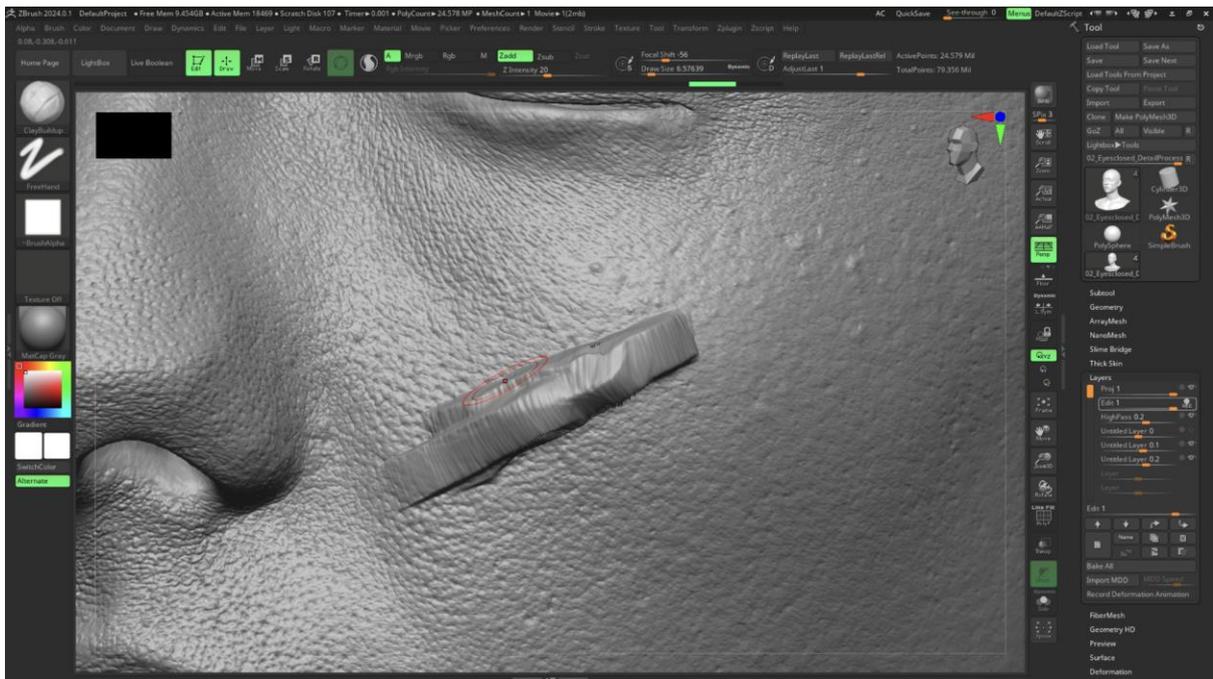


Figure 21. Capture d'écran de l'utilisation de la brosse "Clay Buildup" dans ZBrush.

Chaque pinceau peut être personnalisé pour modifier sa forme, sa dureté, sa texture, et son effet sur la maille, ce qui permet aux sculpteurs de créer des textures de peau réalistes, des rides détaillées, et des muscles propres aux expressions faciales. Un aspect important de la sculpture numérique est de travailler avec des niveaux de détails variables, en effectuant des modifications partant des bas niveaux de subdivision du maillage à des niveaux de hautes subdivisions. ZBrush utilise une technologie appelée DynaMesh qui permet de remodeler continuellement la topologie sans perdre les détails du modèle. Cela est particulièrement utile pour éviter de travailler sur différents niveaux de subdivision dans des cas complexes comme la modélisation des visages humains, où des ajustements fréquents sont nécessaires pour arriver au bon niveau de réalisme. De plus, les fonctionnalités telles que les masques et les déformateurs offrent un contrôle supplémentaire sur des régions spécifiques du modèle, facilitant la création de détails fins comme les plis des lèvres ou les paupières.

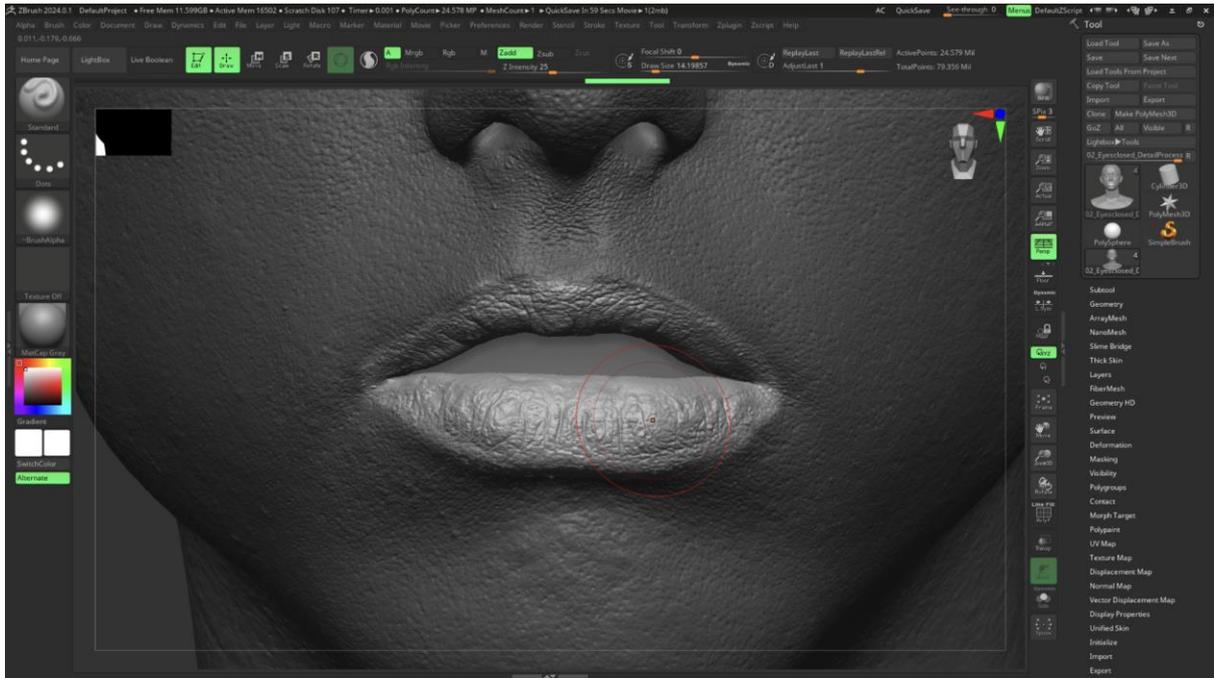


Figure 22. Capture d'écran de l'utilisation d'un masque de sélection dans ZBrush, permettant d'effectuer des modifications sur la bouche.

Pour les détails très fins, tels que les pores de la peau ou les fines lignes d'expression, les artistes peuvent utiliser des couches alphas sur des pinceaux¹³, gardant en mémoire des zones sélectionnées du modèle. Ces outils permettent d'appliquer au modèle des textures ou des détails pré-fabriqués directement sur la surface du modèle 3D, ce qui aide à créer une texture de peau avec une apparence réaliste et avec du volume. Ces techniques sont essentielles pour produire une géométrie du modèle sculpté proche d'un visage humain en volume et en surface, jusqu'aux micro-détails des pores de peau. En combinant ces techniques, les sculpteurs numériques ont tous les outils pour pouvoir produire des modèles qui ressemblent à des humains réels, presque tangibles. La sculpture numérique est une méthode puissante mais demande beaucoup d'expérience et de temps pour exploiter son potentiel maximal en réalisant un visage humain virtuel identique à un visage humain réel. Les sculpteurs 3D ont un rôle important dans le domaine de la

¹³ Par exemple, avec la brosse XTractor de Zbrush

création de personnages pour les films, les jeux vidéo, et d'autres applications numériques.

Fidélité Anatomique dans la Sculpture Numérique

Comme vu précédemment, avoir une grande maîtrise de l'anatomie humaine est essentielle pour produire des représentations réalistes de visages humains en 3D. Les visages humains, en particulier, présentent des défis uniques en raison de leur complexité et de la subtilité nécessaire pour capturer les émotions et les réactions inconscientes d'un être humain. Pour être le plus fidèle possible à une représentation anatomique humaine, les sculpteurs numériques doivent étudier en détail la structure osseuse, les groupes musculaires et les couches de tissus qui composent le visage humain, par exemple à travers des ouvrages illustrés comme celui d'Uldis Zarins. En effet, pour sculpter un visage, il est important de comprendre la manière dont les muscles faciaux sous-jacents sont responsables de diverses expressions faciales et comment ils interagissent les uns avec les autres lors des mouvements naturels. Ces connaissances permettent aux artistes de concevoir des modèles 3D qui affichent des expressions réalistes mais qui se comportent aussi physiquement de manière plausible sous différents éclairages et angles de vue.

Les ressources comme "Anatomy of Facial Expression" de Uldis Zarins sont extrêmement précieuses pour les sculpteurs numériques. Cet ouvrage fournit des illustrations détaillées et des descriptions des muscles faciaux, offrant aux artistes un guide pratique pour comprendre et reproduire les mécanismes qui permettent aux expressions humaines de se manifester. En appliquant ces principes anatomiques, les sculpteurs peuvent mieux anticiper les effets de l'éclairage sur les contours du visage, améliorant ainsi la qualité du rendu final.

En plus de la référence anatomique, l'utilisation de scans photogrammétriques 3D et de technologies de capture de mouvement peut augmenter la précision des modèles numériques. Ces technologies permettent de capturer la forme exacte d'un visage humain ainsi que ses mouvements dynamiques, offrant une base réaliste pour la sculpture numérique. En intégrant ces données dans le flux de travail, les artistes cherchant à reproduire à l'identique un individu existant ou donner naissance à un

tout nouveau personnage peuvent raffiner davantage leurs sculptures, en s'assurant que chaque détail, de la ride la plus fine à la courbe des lèvres, est fidèlement reproduit. La fidélité anatomique est donc une problématique de précision visuelle et un élément fondamental pour l'expressivité émotionnelle des personnages. Un modèle bien conçu avec une anatomie correcte est plus susceptible de créer un lien avec son spectateur, car il transmet une vérité universellement reconnue dans les traits et expressions humaines. Cette précision anatomique et ces défauts introduits volontairement par l'artiste renforçant ainsi l'immersion et l'impact narratif à travers les médias où ils sont utilisés.

Cependant, il est essentiel de noter que trop de régularité peut nuire à l'impression de naturel. Comme exploré avec l'exemple de l'Apollon du Belvédère, la perfection excessive dans la modélisation des traits faciaux peut rendre un personnage artificiel et peu convaincant. Les visages humains sont marqués par des asymétries subtiles et des imperfections qui leur donnent leur caractère unique et leur réalisme.

Pour mieux comprendre cette dynamique, il est utile de décomposer le processus de création en plusieurs étapes. D'abord, l'anatomie de base doit être correctement établie, en utilisant des références et des technologies modernes pour capturer les structures fondamentales. Ensuite, il est crucial d'introduire des irrégularités et des détails spécifiques à l'individu ou au personnage imaginé. Par exemple, les légères asymétries dans les sourcils, les variations dans la texture de la peau, et les rides ou cicatrices uniques ajoutent une couche de réalisme qui rend le modèle plus vivant. En outre, la capture de mouvement ajoute une autre dimension en permettant aux artistes de recréer les mouvements dynamiques du visage humain. Les expressions faciales ne se limitent pas à des positions statiques mais incluent des transitions fluides entre différentes émotions. En utilisant ces données de capture de mouvement, les artistes peuvent animer leurs modèles de manière à ce qu'ils réagissent de façon naturelle aux stimuli, renforçant ainsi l'illusion de vie.

II.D. Rendu et Techniques d'Éclairage

Techniques d'éclairage

L'éclairage est un composant crucial dans la modélisation 3D, car il améliore la qualité visuelle et joue un rôle déterminant dans la perception et l'interaction du spectateur avec l'œuvre. En tirant parti des techniques éprouvées de la photographie de portrait, les artistes 3D peuvent apporter une dimension supplémentaire de réalisme et d'expressivité à leurs créations.

Les techniques d'éclairage traditionnellement utilisées en photographie de portrait sont répliquées en modélisation 3D lors des étapes de Lighting et de rendu. Dans un logiciel de modélisation 3D, l'utilisateur peut placer librement dans l'espace des sources lumineuses, avec différents paramètres de puissance, d'angle de champ, de température de couleur. Certains moteurs de rendus comme Arnold donnent clé en main des sources lumineuses que l'on peut retrouver en photographie de studio, comme des softbox ou des spots.





Figure 23. *PLANÈTE DES SINGES*, exemple d'éclairage sur un objet 3D au cinéma, réalisé par Rupert Wyatt, 2011. Cette image montre comment l'éclairage est utilisé pour donner vie et réalisme aux personnages numériques dans un environnement cinématographique.

Figure 24. *L'ILLUSIONNISTE*, exemple d'éclairage au cinéma traditionnel, réalisé par Neil Burger, 2006. Cette image illustre l'utilisation classique de l'éclairage pour créer des atmosphères et des ambiances spécifiques, en mettant en valeur les nuances et les détails des scènes et des personnages.

Dans son ouvrage numérique "CG Cinematography", Chris Brejon explore les différentes techniques d'éclairage adaptées au domaine de la modélisation 3D, et particulièrement pour mettre en scène des personnages et les rendre de la meilleure manière possible. Selon lui, l'éclairage en trois points est une technique fondamentale qui peut être adaptée de manière flexible en fonction des besoins spécifiques de la scène 3D. L'éclairage en trois points se décompose en plusieurs sources notables :

- **La lumière clé.** Elle est placée pour maximiser l'impact dramatique, la lumière clé définit la forme principale et la texture du personnage. En modélisation 3D, sa position peut être ajustée précisément pour capturer

l'interaction souhaitée des ombres et des hautes lumières, ce qui est crucial pour donner du relief et du caractère au visage du personnage.

- **La lumière de remplissage.** Elle est utilisée pour contrôler le contraste et réduire les ombres trop prononcées créées par la lumière clé, la lumière de remplissage dans un environnement 3D peut être subtilement calibrée pour maintenir les détails nécessaires sans submerger la scène de lumière.
- **La lumière de contre-jour ou de backlight.** Elle est essentielle pour séparer le personnage de l'arrière-plan et ajouter une profondeur supplémentaire à l'image, le contre-jour en cinématographie CG peut également être utilisé pour créer un halo ou un effet de brillance qui augmente l'impact visuel du personnage.

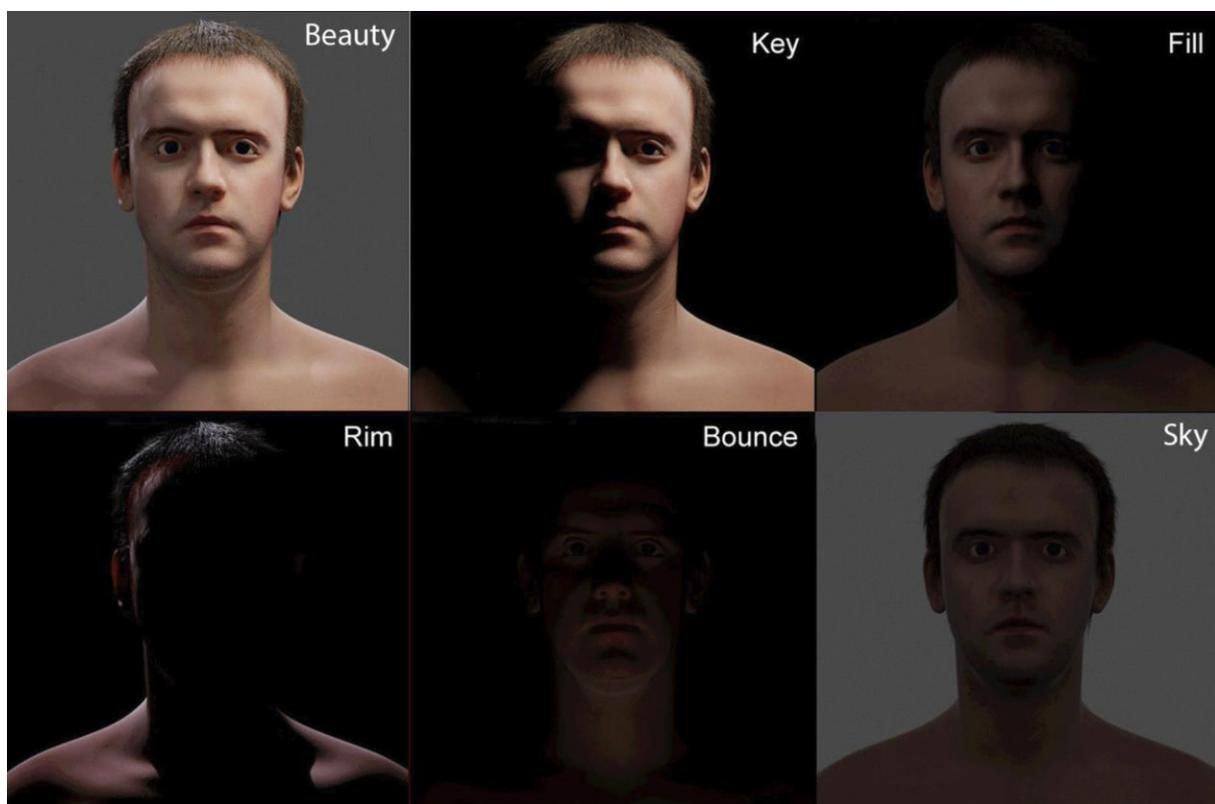


Figure 25. MARTIN, Eduardo : *Virtual Lighting Studio*, capture d'écran montrant les différents types d'éclairage : Beauty, Key, Fill, Rim, Bounce, Sky. Cette image illustre comment chaque type de lumière influence l'apparence finale d'un modèle 3D.

Contrairement à un éclairage classique, un personnage doit être éclairé en fonction de l'angle de la caméra.

Chris Brejon souligne l'importance de l'expérimentation avec ces lumières dans un environnement 3D, où les artistes ont un contrôle complet sur chaque aspect de l'éclairage, bien au-delà de ce qui est possible en photographie traditionnelle. L'adaptation de ces techniques permet de réaliser des éclairages visuellement satisfaisants et de les utiliser comme des outils narratifs pour guider les émotions du spectateur et renforcer le lien entre le personnage et son spectateur.

Les techniques avancées telles que l'éclairage basé sur l'image (IBL) et le ray tracing offrent des possibilités supplémentaires pour simuler des interactions lumineuses réalistes, comme expliqué dans la documentation de Brejon. Ces technologies permettent de capturer et de reproduire des conditions d'éclairage complexes et physiquement justes qui réagissent dynamiquement aux changements dans l'environnement virtuel, améliorant l'immersion et la vérité de la scène.

La lumière est un élément fondamental au rendu d'une image de synthèse, influant la manière dont nous percevons les objets visuellement et comment nous interprétons ces objets dans un contexte spatial et émotionnel. En modélisation 3D, un éclairage bien conçu est essentiel pour transmettre le niveau de détail des textures et la complexité des formes. Un éclairage doit définir l'apparence des objets, leur texture et leur profondeur, de manière à créer une image qui semble réaliste et immersive. Dans "CG Cinematography", Chris Brejon explique comment l'éclairage peut transformer une scène 3D en accentuant les détails et en guidant le regard du spectateur vers les éléments clés de l'histoire. Un éclairage soigneusement planifié permet de simuler les conditions de lumière naturelle, d'ajouter de la dimension et de la profondeur aux objets, et de faire ressortir les textures complexes. Par exemple, la gestion de la lumière indirecte, les techniques de vignetage, et le light-linking¹⁴ sont des méthodes utilisées pour mettre en valeur

¹⁴ Le light-linking est une technique en modélisation 3D qui permet de contrôler quels objets d'une scène sont affectés par quelles sources de lumière.

les personnages et les environnements tout en contrôlant l'impact visuel global de la scène. Cependant, il est important de noter que trop de régularité dans l'éclairage ou les détails trop prononcés peut rendre une scène artificielle. L'introduction de légères irrégularités et de variations dans l'éclairage est essentielle pour maintenir un aspect naturel et réaliste. La combinaison d'une précision anatomique sur un personnage de synthèse et d'un éclairage bien pensé renforce l'expressivité émotionnelle de ce dernier, rendant l'image visuellement convaincante et engageante.

Comme Chris Brejon le souligne, la lumière révèle la qualité des matériaux utilisés sur un objet 3D et contribue à l'atmosphère générale de la scène. L'éclairage influence directement la façon dont les textures sont perçues. Par exemple, la façon dont la lumière interagit avec la peau, le tissu, ou le métal peut révéler des détails subtils qui ne sont pas visibles autrement. Des techniques comme le subsurface scattering¹⁵ sont essentielles pour simuler la manière dont la lumière pénètre dans des matériaux semi-transparents comme la peau humaine, produisant un effet réaliste qui est essentiel pour représenter des personnages modélisés en 3D de manière convaincante.

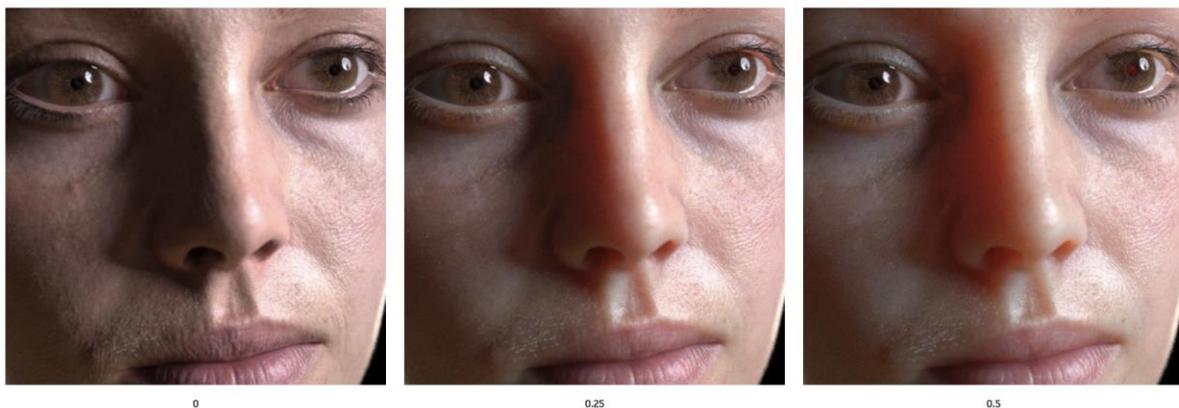


Figure 26. Exemple de *subsurface scattering* sur un visage humain à plusieurs niveaux d'intensité.

¹⁵ Le subsurface scattering (SSS) est un phénomène où la lumière pénètre la surface d'un matériau translucide, se disperse sous cette surface, puis en ressort.

De plus, l'utilisation stratégique de l'éclairage peut accentuer ou atténuer des textures spécifiques, aidant à attirer ou éloigner l'attention du spectateur vers certaines caractéristiques du personnage. Dans un contexte de modélisation 3D, la précision avec laquelle l'éclairage est utilisé peut également affecter la perception de l'espace et de la profondeur. Un éclairage correctement pensé comme l'éclairage en trois points vu précédemment peut améliorer la qualité de rendu des objets et renforcer leur aspect volumétrique. Cela offre une plus grande profondeur visuelle et renforce l'immersion dans l'environnement virtuel.

Par ailleurs, l'éclairage joue un rôle central dans l'ambiance et le contexte d'une scène, où des variations subtiles dans la température de couleur ou l'intensité peuvent évoquer des sentiments spécifiques, tels que la chaleur d'un coucher de soleil ou la froideur d'une scène de nuit. L'efficacité de l'éclairage en termes de réalisme ne repose pas seulement sur la technologie utilisée, mais aussi sur la capacité de l'artiste à comprendre et à manipuler la lumière pour reproduire des interactions naturelles. En effet, manipuler des sources lumineuses en photographie traditionnelle aide grandement à la compréhension et à la maîtrise de l'éclairage dans un environnement virtuel. En s'inspirant de techniques utilisées dans d'autres disciplines visuelles et en les adaptant au domaine de la modélisation 3D, les artistes peuvent créer des images mettant en valeur leur personnages de la manière la plus juste, réaliste, et donc tangible possible.

Méthodes de rendu photoréaliste

La dernière étape de production d'une image de synthèse réside dans le rendu. Pour se faire, l'artiste 3D doit choisir son moteur de rendu et le paramétrer selon ce qu'il souhaite représenter. Dans le cadre d'image photoréaliste, les moteurs de rendus utilisés sont basés sur la technologie de ray tracing. On cite parmi les plus connus Arnold, RenderMan, Octane et V-Ray.

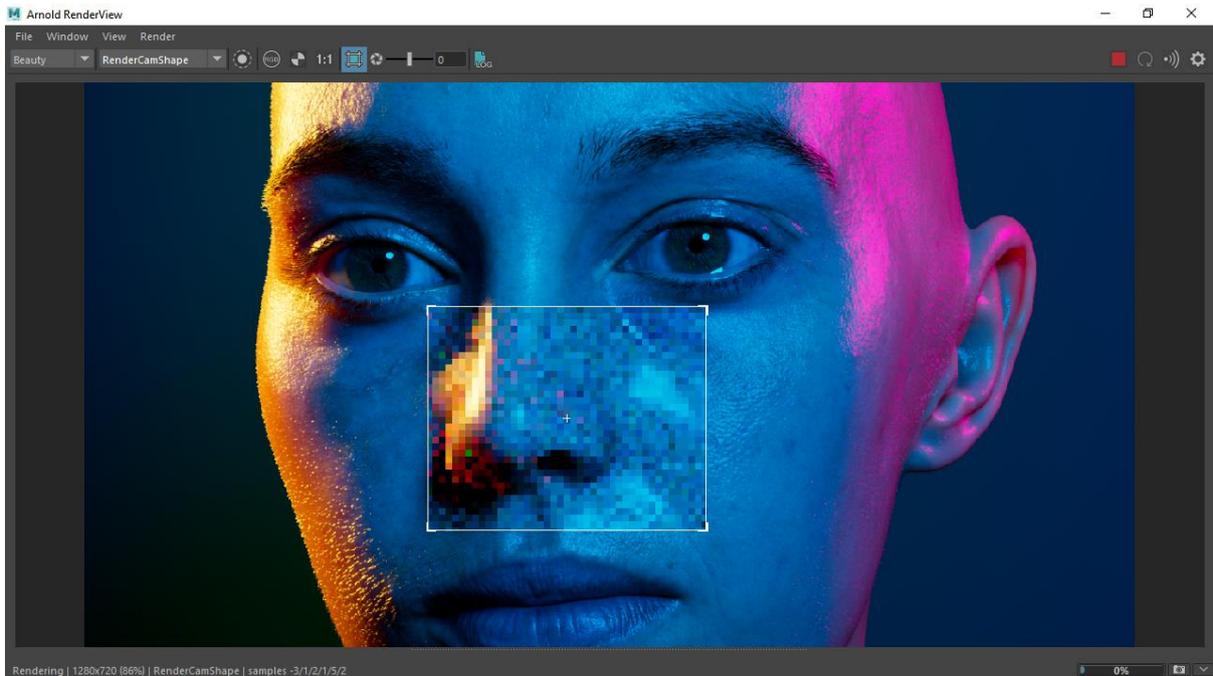


Figure 27. Autodesk : Exemple de rendu avec le moteur Arnold pour Maya.

Ces moteurs de rendus permettent d'exploiter au maximum les données d'une scène et de calculer une image sortante en simulant avec précision les interactions complexes de la lumière avec les matériaux dans un environnement virtuel. Par exemple, Arnold est souvent choisi pour des productions cinématographiques de haute qualité en raison de sa capacité à gérer efficacement les effets de lumière globale, essentiels pour reproduire des environnements naturels et artificiels réalistes.

Moteur de rendu à ray tracing :

Le ray tracing est une technique avancée de rendu 3D utilisée pour créer des images extrêmement réalistes en simulant les interactions complexes de la lumière. Cette méthode trace des rayons de lumière de la caméra à la source lumineuse, suivant chaque rayon à travers la scène où il peut rebondir, être absorbé ou se réfracter. Les progrès autour du ray tracing ont été particulièrement influencés par des travaux académiques et industriels, comme ceux présentés dans les

publications de SIGGRAPH, où les chercheurs explorent continuellement de nouvelles méthodes pour optimiser et améliorer cette technologie.



Figure 28. PIXAR : *RenderMan: An Advanced Path Tracing Architecture for Movie Rendering*. Scène tracée par rayons du film *Le Livre de la Jungle*. La moitié gauche montre une décomposition de la géométrie générée procéduralement ; la moitié droite montre l'image finale.

Pour comprendre pleinement cette technique, il est important d'explorer les notions de brute force, Monte Carlo et random walk, qui sont fondamentales dans ce contexte.

La technique de brute force est utilisée pour calculer de manière exhaustive tous les chemins possibles que la lumière peut emprunter. Cela implique une grande puissance de calcul, car chaque interaction lumineuse est simulée sans approximation. Cette méthode est très précise, produisant des images de haute qualité avec un réalisme exceptionnel, mais elle demande aussi beaucoup de ressources, nécessitant ainsi beaucoup de temps et de puissance de traitement.

Pour améliorer l'efficacité de ces calculs intensifs, l'algorithme Monte Carlo est couramment utilisé. Monte Carlo est une approche statistique qui utilise des techniques de randomisation pour simuler les interactions complexes de la lumière. En path tracing, Monte Carlo est utilisé pour estimer les effets lumineux en générant des échantillons aléatoires des chemins de la lumière. Cette méthode est

particulièrement efficace pour traiter des effets comme le subsurface scattering, où la lumière se disperse à l'intérieur d'un matériau. Monte Carlo permet de traiter ces interactions de manière plus efficiente tout en conservant une haute qualité de rendu.

En complément de Monte Carlo, la technique random walk simule le déplacement aléatoire de la lumière à travers des matériaux translucides. Cette méthode est essentielle pour des effets comme le subsurface scattering, où la lumière pénètre la surface d'un matériau, se disperse sous cette surface, puis ressort. La technique random walk permet de modéliser cette dispersion de manière réaliste, ajoutant une profondeur et une naturalité aux matériaux comme la peau humaine, le marbre, ou d'autres substances semi-translucides.

En combinant ces techniques, des moteurs de rendu comme RenderMan de Pixar peuvent créer des images d'une fidélité visuelle remarquable. Le subsurface scattering, par exemple, est particulièrement bien rendu grâce à ces méthodes, permettant de capturer les nuances subtiles de la lumière et de la matière pour produire des rendus photoréalistes. Cela est essentiel dans les productions cinématographiques où le réalisme visuel joue un rôle essentiel, comme démontré dans les rendus de personnages tels que ceux de *Blade Runner 2049* ou d'autres films utilisant des moteurs de rendu avancés.

Importance des matériaux et de la lumière:

La gestion des matériaux dans ces moteurs de rendu est tout aussi importante que la simulation de lumière. V-Ray, par exemple, offre des capacités avancées pour créer des matériaux qui réagissent à la lumière de manière réaliste, y compris des textures complexes et des finitions qui imitent les caractéristiques physiques des surfaces réelles. Cette notion est importante pour restituer de manière fidèle les textures de peau sur un être humain. Un bon paramétrage des matériaux utilisés dans une scène 3D est essentiel pour assurer que les objets dans la scène interagissent de manière convaincante avec la lumière, et ainsi que la scène soit réaliste. L'utilisation de ces moteurs de rendu nécessite une bonne maîtrise des

paramètres techniques du logiciel mais aussi des principes physiques de la lumière et des matériaux.

RenderMan et le réalisme des visages humains:

Historiquement, le moteur de rendu RenderMan a été un des premiers à développer une méthode de ray tracing. C'est avec l'arrivée de ce moteur de rendu que les films d'animations de Pixar ont gagné en qualité et que leurs personnages ont été mis en valeur. RenderMan a été conçu pour gérer des niveaux de complexité élevés, y compris le rendu de la peau humaine, qui nécessite une attention particulière aux subtilités de la translucidité et de la réflexion de la lumière.



Figure 29. PIXAR : Exemples de rendu en tracé de rayons avec *subsurface scattering* : fourmi (modèle original de Sunny Chopra ; modélisation et rendu supplémentaires par Chu Tang) et Rachael de *Blade Runner 2049*

La documentation fournie par Pixar sur RenderMan indique que le moteur utilise le *subsurface scattering* pour simuler la manière dont la lumière pénètre dans la peau humaine et interagit avec les couches sous-cutanées avant d'être réfléchi. Cette technique est essentielle pour donner à la peau un aspect naturel et vivant, essentiel

pour le rendu de visages humains réalistes. En outre, RenderMan emploie des shaders complexes qui peuvent imiter la variabilité des propriétés de la peau, comme l'humidité, la rugosité, et la couleur, qui sont influencées par des facteurs biologiques et environnementaux. Ces outils mis à disposition aux artistes leur permettent de créer des personnages aux visages expressifs et détaillés. Les rendus en tracé de rayons avec subsurface scattering présentés dans RenderMan de Pixar illustrent les capacités avancées de ce moteur de rendu pour créer des effets de lumière réalistes et complexes. Deux exemples notables sont une fourmi et Rachael de *Blade Runner 2049*. Le modèle original de la fourmi, créé par Sunny Chopra avec des modélisations et rendus supplémentaires par Chu Tang, met en évidence l'utilisation du subsurface scattering pour simuler la dispersion de la lumière dans des volumes homogènes denses. Ce procédé est particulièrement utile dans des cas où les méthodes de diffusion de lumière classique échouent, comme les fines jambes et antennes de la fourmi. Pour Rachael de *Blade Runner 2049*, le rendu utilise la même technique pour créer une peau réaliste, démontrant l'efficacité de cette méthode dans des applications cinématographiques de haute qualité.

Techniques avancées de shading et de lumière:

La capacité de RenderMan à intégrer des sources de lumière physiquement plausibles ajoute une autre couche de réalisme aux rendus. En utilisant des modèles d'éclairage basés sur des mesures physiques réelles, RenderMan assure que les ombres et les reflets sur les visages humains sont rendus de manière naturelle, améliorant ainsi l'authenticité visuelle de la scène. Cette fidélité dans le rendu de la lumière est associée à des outils d'optimisation qui permettent de maintenir une haute qualité visuelle tout en minimisant les temps de rendu, un équilibre crucial pour les productions à grande échelle.

Techniques pour atteindre un rendu de haute qualité

Le rendu photoréaliste en modélisation 3D est une quête permanente pour les artistes et les techniciens qui cherchent à restituer de la manière la plus proche possible du monde réel l'apparence physique et les émotions de personnages humains. Pour atteindre ce niveau de réalisme, plusieurs techniques avancées doivent être maîtrisées et appliquées stratégiquement.

Le développement de shaders complexes est fondamental pour réaliser des rendus de haute qualité. Les shaders définissent comment les matériaux réagissent à la lumière, et leur optimisation peut radicalement changer l'apparence et la réactivité d'un personnage. Pour les visages humains, des shaders spécifiques sont utilisés pour simuler des effets comme le subsurface scattering. Les techniques telles que celles décrites dans "Advanced RenderMan: Creating CGI for Motion Pictures" de Anthony A. Apodaca et Larry Gritz fournissent une base solide pour comprendre et implémenter ces shaders complexes.

Une bonne gestion de l'éclairage est essentielle pour atteindre un rendu photoréaliste en modélisation 3D. L'éclairage accentue les textures, formes et volumes, créant des ombres et reflets réalistes. Les techniques avancées, comme le ray tracing, simulent des interactions lumineuses complexes, importantes pour rendre une scène de manière réaliste. Réaliser un éclairage d'une scène 3D comprend la sélection et la configuration des sources de lumière ainsi que l'optimisation de l'éclairage global et des ombres. Les moteurs de rendu modernes offrent des options pour ajuster la douceur des ombres, l'intensité lumineuse, et le contraste, permettant aux artistes de mettre en scène des visages humains avec un réalisme proche d'une image photographique. Des outils comme les HDRI (High Dynamic Range Imaging) sont souvent utilisés pour fournir un environnement de lumière riche qui peut être ajusté pour refléter différents moments de la journée ou conditions atmosphériques, influençant subtilement l'ambiance de la scène.

Le post-traitement constitue une étape cruciale dans la finalisation du rendu. Cette phase permet de corriger les images générées par le moteur de rendu à travers des ajustements de la couleur, de la luminosité, du contraste, et d'autres effets visuels qui peuvent améliorer la clarté et le détail visuel. Le compositing, où différentes passes de rendu sont combinées pour former l'image finale, permet aux artistes de contrôler précisément chaque élément de l'image, de la profondeur de champ aux

aberrations chromatiques de l'objectif, augmentant ainsi le réalisme perceptuel et la richesse visuelle.

Être humain hyperréaliste et likeness sculpting

Certains artistes 3D s'essaient à l'exercice de "likeness sculpting", un mouvement cherchant à créer des représentations hyperréalistes de visages humains. Ce mouvement cherche à reproduire fidèlement les traits distinctifs et les expressions d'une personne spécifique. Ce processus repose sur l'utilisation de références photographiques précises, sous divers angles, et de logiciels de sculpting comme ZBrush pour reproduire manuellement les détails fins du visage humain. Une compréhension approfondie de l'anatomie humaine est essentielle pour créer des modèles proportionnés et réalistes. Des textures et matériaux complexes sont appliqués pour simuler la peau, les cheveux et d'autres éléments, ajoutant du réalisme. Les artistes doivent également maîtriser les moteurs de rendu fonctionnant avec du ray tracing pour rendre leur personnage de la meilleure manière possible. Le likeness sculpting peut être utilisé dans les industries du cinéma ou des jeux vidéo où il permet de créer des personnages numériques indiscernables des personnes réelles, augmentant le réalisme et l'immersion des productions.

Par exemple, Şefki Ibrahim, un artiste 3D reconnu pour ses compétences exceptionnelles en likeness sculpting, crée des modèles hyperréalistes de célébrités à partir de références variées trouvables facilement sur internet. Şefki Ibrahim sculpte chaque détail, en s'appuyant le plus possible sur des références photographiques pour capturer la ressemblance exacte du personnage. L'éclairage joue un rôle important dans ces compositions, tout comme le rendu qui est maîtrisé pour être photoréaliste. Cet artiste parvient à créer des personnages numériques qui semblent presque réels. Cela montre à quel point la modélisation 3D, lorsque ses outils sont parfaitement utilisés, parvient à repousser les limites du réalisme visuel.

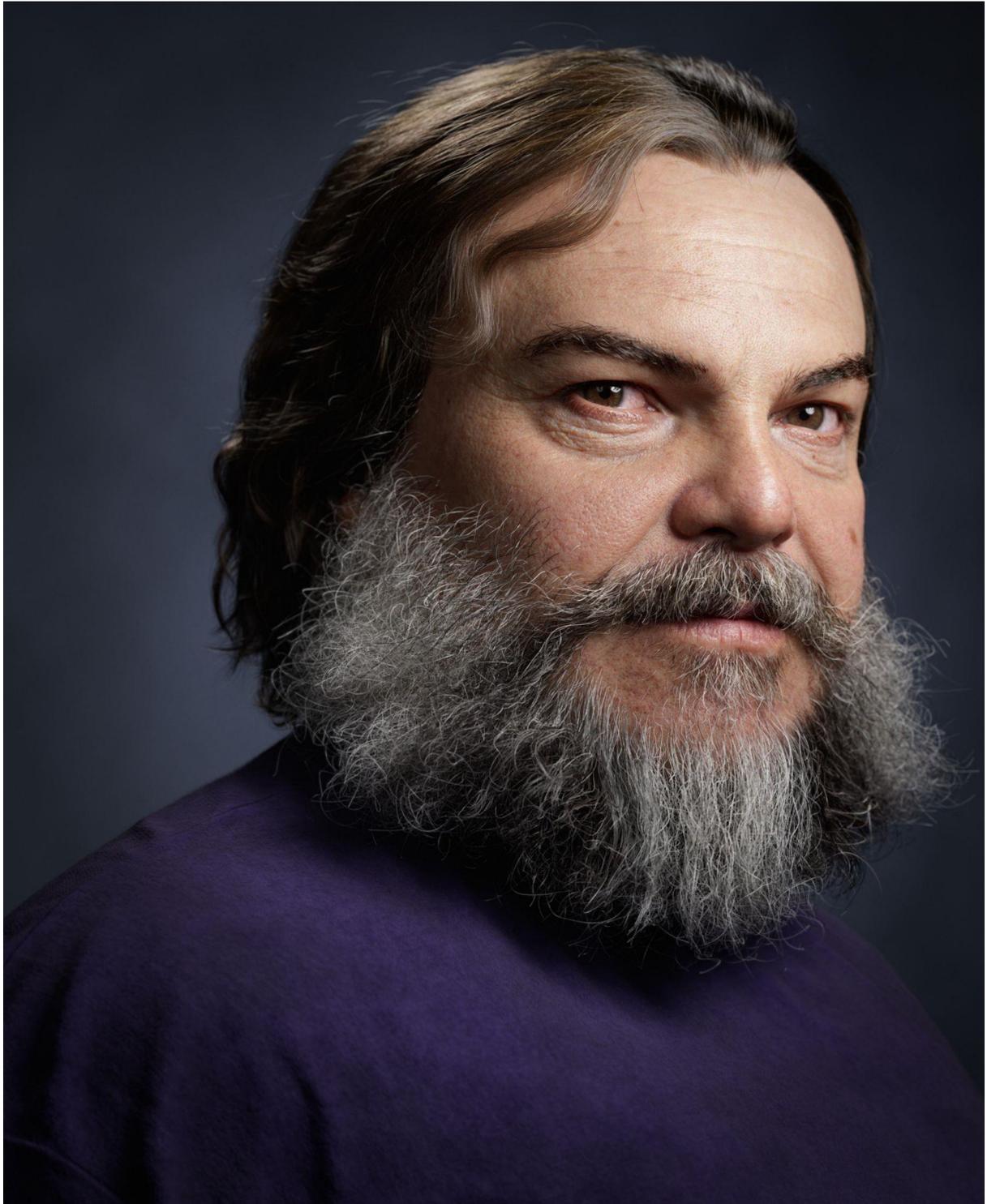


Figure 30. IBRAHIM, Şefki : *Jack Black*, 2024. Sculpture numérique rendue avec le moteur de rendu Arnold sur Maya.

Le likeness sculpting permet d'atteindre un niveau de réalisme remarquable grâce à la précision des outils de modélisation 3D et à une compréhension approfondie de l'anatomie humaine. Pour aller encore plus loin dans la captation de la réalité, une technologie appelée photogrammétrie offre une méthode révolutionnaire pour les artistes 3D. Cette technique permet de capturer la forme et les détails d'un objet ou d'un être humain en utilisant des photographies prises sous différents angles pour générer un modèle 3D précis et texturé. La photogrammétrie, en combinant des données visuelles avec des algorithmes de reconstruction, crée des représentations détaillées et fidèles, ce qui change complètement la manière de créer des modèles 3D réalistes. Dans la partie suivante, il sera exploré l'utilisation de cette technique dans le cadre de la numérisation d'êtres humains, en montrant comment elle complète et enrichit les méthodes de sculpting traditionnelles pour offrir des solutions innovantes dans les domaines du cinéma, des jeux vidéo et des médias numériques.

III. Retranscription d'une figure humaine par photogrammétrie et aléatoire du réel

III.A. Introduction à la technique photogrammétrique dans le cadre de captation d'êtres humains

Les techniques de modélisation 3D traditionnelles, bien que très avancées et polyvalentes, présentent certaines limitations lorsqu'il s'agit de reproduire avec précision les subtilités et les particularités des traits humains. Il a été vu précédemment les divers aspects de la création de personnages numériques, incluant les techniques de sculpture numérique, le texturing, ainsi que les techniques d'éclairage et de rendu, permettant d'aboutir à des représentations détaillées et expressives de figures humaines. Cependant, ces méthodes reposent largement sur l'habileté, l'expérience et la subjectivité des artistes, ce qui peut parfois introduire

des simplifications ou des approximations sur les représentations. Pour remédier à ces problématiques et atteindre un niveau de réalisme inégalé sur des modèles 3D d'êtres humains, la technologie de photogrammétrie a été utilisée dans le cadre spécifique de la capture instantanée d'être vivant. En capturant des images à partir d'angles de vue multiples et en utilisant des logiciels comme Reality Capture¹⁶ pour reconstruire des modèles tridimensionnels, la photogrammétrie permet de capturer avec une grande précision les moindres détails des visages humains, des textures de peau aux micro-expressions. La qualité d'une capture photogrammétrique va dépendre de l'homogénéité de l'éclairage de l'objet photographié et du taux de recouvrement de deux images successives. En effet, plus les caméras capturant un objet seront proches et nombreuses, mieux le logiciel va parvenir à reconnaître des motifs et ainsi créer un maillage fidèle à la réalité. Il est important de comprendre comment cette technologie permet de créer des doubles numériques d'une fidélité presque parfaite, ce qui dans le cadre d'une modélisation brute est très difficilement atteignable. Pour cela, une étude autour de ses principes théoriques et ses applications pratiques sera menée.

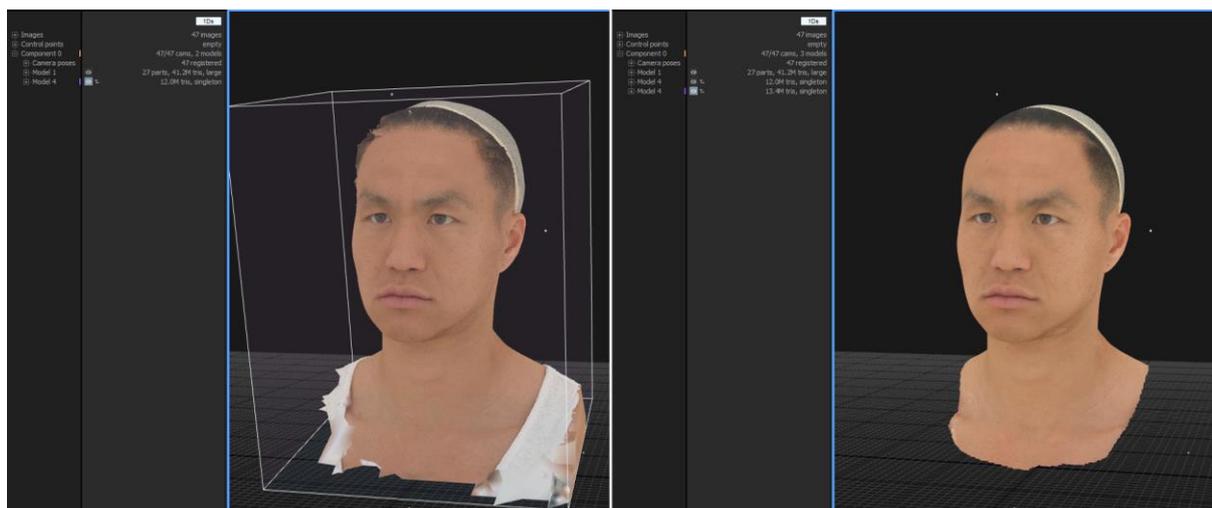


Figure 31. *Capturing Reality*, Scan photogrammétrique de tête humaine, capture d'écran du logiciel Reality Capture.

¹⁶ Reality Capture est un logiciel permettant de créer des ressources et des environnements 3D ultra-réalistes à partir de photos et/ou de numérisations laser.

À l'origine, la photogrammétrie consiste à réaliser des photographies sous différents angles pour mesurer et recréer les caractéristiques tridimensionnelles d'un sujet. Ses premières applications remontent aux travaux de cartographie, mais elle a évolué pour devenir un outil capable de capturer des détails complexes avec une grande précision.

Le principe de photogrammétrie repose sur des principes de géométrie multi-vues, décrits en détail par Hartley et Zisserman dans leur ouvrage "Multiple View Geometry in Computer Vision" (2004). Ces principes permettent de trianguler les points communs entre différentes images pour reconstruire une surface 3D. Luhmann et ses collègues, dans "Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging" (2013), expliquent comment cette technique a été affinée pour capturer des objets à courte portée, rendant possible la modélisation précise de détails complexes comme les traits du visage humain.

Les livres "Multiple View Geometry in Computer Vision" de Richard Hartley et Andrew Zisserman et "Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging" de Thomas Luhmann et al. sont des références importantes pour comprendre les fondements théoriques de la photogrammétrie. Dans ces documents, le principe de géométrie projective est expliqué, représentant la base de la photogrammétrie. La géométrie projective permet de décrire les relations entre plusieurs vues d'un même objet, autrement dit leurs motifs récurrents. Après avoir analysé les motifs récurrents sur différentes images en deux dimensions, l'algorithme va transformer ces données en un objet en trois dimensions avec ce qu'on appelle les transformations projectives. Les transformations projectives, affines et euclidiennes sont des outils mathématiques qui permettent de passer d'une image 2D à une autre tout en préservant la structure géométrique des objets. Ce principe de base de la photogrammétrie se retrouve sur tous les logiciels qui exploitent cet algorithme et est essentiel pour reconstruire des modèles 3D à partir de photographies multiples.

La géométrie épipolaire est un autre principe fondamental abordé par Hartley et Zisserman. Ce principe décrit les relations géométriques entre deux vues. Une matrice dite fondamentale encapsule ces relations, et permet de trouver des correspondances de points entre deux images successives. Ces correspondances sont utilisées pour trianguler les points 3D et ainsi reconstruire la forme de l'objet.

L'algorithme des 8 points, par exemple, est une méthode standard permettant d'estimer la matrice fondamentale et est largement utilisé dans les logiciels de photogrammétrie. En effet, lorsque la triangulation des points est réalisée, le modèle 3D solide va pouvoir être généré dans une étape que l'on nomme reconstruction. La reconstruction repose sur des relations bilinéaires, trilineaires et quadrilinaires pour déterminer la position 3D des points à partir de plusieurs images. Hartley et Zisserman décrivent des méthodes telles que la factorisation projective et les ajustements par faisceaux, qui sont couramment utilisées pour obtenir des reconstructions précises¹⁷. Ces techniques permettent de créer des modèles 3D détaillés et cohérents à partir de grandes quantités de données photographiques. Le modèle 3D brut est ainsi créé et pourra par la suite être modifié par l'artiste 3D.

Une autre notion de la photogrammétrie est le placement de la caméra dans un espace et la projection de son image sur l'objet 3D reconstitué. Le modèle de la caméra projective décrit la relation entre les points 3D d'un objet et leurs projections 2D sur une image. L'estimation précise de la matrice de la caméra est fondamentale pour les calculs géométriques. Hartley et Zisserman soulignent l'importance de minimiser les erreurs géométriques lors de cette estimation, l'algorithme de traitement des images doit ainsi être optimisé pour obtenir des reconstructions 3D précises et fiables.

Pour synthétiser ces éléments techniques, les logiciels de photogrammétrie scindent leur interfaces en trois étapes clés. Premièrement l'alignement des images recensées de manière à obtenir un nuage de point. Ensuite, la reconstruction du nuage de point en un modèle 3D solide. Pour finir, l'utilisateur peut choisir ou non de projeter la texture issue des photographies sur le modèle 3D.

¹⁷ Hartley, R., & Zisserman, A. (2004). *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press. ISBN 978-0521540513.

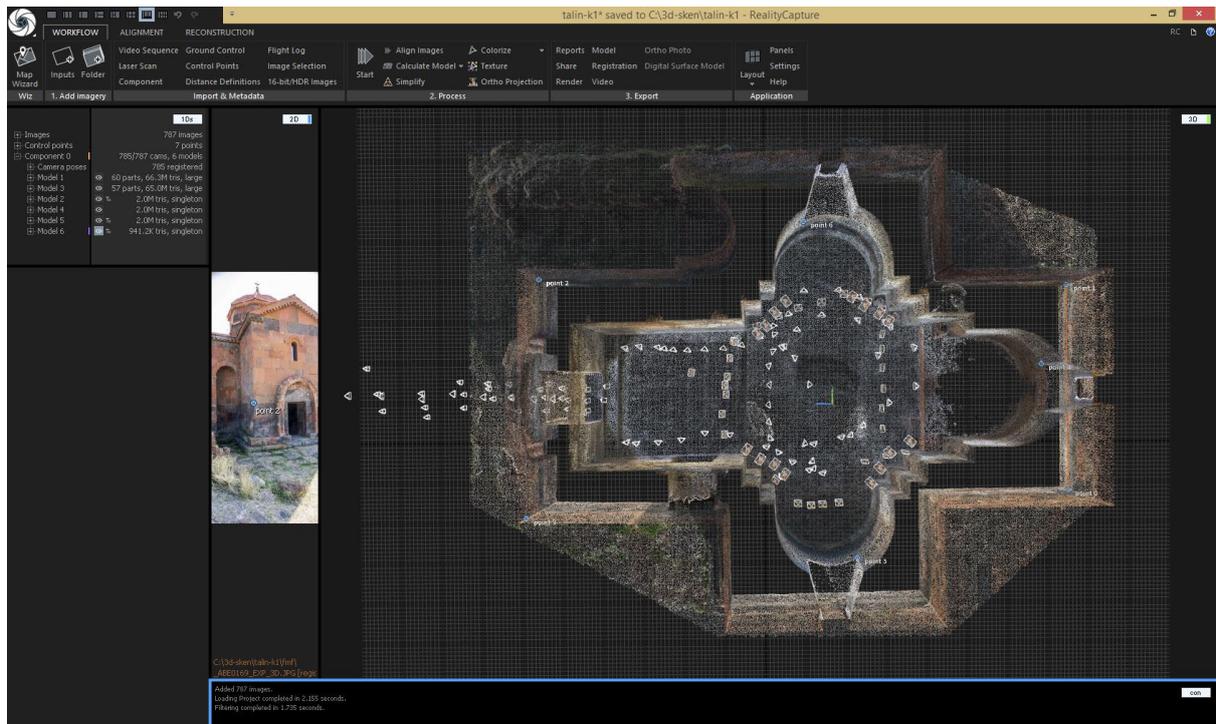


Figure 32. *Capturing Reality*, Nuage de points et modèle reconstitué en 3D, captures d'écran du logiciel Reality Capture.

Pour ce qui est des recherches autour de la photogrammétrie spécialisée dans la capture d'être humain, les travaux de Paul Debevec sont les premiers à explorer ce sujet et révolutionnent l'industrie du cinéma. Les recherches de Paul Debevec ont grandement influencé l'évolution de la photogrammétrie de manière générale et particulièrement son application dans la numérisation de visage et de corps humain. Ses recherches, notamment le développement de la technique de "Light Stage", ont permis la capture des détails complexes de la peau humaine. Dans leur article "Acquiring the Reflectance Field of a Human Face" (SIGGRAPH, 2000), Debevec et son équipe décrivent comment le Light Stage utilise des configurations d'éclairage variées pour capturer avec précision les interactions de la lumière avec la peau, permettant ainsi de reproduire des textures et des nuances de lumière avec une fidélité la plus proche possible de la réalité. Cette technique repose sur l'utilisation de plusieurs sources lumineuses et de caméras disposées à 360° autour d'un sujet, permettant de capturer des images sous différents angles et éclairages. En combinant toutes ces images, il est possible de reconstruire un modèle 3D très détaillé du sujet photographié à 360°. Après projection de texture et traitement du modèle avec des logiciels annexes, les propriétés de réflexion et de diffusion de la peau et sa réaction avec une source lumineuse se rapprochent grandement d'un modèle physique réel. Les travaux de Debevec ont permis de réaliser des captures photogrammétrique d'êtres humains et ont ainsi permis d'améliorer la qualité des textures de peau et la fidélité géométrique d'un modèle humain modélisé. Ses recherches ont également établi des normes pour la capture et la reproduction de la lumière, influençant des industries telles que le cinéma et les jeux vidéo où le photoréalisme est essentiel. Les techniques développées par Debevec sont actuellement utilisées pour créer des personnages numériques qui ressemblent physiquement à leurs modèles humains et permettent de capturer les subtilités des interactions lumineuses qui rendent la peau humaine si complexe et réaliste. En combinant les principes théoriques de la photogrammétrie avec des avancées pratiques comme celles introduites par Debevec, il est possible de repousser les limites du réalisme visuel dans la modélisation 3D. Cela ouvre alors de nouvelles possibilités pour la création de personnages numériques authentiques et expressifs. En combinant ces méthodes avec des algorithmes de traitement d'image et les logiciels de modélisation 3D classiques, il est possible de créer des doubles

numériques qui ressemblent à leur sujet d'origine et qui restituent des détails infimes propres à chaque être humain.

La photogrammétrie ne se contente pas de simplement capturer des formes géométriques et des textures. Elle joue un rôle important dans la saisie des caractéristiques individuelles et des imperfections uniques de chaque sujet, éléments souvent absents ou idéalisés dans les méthodes de modélisation 3D traditionnelles. En capturant ces imperfections naturelles, la photogrammétrie contribue à créer des modèles qui sont réalistes et authentiques, enrichissant ainsi la représentation numérique des êtres humains.

L'utilisation de la photogrammétrie pour créer des modèles humains réalistes a progressé ces dix dernières années grâce à l'essor de logiciels spécialisés et du développement d'appareils photos numériques de plus en plus performants. Les sociétés de capture photogrammétriques d'êtres humains permettent aux industries du cinéma, du jeu vidéo ou encore de la mode de travailler avec des doublures numériques de grande qualité pour des utilisations variées. Par exemple, la société Scan Engine, une filiale du studio d'animation Unit Image célèbre pour ses bandes annonces de jeux vidéo et séries d'animation intégrant des personnages hyper réalistes a développé un système de prise de vue adaptée à la numérisation de corps et de visage humain. Ce studio de capture photogrammétrique à 360° est composé d'une centaine d'appareils photo déclenchants simultanément pour capturer tous les angles d'un sujet en un instant figeant son mouvement. Cette technique est particulièrement efficace pour créer des modèles 3D détaillés qui reflètent fidèlement la réalité physique du sujet.

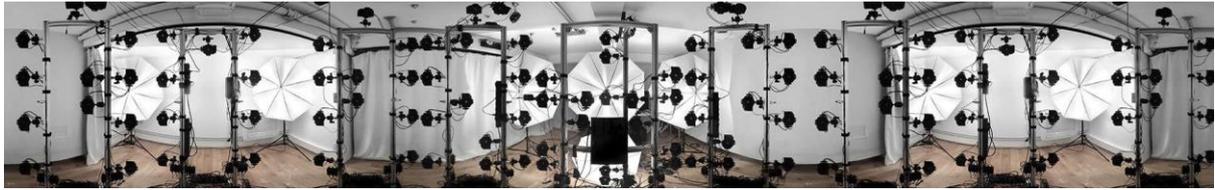


Figure 33. *Scan Engine, Unit Image*, photographie à 360° studio de capture photogrammétrique de Scan Engine, société d'Unit Image.¹⁸

Évolution et utilisation actuelle

L'évolution de la photogrammétrie, de ses débuts dans les applications de cartographie à son utilisation moderne dans le domaine de la modélisation 3D, illustre son potentiel pour capturer des figures humaines avec une grande précision et ainsi apporter tous les éléments nécessaires aux artistes pour créer un personnage numérique. Richard Szeliski, dans son ouvrage "Computer Vision: Algorithms and Applications" (2010), souligne l'importance des avancées technologiques qui ont permis à la photogrammétrie de passer d'une technique purement géométrique à un outil de capture visuelle sophistiqué¹⁹. Ces avancées incluent des améliorations dans les capteurs des appareils photo, les algorithmes de traitement d'images et les capacités de calcul des ordinateurs, rendant possible la création de modèles 3D de plus en plus détaillés et fidèles à la réalité.

Aujourd'hui, la photogrammétrie est fortement utilisée dans l'industrie cinématographique pour leurs effets spéciaux et du jeu vidéo pour créer des

¹⁸ <https://www.scan-engine.fr/>

¹⁹ Szeliski, R. (2010). Computer Vision: Algorithms and Applications. Springer. ISBN 978-1848829343.

modèles humains réalistes. Les techniques de capture photogrammétrique permettent de produire rapidement des modèles 3D détaillés, ce qui est particulièrement utile pour des projets nécessitant un haut niveau de réalisme et des délais de production courts.

En revanche, les modèles photogrammétriques bruts sont difficilement exploitables pour ces utilisations à cause de leur nombre trop important de polygones. Plusieurs traitements doivent alors être effectués pour les optimiser tout en gardant le niveau de détail d'origine. En effet, l'optimisation de ces objets 3D consiste à trouver un équilibre entre fidélité visuelle et performance technique. Ce processus commence par la retopologie, qui consiste à créer un modèle à bas niveau de subdivision à partir du scan photogrammétrique initial. Cette étape implique de reconstruire la géométrie du modèle avec un nombre réduit de polygones tout en préservant les formes essentielles et en utilisant un maillage le plus régulier possible. Ensuite, les détails fins issus du modèle capturé par la photogrammétrie sont projetés sur ce modèle simplifié dans le logiciel Zbrush puis le modèle sera de plus en plus subdivisé. Lors de cette étape, l'artiste 3D va soigneusement nettoyer les artéfacts issus de la projection pour chaque niveau de détails. Pour utiliser un modèle à bas niveau de subdivision tout en conservant la qualité du plus haut niveau de détail, des maps de déplacement²⁰ ou de normal sont utilisées pour faire apparaître les détails du modèle lors du rendu de l'image. Les maps de déplacement simulent les variations de hauteur et les reliefs sur la surface du modèle, tandis que les maps de normal²¹ ajoutent des détails microscopiques sans augmenter le nombre de polygones. Cette approche permet de conserver un niveau de détail élevé tout en utilisant des modèles à faible nombre de polygones, optimisés pour le rendu en temps réel et les performances dans les environnements interactifs. Ce processus

²⁰ Une map de déplacement est une texture utilisée en modélisation 3D pour ajouter des détails géométriques à un modèle en déplaçant les sommets de sa surface en fonction des valeurs de la texture.

²¹ Une map de normal est une texture utilisée en modélisation 3D pour simuler des détails fins sur la surface d'un modèle sans modifier sa géométrie. Elle encode des informations de direction des normales de surface.

permet de garantir des résultats visuellement réalistes tout en respectant les contraintes de performance des plateformes de jeu et de production d'animation.

Lorsqu'un acteur est scanné par photogrammétrie, une série de scan est effectuée pour capturer diverses expressions faciales nommées et définies de manière conventionnelle, telles que le sourire, le froncement de sourcils, la surprise, etc... Ces différentes expressions faciales sont notamment renseignées dans le livre "Anatomy of Facial Expression" (2017) de Uldis Zarins. Chaque scan est ensuite traité et optimisé pour créer un modèle 3D correspondant à une expression spécifique. Chacun de ses modèles 3D associé à une expression faciale spécifique est appelé blend shape. Les blend shapes sont des techniques d'animation utilisées pour créer différentes expressions faciales en interpolant entre différents modèles 3D, chacun représentant une expression distincte. Selon Uldis Zarins, les blendshapes sont essentielles pour simuler les étapes intermédiaires de mouvements complexes. En effet, les déformations de la peau et des muscles faciaux passent par de nombreuses phases et ne peuvent être capturées en un instant unique. Les blend shapes permettent alors d'interpoler entre les modèles photogrammétriques pour animer les transitions fluides entre les différentes expressions. Par exemple, en passant progressivement d'un modèle représentant une expression neutre à un modèle représentant un sourire, les blend shapes permettent de simuler de manière réaliste le mouvement des muscles et de la peau. Les blend shapes, en combinaison avec les scans photogrammétriques, sont largement utilisés dans l'industrie du cinéma et des jeux vidéo pour créer des personnages numériques expressifs et crédibles.

En capturant les détails subtils de la peau, des expressions faciales et des caractéristiques individuelles, les numérisations photogrammétriques d'êtres humains permettent de créer des modèles qui ressemblent à leurs sujets et qui reproduisent fidèlement leurs expressions. Cela est essentiel pour des applications où le réalisme visuel est primordial, comme dans les effets spéciaux de films ou les

personnages de jeux vidéo. Par exemple, dans le jeu vidéo "Baldur's Gate III", les développeurs ont utilisé la photogrammétrie pour capturer les détails des visages et les expressions des personnages, créant ainsi une immersion visuelle profonde et authentique pour les joueurs. Les personnages de ce jeu bénéficient d'une richesse de textures et d'une fidélité visuelle qui renforcent l'expérience narrative tenant une place centrale dans ce jeu. Par exemple, le personnage d'Astarion, un vampire elfique aux traits distinctifs, est rendu avec une grande attention aux détails et à la complexité des textures dans le jeu vidéo. Cet exemple illustre aussi la capacité du moteur de jeu à créer des modèles 3D réalistes et expressifs.



Figure 34. Larian Studios, Astarion dans le jeu vidéo Baldur's Gate III.

Lorsqu'un modèle humain issu de photogrammétrie doit être animé, la manière la plus efficace est la motion capture, ou capture de mouvement. Cette technique est utilisée pour enregistrer les mouvements d'un acteur et les appliquer à un modèle numérique. La combinaison des scans photogrammétriques avec la motion capture permet d'atteindre un niveau de réalisme élevé dans l'animation et la restitution des mouvements corporels et faciaux humains. Les scans photogrammétriques fournissent des modèles 3D détaillés et texturés, capturant les nuances des traits du visage et des détails de la peau. Ainsi, en intégrant ces modèles après optimisation

avec les données issues des capteurs de mouvement, il est possible de reproduire fidèlement les mouvements et les expressions d'un acteur. En particulier, la motion capture de visage avec un casque HMC "head-mounted cameras", consiste à filmer le visage d'un acteur à haute fréquence, avec un objectif Fisheye. L'acteur aura des points de tracking sur le visage pour que le logiciel de traitement des données puisse restituer ses expressions au modèle 3D. Ainsi, cette technique permet d'enregistrer les moindres mouvements musculaires et les expressions d'un acteur, ensuite appliqués à leur modèle photogrammétrique.





Figure 35. *FaceForm, Head-Mounted Cameras (HMC).* La première image montre un HMC placé sur la tête d'un acteur, utilisé pour capturer les mouvements faciaux détaillés en temps réel. La deuxième image montre le retour caméra, où les données capturées sont transposées sur le modèle 3D de l'acteur.

Ces données sont ensuite utilisées pour piloter les blend shapes, synchronisant parfaitement les mouvements enregistrés avec les déformations des modèles 3D. Le résultat est une animation faciale qui reproduit fidèlement les expressions et les émotions de l'acteur, menant à une sensation de réalisme chez le spectateur. En somme, cette technique permet de capturer ce qui n'est pas reproductible manuellement, c'est-à-dire les performances des acteurs et de les traduire en animations numériques. En effet, la richesse et la subtilité des performances d'acteurs est essentielle pour l'animation réaliste de personnage. Les micro-expressions, les mouvements imperceptibles des muscles faciaux, et les variations subtiles dans la voix et les gestes sont difficiles, voire impossibles, à recréer de manière fidèle par un animateur. Chaque acteur apporte une dimension unique à son rôle, attachée à son expérience, son interprétation et son ressenti émotionnel à un moment précis.

En utilisant des techniques de capture de mouvement et de synchronisation avec les blend shapes, on peut transposer ces nuances directement dans l'animation 3D. Cette méthode précise capture les expressions génériques mais aussi les micro-expressions. Sans ces détails, l'animation peut paraître artificielle ou exagérée. Par exemple, un sourire sincère implique des contractions spécifiques autour des yeux et de la bouche, des mouvements qui peuvent être perdus ou mal interprétés sans capture directe de l'acteur. Ces techniques permettent de préserver l'intégrité de la performance originale et offrent un réalisme de l'animation du modèle 3D. Ainsi, cela permet aux personnages animés de bénéficier de la même complexité et profondeur émotionnelle que leurs homologues en chair et en os.

Cette combinaison est utilisée dans des productions comme "The Irishman" de Martin Scorsese, où les acteurs Robert De Niro, Al Pacino et Joe Pesci ont été numériquement rajeunis. Les scans photogrammétriques des visages des acteurs ont été animés avec des données de motion capture, permettant de recréer leurs performances avec un réalisme difficilement atteignable manuellement²², tout en respectant les nuances de leurs expressions faciales et mouvements corporels. Cette méthode garanti une animation fluide et réaliste, augmentant ainsi l'impact visuel et émotionnel des personnages numériques.



²² Ford, R., & Parr, T. (2019). The technology behind The Irishman's de-aging VFX. CGSociety.



Figure 36. SCORSESE, Martin : *The Irishman*, 2019. Rajeunissement numérique des acteurs Robert De Niro, Al Pacino et Joe Pesci. La première image montre les acteurs avant le traitement numérique et la deuxième montre le résultat final après le rajeunissement numérique.

III.B. Utilisation de la photogrammétrie d'être humain dans les différentes industries

Impact de la photogrammétrie sur les doubles numériques et les scènes d'action au cinéma

Dans l'industrie cinématographique, les doublures numériques créées à l'aide de numérisation par photogrammétrie sont utilisées dans les scènes d'action difficilement reproductible dans un environnement réel. Elles sont en effet utilisées pour des scènes dangereuses, fantastiques, ou nécessitant des transformations physiques impossibles à réaliser avec des méthodes traditionnelles. Par exemple, les doubles numériques permettent de modifier artificiellement l'âge d'un acteur ou de manière générale de modifier son apparence physique. Cette technologie permet de créer des répliques numériques fidèles aux acteurs et à leurs performances.

Un exemple important d'apparition de doublure numérique au cinéma est le film "The Curious Case of Benjamin Button" (2008) de David Fincher, connu pour avoir le temps d'écran le plus long d'un double personnage numérique. Dans ce film, Brad Pitt joue un personnage qui vieillit à l'envers, apparaissant d'abord comme un vieil homme pour ensuite rajeunir au fil de l'histoire. Les artistes d'effets spéciaux ont alors utilisé la photogrammétrie pour créer des modèles 3D détaillés des différentes expressions du visage de Brad Pitt puis les ont déformés en post-production pour lui faire traverser différents stades de vieillissement. Cette numérisation de l'acteur a en effet permis de montrer à l'écran l'acteur avec une fidélité des traits du visage et de ses expressions. Ainsi, les scans photogrammétriques ont fourni des bases réalistes sur lesquelles les artistes ont pu travailler manuellement pour vieillir et rajeunir le modèle en s'appuyant sur des références visuelles externes et laissant libre court à leur créativité, tout en préservant les performances et les expressions naturelles de Brad Pitt.



Figure 37. FINCHER, David : *The Curious Case of Benjamin Button*, Doublure numérique de Brad Pitt, film dramatique américain, basé sur la nouvelle de F. Scott Fitzgerald, Paramount Pictures, sorti en 2008.

Les doublures numériques au cinéma sont aussi utilisées pour des scènes d'action. Une des premières utilisations d'un double numérique dans une scène d'action au cinéma apparaît dans le film *Matrix* (1999) avec l'introduction d'un effet dit "bullet time", où l'image semble se figer et où la caméra effectue un traveling autour du

personnage. Conçu pour capturer des moments d'action à une vitesse ultrarapide tout en permettant à la caméra de se déplacer autour de la scène à une vitesse normale, cet effet a redéfini les standards des séquences d'action au cinéma. Pour réaliser l'effet de bullet time dans le film *Matrix*, les réalisateurs du film Lana et Lilly Wachowski ont collaboré avec John Gaeta, superviseur des effets visuels, pour créer une technique qui combine des prises de vue en direct avec des éléments numériques. La scène où Neo, incarné par Keanu Reeves esquive des balles a été tournée sur un plateau circulaire spécialement conçu pour la séquence, entouré de 120 appareils photo fixes disposés en un arc de cercle autour de l'acteur. Ces caméras sont synchronisées pour capturer simultanément des images fixes de l'action à différents angles. Cette technique se rapproche en effet de la méthode de photogrammétrie actuelle dans son principe fondamental mais n'en utilise pas à proprement parler. Les images capturées par les caméras fixes ont ensuite été combinées numériquement pour créer une séquence fluide où le temps semble ralentir jusqu'à presque se figer, tandis que la perspective de la caméra se déplace rapidement autour de Neo. Pour compléter l'effet, des modèles 3D à faible résolution de Neo ont été utilisés pour intégrer de manière transparente les transitions entre les images fixes et pour générer des mouvements impossibles à réaliser avec les caméras réelles seules.



Figure 38. WACHOWSKI, Lana et Lilly : *The Matrix*, Effet "bullet time" avec double numérique de Keanu Reeves, film de science-fiction américain, Warner Bros., sorti en 1999.

En plus du rajeunissement et des scènes d'action, les doubles numériques et la photogrammétrie sont souvent utilisés pour les effets spéciaux où des transformations physiques extrêmes sont nécessaires. Dans le film "Alita: Battle Angel" (2019) réalisé par Robert Rodriguez, la transformation physique de la doublure numérique de l'actrice Rosa Salazar, qui incarne le personnage principal Alita, a été réalisée grâce à des techniques avancées de capture de mouvement facial et de photogrammétrie. Pour donner vie à Alita, une cyborg aux grands yeux expressifs et aux mouvements fluides, l'équipe d'effets spéciaux a utilisé la capture de mouvement faciale et corporelle afin d'intégrer ce double numérique dans une scène réelle. Les données de capture de mouvement faciale et corporelle ont été utilisées pour créer un modèle numérique détaillé d'Alita, permettant de transférer les performances de l'actrice à l'écran avec une grande fidélité. Les artistes du studio Weta Digital ont également appliqué des techniques de texturing et de shading avancées pour rendre l'aspect de surface de la peau de l'actrice synthétique et les composants mécaniques d'Alita aussi réalistes que possible, tout en conservant les éléments stylistiques distinctifs du personnage. En effet, les modèles 3D photogrammétriques permettent de réaliser ces transformations de manière crédible, en conservant les détails réalistes des visages et des corps des acteurs.



Figure 39. RODRIGUEZ, Robert et CAMERON, James : *Alita: Battle Angel*, Portrait d'Alita interprétée par Rosa Salazar, personnage principal numérique, film de science-fiction américain, adaptation du manga *Gunnm* de Yukito Kishiro, 20th Century Fox, sorti en 2019.

L'utilisation de la photogrammétrie pour les doublures numériques améliore également la sécurité sur les plateaux de tournage. Pour les scènes dangereuses ou les cascades, les doublures numériques peuvent remplacer les acteurs, réduisant ainsi les risques de blessures. Les modèles numériques créés par photogrammétrie peuvent être animés pour effectuer des cascades complexes, tout en conservant une apparence réaliste et cohérente avec le reste du film.

Utilisation de la photogrammétrie dans la création de personnages et d'environnements de jeu vidéo

Dans l'industrie du jeu vidéo, les scans photogrammétriques sont devenus pour les jeux à la recherche de réalisme un outil essentiel pour donner vie aux personnages et ainsi renforcer l'immersion du joueur dans l'environnement virtuel. Le traitement des données photogrammétriques adapté à des modèles 3D utilisables en rendu en temps réel permet aux développeurs d'utiliser des textures et des formes géométriques détaillées issu d'un sujet humain réel. Cela offre en effet de la profondeur et de l'authenticité au personnage joué ou rencontré par le joueur.

Un exemple récent d'utilisation de modèles humains numérisés pour le jeu vidéo est "Baldur's Gate III" développé par Larian Studios et élu meilleur jeu de l'année 2023. Pour ce jeu, les développeurs ont utilisé la photogrammétrie pour capturer les détails minutieux des visages des personnages, ainsi que les textures de leurs vêtements et accessoires. Cette méthode permet de rendre chaque personnage unique, avec des

traits et des expressions faciales réalistes, renforçant ainsi l'engagement émotionnel des joueurs. En utilisant des scans photogrammétriques, les développeurs peuvent également intégrer des variations naturelles dans les textures de peau, telles que des imperfections ou des cicatrices, rendant les personnages plus crédibles et authentiques.

Dans "Baldur's Gate III", la conception des personnages repose sur l'utilisation de la photogrammétrie et de la capture de mouvement pour créer des modèles réalistes et détaillés. L'équipe de création de personnages de Larian Studios, dirigée par Alena Dubrovina, commence par utiliser la photogrammétrie pour scanner des têtes humaines réelles. Cela permet de capturer les formes anatomiques et les détails de la peau avec une grande précision, fournissant une base réaliste pour la modélisation en 3D. Pour la modélisation des cheveux, l'équipe a adopté une approche de génération de mèches de nouvelle génération et optimisée. En utilisant des outils développés spécifiquement pour le logiciel Maya, les artistes peuvent aligner les mèches et contrôler les couleurs des vertex pour simuler des coiffures réalistes ainsi que des éléments tels que la fourrure et les plumes. Cette approche permet d'obtenir des résultats crédibles, améliorant ainsi l'apparence des personnages dans le jeu. Pour ce qui est de l'animation des personnages, sa force réside dans l'utilisation de la capture de mouvement. Larian Studios a fait appel à 248 acteurs pour fournir des données de mouvement, ce qui permet de capturer les mouvements des personnages ainsi que toute une gamme d'expressions faciales subtiles. Ce processus créatif a permis au studio de renforcer l'immersion et l'émotion dans les dialogues et les scènes cinématiques, rendant les personnages plus vivants et convaincants. Au lancement du jeu, l'éditeur de personnage proposé au joueur permet d'assigner des modèles 3D et d'exposer des paramètres de textures pour une personnalisation rapide et efficace des personnages. Cette approche procédurale permet la création d'une infinité de personnages uniques, chacun ayant ses propres caractéristiques et apparences distinctes comme de vrais individus humains. Ce tour de force est rendu possible par la diversité de sujets numérisés par photogrammétrie. En effet, plus une base de données est importante et plus l'aléatoire du réel pourra être reproduit artificiellement.

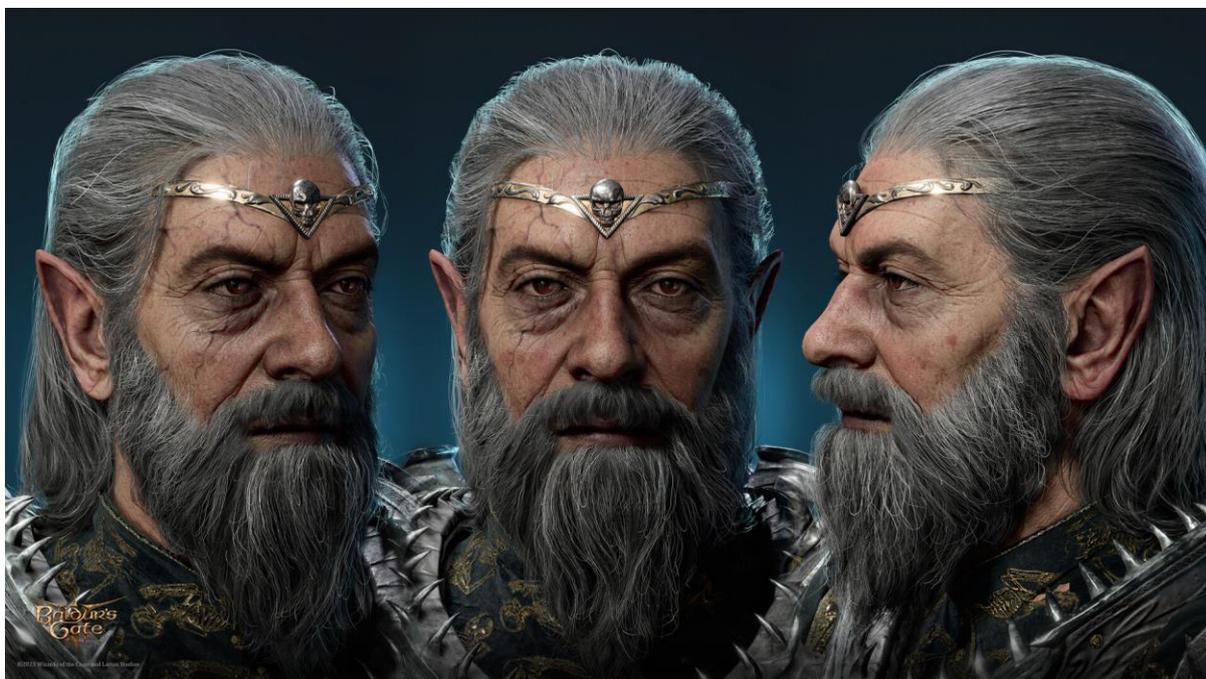
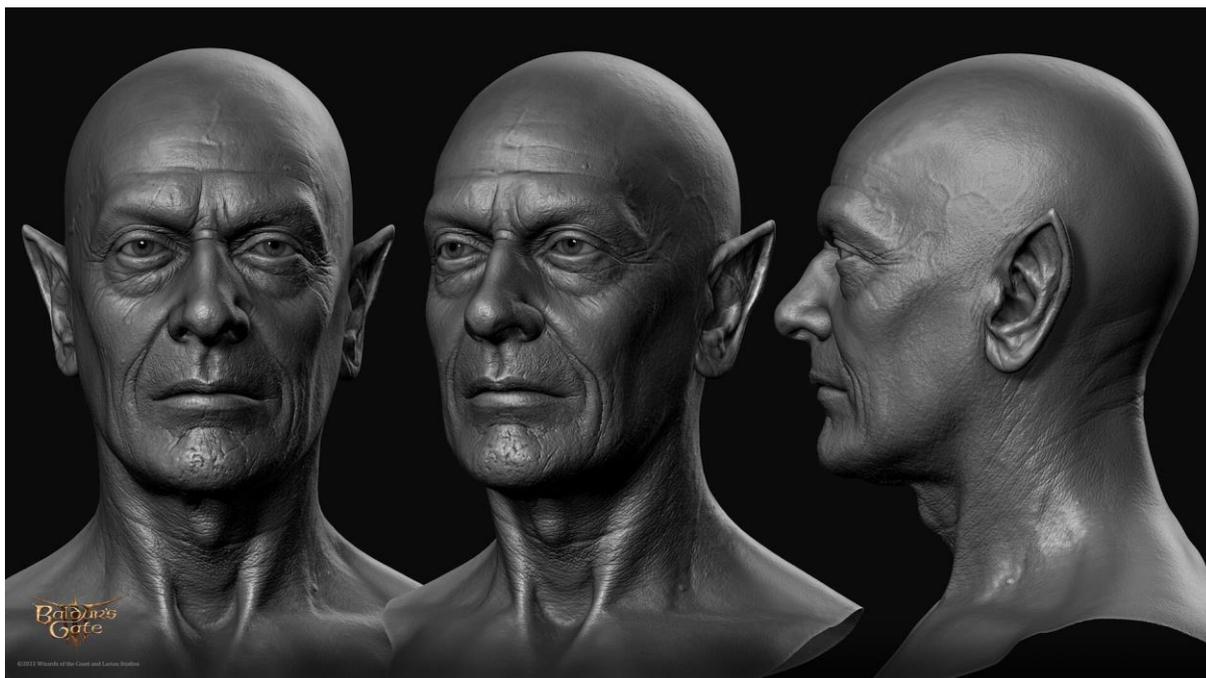


Figure 40. DUBROVINA, Alena, LARIAN STUDIOS : *Ketheric Thorm*, modèle photogrammétrique brut, ArtStation, 2023.

Figure 41. DUBROVINA, Alena, LARIAN STUDIOS : *Ketheric Thorm*, modèle final avec texture, ArtStation, 2023.

Tout comme Baldur's Gate III, dans le jeu vidéo sorti en 2017 "Hellblade: Senua's Sacrifice", développé par Ninja Theory, la conception des personnages repose sur une combinaison de capture de mouvement et de photogrammétrie. Pour renforcer le réalisme et l'immersion, les artistes ont intégré des détails et interactions liés à l'environnement sur le personnage, tels que la saleté, la sueur, et les effets de la lumière sur la peau de Senua, le personnage principal du jeu. Outre les visuels, l'expérience immersive de "Hellblade: Senua's Sacrifice" est grandement enrichie par son design sonore. Le jeu utilise des enregistrements binauraux pour créer un paysage sonore en 3D, enveloppant le joueur dans l'environnement auditif de Senua. Cette approche sonore renforce l'immersion dans les images et contribue à la narration, en particulier en ce qui concerne la représentation des voix hallucinatoires que Senua entend. L'équipe de Ninja Theory souligne l'importance de capturer des performances authentiques et de les transposer dans le monde numérique sans perdre l'intégrité émotionnelle des acteurs.



Figure 42. *NINJA THEORY, Hellblade: Senua's Sacrifice*, jeu vidéo d'action-aventure psychologique, sorti en 2017.

Parallèlement à la numérisation de personnages en 3D, les environnements de jeu bénéficient également grandement de la photogrammétrie. Par exemple, dans "Red Dead Redemption 2" de Rockstar Games, les développeurs et artistes chargés de l'environnement ont utilisé cette technique pour recréer des paysages naturels vastes et détaillés, complexes et diversifiés. Chaque élément, des rochers aux arbres, a été scanné par photogrammétrie et intégré dans le moteur de jeu, permettant de reproduire fidèlement les textures et les formes naturelles. Cela donne aux joueurs l'impression de se trouver dans un monde vivant et respirant, où chaque détail contribue à l'immersion globale. Ainsi, en ajoutant des personnages réalistes comme dans Baldur's Gate III, les jeux vidéos peuvent atteindre ce que peu de médiums atteignent en termes d'immersion dans un environnement virtuel.



Figure 43. *ROCKSTAR GAMES*, Capture d'écran d'un environnement du jeu *Red Dead Redemption 2*, jeu vidéo d'action-aventure en monde ouvert, publié par Rockstar Games, sorti en 2018.

La photogrammétrie joue également un rôle clé dans la création de personnages secondaires et de figurants (PNJ), souvent sous-estimés mais essentiels pour la cohérence du monde de jeu. En scannant une série d'acteurs et de figurants, les développeurs peuvent créer une variété de modèles 3D avec des caractéristiques uniques, évitant ainsi la répétitivité souvent observée avec des modèles générés de manière procédurale. Cela permet de peupler les mondes de jeu avec des personnages diversifiés et réalistes, enrichissant l'expérience du joueur.

Les avancées en photogrammétrie ont également facilité la création de textures de haute résolution qui peuvent être utilisées sur des modèles à faible nombre de polygones optimisés pour du rendu en temps réel. Les techniques d'optimisation de modèles 3D et de textures sont particulièrement bénéfiques pour les jeux qui nécessitent des performances optimales tout en gardant un bon niveau de réalisme. En utilisant des maps de normal et de déplacement dérivées de scans photogrammétriques, les développeurs peuvent maintenir une haute qualité visuelle sans compromettre les performances du jeu.

Innovations en modélisation 3D et photogrammétrie dans l'art contemporain

Les techniques de modélisation 3D et de photogrammétrie ont ouvert de nouvelles portes dans le domaine de l'art contemporain, permettant aux artistes d'explorer des nouvelles formes de représentation dans les œuvres d'art. En capturant des modèles 3D à partir de sujets ou d'objets réels, une multitude de possibilités créatives s'ouvre aux artistes qui souhaitent intégrer des éléments numériques et physiques dans leurs œuvres.

Un exemple de l'utilisation de la photogrammétrie dans l'art contemporain est le travail de l'artiste Sophie Kahn. Elle utilise un scanner laser 3D pour capturer des images fragmentaires de corps humains, mettant en évidence les imperfections et

les échecs de la technologie. Ces scans sont ensuite utilisés pour créer des impressions 3D, comme dans son œuvre "Bust of a Woman with Head Thrown Back" (2013). L'utilisation de la photogrammétrie permet à Kahn de matérialiser les défauts et les lacunes des scans, représentant une critique des technologies contemporaines et de leur perception des corps humains. Ses œuvres montrent comment la photogrammétrie peut être utilisée pour explorer de nouvelles formes d'expression artistique et repenser la représentation du corps humain dans l'art contemporain.



Figure 44. KAHN, Sophie : *Bust of a Woman with Head Thrown Back*, impression 3D à partir de scan laser 3D, peinture, vernis, acier, taille réelle, 2013.

Dans ses œuvres, les imperfections et les lacunes des scans sont intentionnellement préservées et accentuées. Kahn s'intéresse à la manière dont les technologies de capture 3D peuvent échouer à saisir la totalité et la complexité du corps humain, ce qui résulte en des formes qui semblent à la fois futuristes et

incomplètes, presque archéologiques. Ces imperfections technologiques deviennent des éléments esthétiques, ajoutant une dimension de temporalité et de vulnérabilité à ses sculptures. En combinant des techniques de photogrammétrie et d'impression 3D, Kahn questionne la fidélité des reproductions numériques ainsi que la notion même de présence corporelle dans le contexte numérique. L'œuvre de Kahn présente des corps fragmentaires, souvent creux et vides, avec des yeux fermés, contrastant fortement avec les grands yeux expressifs d'Alita dans *Alita: Battle Angel*. Cette fermeture des yeux crée une distance entre l'objet et le spectateur, renforçant la sensation de vide et d'absence. Cette approche met en évidence la déconnexion entre la technologie et la réalité humaine, soulignant les limites des reproductions numériques à retranscrire la vitalité des sujets vivants. En accentuant ces imperfections et ces vides, Kahn explore la fragilité et la temporalité du corps humain dans le monde numérique.

Un contraste marquant avec le travail de Sophie Kahn se trouve dans le travail de Cristina Galan avec son œuvre "Paul". Contrairement à Kahn, Galan joue sur l'exagération de l'émotion et de l'effet empathique, créant une figure totalement inhumaine. Les yeux noirs et troublants du personnage de "Paul" accentuent cette inhumanité, suscitant à la fois fascination et malaise profond chez le spectateur. Galan utilise cette hyperbole émotionnelle pour explorer les limites de la photogrammétrie et de la modélisation 3D. En poussant les expressions et les caractéristiques à des extrêmes inaccessibles à la réalité humaine, elle met en lumière les tensions entre la technologie et l'authenticité de la vie humaine. L'œuvre de Galan, avec son approche hyperbolique, questionne ainsi la nature de l'empathie et de l'identité dans les représentations numériques, en jouant sur les perceptions et les réactions du spectateur face à ce qui semble familier mais profondément altéré.



Figure 45. GALAN, Cristina : *Paul*, œuvre d'art numérique, 2023.

La photogrammétrie transforme ainsi la manière dont les œuvres d'art éphémères sont conservées et étudiées. Elle permet de documenter des créations qui, autrement, pourraient être perdues à jamais. En capturant des œuvres dans un

format numérique, elle assure leur survie et leur accessibilité pour les générations futures, tout en ouvrant de nouvelles possibilités pour l'interaction et l'engagement avec l'art. Il est possible de relier cette idée avec la numérisation d'être humain. En effet, le scan photogrammétrique d'un individu permet une conservation de son apparence physique dans les moindres détails à un instant de sa vie et pourra être réutilisé dans le futur.

III.C. Importance de l'élément aléatoire du réel capturé avec la photogrammétrie

La photogrammétrie permet de capturer les imperfections et les détails uniques du réel, éléments souvent négligés dans les techniques traditionnelles. Ces imperfections ajoutent une authenticité essentielle aux modèles numériques.

L'aléatoire du réel, capturé par cette technologie, permet de créer des personnages plus crédibles et expressifs. En intégrant ces détails naturels, la photogrammétrie enrichit la perception du réalisme et renforce la connexion entre le spectateur et le personnage numérique.

Capture des imperfections et des détails uniques

L'un des atouts majeurs de la photogrammétrie dans la modélisation 3D est sa capacité à capturer les imperfections et les détails uniques qui caractérisent chaque visage humain. Cette précision est essentielle pour créer des modèles 3D réalistes et crédibles.

La photogrammétrie permet de capturer les moindres détails de la surface de la peau humaine, y compris les imperfections naturelles telles que les pores, les rides, et les cicatrices. Ces détails, souvent négligés ou simplifiés dans les techniques de modélisation traditionnelles, sont fondamentaux pour reproduire fidèlement un visage humain. Les travaux de Volker Blanz et Thomas Vetter dans "A Morphable

Model for the Synthesis of 3D Faces" (SIGGRAPH, 1999) mettent en évidence l'importance de capturer ces variations individuelles pour créer des modèles morphables réalistes. Leurs recherches ont marqué une avancée significative dans la modélisation 3D de visages humains. Leur méthode repose sur l'utilisation de modèles statistiques pour générer des visages réalistes à partir de données 3D. En analysant des scans faciaux, ils ont créé un modèle modulable capable de synthétiser une large gamme de formes et d'expressions faciales. Cette approche permet de combiner et d'interpoler différents visages pour produire de nouvelles variations, facilitant ainsi la création de personnages numériques réalistes et variés.

Par ailleurs, l'utilisation de techniques d'éclairage spécifiques telles que l'éclairage cross polarisé permet d'éliminer les reflets indésirables et de capturer des textures de peau très détaillées. La cross polarisation est une technique optique où des filtres polarisants sont placés sur les sources de lumière et les capteurs de la caméra à des angles perpendiculaires (90°). Cela permet de supprimer les réflexions spéculaires en bloquant la lumière polarisée réfléchie, améliorant ainsi la capture des détails de la surface et des textures sans les interférences des reflets. Cette méthode permet de faciliter la capture des détails subtils de la surface de la peau. La map de spéculaire²³ est générée par soustraction de la texture issue de la polarisation à 90° et de la polarisation parallèle. La spéculaire appliquée à un modèle 3D permet de reproduire avec précision les interactions de la lumière avec la peau, ajoutant ainsi une dimension de réalisme supplémentaire.

Authenticité et réalisme des personnages 3D

En capturant les imperfections naturelles et les expressions intermédiaires imperceptibles, la photogrammétrie d'être humain permet d'obtenir des éléments

²³ Une map de spéculaire est une texture utilisée en modélisation 3D pour définir l'intensité et la couleur des reflets spéculaires sur la surface d'un objet, contrôlant ainsi l'apparence de la brillance et des reflets lumineux.

propre à chaque individu, difficilement reproductible par des artistes 3D utilisant la modélisation traditionnelle.

Rachel McDonnell et ses collègues, dans leur article "Evaluating the Perceptual Realism of Animated Human Characters" (ACM Transactions on Graphics, 2007), soulignent l'importance de ces détails difficiles à saisir, jouant un rôle important pour le réalisme perceptuel des êtres humains de synthèse. Ils démontrent que la présence de petites imperfections, telles que des irrégularités cutanées ou des asymétries faciales, améliore significativement la perception d'une entité existante réellement par les spectateurs. Ces détails, souvent négligés, jouent un rôle clé dans la perception de la vie et de l'individualité chez les personnages animés. En intégrant ces imperfections, les artistes créent une diversité visuelle qui reflète la réalité humaine, évitant ainsi l'apparence trop lisse ou trop parfaite qui peut sembler artificielle. En effet, les spectateurs perçoivent ces anomalies comme des marqueurs de l'humanité, ce qui augmente la crédibilité des émotions. De plus, ces petites imperfections aident à différencier les personnages, ajoutant de la profondeur narrative et de la richesse visuelle aux films et jeux vidéo.

Anil K. Jain et ses collègues, dans "Facial Soft Biometrics for Recognition" (Advances in Biometrics, 2009), discutent de l'importance des caractéristiques faciales subtiles pour la reconnaissance et le réalisme. Ils expliquent que ces détails jouent un rôle crucial dans la différenciation des individus et dans la création de représentations numériques photoréalistes. En intégrant ces éléments, la photogrammétrie permet de capturer des traits distinctifs qui ajoutent une couche supplémentaire d'authenticité aux modèles 3D. L'authenticité obtenue par la photogrammétrie est également renforcée par la capacité de cette technique à capturer des expressions faciales et des mouvements de manière naturelle. Contrairement aux méthodes de modélisation manuelle, qui peuvent involontairement lisser ou simplifier les détails, la photogrammétrie enregistre les nuances de chaque mouvement et expression, ajoutant ainsi à la crédibilité des personnages numériques. Cela est particulièrement important dans les applications où l'expressivité et l'interaction émotionnelle sont essentielles, comme dans les cinématiques de jeux vidéo ou les scènes dramatiques de films.

Applications dans la narration et le développement personnage

Travailler avec des doubles numériques à hauts niveaux de détails et fidèles à un modèle physique permet également à la narration de devenir plus efficace tout comme le développement du personnage. En figeant des expressions humaines, les personnages numériques deviennent presque vivants dans un univers virtuel et se dotent d'une individualité et d'une expressivité très proche d'un être physiquement réel.

Pour illustrer l'effet produit chez le spectateur par ces détails réalistes présents chez un personnage de fiction, Masahiro Mori introduit en 1970 le concept d'Uncanny Valley ou vallée de l'étrange. Dans ses recherches, Mori postule que plus une réplique humaine s'approche de la réalité sans l'atteindre complètement, plus elle risque de provoquer une sensation de malaise chez le spectateur. En capturant les subtilités, les imperfections et les éléments inconscients de la réalité, la capture par photogrammétrie permet de surmonter cette vallée de l'étrange. En effet, les numérisations d'humains mènent à la création de personnages ressemblant à des êtres humains réels mais suscitent également des réactions émotionnelles positives chez son spectateur. Dans le cas d'un personnage imaginé intégralement par un artiste, cette sensation de malaise est davantage vouée à être ressentie par son spectateur. En revanche, lorsqu'un être humain existant réellement est numérisé, sa représentation apparaît comme la plus naturelle possible et s'éloigne ainsi du concept d'Uncanny Valley. En effet, chaque micro détail est important lors de la modélisation d'un personnage en image de synthèse, c'est la raison pour laquelle la photogrammétrie est fortement sollicitée pour développer un personnage à l'écran.

Les recherches de Gillian Dyer dans "The Role of Human Emotions in the Realism of Digital Characters" (Journal of Digital and Media Literacy, 2015), explorent comment

les émotions et les expressions faciales capturées par photogrammétrie enrichissent la caractérisation des personnages. En saisissant des expressions faciales naturelles et des mouvements subtils, la photogrammétrie permet aux créateurs de personnages de transmettre un spectre d'émotions variées tout en restant authentiques. En effet, restituer des émotions faciales d'un acteur avec tous les défauts inconscients qu'il peut produire lors de sa performance de capture instantanée ou de mouvement est essentiel pour établir une connexion empathique entre le spectateur et le personnage. Ce lien créé entre le personnage de fiction et le spectateur permet de renforcer l'engagement narratif dans une séquence animée ou fixe. Les visuels caractérisés des blendshapes issues du livre *Anatomy Of Facial Expression* d'Uldis Zarins montrent comment la capture d'un spectre défini d'expressions faciales permettent d'établir une large gamme d'émotions et de réactions au double numérique. En effet, ce champ d'expressions est essentiel dans la narration d'un récit tourné autour d'un personnage fictif.

La capacité de la photogrammétrie à enregistrer des détails faciaux et corporels propre à chaque individu et des imperfections naturelles ouvre également de nouvelles perspectives en termes de diversité et de représentation dans les médias numériques. En capturant une grande diversité de visages humains il est possible de créer des personnages issus d'hybridations de scan photogrammétriques devenant uniques. Ces personnages physiquement justes et uniques vont refléter la variété et la complexité du vivant. Cette diversité et justesse anatomique est particulièrement pertinente dans les jeux vidéo et les films, où une représentation fidèle mais variée des personnages permet d'enrichir l'expérience narrative et de donner lieu à développements de personnages plus inclusifs et nuancés. En capturant la réalité dans ses moindres détails et sa diversité, la photogrammétrie représente un outil important pour les concepteurs de personnages 3D cherchant à repousser les limites du réalisme dans le développement de leur personnage de fiction.

III.D. Les êtres humains numériques hyperréalistes et le concept d'Uncanny Valley

Concept d'Uncanny Valley et ses implications

Le concept de l'Uncanny Valley, introduit par Masahiro Mori en 1970²⁴, décrit une réaction émotionnelle spécifique que les humains éprouvent lorsqu'ils sont confrontés à des représentations humanoïdes qui semblent presque réelles, mais qui ne le sont pas tout à fait ou qui paraissent plus qu'humaines. D'abord, ces représentations inhumaines créent une dissonance cognitive en raison de leur proximité avec le réalisme sans l'atteindre pleinement. Les imperfections subtiles ou les mouvements légèrement incorrects rappellent constamment au spectateur la nature artificielle de ces figures, provoquant un malaise.

Cependant, un autre paradoxe apparaît lorsque le réalisme atteint un niveau trop important et que la figure devient tellement parfaite qu'elle semble "hyper humaine". À ce stade, la représentation dépasse la réalité humaine telle qu'elle nous apparaît naturellement. Cette hyper-perfection peut éloigner le spectateur, car elle manque des imperfections et des irrégularités qui caractérisent les vrais humains. Cette absence de défauts naturels peut rendre la figure trop lisse, trop polie, et finalement, moins crédible.

Cette zone que l'on pourrait traduire par "inquiétante étrangeté". La notion d' "inquiétante étrangeté" est étroitement liée au concept d'unheimlich de Sigmund Freud. Freud a décrit l'unheimlich comme une sensation d'étrangeté familière, où quelque chose de connu est rendu étrangement inconnu et inquiétant. Cette idée se retrouve dans l'Uncanny Valley de Mori, où les figures humanoïdes presque réelles, mais imparfaites, évoquent une réaction émotionnelle similaire de malaise et de trouble. D'abord, on s'approche de la ressemblance parfaite, mais on finit par la dépasser sans jamais réellement la toucher. C'est ce paradoxe qui crée l'étrangeté, l'image devient "hyper humaine", où chaque détail est rendu avec une précision extrême, mais paradoxalement, la sensation de vivant s'évanouit. Cette quête de l'insaisissable montre que plus l'image se précise dans son réalisme, plus elle échappe aux signes du vivant, soulignant la difficulté de capturer l'humanité authentique par des moyens numériques. L'hyper-réalisme, en cherchant à

²⁴ Mori, Masahiro. "The Uncanny Valley." Energy, 1970

surpasser la réalité, finit par manquer la présence vitale qui rend une figure véritablement humaine.

Selon les écrits de Masahiro Mori, le phénomène se manifeste lorsque les personnages fictifs se rapprochent fortement du réalisme sans l'atteindre pleinement, créant un sentiment de malaise ou de répulsion chez les spectateurs. L'Uncanny Valley est une notion particulièrement pertinente dans le contexte de la modélisation 3D et de l'animation numérique, où chaque imperfection artificielle ou manque de fidélité dans les détails peut provoquer une dissonance cognitive importante chez le spectateur. Pour comprendre ce phénomène, il est essentiel de définir ce que l'on entend par perfection. Si l'on revient sur le début de ce mémoire avec l'Apollon du Belvédère, on voit que le modèle antique idéal, tout comme le modèle générique, est conçu comme "parfait", c'est-à-dire symétrique, sans irrégularité. Cependant, cette perfection classique contraste avec ce que l'on perçoit comme réaliste aujourd'hui. Dans la modélisation 3D, une figure trop lisse, trop symétrique, manque des imperfections naturelles qui rendent un visage humain crédible et vivant. Ainsi, en cherchant à atteindre une perfection visuelle, les artistes numériques doivent équilibrer entre l'idéal classique et les imperfections réalistes, car une figure trop parfaite peut paradoxalement sembler moins humaine et plus artificielle.

Masahiro Mori a théorisé que plus une représentation humanoïde ressemble à un humain sans être parfaitement réaliste, plus elle provoque un sentiment de dégoût ou de perturbation²⁵. Cette théorie a été soutenue par des études ultérieures qui ont exploré les réponses psychologiques à différents niveaux de réalisme dans les personnages numériques. Par exemple, MacDorman et Ishiguro (2006)²⁶ ont examiné comment les imperfections subtiles dans les expressions faciales et les mouvements peuvent amplifier le sentiment d'étrangeté et de malaise, confirmant

²⁵ Mori, M. (1970). The uncanny valley. *Energy*, 7(4), 33-35.

²⁶ MacDorman, Karl F., and Hiroshi Ishiguro. "The Uncanny Advantage of Using Androids in Cognitive and Social Science Research." *Interaction Studies*, 2006

ainsi les observations de Mori. Les études de MacDorman et Ishiguro montrent que l'Uncanny Valley ne se limite pas aux aspects visuels mais inclut également les mouvements et les comportements des personnages numériques. Les mouvements rigides ou mécaniques, les expressions faciales inexactes et les interactions non naturelles avec l'environnement peuvent tous contribuer à ce sentiment de malaise. Sigmund Freud, dans son essai sur l'inquiétante étrangeté (Unheimlich), illustre cette notion en prenant l'exemple de la poupée mécanique Olympia dans les contes d'Hoffmann. Olympia, bien qu'elle ressemble à une jeune femme, affiche des mouvements mécaniques et des interactions non naturelles, provoquant une forte sensation d'étrangeté chez ceux qui la rencontrent. De même, dans la modélisation 3D et l'animation numérique, ces imperfections dans les mouvements et expressions accentuent l'Uncanny Valley, rappelant constamment aux spectateurs la nature artificielle de ces représentations. C'est pourquoi il est important de capturer les éléments de surface mais aussi les nuances subtiles des expressions faciales et des mouvements pour surmonter l'Uncanny Valley.

L'impact de l'Uncanny Valley sur la perception des personnages numériques est observable dans plusieurs productions cinématographiques et vidéoludiques. Les personnages du long métrage "Rogue One: A Star Wars Story" réalisé par Gareth Edwards en 2016, ont suscité des réactions partagées chez les spectateurs. En particulier la doublure numérique de l'acteur du personnage Wilhuff Tarkin, qui a reçu une seconde vie dans ce long métrage. Certains spectateurs ont salué le réalisme de la technologie, tandis que d'autres ont ressenti une gêne en raison des légères imperfections qui trahissaient la nature numérique du personnage. De même, dans Alita: Battle Angel, le personnage principal modifié par traitement numérique, a été conçu pour être hyperréaliste, mais certains aspects de son apparence comme ses yeux plus gros que la moyenne ont provoqué des réactions de trouble chez les spectateurs.

En somme, le principe d'Uncanny Valley pose une question majeure pour les artistes 3D concepteurs de personnages numériques travaillant autour du réalisme. Comment s'assurer que chaque détail dans l'aspect de surface de l'enveloppe

corporelle, chaque mouvement, chaque expression soit juste et fidèle à la réalité pour créer l'apparence du vivant ?

Réalisme facial et expressions émotionnelles

Pour surmonter l'Uncanny Valley, il est essentiel de capturer une diversité d'expressions faciales naturelles et inconscientes, qui permettent après traitement de simuler la vie chez un personnage numérique. Les micro-expressions, qui sont des mouvements faciaux intermédiaires subtils et souvent inconscients peuvent être capturées par photogrammétriques ou simulé en sculpture dans la modélisation 3D à condition de s'inspirer de nombreuses références visuelles. Ignorer ces micro détails peut entraîner une perte de réalisme et une réaction de malaise chez les spectateurs, exacerbant ainsi l'effet de l'Uncanny Valley.

Paul Ekman²⁷, pionnier dans l'étude des expressions faciales modernes, a développé le Facial Action Coding System (FACS), un système exhaustif qui catégorise les mouvements musculaires du visage associés à différentes émotions. Le FACS, comme il est couramment appelé, décompose les expressions faciales en unités d'action (Action Units, AUs), chacune correspondant à une contraction spécifique d'un ou plusieurs muscles du visage. Ce système est le fruit de décennies de recherche sur la communication non verbale et les expressions émotionnelles. Le FACS a été conçu pour identifier et coder tous les mouvements faciaux possibles, permettant une analyse détaillée et objective des expressions humaines. Chaque AU est décrite en termes de positionnement des muscles et de leur mouvement. Le système couvre une gamme complète d'expressions, allant des sourires aux froncements de sourcils, en passant par les micro-expressions. Ces dernières,

²⁷ Ekman, Paul. "Facial Action Coding System." (2002).

souvent de courte durée, révèlent des émotions que les individus peuvent tenter de dissimuler, rendant leur étude particulièrement précieuse pour comprendre les véritables sentiments des êtres humains. Par exemple, une contraction du muscle orbiculaire de l'œil peut indiquer un sourire sincère, tandis qu'une légère élévation de la lèvre supérieure peut signaler le dégoût. Ekman s'est inspiré des travaux de Duchenne de Boulogne, qui a démontré que certaines expressions faciales, comme le sourire de plaisir, étaient le résultat de contractions musculaires spécifiques. Ekman et son collègue Wallace V. Friesen ont étendu cette recherche en cataloguant plus de 40 AUs et leurs combinaisons, aboutissant à un manuel de 527 pages détaillant ces mouvements et leurs implications. Ces combinaisons sont d'ailleurs renseignées dans le livre *Anatomy of Facial Expression* de Uldis Zarins. Le FACS trouve des applications dans des domaines tels que la psychologie, la sécurité et l'animation numérique. En psychologie, il est utilisé pour étudier les réponses émotionnelles et les interactions sociales. Dans le domaine de la sécurité, il aide à la détection de mensonges et à l'évaluation des intentions. Pour l'animation et la modélisation 3D, le FACS fournit une base méthodologique pour reproduire fidèlement les expressions faciales humaines, permettant ainsi aux opérateurs de scan photogrammétriques de diriger un acteur pour lui faire reproduire toute une série d'expressions par la suite traitées en tant que blendshapes. Des studios comme Pixar, Industrial Light & Magic et Weta Digital utilisent le FACS pour servir de référence aux animateurs et ainsi produire des visages extrêmement réalistes. En effet, en capturant et en transposant les unités d'action définies par le FACS, les animateurs peuvent s'assurer que chaque mouvement facial est fidèle à la réalité et contribue à la crédibilité émotionnelle du personnage.

Selon Ekman, les micro-expressions sont des indicateurs fiables des véritables émotions, souvent dissimulées par des expressions plus contrôlées. En intégrant ces micro-expressions dans les modèles 3D sculptés ou numérisés, il est possible de créer des personnages numériques qui transmettent des émotions de manière plus authentique et convaincante. En utilisant les unités d'action AU, les animateurs peuvent animer les visages de manière précise et détaillée pour rendre les personnages plus riches en expressions. L'intégration des micro-expressions dans

les modèles 3D prêts pour l'animation permet de capter les émotions fugitives qui échappent souvent aux expressions plus manifestes. Ces micro-expressions, bien que subtiles et brèves, procurent une sensation plus humaine aux personnages numériques. Elles peuvent révéler des sentiments cachés ou conflictuels, enrichissant ainsi la narration et l'engagement émotionnel du spectateur. La technologie de capture de mouvement faciale, souvent utilisée en combinaison avec le FACS, enregistre les mouvements subtils du visage de l'acteur pour les appliquer aux modèles 3D. Cela garantit que chaque micro-expression est fidèlement reproduite sur le personnage virtuel.

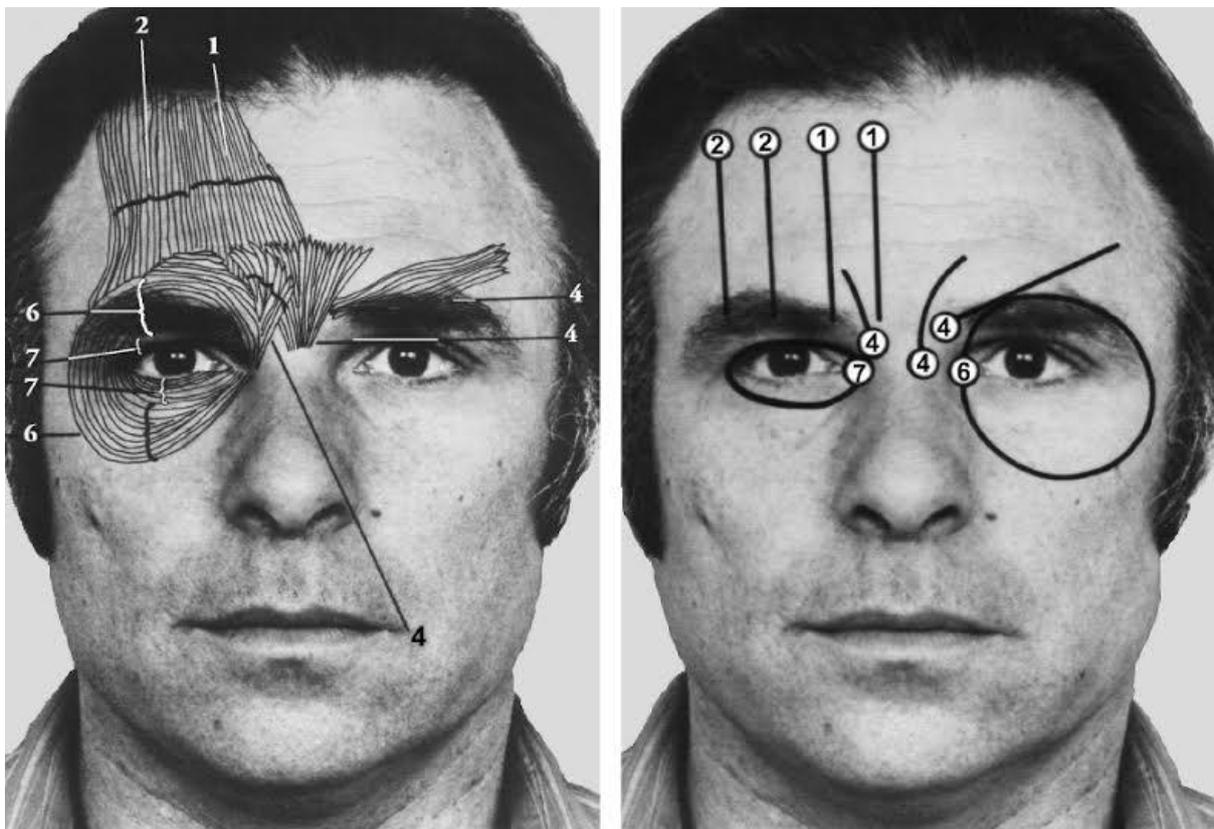


Figure 46. EKMAN, Paul : *Facial Action Coding System*, système exhaustif de catégorisation des mouvements faciaux associés aux émotions, livre publié en 2002, image tirée de son ouvrage.

Eric Alexander, dans son ouvrage "The Art of Facial Animation: Realism and Emotion in 3D Characters" (2017)²⁸, explore les techniques avancées de capture et d'animation des expressions faciales. Il souligne que pour atteindre un réalisme facial convaincant, il ne suffit pas de modéliser les formes de base du visage mais qu'il faut aussi capturer les mouvements subtils des muscles faciaux. L'utilisation de technologies comme la capture de performance faciale en temps réel permet de saisir ces nuances. Alexander met en évidence l'importance de reproduire les micromouvements des muscles faciaux pour rendre les personnages numériques plus expressifs et réalistes. Les systèmes de head-mounted cameras (HMC) sont utilisés pour enregistrer les performances faciales des acteurs avec une grande précision et permet une grande fluidité de traitement en post-production. Ces dispositifs, fixés sur la tête de l'acteur, capturent en temps réel les expressions faciales, permettant ainsi de transférer fidèlement ces mouvements aux modèles 3D. Cette méthode garantit que chaque sourire, froncement de sourcil ou clignement d'œil est reproduit avec une très grande précision. Cette technologie permet de capturer des performances en direct, ce qui signifie que les expressions faciales des acteurs peuvent être intégrées directement dans les animations sans nécessiter de retouches majeures. Cela améliore en effet l'efficacité du processus de création et assure également une synchronisation parfaite entre les mouvements du visage et les émotions exprimées par l'acteur. Les studios d'animations utilisent ces techniques pour que le personnage réagisse de manière naturelle avec son environnement. Lors de la capture, les acteurs interagissent avec des éléments du monde réel qui seront ensuite transformés dans l'environnement 3D.

Hao Li et ses collaborateurs ont développé un dispositif de capture de performance faciale monté sur la tête, détaillé dans leur article "Facial Performance Sensing

²⁸ Alexander, Eric. "The Art of Facial Animation: Realism and Emotion in 3D Characters." CRC Press, 2017

Head-Mounted Display" (2015)²⁹. Ce système capture les mouvements faciaux en haute résolution, permettant une intégration fluide et réaliste des expressions dans les personnages numériques. Le dispositif, appelé Head-Mounted Camera (HMC), utilise plusieurs caméras et capteurs pour enregistrer avec précision les micro-expressions et les mouvements subtils du visage. En utilisant des algorithmes avancés pour analyser et transposer ces mouvements, les artistes peuvent créer des animations faciales qui évitent l'Uncanny Valley, ce phénomène où des répliques humaines presque réalistes provoquent un malaise chez le spectateur. Les algorithmes développés par Hao Li et son équipe décomposent les mouvements faciaux en unités d'action, similaires à celles du Facial Action Coding System (FACS) de Paul Ekman. Ces unités d'action sont ensuite utilisées pour animer les modèles 3D avec une fidélité exceptionnelle. Par exemple, un léger froncement de sourcil ou un sourire subtil peut être capturé et reproduit avec une précision qui renforce l'authenticité des personnages numériques. L'utilisation de ce dispositif a été illustrée dans plusieurs projets de films et de jeux vidéo. Par exemple, les technologies similaires ont été employées pour capturer les performances des acteurs dans des productions comme "Blade Runner 2049", où la nécessité de représenter des personnages numériques avec des expressions réalistes et émouvantes était primordiale.

Aussi, les performances des acteurs scannés par photogrammétrie et capturés en motion capture pourront être appliquées à des modèles 3D transformés par les artistes et s'éloignant des formes humaines conventionnelles. Par exemple, dans le film "Le livre de la jungle" (2016), les performances faciales des acteurs ont été capturées pour animer les animaux de manière réaliste, rendant intentionnellement leurs réactions presque comparables à celles d'êtres humains. Dans le film "Avatar" de James Cameron, les acteurs ont été scannés pour capturer chaque nuance de leur performance. Les données obtenues ont ensuite été appliquées aux

²⁹ Li, Hao, et al. "Facial Performance Sensing Head-Mounted Display." ACM Transactions on Graphics, 2015

personnages Na'vi, des créatures qui, bien que non humaines, expriment des émotions de manière authentique et crédible grâce à la fidélité des mouvements et expressions capturées. En effet, la capture avec HMC permet de transférer les performances des acteurs à des personnages numériques, même s'ils ne ressemblent pas à des humains.



Figure 47. CAMERON, James : *Avatar 2*, Image du visage de Neytiri, suite du film de science-fiction *Avatar*, Production de 20th Century Studios, 2022.

Dans "Le Seigneur des Anneaux", Andy Serkis, en incarnant Gollum, a pu voir ses mouvements et expressions transposés sur une créature numérique unique. Cette technique a permis de rendre Gollum incroyablement réaliste et expressif, bien qu'il ne partage pas les proportions et caractéristiques humaines.

Les artistes numériques combinent les données photogrammétriques et la capture des acteurs à leur expérience de sculpture pour créer des personnages qui repoussent les limites de l'imagination. Grâce à des logiciels comme ZBrush, ils peuvent manipuler et adapter les formes capturées pour concevoir des créatures fantastiques ou des entités mythologiques par exemple. Avec ce processus créatif,

les concepteurs de personnages 3D sont capable de créer de l'empathie chez le spectateur grâce au réalisme des expressions et des traits de visage d'un personnage.

La combinaison de ces techniques de capture avec des algorithmes de traitement avancés permet de surmonter certains des principaux obstacles à la création de visages numériques réalistes. Par exemple, la capture en temps réel des micro-expressions et des mouvements musculaires offre une richesse de données qui peut être utilisée pour animer des personnages de manière plus naturelle. De plus, l'intégration de ces données dans des modèles de haute résolution optimisés selon le support permet de conserver la fidélité des détails, même lors de l'animation complexe. En somme, le réalisme facial et les expressions émotionnelles sont des composants essentiels pour éviter l'Uncanny Valley et créer des personnages numériques convaincants. Malgré les avancées technologiques de capture rendant en apparence la quête de réalisme en animation 3D plus accessible, il est important de continuer à affiner les techniques manuelles de modélisation et d'animation et de les ajouter à des connaissances issues de la psychologie des émotions pour s'assurer que les personnages numériques puissent transmettre des émotions engageantes.

L'intégration des détails environnementaux et des interactions

Outre les expressions faciales et les micro-expressions, l'intégration réaliste des personnages numériques dans leur environnement est essentielle pour éviter l'effet d'Uncanny Valley et ainsi créer une expérience visuelle convaincante. Les interactions physiques d'un personnage numérique liées à un environnement virtuel sont importantes pour parfaire l'illusion de réalisme.

Les techniques de capture de mouvement sont utilisées pour enregistrer les mouvements corporels des acteurs et les transposer sur des modèles numériques. Cependant, pour atteindre un niveau de réalisme plus élevé, il est important de synchroniser les interactions des acteurs avec l'environnement virtuel dans lequel ils évoluent. Cela inclut par exemple les mouvements tels que le contact des pieds avec le sol, la réaction avec leurs vêtements, et les effets de l'environnement sur la peau et les cheveux.

Michael Gleicher, dans son article "Motion Editing for Human-Like Animation" (1997), explore comment les techniques de capture de mouvement peuvent être améliorées et traitées en post-production pour créer des animations plus réalistes et humaines³⁰. Gleicher met en avant l'importance d'affiner les données de capture de mouvement pour intégrer des détails subtils qui sont souvent perdus dans les processus de capture standards. Par exemple, le contact des pieds avec le sol doit être capturé avec précision pour éviter l'effet de flottement souvent observé dans les animations 3D. Les capteurs de pression et les algorithmes de correction de mouvement peuvent être utilisés pour assurer que les pieds des personnages réagissent de manière réaliste à la surface du sol, prenant en compte la texture et la rigidité de la surface. Cela permet de créer une marche ou une course qui semble authentique, en simulant les forces et les résistances rencontrées par les pieds. Par ailleurs, les réactions des vêtements avec le corps de l'acteur présent sur le tournage et leur apparence en post production sont importantes à prendre en considération. Lorsqu'un personnage bouge, les vêtements doivent réagir de manière crédible et être en accord avec les mouvements de l'acteur. En effet, des déformations, des plis et des étirements interviennent sur le vêtement en fonction des mouvements corporels. Des logiciels de simulation de tissu, comme Marvelous Designer³¹, sont utilisés en combinaison avec la capture de mouvement pour générer des vêtements qui réagissent de manière dynamique et réaliste avec la performance de l'acteur. En utilisant ces outils, les animateurs et les "character

³⁰ Gleicher, M. (1997). Motion editing for human-like animation. Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 33-42).

³¹ "Marvelous Designer: Realistic Cloth Simulation for 3D Characters." [Marvelous Designer](#).

effects artists" (CFX)³² peuvent simuler la gravité, la friction et la flexibilité des matériaux pour créer des animations de vêtements qui ajoutent une couche supplémentaire à l'illusion de réalisme dans une animation.

En parallèle, la photogrammétrie joue un rôle clé dans la création d'environnements détaillés et réalistes. Thomas Luhmann et ses collègues, dans "Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging" (2013)³³, expliquent comment la photogrammétrie peut être utilisée pour capturer des environnements en haute résolution. Cette technique permet de créer des modèles 3D détaillés de scènes réelles, qui peuvent ensuite être intégrées dans des productions numériques. En combinant ces environnements réalistes avec des personnages numérisés, il est possible de créer des scènes où les interactions physiques entre les personnages et leur environnement semblent plus naturelles.

Thabo Beeler et al., dans leur article "High-quality Single-shot Capture of Facial Geometry" (2010)³⁴, démontrent l'importance de la capture de la géométrie faciale en haute qualité pour les interactions environnementales. Leur technique permet de capturer des détails fins du visage en une seule prise, améliorant ainsi la fidélité des interactions lumineuses et des ombres sur le visage. Cela est particulièrement important pour les scènes où l'éclairage joue un rôle central dans le visuel.

Les interactions environnementales ne se limitent pas aux contacts physiques entre un personnage fictif ou réel. Les effets de l'environnement, tels que les réflexions, les ombres portées, et la diffusion de la lumière, doivent également être reproduits

³² Le métier de CFX (Character Effects) consiste à simuler les dynamiques des vêtements, des cheveux, de la peau et des muscles des personnages numériques, afin de rendre leurs interactions avec l'environnement plus réalistes

³³ Luhmann, Thomas, et al. "Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging." Walter de Gruyter, 2013.

³⁴ Beeler, Thabo, et al. "High-quality Single-shot Capture of Facial Geometry." ACM Transactions on Graphics, 2010.

avec précision dans une scène. Les moteurs de rendu tels que RenderMan de Pixar, permettent de simuler ces effets de manière photoréaliste. Ces moteurs de rendus permettent de reproduire les interactions complexes entre la lumière et les surfaces d'un personnage.

Conclusion

À travers ce mémoire, nous avons exploré les capacités et les limites des technologies modernes de représentation humaine, en particulier la modélisation 3D et la photogrammétrie. Ces deux techniques, bien que distinctes dans leurs approches, partagent un objectif commun : capturer la complexité et la singularité de l'être humain.

La modélisation 3D, comme nous l'avons vu, repose largement sur les compétences et l'interprétation de l'artiste numérique. Les premiers travaux de pionniers comme Edwin Catmull et Fred Parke ont dressé les bases de cette technologie, en utilisant des points de coordonnées pour créer des modèles tridimensionnels de la main et du visage humain. Cependant, malgré les avancées technologiques et les outils sophistiqués disponibles aujourd'hui, tels que ZBrush et Autodesk Maya, la modélisation 3D reste influencée par la subjectivité de l'artiste, qui doit constamment équilibrer entre réalisme et expressivité (Catmull, 1972; Parke, 1974).

En parallèle, la photogrammétrie a montré un potentiel impressionnant pour capturer les moindres détails de la surface humaine. Les techniques développées par Paul Debevec, notamment le "Light Stage", permettent de reproduire fidèlement les textures et les jeux de lumière sur la peau, apportant un réalisme sans précédent aux modèles numériques (Debevec, 2000). Cependant, cette méthode pose la question de sa capacité à retranscrire les nuances de l'individu au-delà de la simple apparence physique.

La comparaison entre ces deux méthodes révèle une tension constante entre la fidélité technique et l'expression authentique. Le concept de l'Uncanny Valley, introduit par Masahiro Mori, souligne les défis que rencontrent ces technologies lorsqu'elles s'approchent du réalisme sans l'atteindre parfaitement, créant ainsi un sentiment de malaise chez le spectateur (Mori, 1970). Ce phénomène met en lumière les limites actuelles de la technologie pour reproduire la vie humaine de manière convaincante.

En conclusion, bien que la modélisation 3D et la photogrammétrie aient fait des progrès significatifs dans la reproduction de l'être humain, elles sont encore loin de capturer pleinement la singularité et la richesse émotionnelle de chaque individu. La

question centrale de ce mémoire : peut-on répliquer fidèlement et saisir la singularité de l'être humain à travers la modélisation 3D sans l'intervention de l'humain, et comment cela se compare-t-il à la retranscription photogrammétrique des figures humaines ? trouve une réponse nuancée. Si ces technologies offrent des outils puissants pour l'art et la science, elles montrent aussi que la présence et la sensibilité humaine restent essentielles pour véritablement capturer pleinement l'être humain.

Bibliographie

Ouvrage d'un seul auteur

- HULSKER, J., *The Complete Van Gogh: Paintings, Drawings, Sketches*, New York, Random House, 1990, 399 p.
- KEMP, M., *Leonardo da Vinci: The Marvellous Works of Nature and Man*, Oxford, Oxford University Press, 2006, 480 p.
- RICHARDSON, J., *A Life of Picasso*, New York, Alfred A. Knopf, 1991, 544 p.
- CUZIN, J.-P., *Jean-Honoré Fragonard: Life and Work*, New York, Harry N. Abrams, 1988, 365 p.
- STEWART, A., *Classical Greece and the Birth of Western Art*, Cambridge, Cambridge University Press, 2008, 376 p.
- CUTHBERTSON, R. A., *Duchenne de Boulogne: A Biography and an Account of his Photographic Iconography*, Cambridge, Cambridge University Press, 1990, 280 p.
- SZELISKI, R., *Computer Vision: Algorithms and Applications*, Berlin, Springer, 2010, 812 p.
- MANOVICH, L., *The Language of New Media*, Cambridge, MIT Press, 2001, 354 p.

Ouvrage collectif

- WALKER, S., BIERBRIER, M. (sous la direction), *Ancient Faces: Mummy Portraits from Roman Egypt*, London, British Museum Press, 1997, 240 p.
- AVEDON, R., BALDWIN, J. (sous la direction), *Nothing Personal*, New York, Atheneum, 1964, 93 p.
- VIOLA, B., WALSH, J. (sous la direction), *Bill Viola: The Passions*, Los Angeles, Getty Publications, 2003, 144 p.
- HARTLEY, R., ZISSERMAN, A., *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge, Cambridge University Press, 2004, 672 p.
- LUHMANN, T., et al., *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*, Berlin, Walter de Gruyter, 2013, 702 p.

Article publié dans le cadre d'un ouvrage collectif

- MACDORMAN, K. F., ISHIGURO, H., "The uncanny advantage of using androids in cognitive and social science research," in *Interaction Studies*, 2006, vol. 7, no. 3, pp. 297-337.

Article publié dans une revue

- JAIN, A. K., et al., "Facial Soft Biometrics for Recognition," in *Advances in Biometrics*, 2009, pp. 245-268.
- MCDONNELL, R., et al., "Evaluating the Perceptual Realism of Animated Human Characters," in *ACM Transactions on Graphics*, 2007, vol. 26, no. 3, Article 20.

Source en ligne

- "Les proportions du visage," [En ligne], mis en ligne le 20 mai 2017. URL : <https://apprendrelapeintureavecelena.com/proportions-du-visage/>. Consulté le 15 janvier 2023.
- "The Tondo des deux frères," [En ligne], British Museum. URL : <https://www.britishmuseum.org/collection/term/BIOG57945>. Consulté le 15 janvier 2023.
- "William Casby, 1963," [En ligne], Museum of Modern Art (MoMA). URL : <https://www.moma.org/artists/219>. Consulté le 15 janvier 2023.
- "Mona Lisa," [En ligne], Musée du Louvre. URL : <https://www.louvre.fr/en/oeuvre-notices/mona-lisa>. Consulté le 15 janvier 2023.
- "La Femme qui pleure (Guernica)," [En ligne], Museum of Modern Art (MoMA). URL : <https://www.moma.org/collection/works/79802>. Consulté le 15 janvier 2023.
- "The Quintet of the Astonished," [En ligne], J. Paul Getty Museum. URL : <https://www.getty.edu/art/collection/artists/540/bill-viola-american-born-1951/>. Consulté le 15 janvier 2023.
- "Le Verrou," [En ligne], Musée du Louvre. URL : <https://www.louvre.fr/en/oeuvre-notices/lock>. Consulté le 15 janvier 2023.
- "Capturing Reality: Scan photogrammétrique de tête humaine," [En ligne], URL : <https://www.capturingreality.com/Page.FullBodyScanning-Printing>. Consulté le 15 janvier 2023.
- "Creating Characters for Baldur's Gate 3," [En ligne], mis en ligne le 10 mars 2020. URL : <https://80.lv/articles/creating-characters-for-baldur-s-gate-3/>. Consulté le 20 avril 2023.
- "The Immersive Experience of Hellblade: Senua's Sacrifice's Visuals and Audio," [En ligne], mis en ligne le 8 février 2018. URL : <https://www.artstation.com/blogs/dioeye/8MNI/the-immersive-experience-of-hellblade-senuas-sacrifices-visuals-and-audio>. Consulté le 25 janvier 2024.

Thèse, mémoire ou travail de recherche non édité

- CHIANG, et al., 2016; KŘIVÁNEK, et al., 2014; MENG, et al., 2016; WRENNINGE, et al., 2017.

Article publié dans une conférence

- BLANZ, V., VETTER, T., "A Morphable Model for the Synthesis of 3D Faces," in *SIGGRAPH*, 1999, pp. 187-194.
- DEBEVEC, P., et al., "Acquiring the Reflectance Field of a Human Face," in *SIGGRAPH*, 2000, pp. 145-156.
- LI, H., et al., "Facial Performance Sensing Head-Mounted Display," in *SIGGRAPH*, 2015.

Film et médias

- FINCHER, D. (réalisateur), *The Curious Case of Benjamin Button*, Doublure numérique de Brad Pitt, film dramatique américain, basé sur la nouvelle de F. Scott Fitzgerald, Paramount Pictures, sorti en 2008.
- RODRIGUEZ, R. (réalisateur), CAMERON, J. (producteur), *Alita: Battle Angel*, Portrait d'Alita interprétée par Rosa Salazar, personnage principal numérique, film de science-fiction américain, adaptation du manga *Gunnm* de Yukito Kishiro, 20th Century Fox, sorti en 2019.
- SCORSESE, M. (réalisateur), *The Irishman*, 2019. Rajeunissement numérique des acteurs Robert De Niro, Al Pacino et Joe Pesci.

- WACHOWSKI, L., WACHOWSKI, L. (réalisateurs), *The Matrix*, Effet "bullet time" avec double numérique de Keanu Reeves, film de science-fiction américain, Warner Bros., sorti en 1999.
- ROCKSTAR GAMES, *Red Dead Redemption 2*, capture d'écran d'un environnement du jeu, jeu vidéo d'action-aventure en monde ouvert, publié par Rockstar Games, sorti en 2018.

Œuvre d'art

- LÉOCHARÈS (attribué à), *Apollon dit « du Belvédère »*, copie en marbre d'une statue en bronze v. 330 av. J.-C.; 2,24 m (h), Époque romaine, Rome, Musée du Vatican, cour octogonale du Belvédère, inv. 1015.
- LE TONDO DES DEUX FRÈRES, 2e siècle après J.-C., peinture sur bois, Antinopolis, Égypte. Musée du Louvre, Paris. Photographie de S. Vannini/Corbis/Getty Images.
- VAN GOGH, Vincent, *Les Mangeurs de pommes de terre*, Huile sur toile, 82 cm x 114 cm, Peinte en avril 1885, Conservée au Musée Van Gogh, Amsterdam, Pays-Bas.
- AVEDON, Richard, *William Casby*, Baton Rouge, Louisiana, 1963, photographie en noir et blanc, tirée de la série *Visages de l'ouest*, actuellement exposée au Museum of Modern Art (MoMA), New York, États-Unis.
- DA VINCI, Léonard, *Mona Lisa*, Huile sur panneau de bois de peuplier, 77 cm x 53 cm, Peinte entre 1503 et 1506, Conservée au Musée du Louvre, Paris, France.
- PICASSO, Pablo, *La Femme qui pleure (Guernica)*, Huile sur toile, Peinte en 1937, Actuellement exposée au Museum of Modern Art (MoMA), New York, États-Unis.
- DUCHENNE DE BOULOGNE, Guillaume, *The Mechanism of Human Facial Expression (ou Mécanisme de la Physionomie Humaine)*, Plusieurs photographies de patients pendant les expériences sur les expressions faciales, Publié pour la première fois en 1862, Paris, France.
- VIOLA, Bill, *The Quintet of the Astonished*, vidéo couleur, sans son, 2000, tirée de la série *Les Passions*, actuellement exposée au J. Paul Getty Museum, Los Angeles, États-Unis.
- FRAGONARD, Jean-Honoré, *Le Verrou*, huile sur toile, vers 1777-1778, actuellement exposé au Musée du Louvre, Paris, France.

Œuvre d'art numérique

- GALAN, C., *Paul*, œuvre d'art numérique, 2023. Exposée à la galerie XYZ.
- IBRAHIM, Ş., *Jack Black*, 2024. Sculpture numérique rendue avec le moteur de rendu Arnold sur Maya.
- VEILHAN, X., *Studio Venezia*, exposé à la Biennale de Venise, 2017.
- DI LUCCA, M., *Walter White*, image de synthèse, personnage sculpté sur le logiciel Mudbox et rendu sur Maya avec le moteur de rendu Arnold, Boulder, États-Unis, 2021.
- KAHN, S., *Bust of a Woman with Head Thrown Back*, 2013, 3D print from 3D laser scan, paint, varnish, steel, Life Size.

Ouvrage scientifique

- EKMAN, P., *Facial Action Coding System*, Salt Lake City, 2002.
- ZARINS, U., *Anatomy of Facial Expression*, Anatomy Next, 2017.
- ALEXANDER, E., *The Art of Facial Animation: Realism and Emotion in 3D Characters*, 2017.

Article de recherche

- GLEICHER, M., "Motion Editing for Human-Like Animation," in *Computer Animation and Virtual Worlds*, 1997.
- ZEPEDA, K., "Ethical Implications of Creating Realistic Digital Humans," in *Journal of Digital Ethics*, 2021.
- ROBERTSON, B., "Digital Doubles and the Ethics of Virtual Actors in Cinema," in *New Review of Film and Television Studies*, 2018.

Logiciel et technologie

- Pixar, *RenderMan: An Advanced Path Tracing Architecture for Movie Rendering*, 2019.
- Capturing Reality, *Reality Capture: 3D Scanning Software*, [En ligne], URL : <https://www.capturingreality.com/>. Consulté le 15 janvier 2023.
- Pixologic ZBrush, *ZBrush: Digital Sculpting and Painting*, [En ligne], URL : <https://pixologic.com/>. Consulté le 15 janvier 2023.
- Foundry Mari, *Mari: Texture Painting Software*, [En ligne], URL : <https://www.foundry.com/products/mari>. Consulté le 15 janvier 2023.
- SideFX Houdini, *Houdini: 3D Animation and VFX Software*, [En ligne], URL : <https://www.sidefx.com/products/houdini/>. Consulté le 15 janvier 2023.
- Autodesk Arnold, *Arnold Renderer: Advanced Ray Tracing Renderer*, [En ligne], URL : <https://www.arnoldrenderer.com/>. Consulté le 15 janvier 2023.

Blog et site web

- BREJON, C., "CG Cinematography," [En ligne], URL : <https://chrisbrejon.com/cg-cinematography/>. Consulté le 15 janvier 2023.
- *Photogrammetry and Artistic Expression*, [En ligne], Art and Tech Journal. URL : <https://www.artandtechjournal.com/>. Consulté le 15 janvier 2023.
- *Sophie Kahn and Digital Art*, [En ligne], Coeval Magazine. URL : <https://www.coeval-magazine.com/coeval/sophie-kahn>. Consulté le 15 janvier 2023.

Index

A

- **A Computer Animated Hand** : page 72
- **Apollon du Belvédère** : page 10
- **Astarion dans Baldur's Gate III** : page 108
- **AVEDON, Richard** : page 29
- **Avatar 2, Neytiri** : page 125

B

- **Baldur's Gate III** : pages 105, 108, 109
- **Belvédère, Apollon du** : page 10
- **Bill Viola** : pages 33, 34

C

- **Catmull, Ed** : page 72
- **Cubisme, Picasso** : page 23

D

- **DA VINCI, Léonard** : page 20
- **Déconstruction du Visage** : page 24
- **DUCHENNE DE BOULOGNE, Guillaume** : page 31

E

- **Expressions faciales** : pages 31, 118
- **Expressions fugitives, Fragonard** : page 34

F

- **Faces and Body Parts** : page 73
- **Fragonard, Jean-Honoré** : page 34

G

- **Gleicher, Michael** : page 50
- **Gollum, Le Seigneur des Anneaux** : page 125

H

- **Hartley et Zisserman** : pages 12, 45
- **Hellblade: Senua's Sacrifice** : pages 108, 109
- **Human Facial Expression, Duchenne** : page 32

I

- **Ibrahim, Şefki** : page 88
- **Irishman, The** : page 125

J

- **Jeu vidéo, Baldur's Gate III** : pages 105, 108, 109
- **Jeu vidéo, Hellblade: Senua's Sacrifice** : pages 108, 109
- **Jeu vidéo, Red Dead Redemption 2** : pages 108, 109

K

- **Kahn, Sophie** : page 14

L

- **Léonard de Vinci, Mona Lisa** : page 20
- **Le Seigneur des Anneaux, Gollum** : page 125

M

- **Mangeurs de pommes de terre, Van Gogh** : page 28
- **Mécanisme de la Physionomie Humaine, Duchenne de Boulogne** : page 32
- **Matrix, The** : page 125

N

- **Neytiri, Avatar 2** : page 125

O

- **Occlusion ambiante** : page 56

P

- **Parke, Fred** : page 73
- **Photogrammétrie** : pages 55, 87, 105, 108, 109, 115, 118
- **Picasso, Pablo** : pages 23, 26
- **Planète des Singes** : page 60

R

- **Red Dead Redemption 2** : pages 108, 109
- **RenderMan** : page 78

S

- **Scan Engine, Unit Image** : page 74
- **Sculpture numérique** : page 67
- **Shading** : page 78
- **Szeliski, Richard** : page 45

T

- **Tondo des deux frères** : page 18
- **Toy Story** : pages 46, 47

U

- **Uncanny Valley** : pages 119, 121, 123

V

- **Van Gogh, Vincent** : page 28
- **Viola, Bill** : pages 33, 34

Z

- **Zarins, Uldis** : page 77
- **ZBrush** : pages 67, 72, 88

Table des matières

Remerciements	3
Résumé	4
Mots Clefs	4
Abstract	5
Keywords	5
Sommaire	6
Introduction	7
I. La caractérisation d'un visage humain dans l'histoire de l'art	9
I.A. L'apparence du visage immobilisé : tension entre les traits du visage générique et idéal	10
I.B. Le Visage et l'Expression du Vécu	27
I.C. L'Expression des Émotions: La Typologie et ses Limites	31
II. Techniques et Flux de Production en Modélisation 3D de Personnages	39
II.A. Introduction à la Modélisation 3D de Personnages	39
Débuts et Évolution de la Modélisation 3D	40
Les avancées des techniques et des outils de modélisation 3D et d'animation	49
Développements de nouveaux outils permettant d'améliorer le réalisme	51
Perfectionnement des logiciels de modélisation	53
II.B. Processus de Création de Personnages et Inspirations Artistiques Externes	54
Utilisation des Techniques Photographiques pour l'Éclairage	57
Sculpture: Transmission des Formes et Volumes	58
Cinéma: Influence de la Narration Visuelle et Composition	61
Anatomie: Base Scientifique pour le Réalisme	62
II.C. Techniques Avancées de Sculpture et Traitement de la Géométrie	66
Techniques de Sculpture Numérique	66
Fidélité Anatomique dans la Sculpture Numérique.....	69
II.D. Rendu et Techniques d'Éclairage	71
Techniques d'éclairage.....	71
Méthodes de rendu photoréaliste	76
III. Retranscription d'une figure humaine par photogrammétrie et aléatoire du réel	85
III.A. Introduction à la technique photogrammétrique dans le cadre de captation d'êtres humains	85
Évolution et utilisation actuelle.....	92
III.B. Utilisation de la photogrammétrie d'être humain dans les différentes industries	98

Impact de la photogrammétrie sur les doubles numériques et les scènes d'action au cinéma.....	99
Utilisation de la photogrammétrie dans la création de personnages et d'environnements de jeu vidéo	103
Innovations en modélisation 3D et photogrammétrie dans l'art contemporain	108
III.C. Importance de l'élément aléatoire du réel capturé avec la photogrammétrie	112
Capture des imperfections et des détails uniques	112
Authenticité et réalisme des personnages 3D	113
Applications dans la narration et le développement personnage.....	115
III.D. Les êtres humains numériques hyperréalistes et le concept d'Uncanny Valley	117
Concept d'Uncanny Valley et ses implications	117
Réalisme facial et expressions émotionnelles	120
L'intégration des détails environnementaux et des interactions.....	126
Conclusion.....	130
Bibliographie	132
Index.....	136
Table des matières	139
Table des illustrations	141
Table des sigles et abréviations	146
Table des Sigles et Abréviations.....	146
Présentation de la partie pratique.....	147
Étude de cas pratique : Modélisation et représentation numérique d'un être humain avec des éléments végétaux.....	147
Processus de création	147

Table des illustrations

Figure 1. *Léocharès attribué à, Apollon dit « du Belvédère »* : Copie en marbre d'une statue en bronze, v. 330 av. J.-C.; 2,24 m (h), Époque romaine, Rome, Musée du Vatican, cour octogonale du Belvédère, inv. 1015.

Figure 2. *Proportions d'un visage générique en dessin mis en parallèle avec le visage idéal de l'Apollon du Belvédère* : Source : <https://apprendrelapeintureavecclena.com/proportions-du-visage/>

Figure 3. *Le Tondo des deux frères* : 2e siècle après J.-C., peinture sur bois, Antinopolis, Égypte. Musée du Louvre, Paris. Photographie de S. Vannini/Corbis/Getty Images.

Figure 4. DA VINCI, Léonard : *Mona Lisa*, Huile sur panneau de bois de peuplier, 77 cm x 53 cm, Peinte entre 1503 et 1506, Conservée au Musée du Louvre, Paris, France.

Figure 5. PICASSO, Pablo : *La Femme qui pleure (Guernica)*, Huile sur toile, Peinte en 1937, Actuellement exposée au Museum of Modern Art (MoMA), New York, États-Unis.

Figure 6. VAN GOGH, Vincent : *Les Mangeurs de pommes de terre*, Huile sur toile, 82 cm x 114 cm, Peinte en avril 1885, Conservée au Musée Van Gogh, Amsterdam, Pays-Bas.

Figure 7. AVEDON, Richard : *William Casby*, Baton Rouge, Louisiana, 1963, photographie en noir et blanc, tirée de la série *Visages de l'ouest*, actuellement exposée au Museum of Modern Art (MoMA), New York, États-Unis.

Figure 8. DUCHENNE DE BOULOGNE, Guillaume : *The Mechanism of Human Facial Expression (ou Mécanisme de la Physionomie Humaine)*, Plusieurs photographies de patients pendant les expériences sur les expressions faciales, Publié pour la première fois en 1862, Paris, France.

Figure 9. VIOLA, Bill : *The Quintet of the Astonished*, Vidéo couleur, sans son, 2000, tirée de la série *Les Passions*, actuellement exposée au J. Paul Getty Museum, Los Angeles, États-Unis.

Figure 10. FRAGONARD, Jean-Honoré : *Le Verrou*, Huile sur toile, vers 1777-1778, actuellement exposé au Musée du Louvre, Paris, France.

Figure 11. CATMULL, Ed : *A Computer Animated Hand*, 1972, animation 3D, University of Utah, États-Unis.

Figure 12. PARKE, Fred : *Faces and Body Parts*, 1972, animation 3D, University of Utah, États-Unis.

Figure 13. PIXAR : *Les Aventures d'André et Wally B.*, 1984, animation 3D (1m39s), Pixar, États-Unis.

Figure 14. PIXAR : *Toy Story*, 1995, animation 3D, 81 minutes, réalisé par John Lasseter, Pixar Animation Studios, États-Unis.

Figure 15. Capture d'écran de l'interface logicielle de *Zbrush*, 2024, logiciel de modélisation 3D, Pixologic Inc.

Figure 16. ZUCKERMAN, Andrew : *Wisdom*, Portrait réalisé en studio de Vanessa Redgrave, Ouvrage regroupant cinquantes portraits de célébrités, Edition Abrams, livre publié en plusieurs langues, long métrage documentaire et exposition itinérante permanente organisée à New York, Los Angeles, Dublin, Sydney et Toronto, 2008.

Figure 17. BOSCHUNG, Daniel : *Photography for 3D Art: High-Resolution Portraits*,
Source : <https://www.danielboschung.com/>

Figure 18. MUECK, Ron : *Mask II*, Sculpture en silicone, résine et cheveux, Dimensions 80 x 146 x 51 cm, Créée en 2001-2002, Collection privée; exposition fréquente dans divers musées internationaux, notamment à la Fondation Cartier pour l'art contemporain, Paris, France.

Figure 19. DI LUCCA, Marco : *Walter White*, Image de synthèse, personnage sculpté sur le logiciel Mudbox et rendu sur Maya avec le moteur de rendu Arnold, Boulder, Etats-Unis, 2021.

Figure 20. ZARINS, Uldis : *Anatomy of Facial Expression*, Analyse détaillée des expressions faciales humaines, ouvrage illustré et didactique, Edition Anatomy Next, 2017.

Figure 21. Capture d'écran de l'utilisation de la brosse "*Clay Buildup*" dans ZBrush.

Figure 22. Capture d'écran de l'utilisation d'un masque de sélection dans ZBrush, permettant d'effectuer des modifications sur la bouche.

Figure 23. *PLANÈTE DES SINGES*, exemple d'éclairage sur un objet 3D au cinéma, réalisé par Rupert Wyatt, 2011. Cette image montre comment l'éclairage est utilisé pour donner vie et réalisme aux personnages numériques dans un environnement cinématographique.

Figure 24. *L'ILLUSIONNISTE*, exemple d'éclairage au cinéma traditionnel, réalisé par Neil Burger, 2006. Cette image illustre l'utilisation classique de l'éclairage pour créer des atmosphères et des ambiances spécifiques, en mettant en valeur les nuances et les détails des scènes et des personnages.

Figure 25. MARTIN, Eduardo : *Virtual Lighting Studio*, capture d'écran montrant les différents types d'éclairage : Beauty, Key, Fill, Rim, Bounce, Sky. Cette image illustre comment chaque type de lumière influence l'apparence finale d'un modèle 3D.

Figure 26. Exemple de *subsurface scattering* sur un visage humain à plusieurs niveaux d'intensité. Source : documentation Maya

https://help.autodesk.com/view/ARNOL/ENU/?guid=arnold_user_guide_ac_standard_surface_ac_standard_subsurface_html

Figure 27. Autodesk : Exemple de rendu avec le moteur Arnold pour Maya. Source : Autodesk documentation Arnold pour Maya.

Figure 28. PIXAR : *RenderMan: An Advanced Path Tracing Architecture for Movie Rendering*. Scène tracée par rayons du film *Le Livre de la Jungle*. La moitié gauche montre une décomposition de la géométrie générée procéduralement ; la moitié droite montre l'image finale. (© 2016 Disney/MPC. Image courtesy of MPC.)

Figure 29. PIXAR : Exemples de rendu en tracé de rayons avec *subsurface scattering* : fourni (modèle original de Sunny Chopra ; modélisation et rendu supplémentaires par Chu Tang) et Rachael de *Blade Runner 2049* (© 2017 Alcon Entertainment, LLC., Warner Bros. Entertainment Inc., et Columbia Pictures Industries, Inc. Tous droits réservés. Image fournie par MPC.).

Figure 30. IBRAHIM, Şefki : *Jack Black*, 2024. Sculpture numérique rendue avec le moteur de rendu Arnold sur Maya.

Figure 31. *Capturing Reality*, Scan photogrammétrique de tête humaine, capture d'écran du logiciel Reality Capture. Source : <https://www.capturingreality.com/Page.FullBodyScanning-Printing>

Figure 32. *Capturing Reality*, Nuage de points et modèle reconstitué en 3D, captures d'écran du logiciel Reality Capture. Source : <https://www.capturingreality.com/photogrammetry-documentation-architects>.

Figure 33. *Scan Engine, Unit Image*, photographie à 360° studio de capture photogrammétrique de Scan Engine, société d'Unit Image.

Figure 34. *Larian Studios, Astarion dans le jeu vidéo Baldur's Gate III*.

Figure 35. *FaceForm, Head-Mounted Cameras (HMC)*. La première image montre un HMC placé sur la tête d'un acteur, utilisé pour capturer les mouvements faciaux détaillés en temps réel. La deuxième image montre le retour caméra, où les données capturées sont transposées sur le modèle 3D de l'acteur.

Figure 36. SCORSESE, Martin : *The Irishman*, 2019. Rajeunissement numérique des acteurs Robert De Niro, Al Pacino et Joe Pesci. La première image montre les acteurs avant le traitement numérique et la deuxième montre le résultat final après le rajeunissement numérique.

Figure 37. FINCHER, David : *The Curious Case of Benjamin Button*, Doublure numérique de Brad Pitt, film dramatique américain, basé sur la nouvelle de F. Scott Fitzgerald, Paramount Pictures, sorti en 2008.

Figure 38. WACHOWSKI, Lana et Lilly : *The Matrix*, Effet "bullet time" avec double numérique de Keanu Reeves, film de science-fiction américain, Warner Bros., sorti en 1999.

Figure 39. RODRIGUEZ, Robert et CAMERON, James : *Alita: Battle Angel*, Portrait d'Alita interprétée par Rosa Salazar, personnage principal numérique, film de science-fiction américain, adaptation du manga *Gunnm* de Yukito Kishiro, 20th Century Fox, sorti en 2019.

Figure 40. DUBROVINA, Alena, LARIAN STUDIOS : *Ketheric Thorm*, modèle photogrammétrique brut, ArtStation, 2023.

Figure 41. DUBROVINA, Alena, LARIAN STUDIOS : *Ketheric Thorm*, modèle final avec texture, ArtStation, 2023.

Figure 42. NINJA THEORY, *Hellblade: Senua's Sacrifice*, jeu vidéo d'action-aventure psychologique, sorti en 2017.

Figure 43. ROCKSTAR GAMES, Capture d'écran d'un environnement du jeu *Red Dead Redemption 2*, jeu vidéo d'action-aventure en monde ouvert, publié par Rockstar Games, sorti en 2018.

Figure 44. KAHN, Sophie : *Bust of a Woman with Head Thrown Back*, impression 3D à partir de scan laser 3D, peinture, vernis, acier, taille réelle, 2013.

Figure 45. GALAN, Cristina : *Paul*, œuvre d'art numérique, 2023.

Figure 46. EKMAN, Paul : *Facial Action Coding System*, système exhaustif de catégorisation des mouvements faciaux associés aux émotions, livre publié en 2002, image tirée de son ouvrage.

Figure 47. CAMERON, James : *Avatar 2*, Image du visage de Neytiri, suite du film de science-fiction *Avatar*, Production de 20th Century Studios, 2022.

Figure 48. BERTON, Maxime : *L'Homme Fleur*, 2024. Sculpture numérique issue d'une base de scan photogrammétrique visualisée dans le logiciel Zbrush.

Figure 49. BERTON, Maxime : *L'Homme Fleur*, 2024. Sculpture numérique issue d'une base de scan photogrammétrique, transformée avec les logiciels Houdini et Zbrush.

Figure 50. BERTON, Maxime : *L'Homme Fleur*, 2024. Visualisation sans textures du modèle transformé, dans le logiciel Maya

Figure 50. BERTON, Maxime : *L'Homme Fleur*, 2024. Série de six images d'une sculpture numérique, rendu avec le moteur Arnold sur Maya

Figure 51. BERTON, Maxime : *L'Homme Fleur*, 2024. Plan de la scénographie

Table des sigles et abréviations

Table des Sigles et Abréviations

- **3D** : Trois Dimensions
- **AU** : Action Unit
- **CGI** : Computer-Generated Imagery (Images de Synthèse)
- **FACS** : Facial Action Coding System (Système de Codage des Actions Faciales)
- **HMC** : Head-Mounted Cameras (Caméras Fixées sur la Tête)
- **SSS** : Subsurface Scattering (Dispersion Sous-Surface)
- **VFX** : Visual Effects (Effets Visuels)

Présentation de la partie pratique

Étude de cas pratique : Modélisation et représentation numérique d'un être humain avec des éléments végétaux

Dans le cadre de ce mémoire, une partie pratique a été réalisée de manière à appuyer de manière concrète les concepts théoriques discutés. Pour ce projet, un travail collaboratif a été effectué avec un individu se considérant comme une fleur. En échangeant avec ce dernier, un travail de recherche et création a été mené de manière à mettre en image sa perception. Le projet a débuté par la numérisation de son corps et de sa tête de manière à pouvoir traiter un scan de haute qualité et fidèlement au personnage. Ensuite, des étapes de traitement du modèle 3D sont réalisées pour transformer le personnage en Homme-Fleur. Cela débute par une sculpture de racines partant des jambes, se transformant en tronc au niveau du torse, en transformant les ossatures en branches puis en formant des fleurs et bourgeons sur la tête du personnage.

Cette partie pratique vise à visualiser de manière réaliste une perception imaginaire tout en conservant de manière fidèle une représentation humaine.

Processus de création

Le processus de création et traitement du scan s'est déroulé en plusieurs étapes avant de pouvoir commencer à transformer le personnage.

La première étape consiste à capturer les images nécessaires pour la création du modèle 3D. Pour cela, des appareils photos disposés à 360° autour de l'acteur sont déclenchés simultanément pour capturer le corps et la tête séparément. Ces captures permettent d'obtenir le plus haut détail possible sur le visage et sur le corps pour chaque angle, assurant une base solide pour la reconstruction 3D.

Les images capturées ont ensuite été alignées et reconstruites en un modèle 3D à l'aide du logiciel de photogrammétrie Reality Capture. La reconstruction initiale est

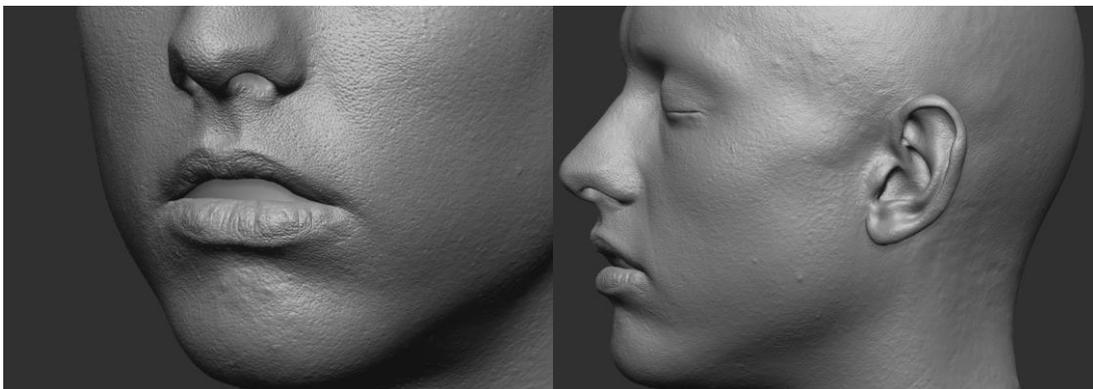
calculée pour produire un modèle dense et détaillé, mais souvent avec une topologie complexe et irrégulière.

Pour optimiser ce modèle, il est décimé à environ 200 000 polygones puis une étape de "wrapping" est effectuée. Cette étape consiste à transposer la géométrie du modèle 3D utilisé sur le maillage d'un "Base Mesh" comportant une bonne topologie. Le Base Mesh est un modèle de base préconfiguré avec une topologie propre et optimisée pour l'animation et d'autres usages. Le wrapping assure que le modèle 3D conserve une structure géométrique utilisable tout en maintenant les détails nécessaires.

Les détails du scan brut en pleine résolution sont ensuite projetés sur le modèle issu du wrapping dans le logiciel de sculpture ZBrush. Cette projection a été effectuée pour chaque niveau de subdivision, permettant de revenir à un modèle haute résolution avec une topologie optimisée. Cette étape est essentielle pour combiner la fidélité des détails avec une structure géométrique efficace.

Les textures sont ensuite projetées dans Reality Capture, puis traitées dans Mari, un logiciel de texturing avancé. La texture originale a été nettoyée pour éliminer les imperfections et améliorer la qualité visuelle du modèle. Une map de "High Pass" a été créée pour transférer les micro détails de la peau sur le modèle 3D en éléments de volume.

Images du modèle humain après traitement dans un niveau de détail maximal :



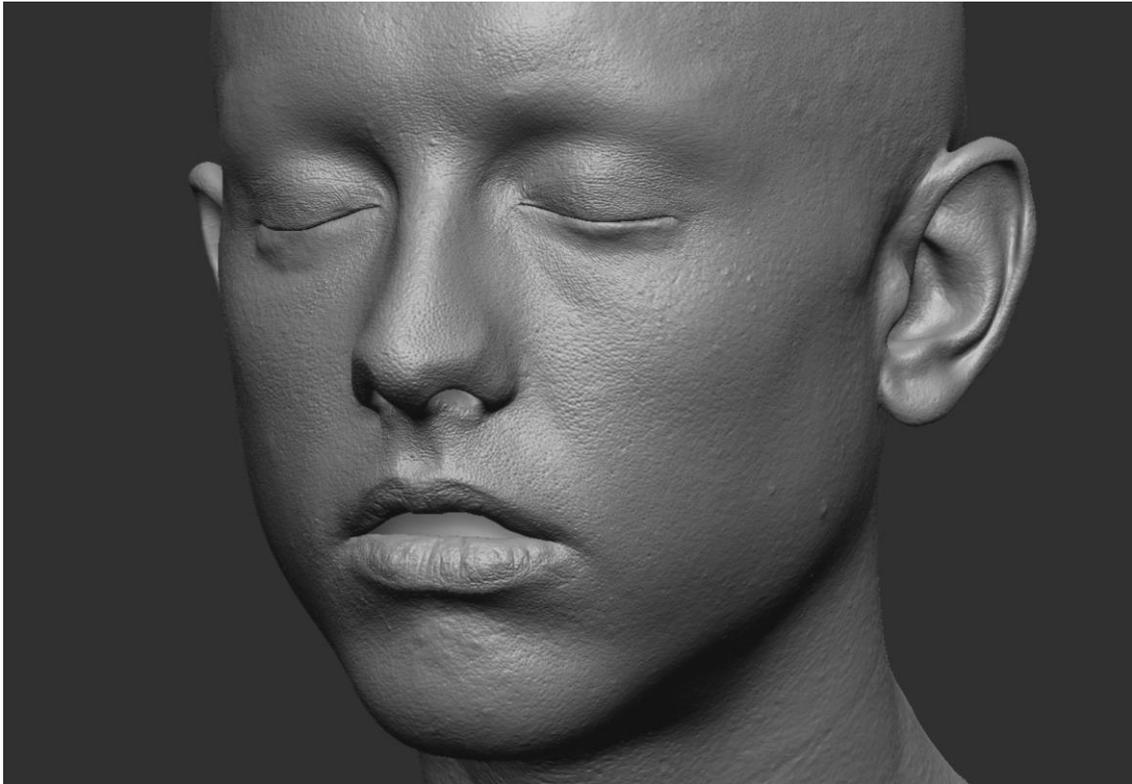


Figure 48. BERTON, Maxime : *L'Homme Fleur*, 2024. Sculpture numérique issue d'une base de scan photogrammétrique visualisée dans le logiciel Zbrush.

Pour optimiser le modèle 3D, nous avons créé une map de déplacement permettant de conserver les détails du modèle haute résolution sur un modèle à basse résolution. Les racines et les branches ont été créées dans Houdini, un logiciel de simulation et de modélisation procédurale, puis sculptées dans ZBrush pour des détails fins. Les fleurs ont été intégrées en utilisant des scans photogrammétriques spécifiques, assurant leur réalisme et leur intégration harmonieuse avec le modèle humain.

Images du modèle modifié, sans texture :



Figure 49. BERTON, Maxime : *L'Homme Fleur*, 2024. Sculpture numérique issue d'une base de scan photogrammétrique, transformée avec les logiciels Houdini et Zbrush.

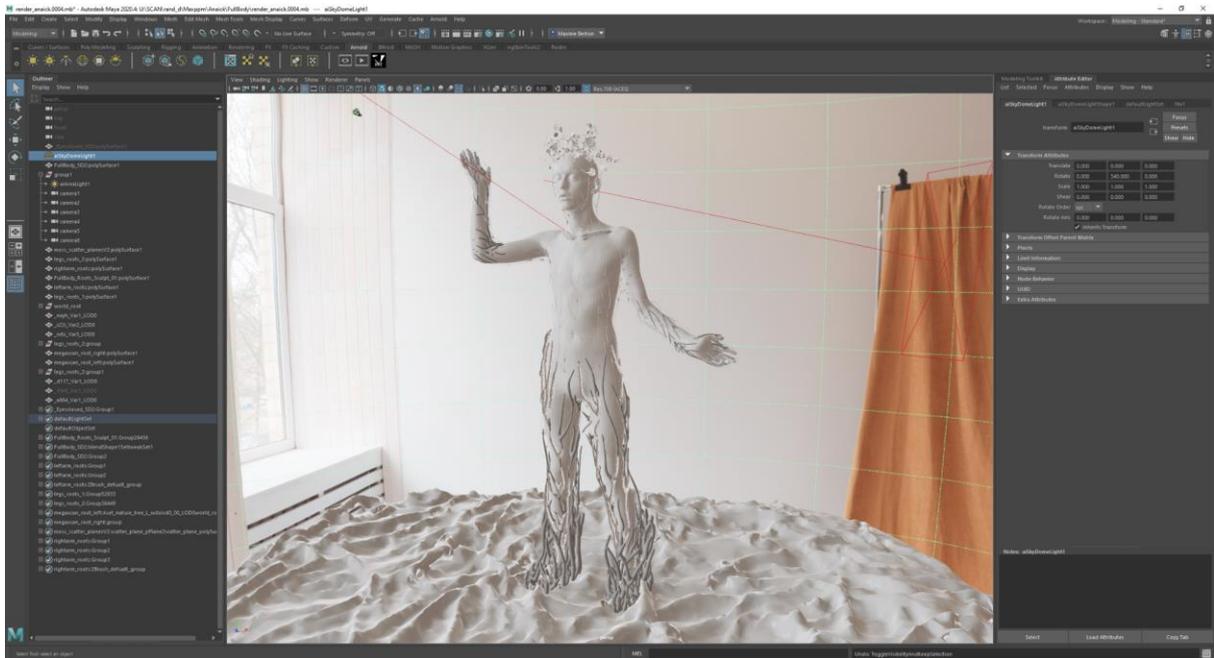
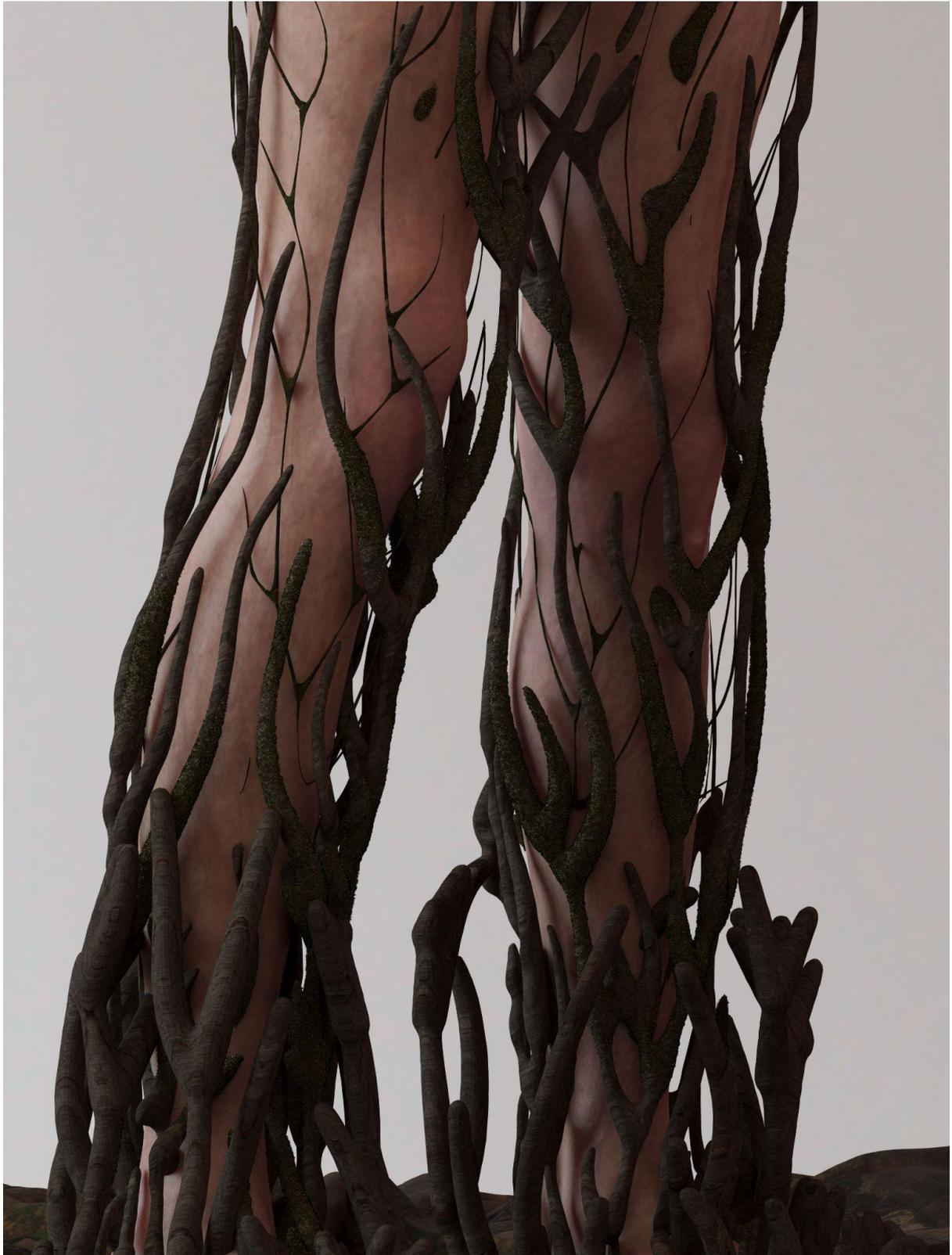


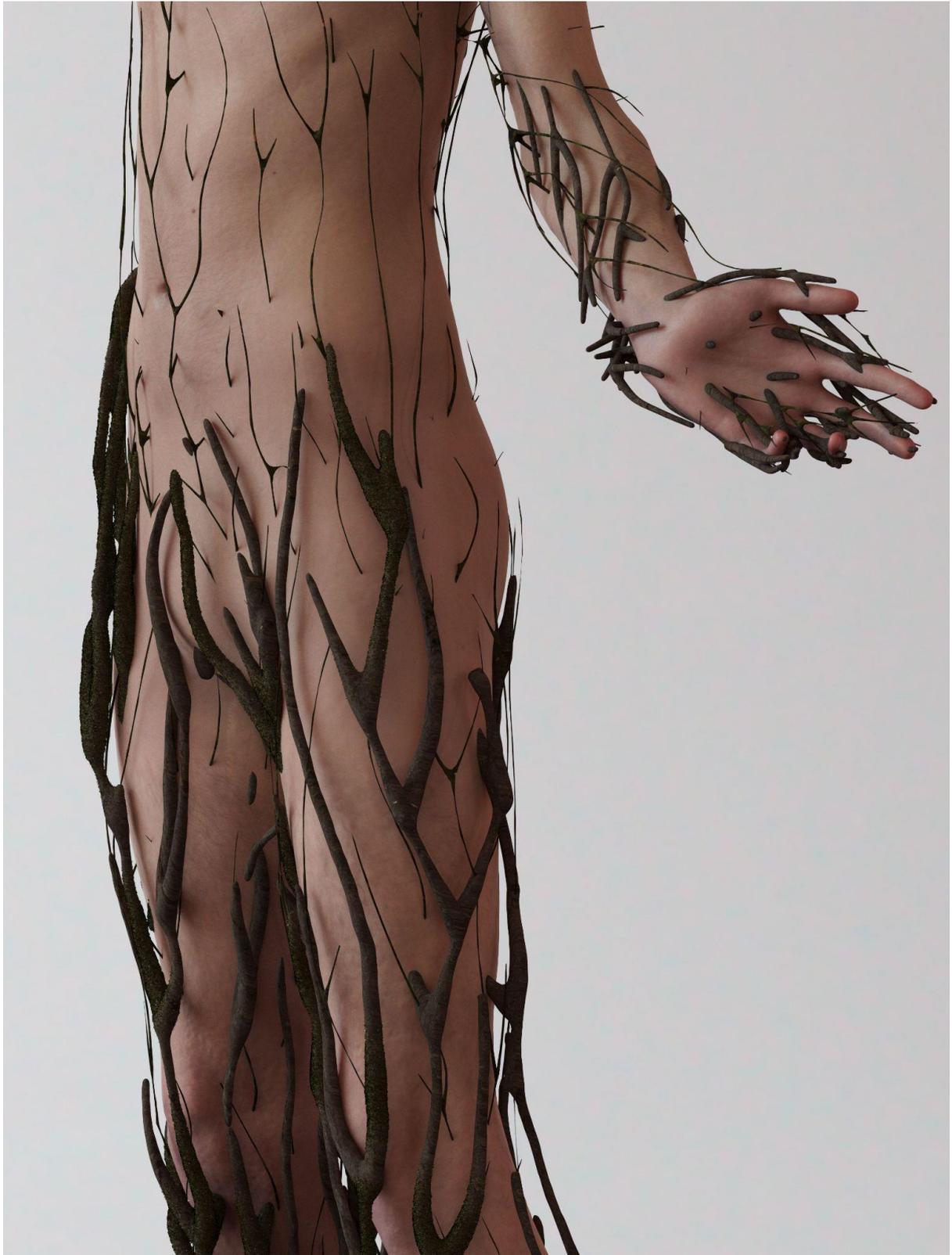
Figure 50. BERTON, Maxime : *L'Homme Fleur*, 2024. Visualisation sans textures du modèle transformé, dans le logiciel Maya

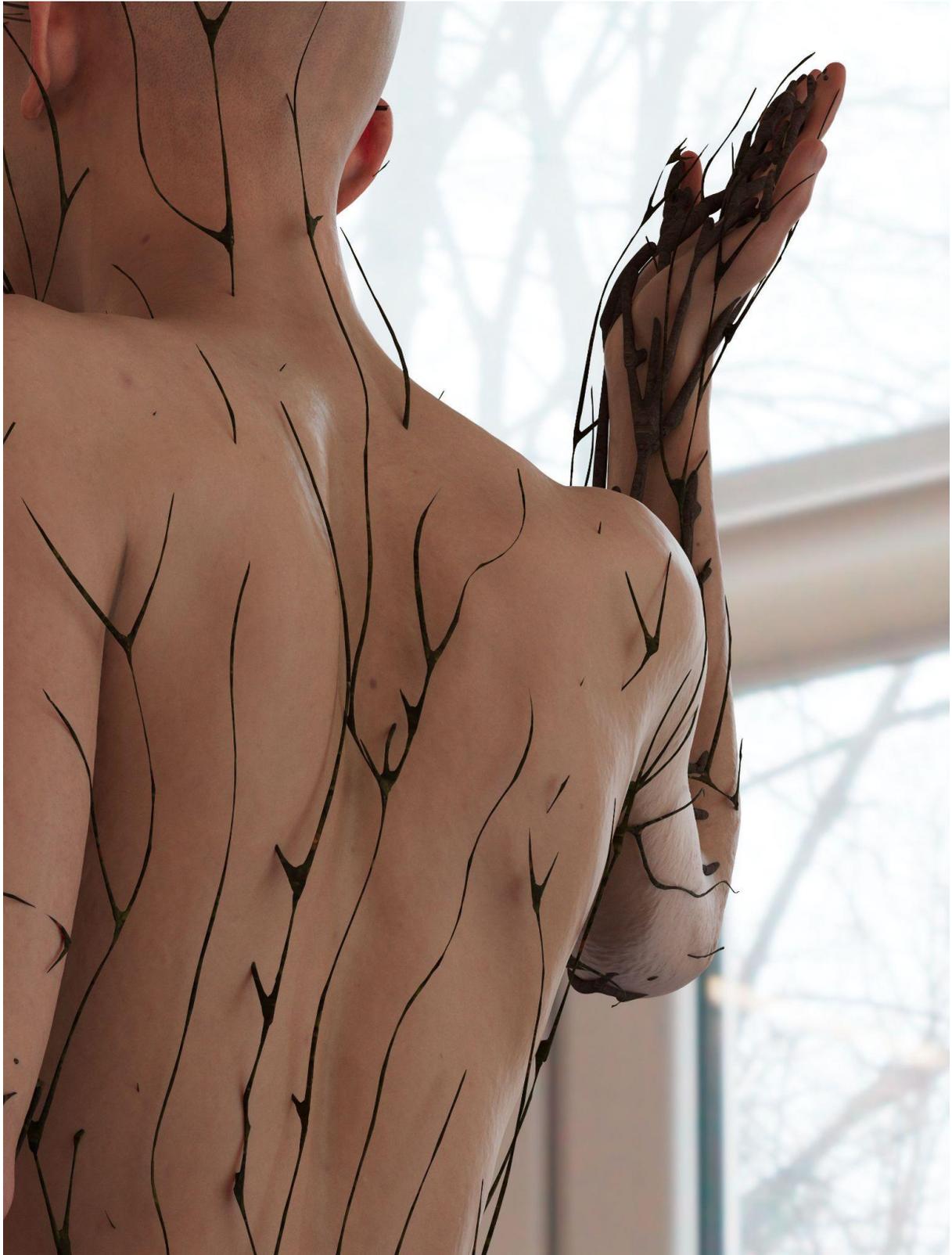
Le rendu final a été réalisé dans Maya avec le moteur de rendu Arnold. Un éclairage de type studio a été utilisé pour simuler des conditions de lumière réalistes, mettant en valeur les détails du modèle et des éléments végétaux. Pour rendre compte de l'objet en trois dimensions, plusieurs rendus ont été réalisés avec différents plans rapprochés sous des angles spécifiques.

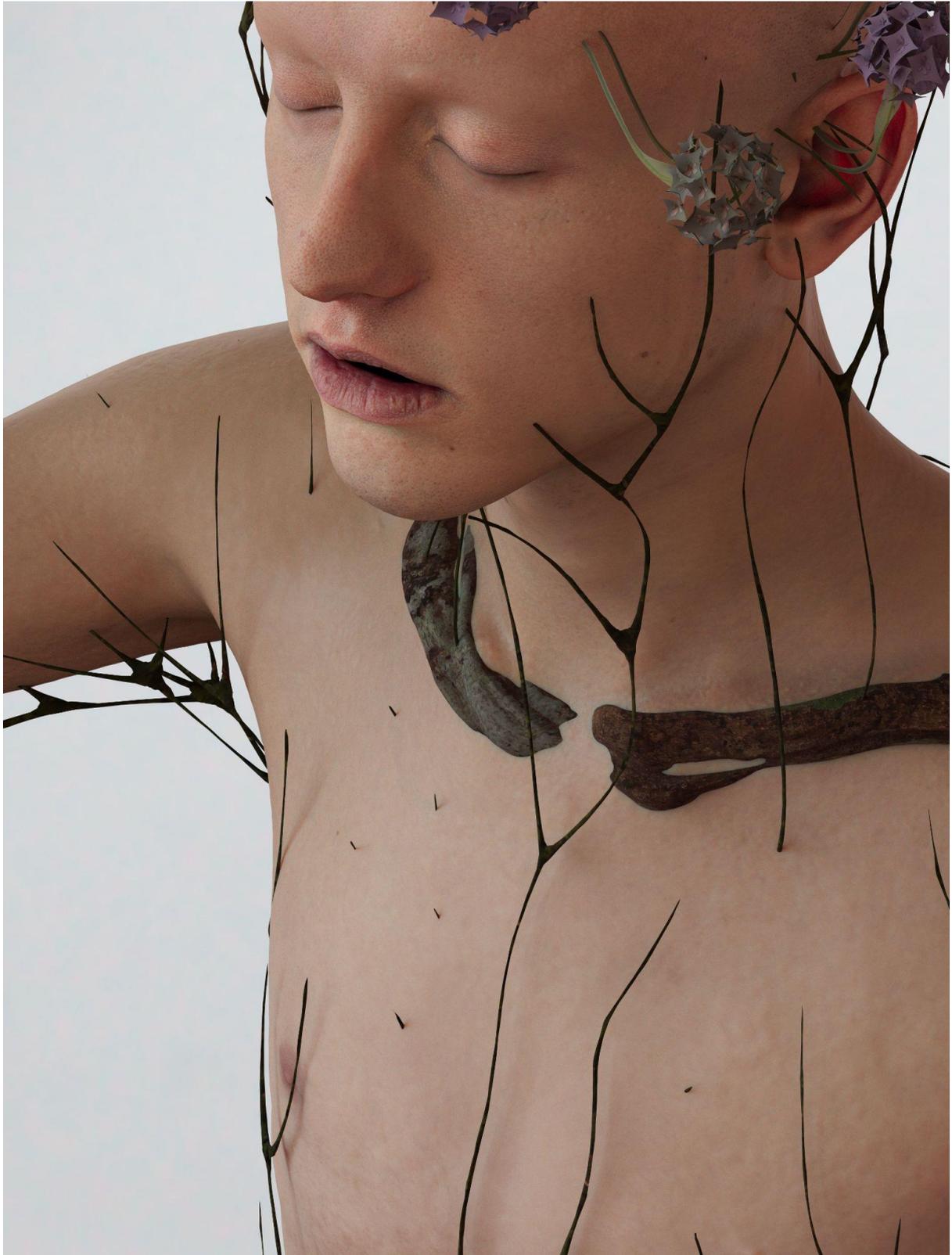
Rendus finaux :











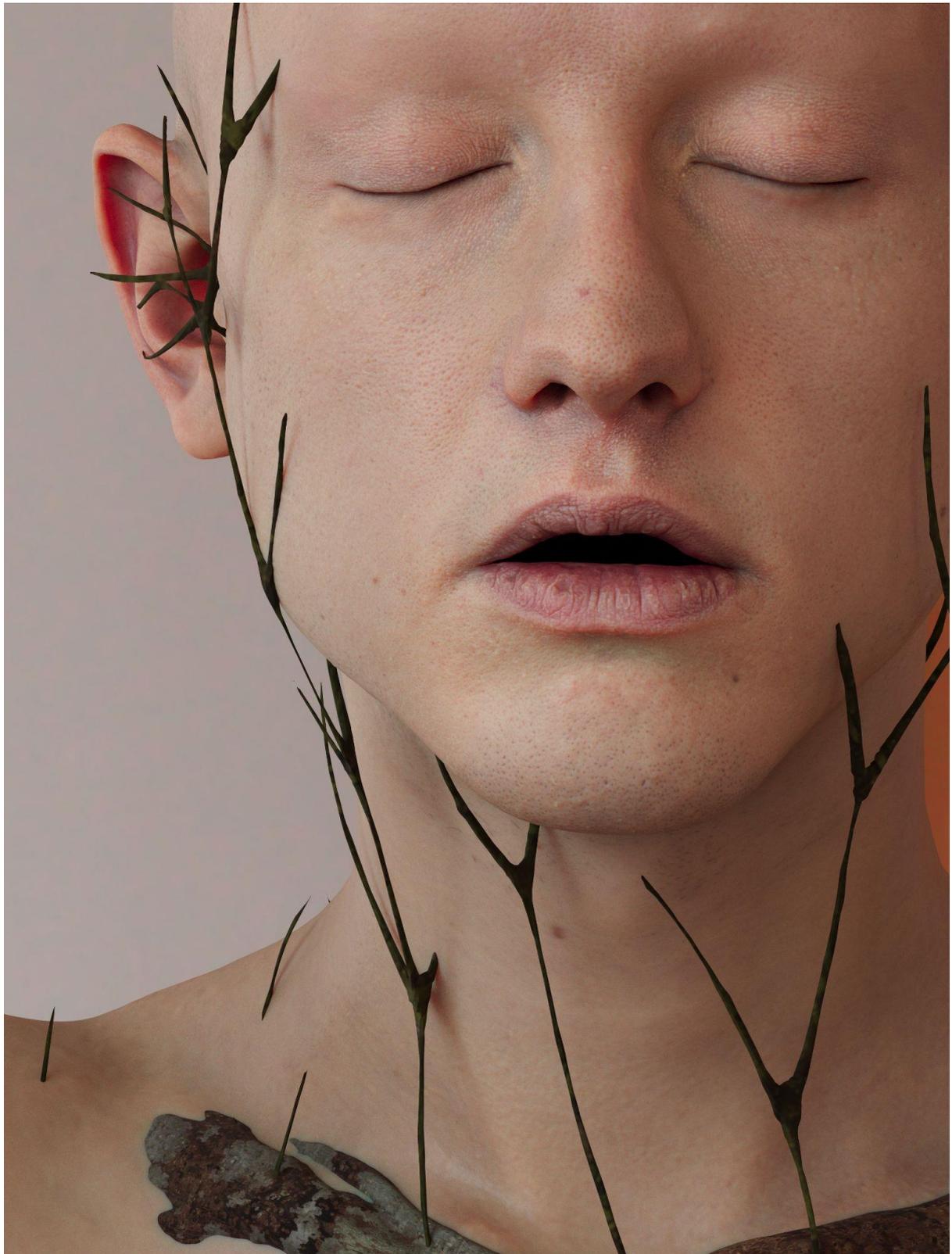


Figure 50. BERTON, Maxime : *L'Homme Fleur*, 2024. Série de six images d'une sculpture numérique, rendu avec le moteur Arnold sur Maya

L'homme numérisé dans ce projet se perçoit comme une fleur. Pour représenter cette auto-perception, le modèle 3D a été enrichi avec des éléments végétaux : des racines sont sculptées au niveau des jambes, des éléments végétaux sont intégrés sur le corps, et des fleurs bourgeonnantes composent son visage.

Ce projet soulève plusieurs questions en lien avec la problématique du mémoire. Premièrement, il interroge la capacité des technologies actuelles à reproduire fidèlement l'apparence physique mais aussi à laisser aux artistes une liberté d'expression et d'imagination dans la création. Les outils mis à disposition aux artistes 3D permettent de mettre en image des éléments complexes à imaginer tout en se rattachant au réel ou non par le rendu. Deuxièmement, il explore comment la modélisation 3D et la photogrammétrie peuvent être utilisées pour visualiser des concepts abstraits et invisibles, tels que l'identité perçue d'un individu comme une fleur.

L'intégration d'un être humain numérisé combiné avec une transformation du modèle 3D pour inclure des éléments végétaux pose des questions sur les capacités actuelles de la technologie et les possibilités qu'elles offrent aux artistes pour représenter des personnages. Cette partie pratique montre que les outils de modélisation 3D combinés à la photogrammétrie permettent de reproduire fidèlement l'apparence physique tout en laissant une liberté d'expression et d'imagination à l'artiste. L'utilisation d'une base de scan photogrammétrique modifiable ensuite librement permet la création d'œuvres qui intègrent des éléments fantastiques et imaginaires tout en raccordant au réel. Cette flexibilité est essentielle pour représenter des concepts abstraits et invisibles, tels que l'identité perçue d'un individu. Utiliser un rendu photoréaliste permet d'offrir une meilleure acceptation de la représentation chez un spectateur extérieur. Le processus de transformation du modèle numérisé en Homme-Fleur, par exemple, illustre comment la technologie permet de visualiser de manière tangible et plausible des symbolismes personnels complexes. L'utilisation des logiciels comme Mari pour le texturing, Zbrush pour le sculpting et Houdini pour la création procédurale montre que les outils numériques offrent une palette riche pour exprimer des idées artistiques tout en maintenant un haut degré de réalisme lors de la phase de rendu. La création de textures détaillées

et la simulation des interactions lumineuses réalistes avec Arnold renforcent la crédibilité du modèle final, démontrant que la technologie actuelle peut servir à la fois la fidélité et l'expression artistique.

Les images seront rendues en couleur avec un éclairage de type studio avec la plus grande résolution possible, avec les éléments transformant le personnage en plante ajoutée en sculpture sur le modèle 3D. La partie pratique sera exposée avec une série de cinq tirages de 70x80cm imprimés sur papier Mat Ultra Smooth et contrecollées sur une surface PVC de 2mm. Sur un premier mur, cette série de tirages montre des plans rapprochés sur des éléments de détails du personnage, allant du sol à la tête de ce dernier. Ces tirages vont aussi mettre en valeur la résolution possible au rendu. Sur un second mur adjacent, un tirage à l'échelle humaine de 200x266cm sera imprimé sur du papier Vinyle et représente le personnage vu de face dans son intégralité.

Voici la prévisualisation de l'accrochage :

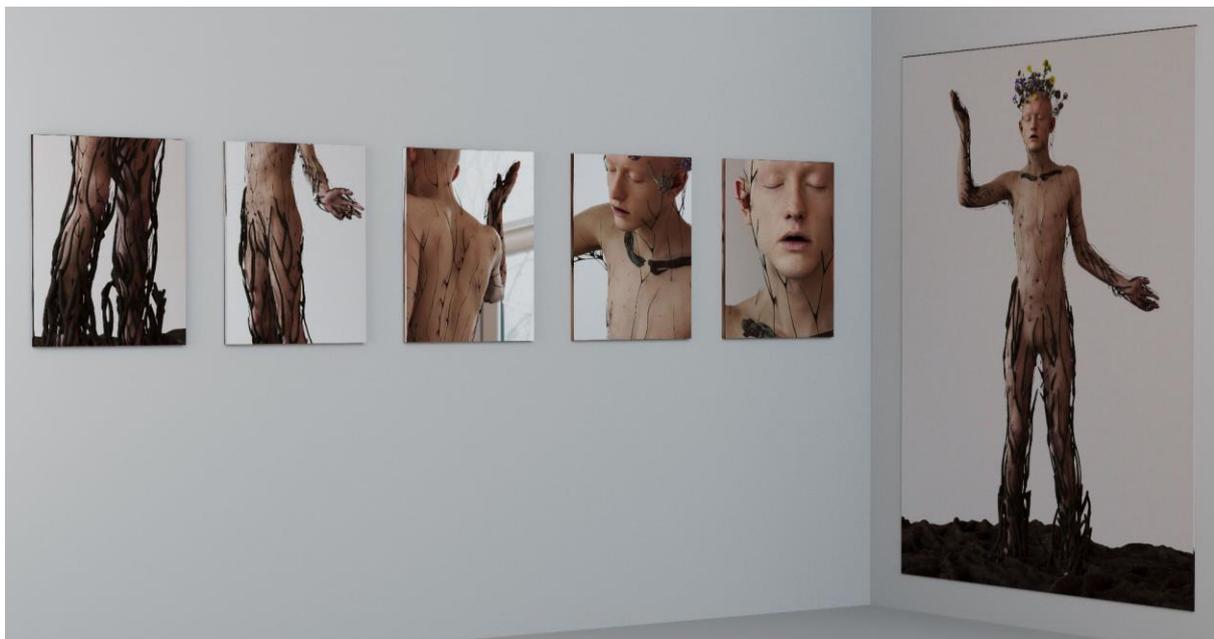


Figure 51. BERTON, Maxime : *L'Homme Fleur*, 2024. Plan de la scénographie

Cette partie pratique permet de démontrer que les technologies de modélisation 3D et de photogrammétrie offrent des possibilités immenses pour la création artistique, permettant de représenter des concepts abstraits de manière tangible et réaliste.