



Guide de numérisation 3D d'œuvres d'art



Musée national
des beaux-arts
du Québec

Québec 

INTRODUCTION

Méthodologie du projet	4
------------------------	---

CHAPITRE 1 | ORIGINE, GRANDS PRINCIPES ET APPLICATIONS DE LA NUMÉRISATION 3D

1.1 Origine de la numérisation 3D	6
1.2 Grands principes de la numérisation 3D	6
1.3 Applications de la numérisation 3D	7

CHAPITRE 2 | PRÉPARATION D'UN PROJET DE NUMÉRISATION 3D

2.1 Définition des objectifs	11
2.2 Sélection des œuvres	11
2.3 Obstacles à surmonter	11

CHAPITRE 3 | INFORMATIONS TECHNIQUES SUR LA NUMÉRISATION 3D

3.1 Types de numérisations	14
3.2 Équipement nécessaire	14
3.3 Processus	16
3.4 Principaux formats de fichiers 3D	17

CHAPITRE 4 | PROCÉDÉ DE NUMÉRISATION 3D : LUMIÈRE STRUCTURÉE

4.1 Introduction et présentation de la technologie	19
4.2 Processus de numérisation avec un appareil à lumière structurée	21
4.3 Quelques remarques sur cette technologie	21
4.4 Enjeux	23

CHAPITRE 5 | PROCÉDÉ DE NUMÉRISATION : PHOTOGRAMMÉTRIE

5.1 Introduction et présentation de la technologie	25
5.2 Processus de numérisation en photogrammétrie	27
5.3 Informations importantes sur le processus de photogrammétrie	29

CHAPITRE 6 | COMPARATIFS ET RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES

6.1 Quel procédé choisir?	34
6.2 Acheter l'équipement ou recourir à la sous-traitance?	36
6.3 Quels sont les limites et le futur de la numérisation 3D?	36

CONCLUSION

Bibliographie	39
---------------	----

Introduction

L'IDÉE DE TESTER LA NUMÉRISATION EN TROIS DIMENSIONS (3D) D'ŒUVRES D'ART EST NÉE D'UNE RÉFLEXION SUR L'AVENIR DES ACTIVITÉS DU STUDIO DE PHOTOGRAPHIE DU MUSÉE NATIONAL DES BEAUX-ARTS DU QUÉBEC. EN FAIT, UN PHOTOGRAPHE DU MUSÉE S'EST POSÉ LA QUESTION SUIVANTE : « COMMENT LE MÉTIER DE PHOTOGRAPHE POURRAIT-IL ÉVOLUER ET SE RENOUVELER? ».

Avec l'engouement pour l'intégration des images en 3D dans plusieurs nouvelles applications, l'idée d'explorer ce type d'imagerie pour documenter des œuvres d'art semblait porteuse d'avenir. D'abord soumise à l'interne, cette idée a fait son chemin jusqu'au ministère de la Culture et des Communications, qui a estimé pertinent d'explorer le champ de possibilités qu'offre la numérisation 3D d'œuvres d'art.

En outre, après avoir mené plusieurs recherches, l'équipe du Musée a observé l'absence de documents traitant de ce sujet, particulièrement en langue française. Devant ce constat, le ministère de la Culture et des Communications a mandaté l'équipe du Musée pour tester cette technologie et produire un guide de numérisation 3D d'œuvres d'art. Les modèles utilisés pour expérimenter la numérisation 3D sont presque exclusivement des œuvres d'art de la collection du Musée, car en période de pandémie, l'accès aux collections d'autres institutions a été difficile. Toutefois, ce guide s'adresse à toutes les institutions culturelles et patrimoniales, quelle que soit la nature de leurs

collections. Élaboré après plusieurs mois de recherches, d'échanges et d'expérimentations, ce document vise principalement à renseigner sur :

- La technologie nécessaire et la démarche optimale pour les institutions culturelles et patrimoniales;
- Le budget;
- Les besoins en ressources humaines;
- Les possibilités actuelles et futures de la numérisation 3D.

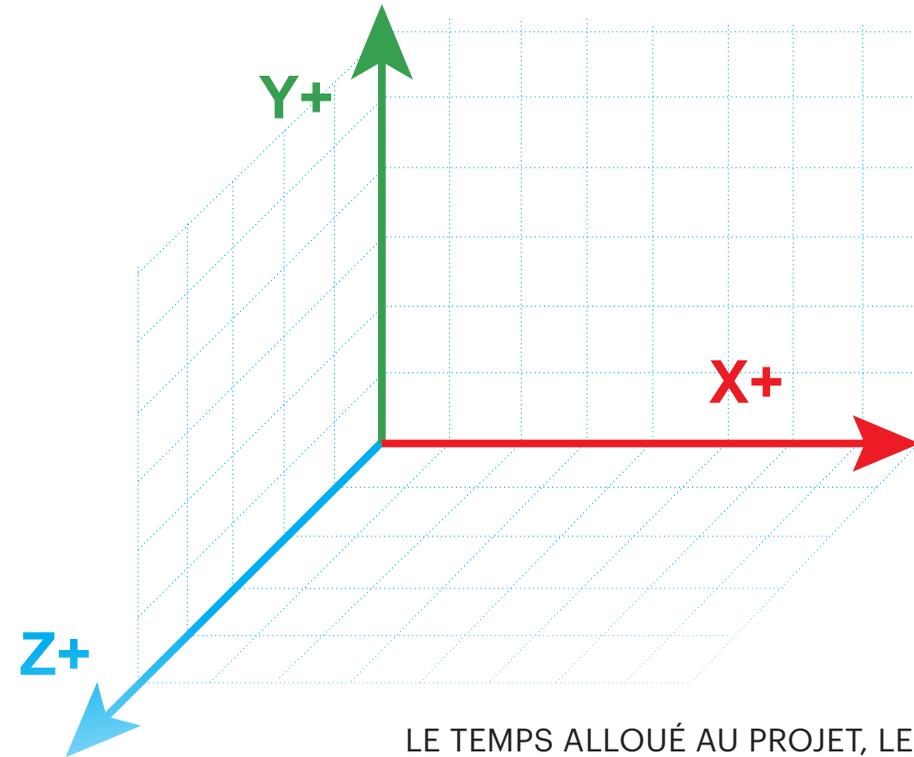
Afin d'être le plus exhaustif possible, ce guide aborde en premier lieu les grands principes de la numérisation 3D, le contexte et les utilisations possibles. Les chapitres suivants présentent en détail les deux principales techniques de numérisation 3D expérimentées et des comparatifs. Finalement, ce guide dévoile les conclusions des recherches et émet des recommandations générales sur la numérisation 3D d'œuvres d'art ou d'objets.

Les expérimentations avaient pour but d'identifier les limites de la numérisation à partir d'une sélection d'œuvres aussi diversifiée que possible, puis de déterminer quelle technologie choisir pour obtenir un modèle 3D le plus fidèle à la réalité à tous points de vue (volume, textures, couleurs, etc.). Cet exercice s'est avéré très stimulant : plus les travaux avançaient, plus les découvertes de possibilités et d'alternatives faisaient émerger de nouvelles questions. Notons que les technologies en matière de 3D évoluent très rapidement et qu'une mise à jour des informations sera nécessaire. L'équipe du Musée adresse ses remerciements au ministère de la Culture et des Communications du Québec pour son soutien financier, ainsi qu'à toutes les personnes ayant collaboré au projet.

Méthodologie du projet

Ce guide recense les procédés de la numérisation 3D, puis présente un éventail des possibilités qu'offre cette technologie. Sa consultation est simple et accessible à quiconque souhaiterait se lancer dans l'aventure de la 3D. Voici les étapes clés du processus :

- Planification et recherche;
- Discussions sur les procédés et le choix des œuvres;
- Achat d'un numériseur 3D à lumière structurée;
- Identification des critères de sélection des œuvres et des objets à documenter;
- Formation de l'équipe à l'utilisation du numériseur 3D;
- Expérimentations techniques au studio photo;
- Formation complémentaire et mise au point des procédés;
- Rencontres et discussions avec d'autres organismes culturels et patrimoniaux;
- Constat : nécessité de tester une seconde technique : la photogrammétrie;
- Recherches sur la photogrammétrie;
- Autoformation sur ce nouveau procédé;
- Développement d'une procédure de prise de vue;
- Expérimentations techniques;
- Évaluation des expérimentations et rédaction du guide.



LE TEMPS ALLOUÉ AU PROJET, LE PRIX DES ÉQUIPEMENTS ET LA COMPLEXITÉ DU PROCESSUS ONT CONSTITUÉ LES PRINCIPALES CONTRAINTES DE LA DÉMARCHE. MALGRÉ CES FACTEURS LIMITATIFS, L'OBJECTIF QUANTITATIF INITIAL DE NUMÉRISER 50 ŒUVRES EN UTILISANT UNE SEULE TECHNOLOGIE A ÉTÉ DÉPASSÉ : CE SONT 80 ŒUVRES QUI ONT ÉTÉ NUMÉRISÉES EN UTILISANT DEUX TECHNOLOGIES.

CHAPITRE 1

Origine, grands principes et applications de la numérisation 3D

DÉCHIFFRER LA TECHNOLOGIE, LA TERMINOLOGIE ET LES OPÉRATIONS LIÉES AU MONDE DE LA NUMÉRISATION 3D COMPORTE SON LOT DE DÉFIS. CONTRAIREMENT À LA PHOTOGRAPHIE ET À LA NUMÉRISATION 2D QUI SONT DES PRATIQUES RELATIVEMENT SIMPLES, LA TECHNOLOGIE ET LE VOCABULAIRE DE L'IMAGE 3D S'APPARENTENT DAVANTAGE AUX DOMAINES DE L'INGÉNIERIE OU DE L'INDUSTRIE DU JEU VIDÉO. QUOI QU'IL EN SOIT, APRÈS PLUSIEURS MOIS D'ÉTUDES ET DE RECHERCHES, VOICI L'INFORMATION DÉCRYPTÉE POUR LE GRAND PUBLIC.

1.1 Origine de la numérisation 3D

Les premiers numériseurs 3D ont été conçus dans les années 1980, époque où cette technologie était peu accessible et onéreuse. Les appareils utilisaient alors des pointes qui parcouraient physiquement l'objet pour les traduire en code binaire et les représenter numériquement sur l'écran d'un ordinateur. La quantité d'informations recueillies se trouvait limitée entre autres par l'espace de stockage restreint. Les technologies d'optiques et d'acquisitions de données développées au cours des années 1990 ont permis de numériser des objets en couleur. C'est également à cette époque que les premiers numériseurs commerciaux ont fait leur entrée sur le marché.

Acquisition (de données) : processus qui consiste à convertir les signaux du monde réel dans le système numérique pour les afficher, les stocker et les analyser¹.

Le prix des équipements a beaucoup diminué ces dernières années et les techniques pour numériser en trois dimensions se sont multipliées. Ce guide présente les deux principales techniques, soit la numérisation avec lumière structurée et la photogrammétrie, qui, pour sa part, est disponible sur un simple téléphone cellulaire. Avec la puissance et l'espace de stockage des ordinateurs qui augmentent de façon exponentielle, le développement de la numérisation 3D s'est accéléré et le processus devient de plus en plus accessible, tant financièrement que techniquement.

1.2 Grands principes de la numérisation 3D

De manière générale, la numérisation 3D consiste à traduire numériquement un objet matériel à l'aide de divers outils d'acquisitions de données visuelles et positionnelles. Avec un numériseur à lumière structurée, un appareil à technologie laser ou un procédé de photogrammétrie, le principe reste le même : pour représenter un objet en trois dimensions à l'écran, le logiciel de reconstruction doit utiliser les données du numériseur ou des photographies pour extraire les données de positionnement dans l'espace de l'objet choisi. En



comparant la position des points dans l'espace qui relie l'appareil de capture à l'objet numérisé, le logiciel attribue ensuite à chaque pixel les informations nécessaires pour transposer le plus fidèlement possible l'objet réel en modèle 3D virtuel.

Modèle 3D : modèle créé dans un système à trois coordonnées, dans lequel il est possible de représenter l'objet selon plusieurs vues².

1.3 Applications de la numérisation 3D

Pour les institutions de la culture ou du patrimoine, les artistes ou les intervenants culturels, la numérisation 3D ouvrira plusieurs voies nouvelles en termes de conservation, de restauration, de diffusion ou de médiation culturelle. Voici quelques exemples :

Diffusion et partage

La numérisation 3D a pour objectif premier la diffusion des modèles 3D sur Internet. Des modèles 3D peuvent être mis en ligne et hébergés sur des sites comme sketchfab.com, qu'un de ses fondateurs, Alban Denoyel, compare à la plateforme Vimeo créée pour la vidéo³. Une visionneuse intégrée au site permet d'y consulter des œuvres en haute définition, de s'en approcher et de les parcourir sous n'importe

quel angle. Voici quelques visionneuses 3D gratuites qui proposent différentes fonctions :

- SketchFab <https://sketchfab.com>;
- Autodesk Viewer <https://viewer.autodesk.com>;
- Online 3d viewer <https://3dviewer.net>.

Visionneuse : programme informatique, intégré au navigateur Web, qui permet de visualiser un fichier de format particulier⁴.

Sketchfab est un site d'hébergement et de lecture de fichiers 3D en ligne⁵.

Muséographie et conservation

Au sein d'un musée, la numérisation 3D offre un accès illimité aux fichiers d'œuvres en 3D et permet aux restaurateurs, conservateurs, commissaires, techniciens, designers d'exposition et autres intervenants du milieu de les utiliser dans une multitude de projets.

Cette technologie peut également servir divers projets muséographiques. Par exemple, une équipe du National Air and Space Museum (Smithsonian Air and Space Museum) a numérisé des objets d'une extrême fragilité dans le but de créer des supports d'exposition sur mesure pour limiter les manipulations. Ainsi, le positionnement des points d'appui a été exactement déterminé avant d'imprimer les supports en 3D.

Muséographie : ensemble des notions techniques nécessaires à la présentation et à la bonne conservation des œuvres des musées.

Si la numérisation 3D permet de produire une modélisation à un moment donné, elle permet aussi de remonter le temps en effectuant des reconstitutions de parties manquantes ou disparues d'objets ou d'œuvres d'art. Par exemple, une œuvre peut être numérisée avant, pendant et après sa restauration dans une optique de comparaison.

Recherche

L'étude des œuvres d'art constitue une partie essentielle des travaux de recherche universitaires, qu'ils soient historiques ou artistiques. La numérisation 3D présente un avantage majeur pour la consultation, réduisant considérablement la manipulation des œuvres. Certaines technologies de numérisation peuvent même révéler des détails pratiquement invisibles à l'œil nu (par exemple la tomographie, une technique d'imagerie médicale communément appelée *taco*).

Revenus autonomes

Les modélisations 3D vendues en ligne peuvent en outre représenter une source de revenus. Par exemple, sur la plateforme en ligne Sketchfab, il est possible de vendre des modèles 3D à un particulier ou à une société de jeux vidéo, ce qui permet de générer des revenus tout en diversifiant les moyens de diffusion des œuvres d'art.

Médiation

La numérisation 3D permet de développer des projets de médiation novateurs. Les mesures de conservation préventive des œuvres interdisent au public de les toucher, mais puisque la numérisation 3D peut donner lieu à l'impression 3D, les répliques ainsi produites pourraient être manipulées, gardant l'œuvre originale intacte. À l'aide d'outils informatiques, il est aussi possible d'accentuer des textures ou des parties d'une œuvre afin de mettre en évidence certaines caractéristiques, technique particulièrement pertinente pour améliorer l'expérience muséale des personnes **ayant une déficience visuelle**.

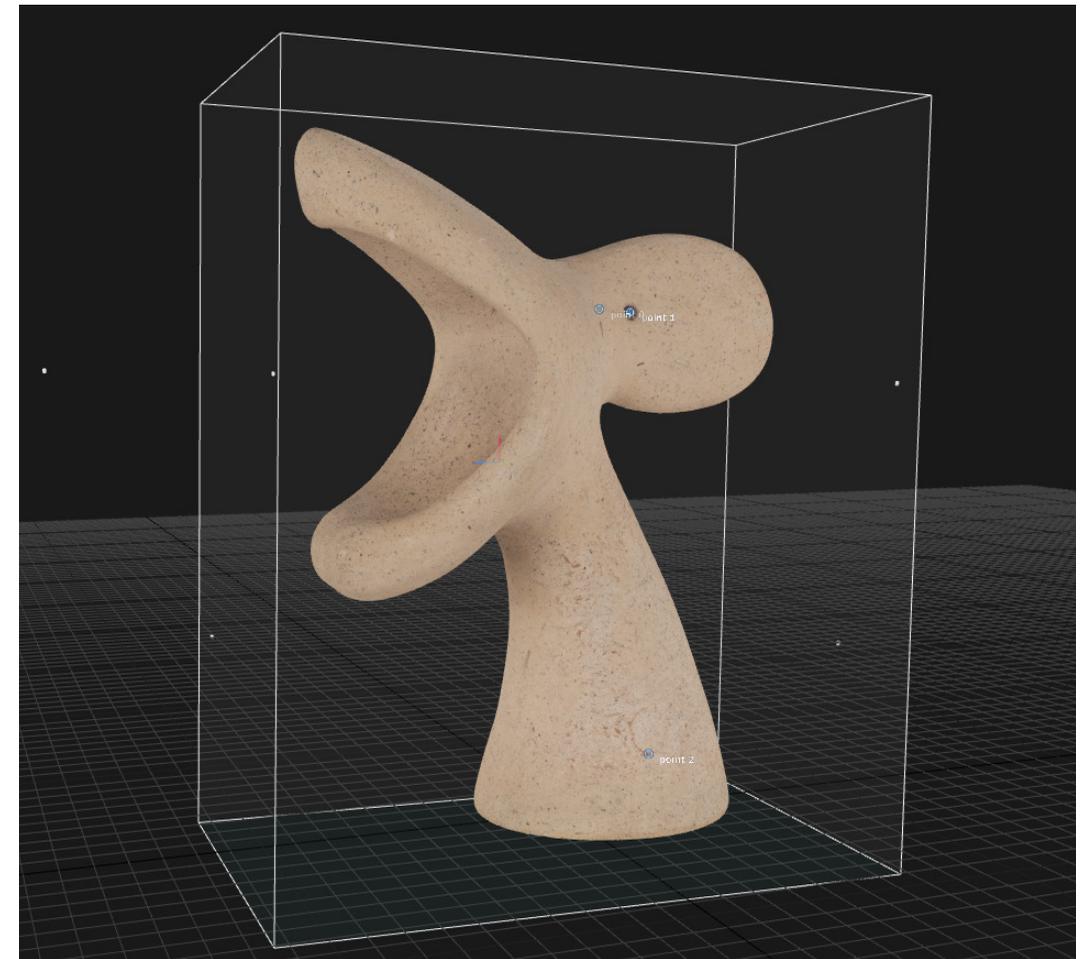
Droits d'auteur et de diffusion : penser à évaluer le **budget** lié à la libération des droits d'auteur et de diffusion, si la diffusion des impressions 3D d'œuvres d'art est envisagée.

Authenticité des œuvres : utiliser les JNF (ou NFT, pour non-fungible tokens) pour certifier l'authenticité numérique des œuvres numérisées ou pour vendre les fichiers.

Art public

Pour les artistes qui produisent des œuvres d'art public, la numérisation 3D s'avère très utile pour plusieurs raisons :

- Mesures très précises des objets numérisés;
- Échelle du modèle 3D facilement ajustable;
- Possibilité d'intégrer l'image 3D produite dans des maquettes virtuelles et de la publier sur Internet.



CHAPITRE 2

Préparation d'un projet de numérisation 3D



2.1 Définition des objectifs

Avant de s'engager dans un projet de numérisation 3D, il convient de définir les besoins actuels et futurs. Par exemple, le processus, la technologie et le budget d'un projet de recherche archéologique sont bien différents de ceux d'un projet de médiation culturelle. Comme le décrivent les chapitres suivants, la complexité du procédé de numérisation 3D peut, à première vue, décourager les non-initiés. Apprendre les grands principes de la numérisation 3D n'est possible qu'en présence d'une réelle motivation, sinon faire appel à une entreprise spécialisée est une alternative à envisager.

À propos des équipements, la gamme de produits et de prix est vaste et les écarts assez impressionnants, tant pour les appareils que pour les logiciels. On peut se procurer des équipements de numérisation 3D très dispendieux, mais il est également possible de réaliser des numérisations tridimensionnelles à un prix modeste avec certains téléphones cellulaires, des appareils photo numériques de base et des logiciels gratuits. Puisque les technologies évoluent très rapidement, on peut s'attendre à ce que la précision et la vitesse de numérisation augmentent aussi rapidement, particulièrement en ce qui a trait à la captation des couleurs et à la netteté des textures. Un projet complexe aujourd'hui pourrait donc s'avérer plus accessible dans quelques années.

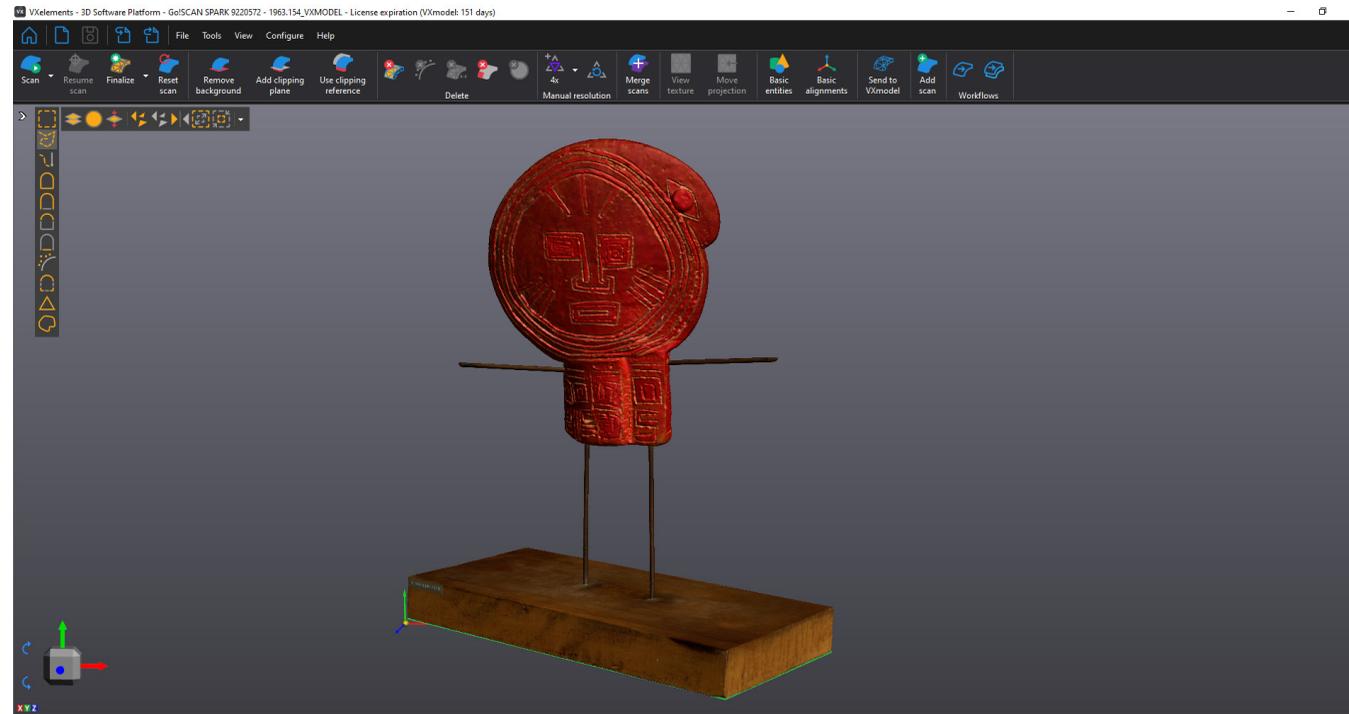
2.2 Sélection des œuvres

Avant de commencer les expérimentations, il convient de définir les critères de sélection des objets en fonction des objectifs visés. En l'occurrence, il a été jugé important que ces critères soient aussi diversifiés que possible de façon à illustrer une grande variété de situations, en tenant compte des caractéristiques suivantes :

- Tailles : de petites (moins de 10 cm) à très grandes (plus de 1,5 m);
- Matériaux : métaux, bois, plastiques, terres, mixtes, poils, épines, cuirs, feutres et tissus;
- Surfaces : lisses, rugueuses, réfléchissantes, mates et poreuses;
- Reliefs : creux, trous, protubérances, plats, courbes et pointus;
- Couleurs : vives, ternes, blanches, noires, sombres et lumineuses;
- Périodes : objets datant de 3 500 av. J.-C. à aujourd'hui.

2.3 Obstacles à surmonter

Se familiariser avec la technologie représente le premier défi, en particulier pour quiconque n'a jamais utilisé de tels équipements. En effet, **la courbe d'apprentissage** des logiciels est assez abrupte et demande beaucoup de temps de formation et d'expérimentation. Le chapitre suivant présente **les principaux termes techniques, formats de fichiers et concepts de base** liés à cette technologie qu'il est bon de connaître.



La matière même de l'objet peut constituer un obstacle de taille. En effet, **certains matériaux ont posé des problèmes** pour réaliser des numérisations. Par exemple, certains appareils captent mal les surfaces réfléchissantes, transparentes, polies ou luisantes. Dans le domaine de l'ingénierie, le problème est parfois contourné en utilisant des techniques alternatives. Par exemple, il est possible de geler l'objet à numériser pour créer du givre à sa surface et le numériser avant que l'effet ne se dissipe. Une autre solution consiste à vaporiser un objet, à l'aide d'un brumisateur d'enduit mat conçu à cet effet⁶, pour rendre sa surface mate ou encore à y déposer une poudre. En l'absence de reflets, le numériseur capte plus facilement les informations. Ces méthodes posent toutefois un risque d'altération des objets et des œuvres d'art. Il est donc fortement suggéré de consulter un professionnel de la restauration avant de procéder à l'utilisation de l'une ou l'autre de ces méthodes.

De plus, dans presque toutes les situations, des détails très fins, tels des cheveux, des épines ou de minces tiges résistent à la numérisation. Les technologies actuelles n'arrivent pas encore à capter à la perfection ces détails en 3D.

Puisqu'on doit parcourir un objet sous tous ses angles pour obtenir un modèle 3D complet, la taille physique de l'objet représente un défi supplémentaire pour numériser les zones inaccessibles (en hauteur, en dessous, dans des recoins, etc.). Pour capter un objet dans toute sa hauteur **avec la photogrammétrie**, on peut avoir recours à une structure rehaussée, trépied ou autre dispositif de fixation, sur laquelle sont fixés les appareils photo qui sont activés à l'aide d'un déclencheur à distance. Dans certains cas, un drone, une nacelle ou tout autre matériel peut aussi être utilisé.

Chercher à capter un objet sous tous ses angles se heurte à certaines limites, quelle que soit la technologie de numérisation utilisée. Par exemple, pour capter le dessous d'un objet, ce dernier doit être surélevé ou placé en position inversée, ce qui peut être périlleux, voire impossible, à cause de sa fragilité.

CHAPITRE 3

Informations techniques sur la numérisation 3D



3.1 Types de numérisation

On compte **trois principaux types de technologies** pour numériser en 3D des œuvres d'art ou des objets :

- La photogrammétrie;
- Le numériseur à lumière structurée;
- Le numériseur laser.

Ce guide développe les procédés de numérisation 3D à partir de **la lumière structurée** et de **la photogrammétrie**. Des informations techniques communes aux deux technologies seront d'abord présentées, puis les chapitres 4 et 5 brosseront un portrait plus précis de chacune d'elles.

3.2 Équipement nécessaire

Numériseur, appareil photo et téléphone cellulaire

Se munir d'un équipement pour capter le réel est évidemment indispensable. Il peut s'agir d'un appareil qui utilise la **lumière**

structurée, dont le prix varie entre moins de mille et plusieurs dizaines de milliers de dollars. Le site Web All3dp Pro⁷ est une bonne ressource pour comparer les appareils et les technologies. Pour la **photogrammétrie**, qui emploie un ou plusieurs appareils photo, il convient idéalement d'utiliser un équipement de haute résolution et un objectif de bonne qualité. Pour l'instant, même s'il est possible de facilement numériser en 3D avec un téléphone cellulaire ou une tablette de dernière génération, les résultats obtenus ne sont pas encore de qualité suffisante pour un contexte de diffusion muséale ou pour l'archivage documentaire. Les développements technologiques actuels permettront peut-être d'atteindre une qualité suffisante pour ces usages dans les années à venir, mais les modèles 3D obtenus avec l'utilisation d'appareils mobiles peuvent très bien convenir pour des utilisations telles que la présentation de maquettes 3D, l'insertion dans des jeux vidéo, ou pour le divertissement personnel. Certains appareils exploitent également la technologie du faisceau laser lidar (acronyme de l'expression en langue anglaise « light detection and ranging » ou « laser imaging detection and ranging »), pour augmenter la précision de la captation.

Lidar : capteur actif qui mesure le temps de propagation aller et retour d'un faisceau lumineux émis par un laser pour déterminer la position et la distance d'une cible par rapport à l'émetteur⁸.

Équipement informatique

Toutes les techniques de numérisation 3D requièrent un ordinateur très performant pour traiter les données et créer les modèles 3D. Plus il est puissant, plus il permet de réduire le temps de traitement et d'utiliser des réglages de précision élevée. Cependant, un ordinateur portable de puissance moyenne (à environ 1 500 \$) peut aussi donner des résultats de très bonne qualité, notamment avec le logiciel Metashape. Il faut noter que plusieurs logiciels ne sont pas disponibles sur le système d'exploitation Mac et que certains exigent des spécifications techniques précises pour fonctionner. Le traitement des données peut prendre en moyenne de trois à douze heures selon l'ordinateur, la quantité d'informations à traiter, les logiciels et les paramètres techniques choisis.

Logiciels de traitement

Pour réaliser les numérisations, il faut prévoir l'achat de logiciels de traitement et de postproduction. Les prix varient en fonction du logiciel choisi, du type d'utilisation et de la méthode de paiement (version perpétuelle, mensuelle ou paiement à l'utilisation). Les numériseurs 3D sont souvent vendus avec leur propre suite de logiciels, mais pour la photogrammétrie, il conviendra de choisir parmi les nombreuses options disponibles comme Meshroom, Meshlab, Reality Capture, Metashape, etc. À noter que Meshlab, Meshroom, Colmap ou VisualSFM sont offerts gratuitement en logiciel libre (open source).

Espace de stockage des données

Quelle que soit la technologie choisie, chaque objet numérisé occupe beaucoup d'espace disque. Voici quelques comparaisons de quantités de données selon le type d'équipement utilisé :

	PHOTOGRAMMÉTRIE : NIKON D850 (IMAGES DE 45,7 MÉGAPIXELS)	LUMIÈRE STRUCTURÉE : CREAFORM GO SCAN SPARK
IMAGES EN HAUTE RÉOLUTION (FORMAT TIFF)	108 X 92 MO = 9 936 MO	-
IMAGES EN HAUTE RÉOLUTION (FORMAT JPEG)	108 X 22 MO = 2 376 MO	-
FICHIERS DE TRAVAIL DU PROJET	+/- 2 500 MO	2 000 MO – 20 000 MO
EXPORTATION AU FORMAT OBJ (HAUTE QUALITÉ)	1 000 MO	1 000 MO
TOTAL DONNÉES DU NUMÉRISEUR 3D	-	2,9 GO – 20,5 GO
TOTAL 108 IMAGES (3 ANGLES DE VUE X 10 °)	15,4 GO	-
TOTAL 216 IMAGES (6 ANGLES DE VUE X 10 °)	27,5 GO	-
TOTAL 504 IMAGES (7 ANGLES DE VUE X 5 °)	59,5 GO	-

Pour construire le modèle en 3D, le procédé de photogrammétrie requiert une grande quantité d'images numériques et donc beaucoup d'espace de stockage disponible. Quant à l'appareil à lumière structurée, il capte et construit le modèle numérique en temps réel, au fur et à mesure que l'œuvre est parcourue. Il est donc plus « efficace » dans la gestion des données recueillies.

Astuce : il est important de noter certains réglages et de faire des captures d'écran tout au long du processus. Les procédés de numérisation 3D nécessitent parfois de la rétroaction et plusieurs tentatives avec des réglages différents.

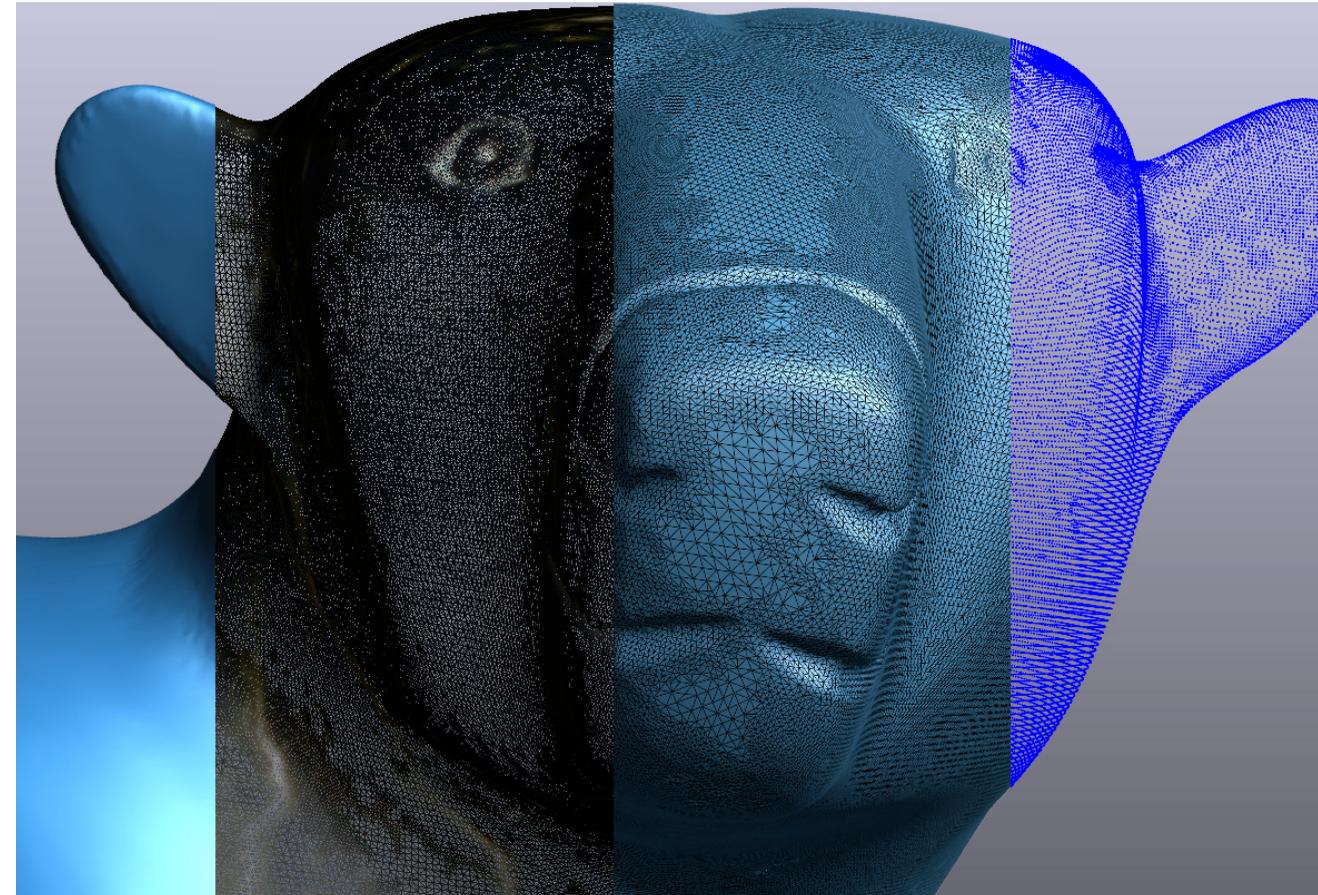
Nuage de points : ensemble de points de données dans un système de coordonnées à trois dimensions. Ces points se définissent en général par les coordonnées x, y et z et servent souvent à représenter la façade d'un objet¹⁰.

3.3 Processus

Pour chaque procédé de numérisation, la terminologie et les opérations informatiques se ressemblent. Après l'étape de l'acquisition des données avec la technologie choisie, les logiciels procèdent ainsi :

- Alignement des photos (pour la photogrammétrie seulement);
- Construction d'un nuage de points (dense/point cloud);
- Création des cartes de profondeur (depth maps);
- Création du maillage (mesh);
- Application de la couche d'informations des couleurs (texture) sur le maillage.

Maillage : structure externe d'un modèle 3D à animer liée à l'armature, qui forme une surface tridimensionnelle constituée d'un ensemble de sommets, d'arêtes et de faces⁹.



3.4 Principaux formats de fichiers 3D

Comme pour la majorité des technologies numériques, la numérisation 3D comporte son lot de formats de fichiers. Voici les plus courants :

	GÉOMÉTRIE (MALLAGE)	COULEURS ET TEXTURES	CODE SOURCE OUVERT (OPEN SOURCE)	IMPRESSION 3D	AVANTAGES PRINCIPAUX
OBJ	OUI	OUI	OUI	OUI, SURTOUT POUR LES COULEURS	TRÈS COURANT ET COMPATIBLE
STL	OUI	NON	OUI	OUI, IDÉAL	IDÉAL POUR L'IMPRESSION 3D
GLTF	OUI	OUI	OUI	À ÉVITER	LÉGER, TRÈS COURANT POUR LA RÉALITÉ VIRTUELLE

OBJ (Wavefront object) :

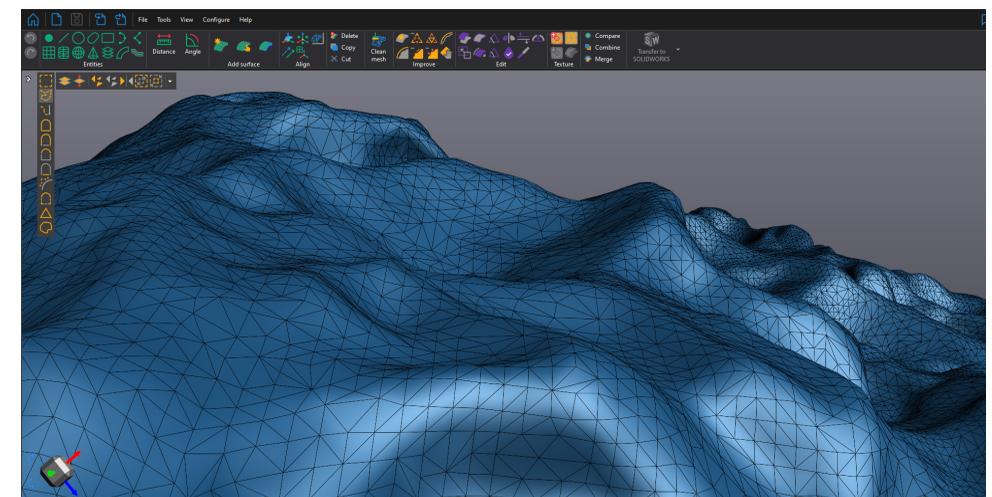
- Format le plus approprié pour la numérisation 3D puisqu'il peut contenir les informations de volumes (assemblage de polygones), de couleurs et de textures;
- Représente l'objet numérisé par des triangles et d'autres formes polygonales;
- Peut également convenir pour l'impression 3D, mais le fichier MTL qui accompagne le fichier OBJ peut complexifier le processus;
- Permet l'impression 3D multicolore;
- Le plus utilisé dans les jeux vidéo.

STL (Standard Tessellation Language) :

- Non recommandé pour la numérisation 3D d'œuvres d'art, car il ne contient pas les informations de couleur;
- Représente la surface d'un objet uniquement par des triangles plutôt que par une multitude de types de polygones. Conséquemment, il ne rend pas aussi bien les volumes que le format OBJ, qui comporte une plus grande variété de formes;
- Le plus utilisé pour l'impression 3D monochrome, mais ne convient pas pour l'impression 3D multicolore.

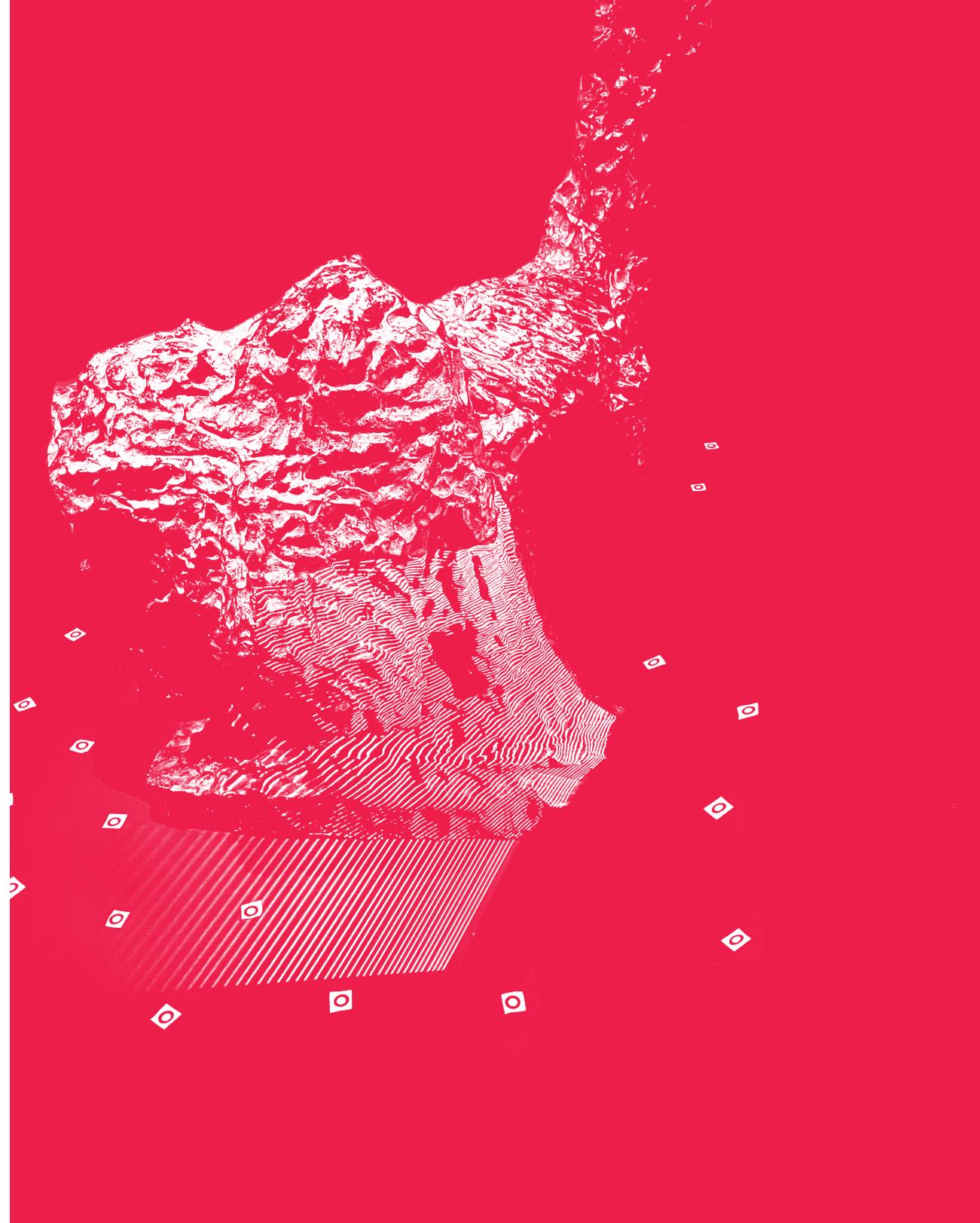
GLTF (glTF ou GLB) (Graphics Language Transmission Format) :

- Comprend les informations de volumes, de couleurs et de textures;
- Fichiers très légers qui utilisent moins d'espace disque;
- Principalement utilisé en réalité virtuelle et augmentée, pour les jeux vidéo et pour le Web.



CHAPITRE 4

Procédé de numérisation 3D : lumière structurée



4.1 Introduction et présentation de la technologie

Les appareils de numérisation à lumière structurée étaient conçus à l'origine pour le domaine de l'ingénierie, mais on les utilise désormais dans d'autres secteurs. Certains modèles sont fixes, reliés à un plateau rotatif automatisé où est déposé l'objet à numériser. D'autres se tiennent dans une main et s'utilisent en faisant le tour de l'objet pour le balayer sous tous ses angles.

Triangulation : méthode trigonométrique de calcul de la position d'un objet utilisée en vision par ordinateur¹¹.

En somme, ce type d'appareil projette à une certaine fréquence des lignes de lumière blanche sur l'objet à numériser et calcule par triangulation les déformations de ces lignes. Par cette triangulation, des caméras de positionnement captent la géométrie de l'objet et envoient à l'ordinateur des millions de coordonnées x , y ou z à la seconde. Ce dernier traduit ces informations pour reproduire numériquement l'objet numérisé dans un nuage de points, puis une réplique 3D identique. Des explications détaillées du procédé peuvent être consultées en ligne sur le site Web de Capture 3D¹² par exemple.

Afin de représenter les couleurs et les textures de manière réaliste, le numériseur utilise un capteur prévu à cet effet pour enregistrer ces informations et les transposer sur le modèle 3D. Comme avec toutes



les techniques de numérisation 3D, les zones qui ne peuvent être captées par la triangulation des capteurs ou les appareils photo ne peuvent être représentées à l'écran. Cela crée des trous sur la surface de la modélisation 3D que l'on doit remplir à l'aide d'un logiciel de post-traitement, ou laisser tels quels, selon l'utilisation prévue du modèle 3D.

Afin d'assurer un positionnement précis du numériseur dans l'espace, il est recommandé d'apposer des cibles autocollantes sur la base où repose l'objet, ou sur celui-ci si cela est possible. Ces cibles consistent en des cercles de vinyle autocollant et réfléchissant au contour noir, qui mesurent de 3 à 12 mm de diamètre. Comme pour toutes les techniques de numérisation 3D, il est impératif que l'objet ne bouge pas durant l'opération. On peut utiliser un plateau rotatif pour faire tourner l'objet à numériser, mais ce dernier doit demeurer immobile en tout temps, sans quoi le numériseur perdra ses repères et l'opération devra être recommencée.

La technologie qui utilise uniquement le laser (lidar) ne capte pas les couleurs, ce qui peut être problématique en regard du respect de l'intégrité des objets et des œuvres. La numérisation 3D en couleur requiert un équipement à projection de lumière blanche ou l'utilisation de la photogrammétrie. Cependant, puisque la technologie laser donne une plus haute précision, il est possible de combiner deux technologies pour additionner le meilleur de chacune (ex. : DEL et infrarouge, DEL et laser). Dans de plus rares cas, la lumière infrarouge, des CT-scan (tomodensitométrie ou taco) et d'autres technologies sont combinées pour ajouter encore plus d'informations.

Pour ce projet, l'appareil utilisé projette 99 lignes de lumière blanche et capte 1 500 000 mesures/seconde, avec une précision qui peut atteindre 0,050 mm.

Temps et équipement consacrés à l'expérimentation

- Le plus de temps possible a été investi pour expérimenter exhaustivement ce procédé de numérisation 3D;
- Formation initiale : 12 heures;
- Formation supplémentaire à mi-parcours : 6 heures;
- Tests techniques : environ 360 heures pour chacun des trois techniciens (soit 1 080 heures);
- Rencontres de développement et de suivi de projet : 100 heures;
- Échanges avec des partenaires et des intervenants externes sur la numérisation 3D (lumière structurée et photogrammétrie) : environ 60 heures.

Équipement utilisé (liste non exhaustive) :

- Numériseur 3D à lumière structurée Creaform GoScan Spark;
- Ordinateur portable HP Zbook G6 17po (64 Go de mémoire vive, processeur Intel Core i7 -9850H 6 cœurs, carte graphique Nvidia Quadro RTX5000 16 Go avec technologie CUDA¹³, disque SSD 1Tb NVMe);
- Logiciels Creaform Vx Scan et Vx Model.

4.2 Processus de numérisation avec un appareil à lumière structurée

Avant de numériser un objet, il convient de s'assurer qu'il est dans l'état souhaité (avant ou après restauration). Il faut également s'installer dans un endroit bien dégagé pour pouvoir contourner aisément l'objet. Sur le plan informatique, on doit disposer d'espace disque suffisant pour stocker les numérisations et veiller à ce que les logiciels d'exploitation et de numérisation de l'ordinateur soient à jour. Pour donner une vue d'ensemble du procédé, les étapes principales sont décrites ci-dessous. À noter que chaque étape du processus de numérisation doit être suivie dans l'ordre prescrit et de manière reproductible dans le temps, surtout si une grande quantité d'œuvres doit être numérisée.

Étapes générales du processus de numérisation

1. Installer l'objet à numériser de façon stable (idéalement sur une surface plane, de couleur neutre et uniforme)
2. Placer des cibles de positionnement sur l'objet ou sur sa base
3. Calibrer le numériseur (au besoin, selon l'appareil utilisé)
4. Préparer le projet dans le logiciel : utiliser un fichier-gabarit de numérisation préalablement créé
5. Régler les paramètres de l'appareil dans le logiciel choisi
6. Numériser l'objet
7. Enregistrer le projet

8. Inspecter le modèle 3D obtenu sur l'écran de l'ordinateur
9. Numériser à nouveau les zones problématiques (au besoin)
10. Assembler les différentes parties de la numérisation (au besoin)
11. Effectuer la postproduction de la numérisation et finaliser le modèle (nettoyer et combler les trous, régler les couleurs, la netteté et d'autres paramètres)
12. Exporter vers un format plus universel (comme OBJ ou PLY, voir section 3.4)
13. Archiver les données

Astuce : le traitement des numérisations prend beaucoup de temps, il est donc primordial d'enregistrer régulièrement le projet pour en sauvegarder toutes les étapes.

4.3 Quelques remarques sur cette technologie

Puisque les réglages diffèrent d'un appareil à l'autre et d'une marque à l'autre, il est apparu utile de présenter des points d'ordre général qui peuvent s'appliquer à plusieurs situations.

Note : Les recommandations finales, les comparaisons avec d'autres technologies et les conclusions techniques se trouvent au chapitre 6.

Réglages du numériseur et des logiciels

Il est impératif de bien comprendre chaque réglage et son effet sur la qualité des numérisations. Il est vivement conseillé de suivre une formation sur l'utilisation de l'équipement choisi et de consulter des sites pertinents sur Internet, car on y trouve des ressources intéressantes et des astuces. Par ailleurs, les meilleures pratiques consistent à toujours utiliser les réglages qui donnent le plus haut niveau de précision au départ, même s'ils utilisent davantage d'espace de stockage et de ressources informatiques. Il est facile d'optimiser les modèles par la suite et de réduire la taille de fichier selon son utilisation.

Optimisation des modèles pour diffusion sur Internet

Afin de réduire la taille des fichiers pour les présenter sur Internet, il est conseillé d'optimiser le maillage de triangles dans le logiciel de numérisation. Dans le monde de la 3D, cette étape s'appelle « décimation ». Pour ce faire, le logiciel simplifie le maillage en regroupant plusieurs triangles dans les secteurs où ce procédé a peu d'impact sur le rendu visuel. Par exemple, si 40 triangles se trouvent sur une grande surface plane triangulaire, le logiciel pourrait les regrouper en un seul grand triangle. Cela permet de réduire la taille de fichier du modèle 3D produit et accélère conséquemment les traitements informatiques. En fonction des formes de l'objet numérisé, il est possible d'obtenir de bons résultats même en réduisant le nombre de triangles de 75 à 80 %.

Logiciels de traitement des données

Chaque fabricant de numériseurs 3D à lumière structurée exploite son propre logiciel pour la création des modèles numériques. Il n'existe donc pas de logiciel universel qui puisse être utilisé avec différentes marques de numériseurs. Cependant, une fois les modèles 3D construits, on peut les modifier avec le logiciel du fabricant ou les exporter dans un format plus universel (ex. : OBJ, PLY) et les retravailler dans un éditeur 3D externe comme Meshroom, Blender ou autre.

Lux : unité d'éclairement équivalent à l'éclairement produit par un flux lumineux de un lumen uniformément réparti sur une surface de un mètre carré¹⁴.

Impact de la lumière DEL sur les œuvres

Dans le monde muséal, l'exposition à la lumière représente un facteur de dégradation des œuvres qui affecte la conservation à long terme. Pour le numériseur à lumière structurée qui a été utilisé en l'occurrence (Creaform GoScan Spark, à DEL blanche), le fabricant a indiqué qu'il projette une intensité moyenne de lumière de 250 lux (maximale de 350 lux). D'après les données de l'Institut canadien de conservation¹⁵, l'exposition à la lumière DEL pendant une heure de numérisation n'entraînerait pas de dégradation prématurée de l'œuvre.

Gestion des couleurs et netteté du rendu visuel

Puisqu'on ne peut pas attitrer un profil de couleurs calibrées au numériseur à lumière structurée, le réglage des couleurs s'effectue une fois la numérisation terminée. Conséquemment, le rendu des couleurs et des textures de cette technologie s'est révélé moins fidèle à la réalité qu'avec la photogrammétrie. Certains logiciels de numérisation peuvent permettre l'ajustement des couleurs et de la netteté, mais des programmes tiers comme Blender¹⁶ ou Meshlab¹⁷ offrent souvent beaucoup plus de possibilités.

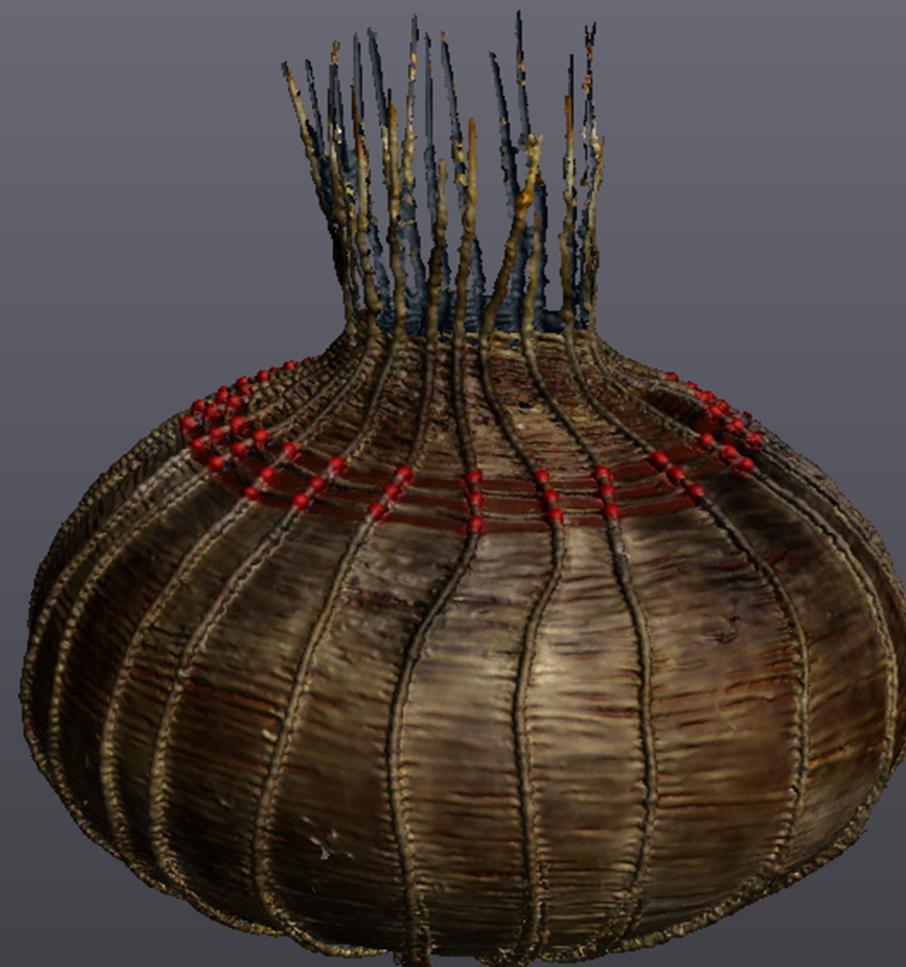
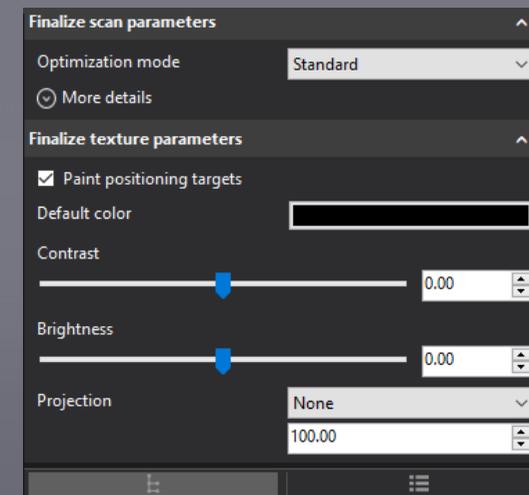
4.4 Enjeux

N'ayant pu tester tous les cas de figures de la numérisation avec un appareil à lumière structurée, quelques questions subsistent :

Netteté : est-il possible d'accentuer la netteté des modèles numérisés dans un logiciel tiers sans perdre de précision volumétrique?

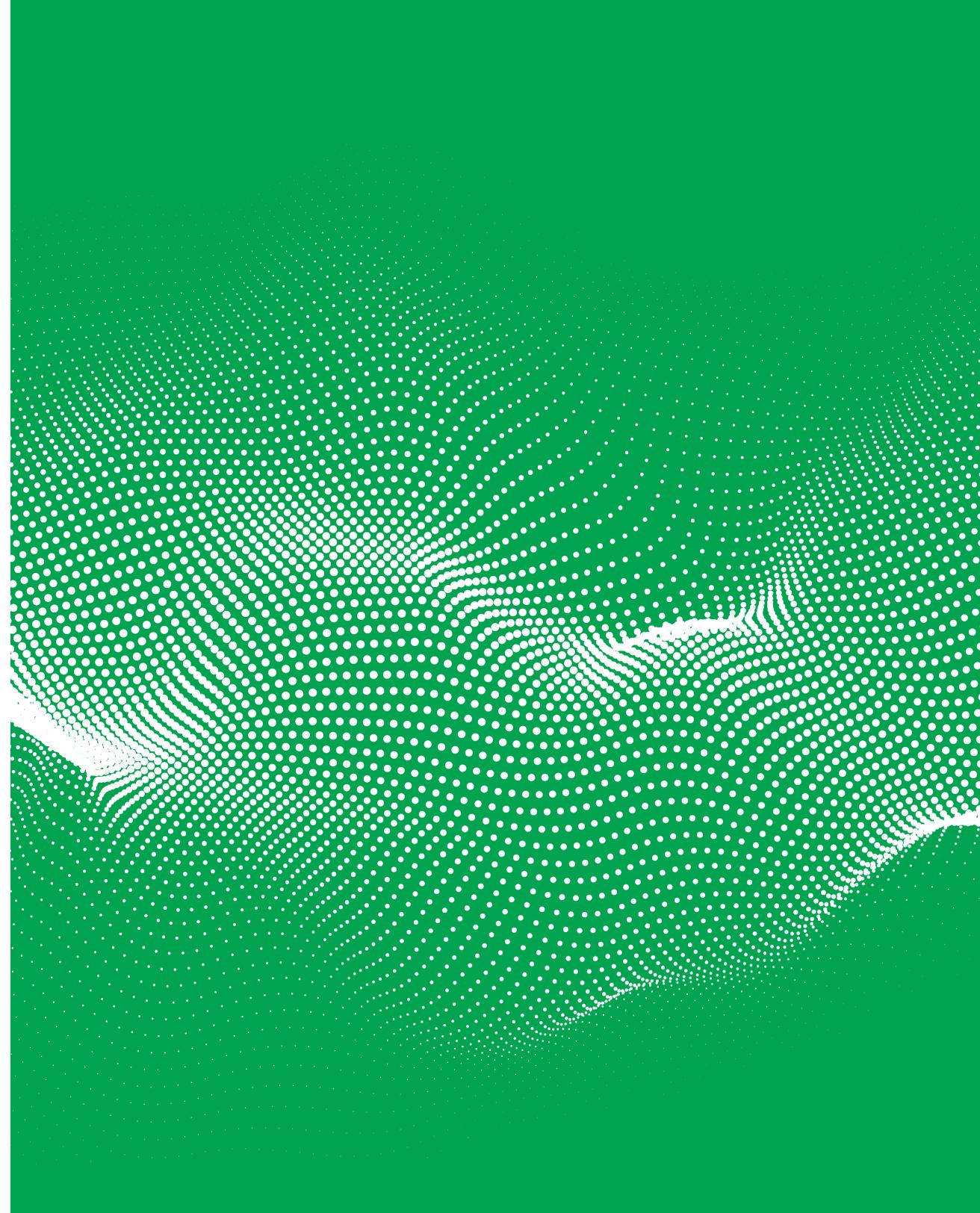
Numérisation à l'extérieur : quelles sont les limites de captation de cette technologie selon les conditions d'ensoleillement?

Combinaisons de technologies : la combinaison de plusieurs technologies de captation (par exemple, la lumière structurée et le laser) pourrait-elle résoudre les difficultés rencontrées au sujet du rendu des surfaces réfléchissantes, des trous, etc.? Si oui, quels numériseurs combiner?



CHAPITRE 5

Procédé de numérisation : photogrammétrie



5.1 Introduction et présentation de la technologie

L'invention de la photogrammétrie remonte à 1849, en France, alors qu'Aimé Laussedat utilise deux photographies pour tenter d'observer et de mesurer un territoire¹⁸ à l'aide d'un restituteur stéréoscopique¹⁹. La photogrammétrie telle qu'elle est utilisée aujourd'hui se base toujours sur ce principe de comparaison : à partir d'images en deux dimensions prises autour d'un objet, un logiciel compare la position des éléments d'une image par rapport à une autre. Il crée ensuite une représentation numérique de ces points et les combine aux informations photographiques pour reconstruire l'objet photographié en un modèle tridimensionnel. Grâce aux moyens technologiques actuels, il est possible d'utiliser des centaines, voire des milliers, d'images pour reconstituer des modèles en trois dimensions d'une très grande précision.

Puisque le principe repose sur l'utilisation d'images, presque tous les appareils qui produisent des photos peuvent être utilisés. Bien entendu, plus l'équipement est de haute qualité, plus les rendus 3D sont nets et précis. Certains utilisent des téléphones cellulaires, d'autres des appareils photo reflex haut de gamme, ou encore des solutions alternatives comme des modules de caméra Raspberry Pi²⁰.

Une fois les images produites avec un appareil photo et retouchées par un logiciel de traitement d'image, les modèles 3D peuvent être construits à l'aide d'un programme de photogrammétrie. Certains sont offerts gratuitement, d'autres en licence perpétuelle, en abonnement mensuel ou payables à l'utilisation selon le nombre d'images utilisées.

Tout comme pour les équipements de numérisation à lumière structurée, l'apprentissage de ces logiciels s'avère ardu même en possédant de bonnes connaissances en informatique, car il utilise ses propres termes techniques, ses propres formats de fichiers et ses propres procédures. Cette section présente un éventail des procédés qui semblent les plus courants au moment de la rédaction de ce guide.

Temps et équipement consacrés à l'expérimentation

- Le plus de temps possible a été investi pour expérimenter exhaustivement ce procédé de numérisation 3D.
- Recherches initiales sur la technologie (ressources en ligne) : 50 heures.
- Autoformation sur le logiciel Reality Capture : 35 heures.
- Autoformation sur le logiciel Agisoft Metashape Pro: 35 heures.
- Traitement informatique pour la création de douze modèles 3D : 60 heures.
- Expérimentations en studio : environ 120 heures pour chacun des trois techniciens, soit 360 heures au total.
- Rencontres de développement et de suivi de projet : 100 heures.
- Échanges avec des partenaires et des intervenants externes sur la numérisation 3D en général (lumière structurée et photogrammétrie) : environ 60 heures.

Équipement utilisé (liste non exhaustive)

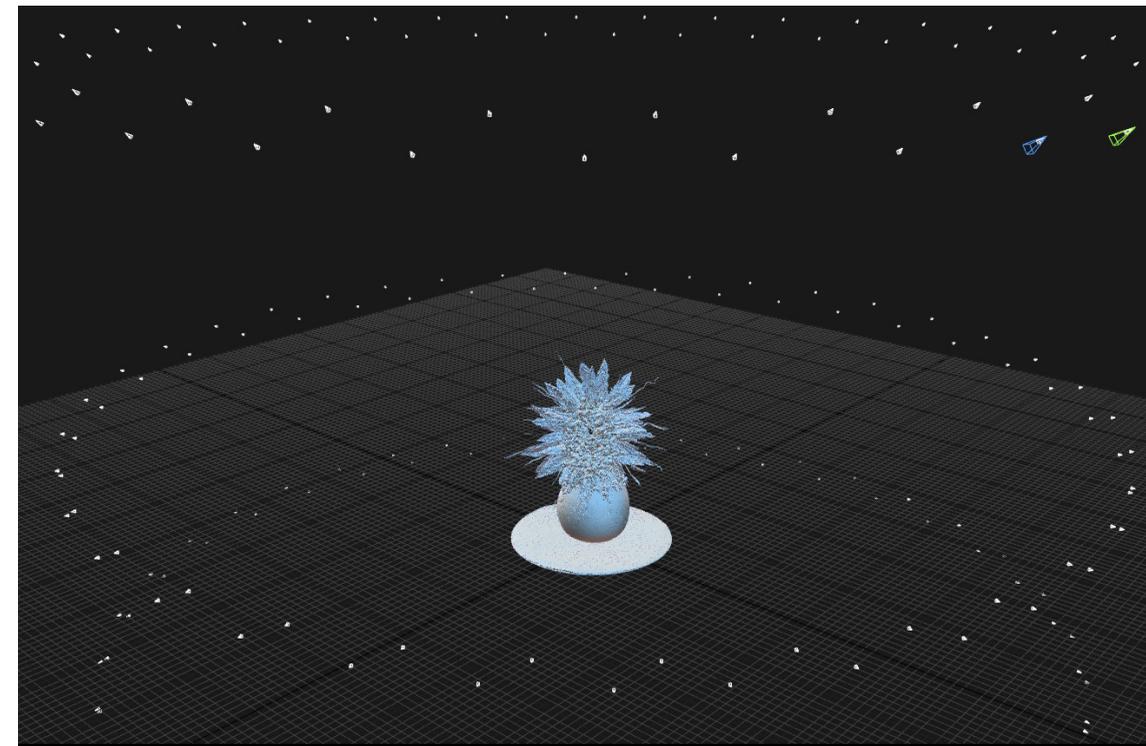
- Trois appareils photo reflex à capteur plein format (16 MP, 24 MP et 45 MP).
- Déclencheur à distance synchronisé avec quatre émetteurs Pocket Wizard.
- Support pour trois appareils photo : assemblage comprenant un trépied, un pied télescopique, un Magic Arm, un Friction Arm, trois têtes de trépied et sept Super Clamps.
- Plateforme roulante (Orbit Dolly) à laquelle on adjoint un trépied (comme pour les tournages de cinéma) pour faire tourner les appareils autour de l'objet.
- Plateaux rotatifs de petite et de grande dimension (non automatisés).
- Ordinateurs : un portable HP Zbook G6 17po (64 Go de mémoire vive, processeur Intel Core i7 -9850H 6 cœurs, carte graphique Nvidia Quadro RTX5000 16 Go avec technologie CUDA, disque SSD 1Tb NVMe) et un portable moyen de gamme Dell Latitude 5520 (8 Go de mémoire vive, processeur Intel Core i5 1135G7 4 cœurs, carte graphique Intel Iris Xe sans technologie CUDA).
- Logiciels d'assemblage : Reality Capture et Agisoft Metashape Pro.





5.2 Processus de numérisation en photogrammétrie

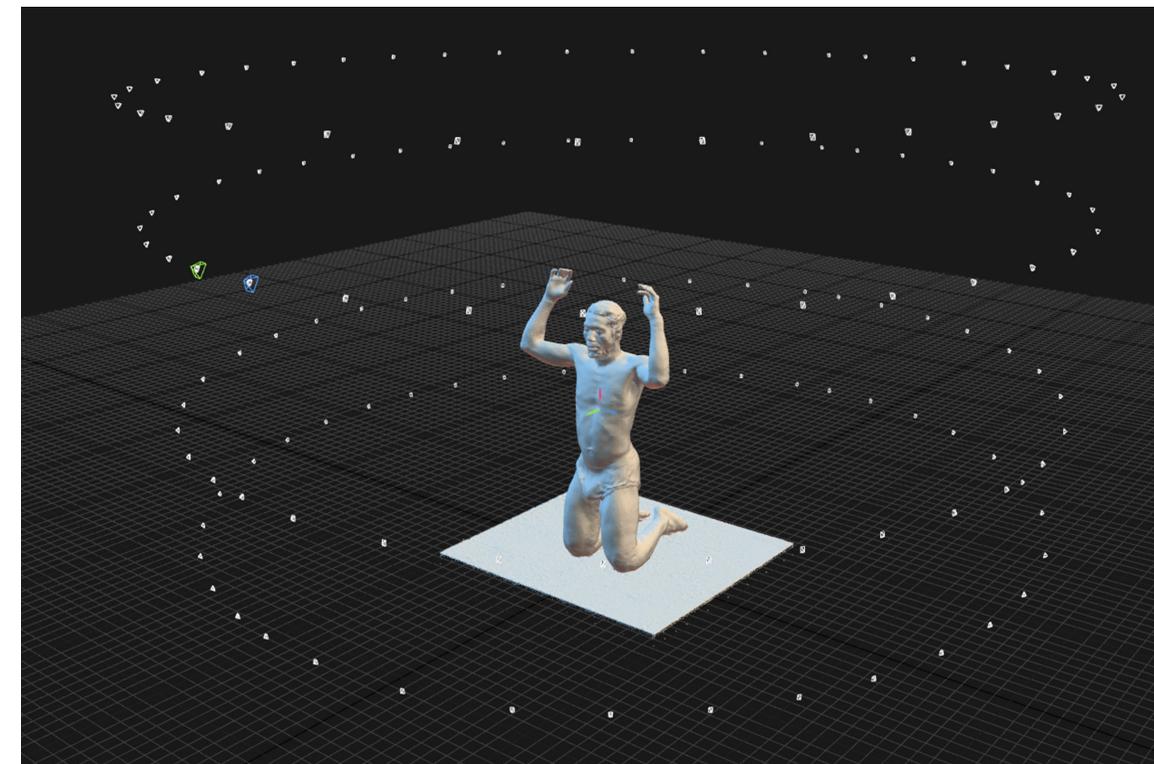
Comme pour le procédé avec lumière structurée, avant de numériser un objet, il convient de s'assurer qu'il est dans l'état souhaité (avant ou après restauration). Il faut également s'installer dans un endroit bien dégagé pour pouvoir contourner aisément l'objet lors des prises de vue. Sur le plan informatique, on doit disposer d'espace disque suffisant pour stocker les numérisations et veiller à ce que les logiciels d'exploitation et de numérisation de l'ordinateur soient à jour. Pour donner une vue d'ensemble du procédé, les étapes principales sont décrites ci-dessous. À noter que chaque étape du processus de numérisation doit être suivie dans l'ordre prescrit et de manière reproductible dans le temps, surtout si une grande quantité d'œuvres doit être numérisée.



Étapes générales du processus de numérisation

1. Installer l'objet à photographier de façon stable (idéalement sur une surface plane, de couleur neutre et uniforme). Important : voir les recommandations à la section 5.3.
2. Placer des cibles de positionnement autour de l'objet sur sa base. Un motif sombre imprimé peut aussi faire office d'aide au positionnement.
3. Préparer le ou les appareils photo (sur un trépied si nécessaire). S'assurer que les batteries sont chargées.
4. Installer les déclencheurs à distance au besoin.
5. Effectuer les réglages sur l'appareil photo : exposition, vitesse d'obturation, etc.
6. Régler la mise au point en mode manuel. Important : voir les recommandations à la section 5.3.
7. Prendre une photo et vérifier la netteté ainsi que l'exposition.
8. Prendre une photo initiale avec une charte de couleurs pour pouvoir les calibrer en post-traitement.
9. Effectuer les prises de vue tout autour de l'objet sous plusieurs angles (voir schéma ci-après).
10. Transférer les photos sur l'ordinateur.
11. Trier, vérifier et nommer les images.
12. Effectuer la postproduction des images : colorimétrie, corrections optiques, netteté, etc.
13. Créer un projet dans un logiciel de photogrammétrie et y ajouter les images.
14. Procéder avec les étapes de création du modèle 3D selon le logiciel choisi.
15. Assembler les différentes parties de la numérisation (au besoin).
16. Effectuer la postproduction et finaliser le modèle (nettoyer et combler les trous, etc.).
17. Exporter vers un format plus universel (comme .OBJ, .PLY, voir section 3.4).
18. Archiver les données.

Astuce : le traitement des numérisations prend beaucoup de temps, il est donc primordial d'enregistrer régulièrement le projet pour en sauvegarder toutes les étapes.



5.3 Informations importantes sur le processus de photogrammétrie

Puisque les réglages diffèrent d'un appareil à l'autre et d'un logiciel à l'autre, il est apparu utile de présenter les points importants à prendre en compte dans le processus. Un oubli dans la chaîne du procédé de prise de vue ou du traitement dans le logiciel peut entraîner une mauvaise reconstruction et des heures de travail supplémentaires. Plusieurs ressources sur la photogrammétrie sont disponibles en ligne, voire certains guides de bonnes pratiques²¹, pour amorcer correctement le processus.

Note : Les recommandations finales, les comparaisons avec d'autres technologies et les conclusions techniques se trouvent au chapitre 6.

Éclairage

Pour éviter le plus possible les ombrages et les reflets, il convient d'utiliser une lumière diffuse et uniforme en la projetant en direction du plafond, sur les murs ou sur des réflecteurs de lumière (ex. : carton ou carton-mousse blanc). S'il est suffisamment petit, on peut également placer l'objet à numériser sur un plateau rotatif à l'intérieur d'une tente blanche et installer des sources lumineuses à l'extérieur de celle-ci. Autre détail important : toujours utiliser des sources d'éclairage de même type (ex. : incandescence, halogène, DEL, etc.) pour garantir un rendu uniforme des couleurs.



Importance des réglages de l'appareil photo

Même si le mode d'exposition automatique de l'appareil photo peut être utilisé, il est préférable de prendre le contrôle de ces réglages en mode manuel pour obtenir une exposition équilibrée. La captation des images en format RAW offre une plus grande plage dynamique pour ajuster les zones claires et les zones sombres en postproduction. De plus, la sensibilité ISO doit être la plus fine possible afin d'éviter une granulosité dans les images de base. Puisqu'il est très difficile d'obtenir des clichés de bonne qualité à main levée, un trépied permet d'utiliser un réglage ISO très bas sans causer de flous malgré une durée d'exposition plus longue.

Par ailleurs, une plus petite ouverture du diaphragme de l'objectif (ex. : f/16 ou f/20 pour les capteurs plein format et f/8 ou f/11 pour les capteurs de petit format) garantit une plus grande profondeur de champ, ce qui est essentiel pour que la plage de focale nette englobe tout l'objet. De plus, si on se tient à la même distance de l'objet pour faire les prises de vue, il est conseillé de régler la mise au point manuellement. Il faut également la fixer (à l'aide d'un ruban collant ou de tout autre dispositif) pour que l'objet demeure dans la bonne plage focale du début à la fin du processus. Cependant, lors de prises de vue en macrophotographie (pour les très petits objets), la mise au point doit être contrôlée à chaque prise de vue pour s'assurer d'obtenir des images nettes.

Lors de la prise de vue, il faut s'assurer qu'aucune zone des images ne soit écrêtée, car les données perdues ne sont pas récupérables

et nuisent au processus d'assemblage. Par ailleurs, l'utilisation d'un appareil photo avec une plage dynamique étendue permet de réduire ces risques d'écrêtage.

Écrêtage (clipping) : élimination de la partie du signal qui dépasse les niveaux supérieur ou inférieur préétablis²². En d'autres termes, il s'agit d'une zone où on ne peut ni récupérer ni modifier l'information des pixels écrêtés.

Notes sur la technique de prise de vue

Il existe deux méthodes pour les prises de vue : faire tourner l'objet ou tourner autour de celui-ci. D'après nos tests, lorsqu'on utilise un plateau rotatif pour photographier un objet, on ne doit voir aucun repère fixe en arrière-plan pour s'assurer que le logiciel distingue bien l'objet (qui tourne) de l'arrière-plan (statique). Pour obtenir un résultat optimal, il convient d'installer un fond uni sans plis comme ceux qui sont habituellement utilisés en studio pour la photographie d'œuvres. On peut apposer un motif détaillé (comme une feuille avec du texte, des lignes franches ou des formes géométriques nettes) sur le plateau rotatif pour ajouter des repères de captation et favoriser un bon alignement des images dans le logiciel. Si, à l'inverse, on photographie un objet fixe en tournant autour, il est idéal d'avoir plusieurs repères visuels fixes en arrière-plan. Ainsi, le logiciel distingue mieux l'objet photographié du fond. Une troisième technique consiste à capter l'objet en simultané dans un dôme ou une structure munie de plusieurs appareils photo qui se déclenchent tous au même moment.

Cependant, à moins d'acheter une solution clés en main, ce processus est très complexe, coûteux et nécessite beaucoup d'espace pour l'installation et le rangement de la structure.

Notes sur la postproduction des images

La création d'un profil de couleurs de l'appareil photo dans le logiciel de traitement favorise un processus de travail de qualité en standardisant le traitement de chaque prise de vue pour éviter les différences de couleurs. Pour que le rendu 3D soit le plus net possible, il est souhaitable d'accentuer légèrement la netteté du détail, ainsi que les textures et la clarté (réglages d'Adobe Camera RAW). Utilisés avec parcimonie, ces réglages permettent d'obtenir une image plus nette, ce qui aide le logiciel de photogrammétrie à assembler précisément les images. Pour éviter d'alourdir le traitement des données, il est suggéré d'exporter et d'utiliser les images en format JPEG de haute résolution plutôt que d'utiliser le format TIFF. Toutefois, les bonnes pratiques consistent à conserver aussi les fichiers au format RAW ou TIFF dans le dossier de projet au cas où un traitement ultérieur serait nécessaire.

Logiciels de traitement des données

Il existe un éventail de logiciels de photogrammétrie capables de donner des résultats professionnels d'une très grande précision. L'utilisation de certains requiert des connaissances approfondies en informatique, et notamment en programmation et en codage. D'autres, comme Reality Capture, guident l'utilisateur pas à pas tout au long du processus. À ce stade-ci, il est difficile de recommander un logiciel

plus qu'un autre, car Reality Capture et Metashape ont été testés en parallèle et tous deux semblent aussi faciles d'approche qu'adaptés à la numérisation 3D des œuvres d'art.

À propos des ordinateurs

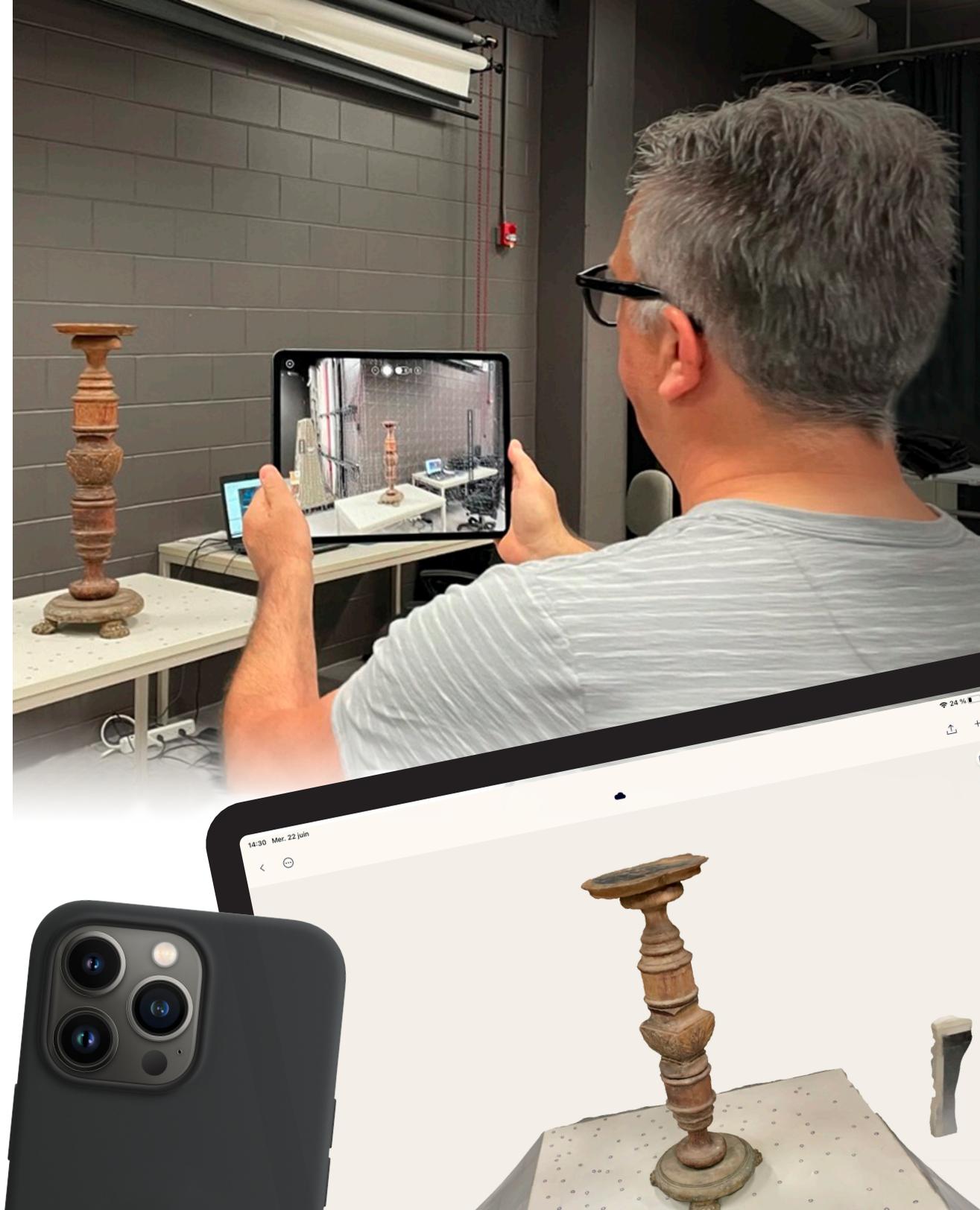
Les procédés de photogrammétrie exigent énormément de puissance de calcul et donc des ordinateurs très performants. Le traitement d'une série d'images pour construire le modèle 3D peut prendre de 3 à 8 heures et jusqu'à 24 heures ou plus selon le nombre et la résolution des images, selon les réglages du logiciel et les spécifications de l'ordinateur utilisé. Certains prestataires offrent la location d'ordinateurs en ligne (machines virtuelles), où l'on peut choisir les spécifications nécessaires à son projet. Cela évite d'investir dans un ordinateur dispendieux alors que le besoin est temporaire. Par exemple, Google offre son service Google Collab²³, qui, selon les avis publiés, est adapté aux projets de photogrammétrie²⁴. Des systèmes de prise de vue automatisés peuvent réduire considérablement le temps de travail en photogrammétrie pour se rapprocher de la durée plus courte de la numérisation 3D avec des appareils à lumière structurée.

Taille des objets et résolution du modèle 3D

En photogrammétrie, la résolution du modèle obtenu dépend du rapport entre la taille de l'objet et la résolution de l'appareil photo en mégapixels. Par exemple, avec un assemblage de 200 images de 45 mégapixels, à échelle égale de 1/1, on ne peut discerner d'aussi fins détails sur un modèle 3D de 10 m de long que sur un modèle 3D d'un petit objet de 10 cm. Donc plus on photographie un objet de grande taille, plus l'appareil utilisé doit avoir une haute résolution pour obtenir la même richesse de détails que lorsqu'on photographie un petit objet.

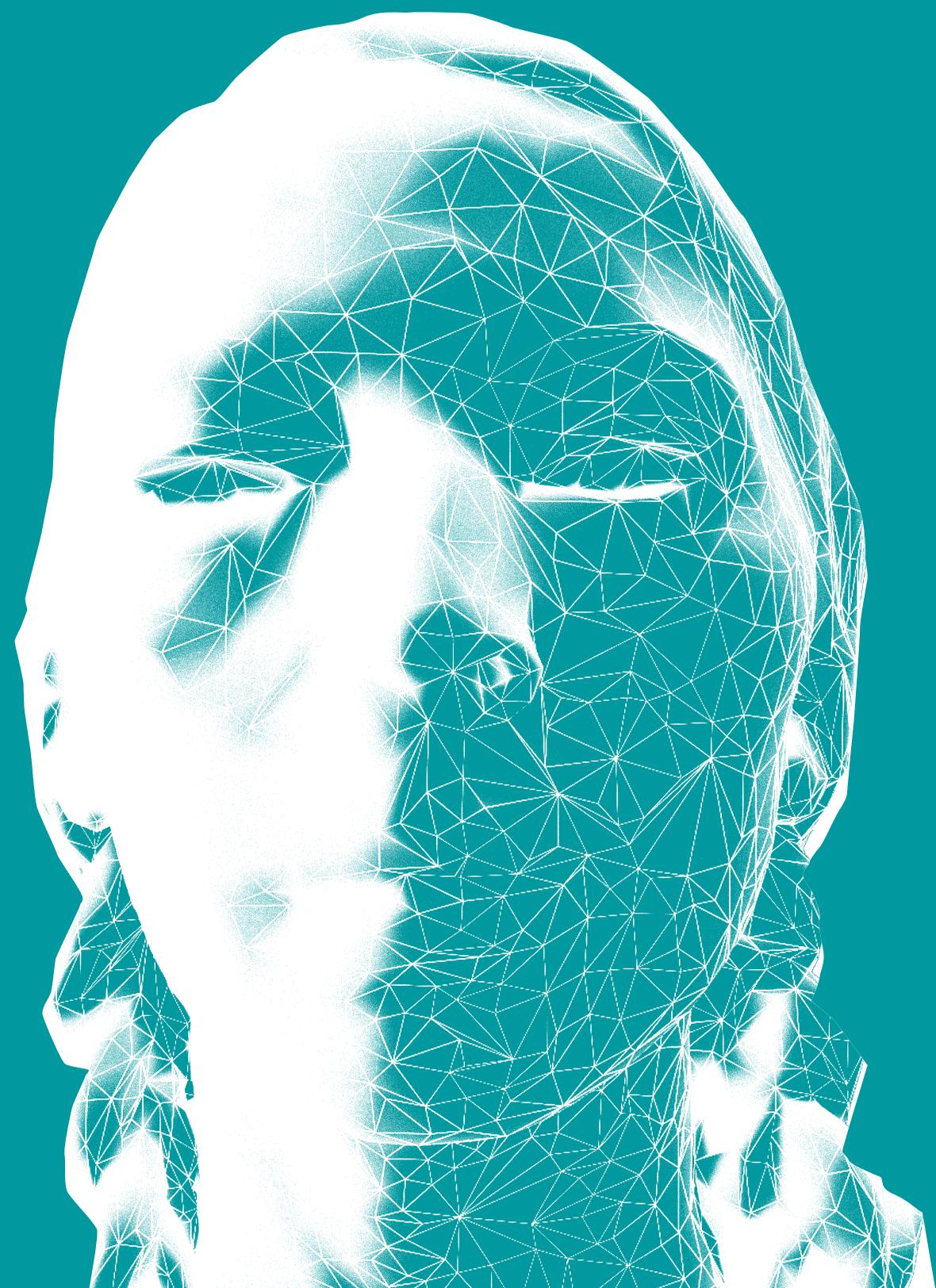
Photogrammétrie sur téléphone mobile

On peut utiliser plusieurs applications, comme Polycam, Scaniverse ou 3D Scanner App, pour produire des modèles 3D en photogrammétrie à partir d'un téléphone mobile ou d'une tablette électronique. Malgré le fait que le résultat soit moins précis qu'avec un traitement à l'ordinateur, la possibilité de créer des modèles directement sur un téléphone s'avère pratique pour partager rapidement des images ou pour prendre des notes visuelles. Comme pour la plupart des technologies de numérisation 3D actuelles, le procédé par téléphone cellulaire restitue moins bien les objets de petite taille (plus petits qu'une chaussure par exemple) ou dont la surface est réfléchissante, ou encore qui comportent de fins éléments aériens (comme les cheveux).



CHAPITRE 6

Comparatifs et recommandations générales



LES RÉSULTATS DES NOMBREUSES EXPÉRIMENTATIONS ONT PERMIS DE COMPARER LES PROCÉDÉS ET DE FORMULER DES RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES.

6.1 Quel procédé choisir?

Le procédé à utiliser dépend de plusieurs facteurs notamment des matériaux, de la quantité d'objets à numériser, des contraintes temporelles, du budget, de l'utilisation souhaitée des modèles 3D, etc. Les deux tableaux ci-dessous présentent la synthèse des avantages et des inconvénients de chacun des procédés expérimentés lors de ce projet :



Avantages et inconvénients de la lumière structurée

AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
<p>Processus rapide : numériser une pièce de 50 x 50 x 50 cm de complexité moyenne ne prend que 45 min.</p> <p>Solution « clés en main » : l'appareil est souvent livré avec son propre logiciel et ses accessoires.</p> <p>Très grande précision volumétrique : les capteurs produisent des rendus de volumes très précis.</p> <p>Instantanéité du rendu visuel : la numérisation apparaît à l'écran en direct, ce qui permet de corriger instantanément les zones problématiques, les manques ou les réglages.</p> <p>Mesures : il est possible d'extraire des mesures de taille très précises sur les modèles 3D produits.</p> <p>Sécurité assurée : processus de numérisation sécuritaire pour les objets et pour les opérateurs.</p>	<p>Perte de certains détails : numérisation difficile des protubérances très fines, des matières filiformes dans l'espace, qui créent des petits trous ou des vides.</p> <p>Matières difficiles, voire impossibles, à capter : surfaces réfléchissantes, lustrées, transparentes ou trop sombres.</p> <p>Prix élevé : entre 5 000 \$ et plus de 50 000 \$ pour un équipement de grande précision.</p> <p>Altération des textures et couleurs : les textures ont souvent un rendu « jeu vidéo » c'est-à-dire artificiel, car elles sont moins précises que la réalité et les couleurs moins fidèles qu'avec la photogrammétrie.</p> <p>Résolution diminuée pour les grands objets : la taille des fichiers produits est proportionnelle à la dimension physique des objets numérisés, obligeant parfois à réduire la résolution de numérisation pour ne pas saturer les appareils et les supports de stockage.</p>

* sans surface réfléchissante ni mince zone creuse ou fin élément aérien

Avantages et inconvénients de la photogrammétrie

AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
<p>Bonne résolution des détails : certains détails sont rendus avec plus de précision et de netteté qu'avec le numériseur 3D (ex. : écritures et textures fines).</p> <p>Zones sombres captées : le fait de travailler à partir de photographies permet d'ajuster l'exposition des zones sombres pour mieux les capturer.</p> <p>Prix des équipements relativement accessibles : contrairement aux autres technologies de numérisation 3D, il est possible de faire de la photogrammétrie avec des équipements peu coûteux. En effet, même si l'utilisation d'un équipement haut de gamme est préférable, un appareil photo de base permet, avec une quantité d'images suffisante (de 100 à 200), d'obtenir de bons résultats.</p> <p>Rendu des textures et couleurs : avec un logiciel de traitement d'image comme Adobe Photoshop, Lightroom, Camera RAW, les couleurs peuvent être ajustées pour obtenir un rendu fidèle à la réalité.</p> <p>Mobilité des appareils : puisque le processus d'acquisition passe par un appareil photo, c'est-à-dire sans fil, les prises de vue peuvent se faire dans n'importe quel lieu (en forêt, en voyage, etc.).</p> <p>Bonne résolution pour les grands objets : la taille des objets numérisés n'influence pas la taille des fichiers produits, qui dépend plutôt de la résolution de l'appareil photo utilisé.</p> <p>Très grande précision volumétrique : tout comme les autres types de numérisation 3D, le processus de photogrammétrie offre une très grande précision.</p> <p>Mesures précises : il est possible d'extraire des mesures de taille très précises sur les modèles 3D produits et d'ajuster l'échelle au besoin.</p> <p>Sécurité assurée : processus de numérisation sécuritaire pour les objets et pour les opérateurs.</p>	<p>Processus long et fastidieux : plusieurs heures sont nécessaires pour réaliser toutes les étapes et s'assurer que chacune d'elles est réussie.</p> <p>Complexité du choix des équipements : le choix d'un ou de plusieurs appareils photo et des logiciels peut s'avérer complexe pour les non-initiés.</p> <p>Obtention tardive du rendu visuel dans le processus : contrairement à la numérisation avec la lumière structurée, le modèle en 3D n'apparaît qu'à la toute fin du processus.</p> <p>Rigueur exigée : une erreur ou un réglage incorrect lors d'une étape peut mener à un échec de construction 3D, qui sera impossible à corriger; tout le processus devra être recommencé.</p>

6.2 Acheter l'équipement ou recourir à la sous-traitance?

La maîtrise des procédés, des réglages des appareils et des logiciels, du traitement informatique et de tous les autres aspects techniques nécessite beaucoup de temps d'apprentissage. En outre, une utilisation régulière des équipements sera indispensable pour maintenir ses connaissances à jour et exploiter au mieux les procédés. Considérant les exigences de cette technologie et les contraintes budgétaires et humaines auxquelles font face les institutions muséales et patrimoniales, faire appel à des prestataires spécialisés qui offrent des services de numérisation 3D peut paraître préférable.

Pour s'équiper en vue d'entreprendre une démarche de numérisation 3D, qu'il s'agisse d'un numériseur 3D ou de la photogrammétrie, l'achat d'un ordinateur puissant sera primordial en prenant soin de vérifier les spécifications nécessaires. Rappelons que la majorité des logiciels sont disponibles sur la plateforme Windows, mais que très peu sont offerts sur Mac.

Les équipements de numérisation sont coûteux et, généralement, la qualité des numérisations est proportionnelle à la qualité du matériel utilisé et donc à son prix. Qu'il s'agisse d'un numériseur 3D à lumière structurée ou d'appareils photo de qualité, plus le prix est élevé, plus la précision et la qualité de rendu sont grandes. Plusieurs ressources en ligne permettent de comparer les appareils²⁵, mais consulter un spécialiste permet de faire les meilleurs choix.

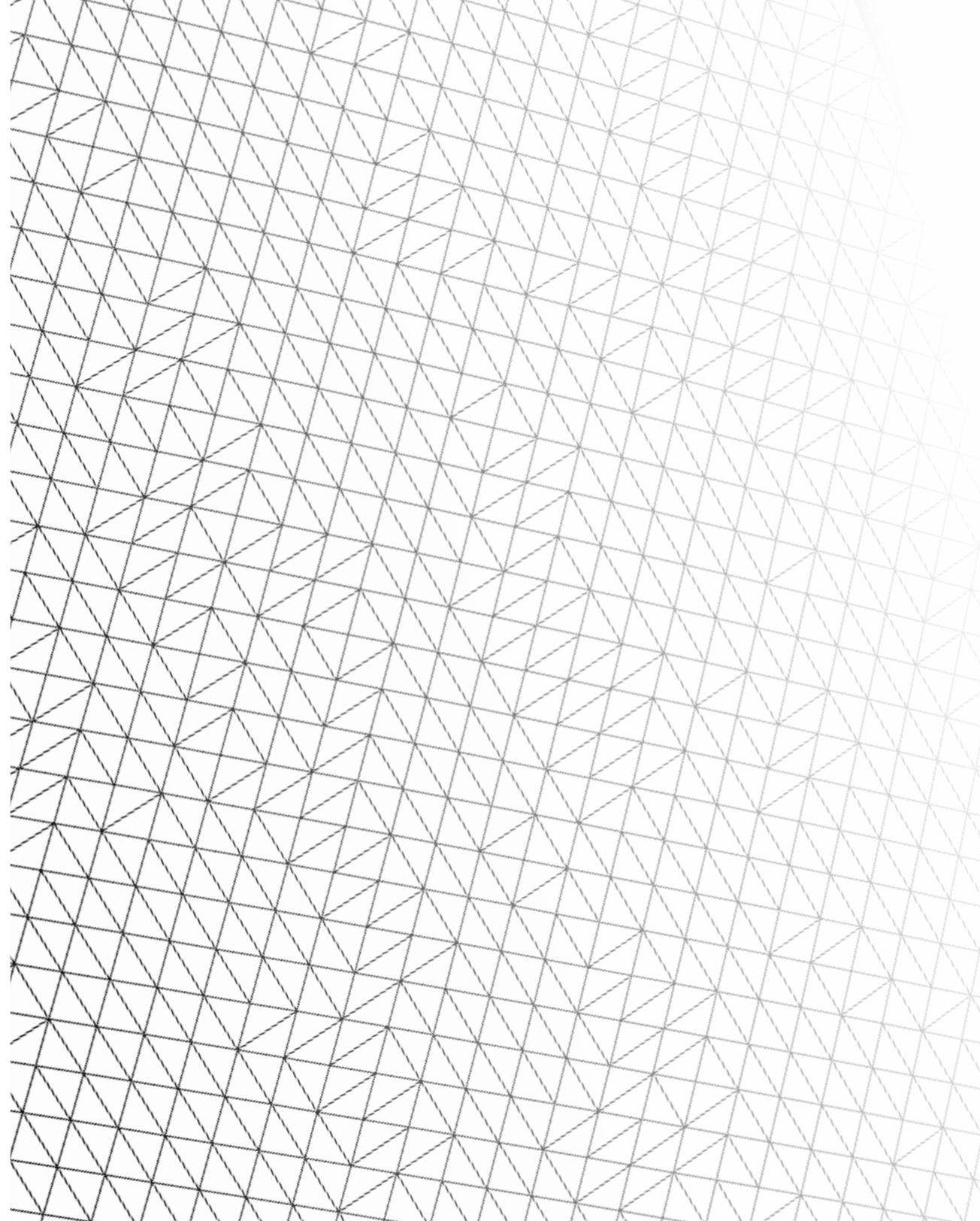
Faire affaire avec un sous-traitant est aussi une bonne solution, car en plus de la numérisation, le contrat de service peut comprendre la préparation des fichiers numériques pour la diffusion Web, la gestion des projets pour l'archivage, la production de plans à l'échelle, la prise de mesures ou autres.

6.3 Quels sont les limites et le futur de la numérisation 3D?

Les techniques de numérisation 3D évoluent à un rythme effréné. Outre la numérisation par lumière structurée, par photogrammétrie, par laser ou par une combinaison de plusieurs techniques, on voit apparaître quelques nouveautés expérimentales comme les technologies qui utilisent les algorithmes de NeRF (Neural Radiance Fields). Comme le révèlent certains travaux récents²⁶, ces nouvelles applications développées avec l'aide de l'intelligence artificielle ont le potentiel d'apporter une nouvelle manière plus rapide et plus précise de traiter les données pour numériser en 3D.

Par ailleurs, l'évolution de la numérisation 3D par téléphone cellulaire et tablette électronique laisse entrevoir des percées importantes dans les prochaines années. Outre l'utilisation de ces appareils pour prendre des photos et les traiter sur ordinateur, des applications permettent maintenant de numériser des objets en 3D presque en temps réel. Puisque celles-ci n'exigent pas des opérateurs de comprendre, ni d'effectuer, ni de maîtriser toutes les étapes de traitement à l'ordinateur, ces applications du futur rendront assurément la numérisation 3D accessible à tous.

Conclusion

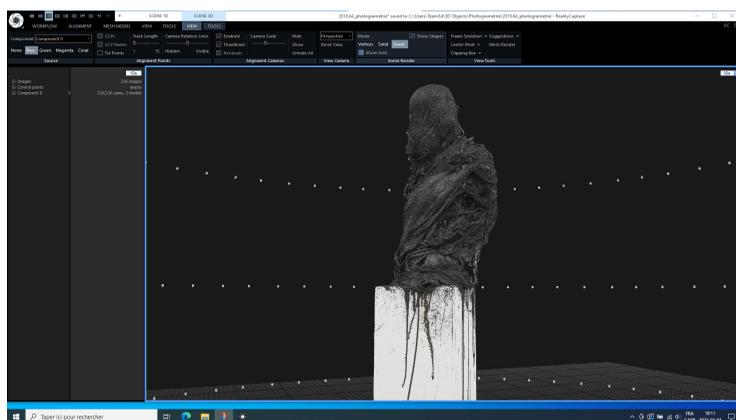


CE GUIDE A PRÉSENTÉ SOMMAIREMENT LA NUMÉRISATION 3D DES ŒUVRES D'ART, SES APPLICATIONS, LES MANIÈRES DE PROCÉDER AINSI QUE CE QU'ELLE IMPLIQUE EN TERMES DE TEMPS.

Les nombreuses possibilités de cette technologie offrent des perspectives intéressantes aux musées, aux organismes culturels et patrimoniaux ainsi qu'aux artistes. Il s'agit d'un domaine en pleine effervescence et en pleine mutation, qui s'imposera dans plusieurs champs d'activités au cours des prochaines années. Il est donc opportun de découvrir ou de mettre à jour les connaissances des équipes afin de faire évoluer les institutions culturelles avec leur temps.

L'univers de la numérisation 3D ne saurait avoir été entièrement exploré lors de ce projet. La bibliographie qui suit propose des liens pertinents vers des ressources variées : projets de recherche, publications universitaires, sites Web à caractère technique, etc. qui compléteront ce guide de numérisation 3D d'œuvres d'art.

L'équipe du projet adresse ses remerciements renouvelés au ministère de la Culture et des Communications du Québec pour son soutien financier, à la direction du MNBAQ et à toutes les personnes ayant participé à cette étude.



Bibliographie

RESSOURCES PERTINENTES EN LIGNE

La plus grande plateforme en ligne gratuite pour héberger et regarder des modèles numérisés en 3D, Sketchfab, [en ligne], <https://sketchfab.com/>

Portail 3D du musée Smithsonian, un des pionniers de la numérisation 3D en contexte muséal, Smithsonian 3D Digitization, [en ligne], <https://3d.si.edu/>

3D Scan expert Reviews, tips, inspiration & consultancy service , [en ligne], <https://3dscanexpert.com/>

Site Web de nouvelles sur l'industrie de l'impression et de la numérisation 3D, All3DP [en ligne], <https://all3dp.com/pro/>

Caractéristiques et bonnes pratiques en photogrammétrie, 12 août 2018
<https://panorama.ulb.ac.be/caracteristiques-bonnes-pratiques-photogrammetrie/>

Comment fonctionne la photogrammétrie?
<https://numerisation3d.construction/fonctionnement-photogrammetrie/?v=7516fd43adaa>

Lidar sur Wikipédia
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Lidar>

Relevés 3D de bâtiments et d'ouvrages par lidar (lasergrammétrie)
<https://www.sintegra.fr/prestation-topographie-cartographie/topographie-terrestre/lidar-terrestre/>

GRASSARD, François. Meshroom : créez des objets 3D à partir de photos, grâce à une solution libre
<https://www.youtube.com/watch?v=CxKzHJEff4w>

Full photogrammetry guide for 3D artists
<https://80.lv/articles/full-photogrammetry-guide-for-3d-artists/>

Crozier Fine Arts and Arius Technology launch a new platform for the art world, 2021
<https://www.digitalmeetsculture.net/article/crozier-and-arius-technology-new-platform/>

Vancouver-based ArtTech Company Arius Technology Strengthens IP Portfolio with Important New Fine Art Colour Imaging Patent, 2021
<https://www.bctechnology.com/news/2021/6/15/Vancouver-based-ArtTech-Company-Arius-Technology-Strengthens-IP-Portfolio-with-Important-New-Fine-Art-Colour-Imaging-Patent.cfm>

CHAKRAVORTY, Dibya. OBJ file format – all you need to know
<https://all3dp.com/1/obj-file-format-3d-printing-cad/>

All You Need to Know About 3D Point Clouds, 2021
<https://blog.hexagongeosystems.com/all-you-need-to-know-about-3d-point-clouds/>

THOMPSON, Charles. Reality capture 101: point clouds, photogrammetry and LiDAR
<https://info.vercator.com/blog/reality-capture-101-point-clouds-photogrammetry-and-lidar>

CARLOTA, V. Laser Scanner vs Structured Light Scanner: which should you choose?, 2019
<https://www.3dnatives.com/en/laser-3d-scanner-vs-structured-light-3d-scanner-080820194/>

Liste des plateformes Web où l'on peut héberger une visionneuse Sketchfab
<https://help.sketchfab.com/hc/en-us/sections/360005222518-Embedding-models-on-web-platforms>

<iframe> : l'élément de cadre intégré
<https://developer.mozilla.org/fr/docs/Web/HTML/Element/iframe>

Atelier Factum Arte : guide pour la numérisation avec lumière structurée
https://www.factumfoundation.org/pag_fa/1414/structured-or-white-light-scanning

GONZALES, Bebay. 3d technology for the making of replicas and mounts

https://www.mountmakersforum.net/_files/ugd/5679a7_67ec8dea874d430fa1e257139c465d59.pdf

SMITHSONIAN DIGITIZATION PROGRAM OFFICE, How to build partnerships for museum digitization
<https://dpo.si.edu/blog/how-build-partnerships-museum-digitization-2020>

SMITHSONIAN DIGITIZATION PROGRAM OFFICE, Smithsonian 3d metadata model
<https://www.dpo.si.edu/blog/smithsonian-3d-metadata-model>

BLUNDELL, Jon. Program specialist with the Smithsonian Digitization Program Office, collects 3D data on Neil Armstrong's Apollo 11 extra-vehicular activity (EVA) glove
<https://airandspace.si.edu/multimedia-gallery/3d-scanning-armstrong-eva-glove-nasm2016-00776>

SMITHSONIAN NATIONAL AIR AND SPACE MUSEUM, Digitization
<https://airandspace.si.edu/digitization>

7e forum international Mountmakers
<https://www.mountmakersforum.net/7th-international-mountmakers-forum>

ALEX, M. Les scanners 3D par triangulation laser, on vous explique tout!, 2016
<https://www.3dnatives.com/3d-triangulation-laser-29042016/#!>

How does a 3D scanner work?

<https://www.capture3d.com/knowledge-center/blog/how-does-a-3d-scanner-work>

Types of 3d scanning technologies : comparison, advantages and applications

<https://bitfab.io/blog/types-of-3d-scanning/>

CHAMBERS, Jerome. Les meilleures applis de scan 3D de 2022 (Android / iPhone)

<https://all3dp.com/fr/2/appli-scan-3d-android-iphone-numerisation-3d/>

AB3D. Run Meshroom on any Computer For Free on Google Colab

<https://www.blendernation.com/2020/08/21/non-blender-run-meshroom-on-any-computer-for-free-on-google-colab/>

KITE-POWELL, Jennifer. How technology is helping the art world protect itself

<https://www.forbes.com/sites/jenniferhicks/2022/01/31/how-technology-is-helping-the-art-world-protect-itself/?sh=13ee9c54171e>

Scene modeling with Visual Structure from motion

<https://www.cs.cmu.edu/~reconstruction/index.html>

INSTITUT CANADIEN DE CONSERVATION. Éclairage à DEL dans les musées, Bulletin technique 36

<https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/conservation-preservation-publications/technical-bulletins/led-lighting-museums.html#a8>

DENOYEL, Alban. Blog du fondateur et PDG de Sketchfab

<https://albn.medium.com/>

LiDAR vs Photogrammetry: Which is better for point cloud creation?

<https://www.mosaic51.com/technology/lidar-vs-photogrammetry-which-is-better-for-point-cloud-creation/>

A digital archaeologist helps inaccessible collections be seen

<https://theconversation.com/a-digital-archaeologist-helps-inaccessible-collections-be-seen-123672>

CORBETT, Jeremy. The Battle of File Formats: STL vs OBJ vs PLY

<https://blog.medit.com/medit/the-battle-of-file-formats-stl-vs-obj-vs-ply>

CAROLO, Lucas, STL vs OBJ (File Formats): The Differences

<https://all3dp.com/2/obj-vs-stl-file-format-differences/>

TAN, Cherie Blender NURBS Modeling: Simply Explained

<https://all3dp.com/2/blender-nurbs-modeling/>

PLY – Polygon file format

<http://paulbourke.net/dataformats/ply/>

OBJ – object files

<http://paulbourke.net/dataformats/obj/>

LIBRARY OF CONGRESS. Polygon file format – PLY

<https://www.loc.gov/preservation/digital/formats/fdd/fdd000501.shtml>

Instant Neural Graphics Primitives with a Multiresolution Hash Encoding
<https://nvlabs.github.io/instant-ngp/>

Computer graphics and deep learning with NeRF tusing TensorFlow and Keras
<https://keras.io/examples/vision/nerf/>

Computer graphics and deep learning with NeRF tusing TensorFlow and Keras Part 2
<https://pyimagesearch.com/2021/11/17/computer-graphics-and-deep-learning-with-nerf-using-tensorflow-and-keras-part-2/>

Run photogrammetry in the cloud
<https://www.instructables.com/Run-Photogrammetry-in-the-Cloud/>

Photogrammetry: Step-by-Step Guide and Software Comparison
<https://formlabs.com/blog/photogrammetry-guide-and-software-comparison/>

A brief history of 3D scanning
<https://matterandform.net/blog/a-brief-history-of-3d-scanning>

MALOY SMITH, Grant Qu'est-ce que l'acquisition de données -DAQ ou DAS?
<https://dewesoft.com/fr/daq/c-quoi-l-acquisition-donnees->

TRAVAUX DE RECHERCHE CONSULTÉS

YU, Alex, FRIDOVICH-KEIL Sara, TANCIK, Matthew, CHEN Qin hong, RECHT, Benjamin, KANAZAWA, Angjoo Plenoxels: Radiance Fields without Neural Networks
<https://arxiv.org/abs/2112.05131>

Ultra high-resolution 3D laser color imaging of paintings: the Mona Lisa by Leonardo da Vinci, 2017BLAIS, François, et coll., 2007
<https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/accepted/?id=8f3c5c14-2ab8-47c4-865c-e1c76d35effd>

A Framework for using photogrammetry in 3D scanning, 2020
https://www.researchgate.net/publication/348587415_A_Framework_for_Using_Photogrammetry_in_3D_Scanning

High definition 3d-scanning of arts objects and paintings
https://www.researchgate.net/publication/240804124_HIGH_DEFINITION_3D-SCANNING_OF_ARTS_OBJECTS_AND_PAINTINGS

CONDORELLI, Francesca & RINAUDO, FULVIO & SALVADORE, FRANCESCO & TAGLIAVENTI, S. (2021). A comparison between 3d reconstruction using nerf neural networks and mvs algorithms on cultural heritage images
https://www.researchgate.net/publication/352830541_A_COMPARISON_BETWEEN_3D_RECONSTRUCTION_USING_NERF_NEURAL_NETWORKS_AND_MVS_ALGORITHMS_ON_CULTURAL_HERITAGE_IMAGES

Comparison of three 3D scanning techniques for paintings, as applied to Vermeer's 'Girl with a Pearl Earring'
https://www.researchgate.net/publication/337009067_Comparison_of_three_3D_scanning_techniques_for_paintings_as_applied_to_Vermeer%27s_%27Girl_with_a_Pearl_Earring%27

MILAN Edl; MAREK Mizerák; JOZEF Trojan. 3D laser scanners: history and applications
https://www.actasimulatio.eu/issues/2018/IV_2018_01_Edl_Mizerak_Trojan.pdf

EBRAHIM, Mostafa A-B. 3D laser scanners: history, applications and future
https://www.researchgate.net/publication/267037683_3D_LASER_SCANNERS_HISTORY_APPLICATIONS_AND_FUTURE

MONTUSIEWICZ, J., MIŁOSZ, M., KĘSIK, J. et Al. Structured-light 3D scanning of exhibited historical clothing, a first-ever methodical trial and its results, Herit Sci 9, article 74, 2021
<https://heritagesciencejournal.springeropen.com/articles/10.1186/s40494-021-00544-x>

AMITY SCHOOL OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY, Laser Triangulation for 3D Profiling of Target, 2011
<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.736.1655&rep=rep1&type=pdf>

Color influence on accuracy of 3D scanners based on structured light, 2006
https://www.researchgate.net/publication/228802199_Color_influence_on_accuracy_of_3D_scanners_based_on_structured_light

SHEA, Brian Kevin. Best practices for three-dimensional laser scanning of cultural heritage, 2013
<https://ufdc.ufl.edu/UFE0046402/00001>

Notes de fin

- 1 <https://dewesoft.com/fr/daq/c-quoi-l-acquisition-donnees>; (consulté le 31 mars 2022)
- 2 Définition de modèle 3D https://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=2076210; (consulté le 7 avril 2022)
- 3 Entrevue sur le podcast White Rabbit Web XR avec Alban Denoyel, à 6 min 50 s. <https://anchor.fm/vhiterabbit/episodes/Episode-037-with-Alban-Denoyel-Founding-Sketchfab--3D-scanning-and-much-more-eskOdk/a-a19hd96>; (consulté le 19 février 2022)
- 4 Définition de visualiseur et visionneuse : https://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=2075210; (consulté le 31 mars 2022)
- 5 Définition de Sketchfab : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Sketchfab>; (consulté le 31 mars 2022)
- 6 https://shop3d.ca/products/aesub-3d-scanning-spray-pre-order?_pos=1&_sid=759cb93d6&_ss=r (consulté le 9 mai 2022)
- 7 <https://all3dp.com/fr/professionnel/>; (consulté le 27 mai 2022)
- 8 Définition de lidar sur le site de l'Office québécois de la langue française : https://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8351812; (consulté le 10 février 2022)
- 9 Définition de maillage sur le site de l'Office québécois de la langue française : https://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=26557694; (consulté le 12 avril 2022)
- 10 Définition de nuage de points sur Wikipédia : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Nuage_de_points_\(g%C3%A9om%C3%A9trie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Nuage_de_points_(g%C3%A9om%C3%A9trie)); (consulté le 10 avril 2022)
- 11 Définition de triangulation sur l'Office québécois de la langue française https://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8385851; (consulté le 7 avril 2022)
- 12 <https://www.capture3d.com/knowledge-center/blog/how-does-a-3d-scanner-work>; (consulté le 26 janvier 2022)
- 13 Les cartes graphiques de la société Nvidia utilisant la technologie CUDA sont souvent requises par les logiciels de photogrammétrie.
- 14 Définition de lux sur le site de l'Office québécois de la langue française : https://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=2081105; (consulté le 7 avril 2022)
- 15 Notes sur la dégradation due à l'exposition à la lumière, disponibles sur <https://objet.canada.ca/fr/institut-conservation/services/agents-deterioration/lumiere.html>; (consulté le 21 février 2022)
- 16 Voir www.blender.org/
- 17 Voir www.meshlab.net
- 18 <https://fr.wikipedia.org/wiki/Photogrammétrie>; (consulté le 24 janvier 2022)
- 19 Aujourd'hui automatisé, on l'appelle « appareil de restitution analytique ». Voir https://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=17022551; (consulté le 11 avril 2022)
- 20 <https://www.raspberrypi.com/products/camera-module-v2/>; (consulté le 15 mars 2022)
- 21 <https://panorama.ulb.ac.be/caracteristiques-bonnes-pratiques-photogrammetrie/>; (consulté le 1er novembre 2021)
- 22 Définition d'écrêtage selon l'Office québécois de la langue française : https://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8886049; (consulté le 27 mars 2022)
- 23 Voir <https://colab.research.google.com/>; (consulté le 27 mars 2022)
- 24 <https://www.blendernation.com/2020/08/21/non-blender-run-meshroom-on-any-computer-for-free-on-google-colab/>; (consulté le 10 février 2022)
- 25 Voir le site Web All3DP à l'adresse suivante <https://all3dp.com/pro/>
- 26 Voir https://www.researchgate.net/publication/352830541_A_COMPARISON_BETWEEN_3D_RECONSTRUCTION_USING_NERF_NEURAL_NETWORKS_AND_MVS_ALGORITHMS_ON_CULTURAL_HERITAGE_IMAGES; (consulté le 25 mars 2022)

Annexe des images présentées

Couverture :

Nuna Parr, *Ours polaire*, 2002. Serpentinite, 29,3 x 42,6 x 42,4 cm. Collection du Musée national des beaux-arts du Québec, Collection d'art inuit Brousseau, achat grâce à une contribution spéciale d'Hydro-Québec (2005.1950) © Dorset Fine Arts (Détails montrant différents aspects visuels de la sculpture numérisée en 3D. Images tirées du logiciel VX Éléments de Creaform.)



Jean Paul Riopelle, *Le Chien*, 1969-1970, fonte 1974. Bronze, 4/4, 56,5 x 71 x 50 cm. Collection du Musée national des beaux-arts du Québec, Don de Claude et Lisette Boyer (1999.321). Photo : Denis Legendre, MNBAQ. © Succession Jean Paul Riopelle / SOCAN (2022) (Image graphique de la démonstration des lignes de lumière projetées sur l'œuvre pour la numérisation 3D utilisant la lumière structurée.)



Sylvia Daoust, *Bedawbenokwa, jeune Huronne*, 1936. Plâtre patiné, 44,5 x 25 x 22,5 cm. Collection du Musée national des beaux-arts du Québec, Don de l'artiste (1974.71) © Succession Sylvia Daoust (Photographie de la sculpture et vue de la modélisation 3D avec le logiciel VX Éléments de Creaform.)



Page 4 :

Graphique représentant les 3 axes de l'espace tridimensionnel.

Page 7 :

H. C. White Co., pour Sears Roebuck Co. Stéréographoscope de type « Holme », breveté en 1889, fabriqué vers 1895-1896. Cerisier, érable, laiton et verre, 10,5 x 18,5 x 21,5 cm. Collection du Musée national des beaux-arts du Québec, Transfert à la suite d'un achat à l'occasion d'une exposition au Musée national des beaux-arts du Québec (CE.2008.06)



Photo du numériseur 3D Creaform GoScan Spark.

Support pour capter un objet avec plusieurs appareils photo. Photo : MNBAQ.

Page 9 :

Louis Archambault, *L'Appel*, 1946. Terre cuite, 39,4 x 18,8 x 29,8 cm. Collection du Musée national des beaux-arts du Québec, Achat lors des Concours artistiques de la province de Québec (1^{er} prix, sculpture) (1948.86) © Succession Louis Archambault / SOCAN (2022). (Numérisation 3D de la sculpture avec le logiciel Reality Capture.)



Page 12 :

Gatien Moisan, *Tête*, 1963. Faïence, bois et métal, 44,8 x 31,7 x 13,5 cm. Collection du Musée national des beaux-arts du Québec, Achat (1963.154) © Succession Gatien Moisan (Capture d'écran du modèle numérisé en 3D tirée du logiciel Creaform VX Scan.)



Page 13 :

Nuna Parr, *Ours polaire*, 2002. Serpentinite, 29,3 x 42,6 x 42,4 cm. Collection du Musée national des beaux-arts du Québec, Collection d'art inuit Brousseau, achat grâce à une contribution spéciale d'Hydro-Québec (2005.1950) © Dorset Fine Arts (Détails montrant différents aspects visuels de la sculpture numérisée en 3D. Image tirée du logiciel VX Éléments de Creaform.)

Page 16 :

Nuna Parr, *Ours polaire*, 2002. Serpentinite, 29,3 x 42,6 x 42,4 cm. Collection du Musée national des beaux-arts du Québec, Collection d'art inuit Brousseau, achat grâce à une contribution spéciale d'Hydro-Québec (2005.1950) © Dorset Fine Arts (Détails montrant différents aspects visuels de la sculpture numérisée en 3D. Images tirées du logiciel VX Éléments de Creaform.)

Page 17 :

Détails montrant les polygones du maillage d'un objet numérisé en 3D. Image tirée du logiciel VX Éléments de Creaform.

Page 18 :

Jean Paul Riopelle, *Le Chien*, 1969-1970, fonte 1974. Bronze, 4/4, 56,5 x 71 x 50 cm. Collection du Musée national des beaux-arts du Québec, Don de Claude et Lisette Boyer (1999.321). Photo : Denis Legendre, MNBAQ. © Succession Jean Paul Riopelle / SOCAN (2022) (Image graphique de la démonstration des lignes de lumière projetées sur l'œuvre pour la numérisation 3D utilisant la lumière structurée.)

Page 19 :

Jean Paul Riopelle, *Le Chien*, 1969-1970, fonte 1974. Bronze, 4/4, 56,5 x 71 x 50 cm. Collection du Musée national des beaux-arts du Québec, Don de Claude et Lisette Boyer (1999.321) © SOCAN (Image graphique de la démonstration des lignes de lumière projetées sur l'œuvre pour la numérisation 3D utilisant la lumière structurée. Photo : Denis Legendre, MNBAQ. © Succession Jean Paul Riopelle / SOCAN (2022) (Démonstration des lignes de lumière projetées sur l'œuvre pour la numérisation 3D utilisant la lumière structurée.)

Page 23 :

Cathy Strokowsky, *Woven Bowl with Red Beads and Quills*, 2001. Verre soufflé, billes de verre, fil métallique, fil ciré et piquants de porc-épic, 17 cm (hauteur) x 14 cm (diamètre). Collection du Musée national des beaux-arts du Québec, Achat pour la collection Prêt d'œuvres d'art du Musée national des beaux-arts du Québec (CP.2002.38) © Cathy Strokowsky (Modélisation de la sculpture numérisée en 3D. Image tirée du logiciel VX Éléments de Creaform.)



Page 26 :

Installation des équipements de prise de vue préparatoire au processus photogrammétrique. Photo : Idra Labrie, MNBAQ.

Page 27 :

Laura Donefer, *Panier « Bonnechance » arc-en-ciel*, 2010. Verre soufflé façonné au chalumeau et matériaux divers, 53,5 x 37 x 24,5 cm. Collection du Musée national des beaux-arts du Québec, Achat grâce à un don de Jean et Denise L. Bissonnette (2010.215) © Laura Donefer (Documentation du procédé de prise de vue de photogrammétrie et vue de la sculpture numérisée en 3D dans l'environnement de travail du logiciel de photogrammétrie Reality Capture.)



Page 28 :

Stanley Février, *cette chair*, 2017-2019. Plâtre, cire, mousse de polyuréthane et peinture à l'huile, 143 x 92 x 66,5 cm. Collection du Musée national des beaux-arts du Québec, Achat (2019.1040) © Stanley Février (Vue de la sculpture numérisée en 3D dans l'environnement de travail du logiciel de photogrammétrie Reality Capture.)



Page 29 :

Jean Paul Riopelle, *Chicago II*, 1958. Huile sur toile, 250 x 300 cm. Collection du Musée national des beaux-arts du Québec, Cession à la faveur d'une contribution spéciale du ministère de la Culture et des Communications du Québec (2001.154) © Succession Jean Paul Riopelle / SOCAN (2022) (Documentation du processus de photographie de la toile en vue du travail de photogrammétrie.)



Page 32 :

Inconnu, *Porte-plante bilobé*, entre 1800 et 1850. Bois décapé et métal, 86,2 x 31,5 x 30,4 cm. Collection du Musée national des beaux-arts du Québec, Acquisition en 1961 (1961.50) (Photomontage présentant la photogrammétrie avec appareil mobile.)



Page 33 :

Sylvia Daoust, *Bedawbenokwa, jeune Huronne*, 1936. Plâtre patiné, 44,5 x 25 x 22,5 cm. Collection du Musée national des beaux-arts du Québec, Don de l'artiste (1974.71) © Succession Sylvia Daoust (Vue du modèle 3D optimisé de la sculpture dans le logiciel VX Éléments de Creaform.)

Page 34 :

Images montrant un numériseur 3D à lumière structurée et un appareil photo utilisé pour le procédé de photogrammétrie.

Page 38 :

Caroline Monnet, *Juno I*, 2017. Goudron, acrylique, cheveux synthétiques et bois, 190 x 43,5 x 45 cm. Collection du Musée national des beaux-arts du Québec, Achat (2018.64) © Caroline Monnet (Vue de la sculpture numérisée en 3D dans l'environnement de travail du logiciel de photogrammétrie Reality Capture.)



Stanley Février, *cette chair*, 2017-2019. Plâtre, cire, mousse de polyuréthane et peinture à l'huile, 143 x 92 x 66,5 cm. Collection du Musée national des beaux-arts du Québec, Achat (2019.1040) © Stanley Février (Documentation du processus de numérisation 3D de la sculpture.)

Crédits

Une publication produite par le Musée national des beaux-arts du Québec avec le soutien du ministère de la Culture et des Communications du Québec.

Musée national des beaux-arts du Québec

Parc des Champs-de-Bataille
Québec (Québec) G1R 5H3
www.mnbaq.org

Copyright

© Musée national des beaux-arts du Québec, 2022

Tous droits réservés. La reproduction d'un extrait de ce livre, par quelque procédé que ce soit, est interdite sans une autorisation écrite de l'éditeur et constitue une infraction sanctionnée par la Loi sur le droit d'auteur.

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
ISBN 978-2-550-92458-6

Le Guide de numérisation 3D d'œuvres d'art bénéficie du soutien financier du gouvernement du Québec.



Le Musée national des beaux-arts du Québec est une société d'État subventionnée par le gouvernement du Québec.



PUBLICATION

Rédaction

Martin Guimont

Équipe technique

Martin Guimont, Louis Hébert, Idra Labrie et Denis Legendre

Équipe de gestion

Catherine Gaumond, Patrick Lefebvre, Jean-Sébastien Picard, Marie-Hélène Raymond et Nathalie Thibault

Révision linguistique

Sandra Dubois

Révision rédactionnelle

Catherine Gaumond, Louis Hébert, Idra Labrie, Patrick Lefebvre, Denis Legendre, Marie-Hélène Raymond et Nathalie Thibault

Iconographie

Jean-François Boisvert, Martin Guimont, Louis Hébert, Idra Labrie et Denis Legendre

Droits d'auteur

Jessica Bélanger Vallières, Marc Lajoie et Nathalie Thibault

Correction d'épreuves

Claire Lehouillier

Conception graphique

Jean-François Boisvert

Diffusion et distribution

Musée national des beaux-arts du Québec et ministère de la Culture et des Communications du Québec