

Université Paris 8

Master Création Numérique

parcours : *Arts et Technologies de l'Image Virtuelle*

Photogrammétrie et numérisation du patrimoine

Paul FRUCTUS



Mémoire de Master 2, 2018 – 2019

Résumé

Dans ce mémoire, je me suis intéressé de près à la photogrammétrie, son histoire, ses applications et comment la pratiquer. De ce fait, j'ai étudié et comparé les différentes méthodes de numérisation. Je me suis principalement attaché à l'utilisation de la photogrammétrie dans le cadre de la reconstitution numérique du patrimoine. L'archivage numérique est en constante évolution depuis ces dernières décennies. La photogrammétrie sera probablement la technique de numérisation 3D la plus populaire dans les prochaines années, grâce à la démocratisation de la photographie numérique. Suite à mes différentes expérimentations, j'ai étudié la photogrammétrie à travers des projets concrets. J'ai ensuite appris à nettoyer le modèle brut produit par cette technique. Au final, je me suis rendu compte de tout ce que ce procédé peut apporter pour la recherche.

Abstract

This essay is about photogrammetry, its history, its applications and how to practice it. I studied and compared different techniques of numerisation. I was mostly interested using photogrammetry as part of digital heritage reconstruction. Digital archiving has been in constant evolution for several decades. Photogrammetry will probably be the most popular 3D scanning technique for years to come, thanks to the democratization of digital photography. I studied photogrammetry over different experiments. After that, I learned how to clean the raw models that this technique produces. Finally, I grasped all the possibilities that this process can grant to scientific research.

Remerciement

Tout d'abord, un grand merci à Bruno d'avoir alimenté le fruit de ma réflexion ces dernières années et pour sa relecture active.

Ensuite, je tiens à remercier ma famille et mes amis, tout particulièrement Florian, Martin, Aurino, Djibril et Anton pour m'avoir soutenu et de s'être autant intéressé à mes productions ses dernières années d'études.

Et puis merci à l'équipe enseignante d'ATI et à mes camarades de classe.

Plan Mémoire

<u>Introduction</u>	4
<u>I- Etat de l'art</u>	5
<u>Introduction</u>	5
<u>A - La numérisation</u>	5
1- Tomographie et radiographie	6
2- Lasergrammétrie	8
3- Réflectance	10
<u>B - La photogrammétrie</u>	13
1- Photogrammétrie analytique	14
2- Photogrammétrie numérique	18
3- Procédé	19
<u>C - Le patrimoine</u>	25
1- Quels sont les différents types de patrimoine ?	26
2- Quelle est la législation autour de la numérisation ?	30
3- Analyses d'œuvres	35
<u>Conclusion</u>	48
<u>II - De la conception à la finalisation d'une œuvre</u>	49
<u>Introduction</u>	49
<u>A- Prise de vue</u>	53
1- Intérieur	53
2- Extérieur	58
3- Intérieur et extérieur	60
<u>B- Traitement des photos</u>	61
1- Alignement des photos	61
2- Triangularisation du modèle	63
<u>C- Nettoyage du modèle 3D</u>	67
1- Topologie	69
2- Texture	72
<u>Conclusion</u>	74
<u>Conclusion</u>	75
<u>Annexes</u>	76
<u>Bibliographie</u>	76
<u>Webographie</u>	76
<u>Vidéographie</u>	80
<u>Ludographie</u>	81
<u>Index des illustrations</u>	81

Introduction

Comment optimiser la photogrammétrie dans la numérisation du patrimoine ?

Le patrimoine culturel a toujours été au centre de mes inspirations artistiques. Sa reproduction graphique peut énormément apporter pour la compréhension de celui-ci. La réappropriation des codes, des sujets, ou de l'architecture des anciens est un apport à la création actuelle. Depuis plusieurs années, je m'intéresse à la reproduction du réel que ce soit dans le domaine de l'architecture ou de la représentation en volume. L'histoire de l'objet d'étude est aussi important que les techniques utilisées pour le représenter. Avant de m'attacher aux méthodes de numérisation, la seule façon dont j'avais connaissance pour reproduire numériquement des oeuvres était la modélisation 3D. Cette méthode a des limites car comparée au scan, il y a forcément une interprétation artistique. Cette technique nécessite une documentation de référence comme des photographies, des plans d'architectes ou des croquis d'oeuvres pour les sujets les plus abîmés ou disparus.

Lorsque je me suis renseigné sur la photogrammétrie, je me suis rendu compte que cette technique permettait une reproduction du réel plus précise et pouvait aussi créer des documents de références. Ainsi, ce procédé est utilisé depuis presque un siècle dans la reproduction et la conservation du patrimoine. La photogrammétrie est la pratique de numérisation la plus démocratisée de nos jours car la majorité des personnes a accès à un ordinateur et à un appareil photo, certaines applications mobiles permettant même de traiter les données photographiques et de les traduire en modèle 3D.

Les réseaux sociaux et Google s'intéressent de plus en plus à la visualisation de modèle 3D, on peut citer comme exemple la création de Poly, une bibliothèque de visionnage d'objets 3D¹, par Google, ainsi que la possibilité d'intégrer dans son fil d'actualité Facebook des modèles 3D². Depuis plusieurs années, les musées commencent à archiver leurs oeuvres via des bibliothèques numériques déjà existantes, et lancent des applications de visites virtuelles. Le grand palais a mis à disposition 700 modèles 3D sur la bibliothèque sketchfab³ et le musée du louvre propose un service de visite en ligne de ses collections.⁴

Mes différentes expérimentations m'ont amenées aux deux aspects de la photogrammétrie, la prise de vue et le traitement numériques de celles-ci. En premier lieu, je me suis concentré sur les questions portant sur la prise de vue, les différentes techniques vis à vis des objets d'études, l'éclairage, les réglages techniques des appareils photo et au final la législation. Ensuite, j'ai dû apprendre les différents logiciels de photogrammétrie disponibles et leur fonctionnement à savoir; l'alignement des images, la construction d'un nuage de point et la triangularisation de celui-ci. Je me suis finalement spécialisé dans le nettoyage des modèles récupérés via des logiciels de modélisation, de traitement photographique et de rendu.

¹ <https://poly.google.com/>

² <https://developers.facebook.com/docs/sharing/3d-posts/>

³ <https://sketchfab.com/francecollections>

⁴ <https://www.louvre.fr/visites-en-ligne>

I- Etat de l'art

Introduction

Cette partie a pour but d'exposer plusieurs types de numérisations en expliquant leurs utilisations et procédés, détailler précisément la technique de la photogrammétrie en expliquant les divers types de prise de vue et en contextualisant ses usages et pour finir, donner une définition du patrimoine ainsi que des lois qui concernent sa numérisation avec des analyses d'oeuvres où il a été scanné.

A - La numérisation

Commençons par quelques définitions.

Numériser : Exprimer sous forme numérique une information analogique.

Analogique : Qui représente, traite ou transmet des données sous la forme de variations continues d'une grandeur physique.

Définition le petit Larousse

Plusieurs types de numérisations différentes ont été développées durant les dernières décennies. Leurs utilisations servent de nombreux domaines d'activités : le médical, la géologie, l'urbanisme, l'armée, l'archéologie. L'alimentation constante de bibliothèques numériques en ligne accessible au grand public servira à l'éducation du plus grand nombre. Plusieurs sites internet se sont spécialisés dans la recherche en ligne d'information ou de culture ; Google et son indexation de sites internet, Wikipédia avec son encyclopédie numérique, Youtube pour ses vidéos à la demande, Pinterest et sa bibliothèque pictural, Deezer ou Spotify et leurs consultations de musique en ligne et Sketchfab pour son hébergement de modèle 3D en ligne.

De nombreux types de média ont été transposés en format numérique. La presse et l'édition se font progressivement remplacer par des sites d'informations et des bibliothèques de livres ou de bandes dessinées en ligne. Les GPS ont remplacé les cartes routières et Google Earth prend la place des atlas. Dans le domaine de la vidéo, les VHS et les pellicules de cinéma analogues sont maintenant des DVD et des cartes SD. Et bien sûr, les photos argentiques avec plusieurs heures de développement en studios professionnels sont maintenant affichées instantanément sur l'écran de l'appareil photo numérique.

De nombreux procédés permettent de numériser des données de média obsolètes. Les VHS peuvent être transcodés en format numérique, les scanners de bureau permettent de numériser des livres ou des photographies. Cela permet de conserver les médias de l'ère pré-numérique et aussi de les remettre à jour ou de les modifier comme par exemple les films ou les photographies colorisées.

La numérisation ne permet pas seulement de transformer une information mais aussi de pouvoir l'analyser. Certaines techniques utilisent des photos, d'autres des lasers ou des rayons pour récupérer diverses informations d'un sujet scanné : échelle, couleur, lumière... Les géographes par exemple peuvent utiliser des procédés comme la fausse couleur d'imagerie satellite pour détacher la végétation d'une zone géographique.

En premier lieu, nous commencerons par décrire et analyser différentes techniques de numérisations.

1-Tomographie et Radiographie

La tomographie comme la radiographie sont des techniques de scan dérivées du domaine médical. La première va, en fonction des capteurs utilisés, définir le volume du sujet scanné et va en récupérer chaque couche.⁵ La Radiographie quant à elle, utilise soit des rayons X, soit des rayons gamma pour scanner un sujet et récupère des informations à l'intérieur de celui-ci.⁶ Voici quelques exemples.

Tomographie par rayons X

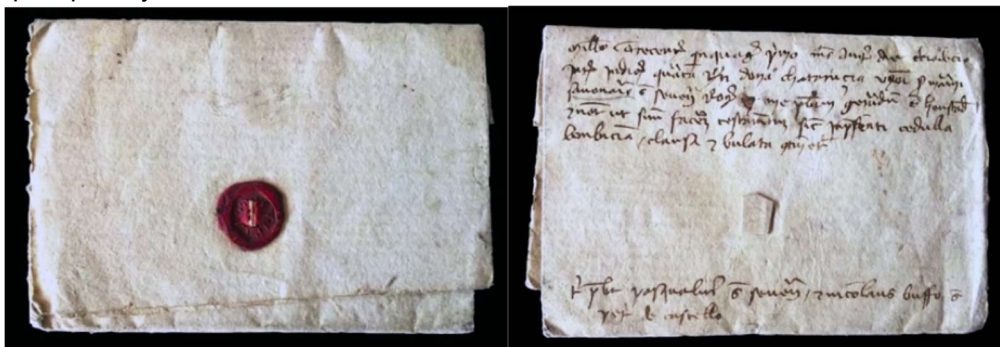


Figure 1 et 2: A gauche une photo d'un document scellé, à droite le même document scellé mais analysé par rayon x.⁷

La tomographie par rayon X permet de numériser l'intérieur d'un document sans l'ouvrir. Des documents scellés ou trop fragiles peuvent être conservés et consultés grâce à cette technique.

Tomodensitométrie



Figure 3, 4 et 5: De gauche à droite, des images 3D d'une même momie passée au scanner pour pouvoir mieux étudier les techniques d'embaumement.⁸

La Tomodensitométrie est une technique de numérisation utilisant un scanner à rayon x qui tourne autour d'un sujet. Il va récupérer des images en coupe du sujet.⁹ Ici la société Tridilog a utilisé la Tomodensitométrie pour effectuer le scan d'une momie. Cette technique est utile pour analyser

⁵ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Tomographie>

⁶ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Radiographie>

⁷ https://www.lemonde.fr/sciences/video/2018/01/05/une-technique-aux-rayons-x-permet-de-lire-des-livres-sans-les-ouvrir_5237825_1650684.html

⁸ <https://www.youtube.com/watch?v=YTqJyvMNqN8>

⁹ <http://www.doctissimo.fr/html/sante/imagerie/scanner.htm>

l'anthropologie, la paléopathologie de la momie, d'étudier le processus de momification et de conservation de celle-ci.¹⁰

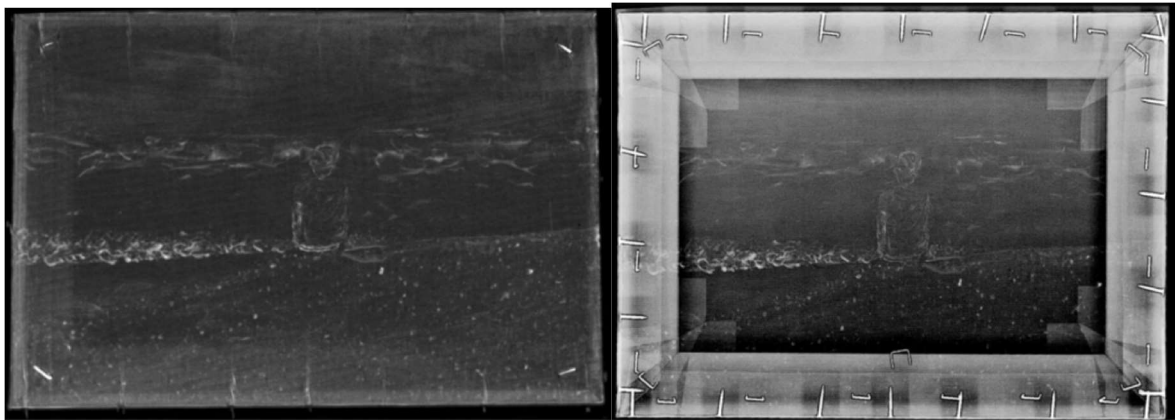


Figure 6,7 et 8: En haut l'oeuvre original¹¹, a gauche une image de scanner à droite une image de radio.¹²

La numérisation peut aller au-delà de la simple conservation d'une oeuvre. L'apport de certaines techniques de scan peut aussi nous révéler des fragments d'oeuvres autrement cachés. Ici on remarque la différence entre la radiographie et la tomographie. La radiographie apporte un résultat en 2D, la tomographie quand a elle, analyse couche par couche l'objet dans sa globalité.

Voici la conclusion de Tridilogy, la société qui a effectué le test : "L'avantage du scanner est de pouvoir faire des images de chaque élément dans n'importe quel plan et de soustraire les structures adjacentes pour se focaliser uniquement sur la zone d'intérêt. Par exemple, au niveau de la périphérie d'une oeuvre sur toile, le châssis se projette sur l'image en radiographie et rend difficile l'analyse de la peinture: avec le scanner, nous pouvons centrer l'image uniquement sur la toile et la peinture, sans être gêné par le cadre sous-jacent."¹³

¹⁰ <http://www.tridilogy.com/momies/>

¹¹ <http://www.tridilogy.com/oeuvres-dart/>

¹² https://www.youtube.com/watch?time_continue=35&v=7j-l_Yi0h1Y

¹³ <http://www.tridilogy.com/oeuvres-dart/>

Scintigraphie



Figure 9: De gauche à droite, des images 3D d'un même corps humain avec ses organes clairement visibles.¹⁴

La scintigraphie permet de capter les rayonnements d'un corps humain après que le patient ait ingéré des substances radioactives. Ces images ont été récupérées grâce à l'Explorer, un scanner qui utilise la scintigraphie et la tomographie ce qui permet de récupérer en 3D des informations sur certains organes du corps humain.¹⁵

2- Lasergrammétrie

Le scan laser ou LIDAR en anglais, est une technique qui permet de capter un nuage de points de la surface scannée. Cette technique n'est pas dépendante de la lumière et donc permet de numériser un lieu ou un objet avec tout type d'éclairage. Elle est très utilisée dans l'urbanisme car permet de scanner rapidement de grands espaces, certains lasers de la marque Faro par exemple peuvent scanner jusqu'à 350m de rayon une surface à 360°.¹⁶

¹⁴ https://www.youtube.com/watch?time_continue=11&v=thGvKuqDPDE

¹⁵ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Scintigraphie>

¹⁶ <https://www.faro.com/fr-fr/>



Figure 10: Une image de Simon Hegarty, LM Scans, Artstation, 2017.¹⁷

Exemple d'un nuage de point créé grâce à un scan laser de type Trimble MX-8. Le nuage de point est un rendu qui n'est pas compressé et qui, comparé à la triangulation d'un scan, reste le plus fidèle à la réalité. Les scans lasers permettent de créer plusieurs millions de points par seconde et restent la technique la plus précise de numérisation d'espace disponible à ce jour.



Voici à quoi peut ressembler un scanner laser de la marque Leica. Le principe est que l'optique du milieu va tourner à 360° sur un axe vertical et la base du scanner à 360° sur un axe horizontal. Un laser est envoyé grâce à l'optique de la machine sur la zone autour du scanner. Lorsque le laser revient, les informations de profondeur sont collectées.

Figure 11: Image d'un scanner Leica.¹⁸

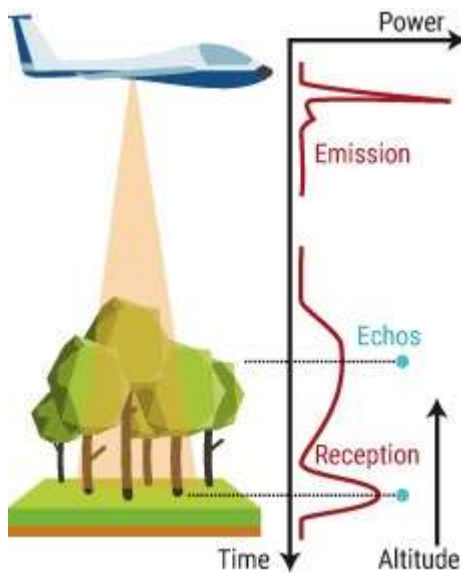
¹⁷ <https://www.artstation.com/artwork/X22Bw>

¹⁸ <https://transitandlevel.com/product/leica-p30-high-definition-scanner/>



Figure 12 et 13: A gauche une vue de Tikal, a droite la même vue recréer avec une technologie LIDAR.¹⁹

Sur cette exemple, on voit que le scan a permis de masquer numériquement la végétation du site de Tikal.



Voici l'explication du site Yellow-scan-LIDAR nous donne du fonctionnement de cette technologie :

- 1- émettre une impulsion laser sur une surface
- 2- attraper le laser réfléchi à la source d'impulsion LiDAR avec des capteurs
- 3- mesurer le temps parcouru par le laser
- 4- calcul de la distance de la source avec la formule "distance = (vitesse de la lumière x temps écoulé)/2"²⁰

Le laser peut donc isoler les fréquences lumineuses correspondant au sol grâce au calcul du temps que la vitesse de la lumière met à parcourir entre l'émission et la réception.

Figure 14: Schéma expliquant le fonctionnement de la technologie LIDAR.²¹

3- Réflectance

Le « Reflectance Transformation Imaging » ou « Polynomial texture mapping » sert dans la restauration et la conservation du patrimoine, plus précisément dans l'épigraphie (def. « Science auxiliaire de l'histoire, qui étudie les inscriptions gravées sur les support durables, pierre, métal, bois, terre cuite, etc... »).²²

Sa technique se définit par la prise de multiples photographies avec une position fixe de l'appareil photo. Une lumière artificielle fixe l'objet sous plusieurs angles à chaque photo prise. Chaque photographie a donc une source lumineuse différente.

¹⁹ <https://share.america.gov/u-s-technology-helps-uneearth-mayan-past/?fbclid=IwAR2dpES9HosY5lvFwc1iKVYEuuAkhsig5Qfsu3uOOMRYCbQ-CrmffZJoJM8>

²⁰ <https://www.yellowscan-lidar.com/fr/applications-and-users/how-lidar-works>

²¹ <https://www.yellowscan-lidar.com/fr/applications-and-users/how-lidar-works>

²² Jeanne Capelle, "Reflectance Transformation Imaging (RTI) et épigraphie," sur RAAN, 20/02/2017. <https://raan.hypotheses.org/1326>

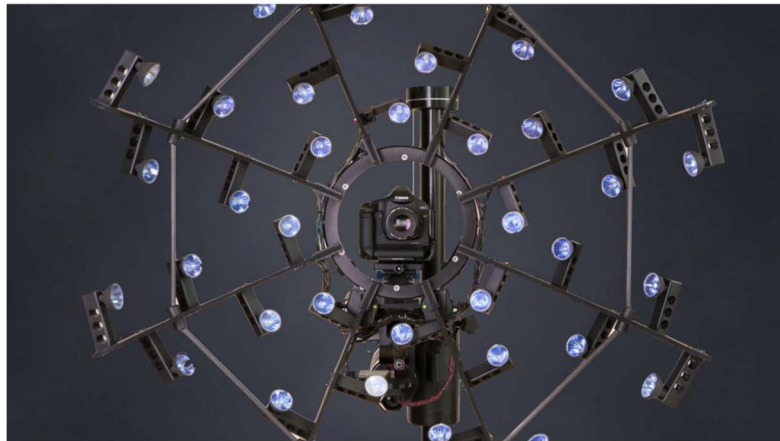


Figure 15: On peut observer une installation matérielle de la technique de réflectance.²³

Cette technique permet la visualisation d'une image interactive. L'utilisateur peut regarder une image fixe tout en choisissant la position de la lumière.



Figure 16 et 17: De gauche à droite, on voit une image de montre à gousset éclairée numériquement de manière différente.²⁴

On voit sur ces images que l'angle de la lumière permet de récupérer plus ou moins de détails sur la gravure de la montre à gousset.

²³ <https://www.youtube.com/watch?v=zddxcSayxcg>

²⁴ <http://swvirtualmuseum.nau.edu/wp/index.php/national-parks/grand-canyon-national-park/rti-gallery/>



Figure 18 et 19: Une relique contenant de l'eau bénite de l'époque post byzantine.²⁵

Vision interactive du positionnement de la lumière sur une relique. Ce type de procédés permet l'analyse des objets scannés plus précise que la simple photographie.

Allegorithmic ; une société de création de textures s'est intéressée à ce procédé pour capturer le relief d'une texture et pour ensuite la retranscrire numériquement avec les algorithmes de leurs logiciels.²⁶

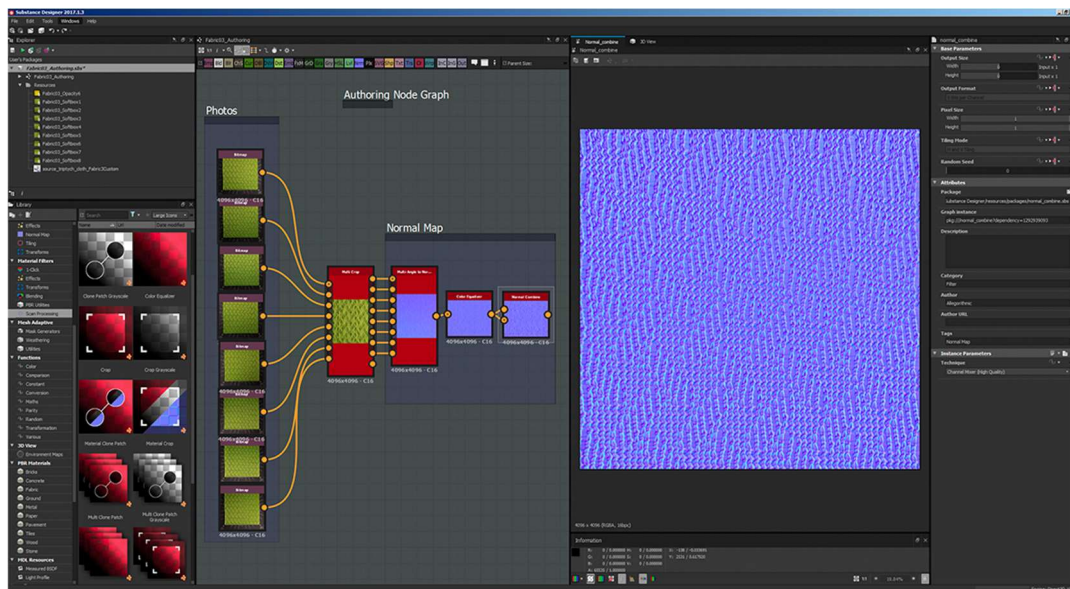


Figure 20: On voit ici l'interface de Substance Designer et comment grâce à un système nodale, le logiciel traduit les prises de vue avec différents éclairages.²⁷

De nombreuses autres techniques existent comme les technologies utilisant des lentilles RGB de détection de profondeur, la Kinect par exemple²⁸, l'ajout de capteurs 3D à des smartphones ou tablettes ou encore les scanners avec contact.

²⁵ <https://www.youtube.com/watch?v=atLzmmeb4XM>

²⁶ <https://www.allegorithmic.com/blog/your-smartphone-material-scanner-vol-ii>
<https://www.allegorithmic.com/blog/scan-anything-dave-riganelli-and-his-homemade-scanbox>

²⁷ https://www.allegorithmic.com/sites/default/files/3SWorld_SD03.jpg

²⁸ <https://azure.microsoft.com/fr-fr/services/kinect-dk/>

B - La photogrammétrie

Photogrammétrie du grec « Photo » la lumière, « Gramma » un signe ou une écriture et « Metron » une mesure.

C'est une technique qui allie l'art et la technologie pour récupérer des informations sur un sujet, un environnement ou un objet d'après une ou plusieurs photographies.

Les clients de la photogrammétrie sont vastes :

- La Culture : sublimer dans les expositions, musées, forums...
- La réhabilitation urbaine de villes ou de sites en reconstructions
- L'archéologie
- Entreprises privées : Google, Microsoft, Ubisoft...
- Le multimédia : publicité, jeux vidéos...

“Une image constitue un enregistrement plan et déformé de l'environnement. Seule, elle ne permet pas d'obtenir les trois dimensions de l'espace. Pour reconstruire notre environnement en 3D, il faut deux images (au minimum...) prises de deux points de vue différents et procéder par intersection. (...) Jusqu'à l'avènement de l'ère numérique, les levés photogrammétriques étaient issus de l'exploitation en relief de couples d'images stéréoscopiques sur lesquels un opérateur effectuait une saisie 3D au trait.”²⁹



Figure 21: Photo stéréoscopique La Porte Saint-Martin, Paris – coll. Le chronoscaphe.³⁰

Il est possible de faire différents types de prise de vue en photogrammétrie. Il y a des types de vues spatiales ou aériennes faites avec des satellites, des avions, des hélicoptères ou des drones. Ce procédé était surtout utilisé par les géologues et les cartographes mais il se démocratise maintenant grâce aux drones accessibles au public. Il y a aussi les prises de vue au sol faites avec des voitures, des robots, ou des trépieds.

“Un appareil photographique (appelé souvent caméra en photogrammétrie) comporte :

- Un objectif, système optique convergent formé de plusieurs lentilles
- Un diaphragme réglant la taille de l'ouverture permettant de faire passer la lumière
- Un obturateur réglant le temps de pose pendant lequel la lumière éclaire la surface sensible
- Une chambre noire qui permet d'obtenir une projection de la lumière sur une surface plane

²⁹ <http://cours-fad-public.ensg.eu/mod/imscp/view.php?id=494>

³⁰ <https://lechronoscaphe.com/la-photographie-stereoscopique-impression-du-relief/>

- Une surface sensible pour l'enregistrement de la lumière : elle peut être argentique ou numérique”³¹

Avant que le numérique n'apparaisse, il y avait les appareils photos argentiques, de moins en moins utilisés. Certains photographes préfèrent continuer la prise de vue de clichés photographiques à l'argentique car il contient un grain naturel difficile à copier avec le numérique. La raison artistique n'a pas sa place pour l'application à la photogrammétrie, les photos prises sont techniques et nombreuses ce qui favorise l'utilisation d'appareil numérique : il y a un gain de vitesse et de qualité dans l'utilisation des prises de vue car il n'y a ni développement, ni numérisation.³²

1- Photogrammétrie analogique

Relevé de la Sainte-chapelle du Palais de Justice à Paris

Ce travail a été effectué en 1943-1944 et était une expérimentation du fonctionnement des relevés photogrammétriques d'époque. L'équipe chargée des relevés a constaté la précision de la technique, et a découvert une légère inclinaison verticale du monument et la dissymétrie de la rose par rapport au tracé de Viollet-Le-Duc (architecte du 19ème siècle).³³

³¹ <http://cours-fad-public.ensq.eu/mod/imscp/view.php?id=494>

³² <http://cours-fad-public.ensq.eu/mod/imscp/view.php?id=494>

³³ Institut Géographique National - *Photogrammétrie architecturale, Application des méthodes photogrammétriques au relevé des monuments, avril 1967.*

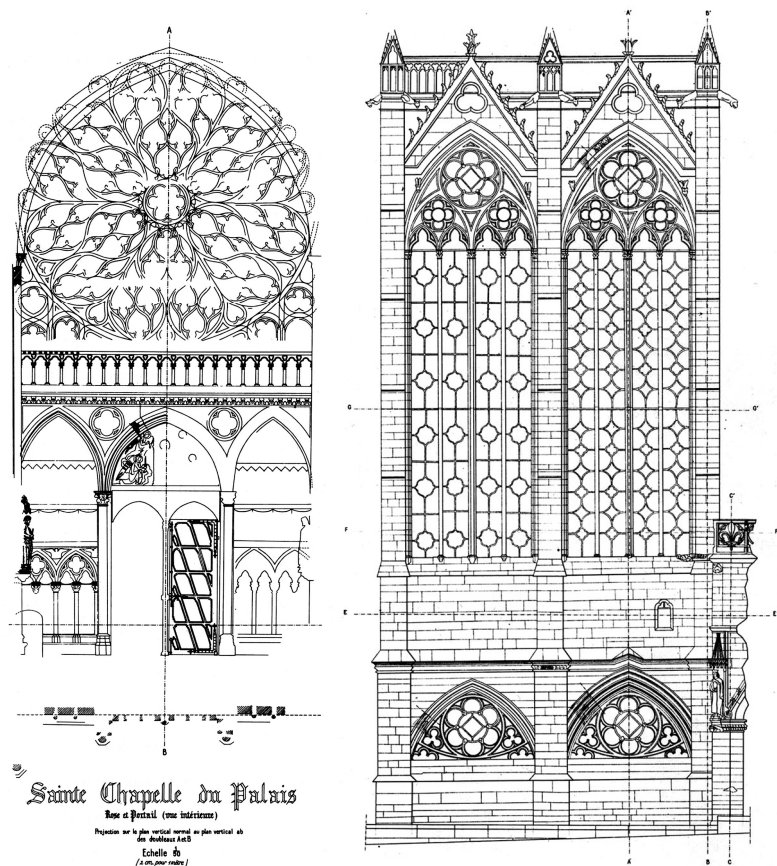


Figure 22 et 23: A droite, on peut voir une élévation d'ensemble du portail avec la rose, à gauche l'élévation du mur du sud. ³⁴

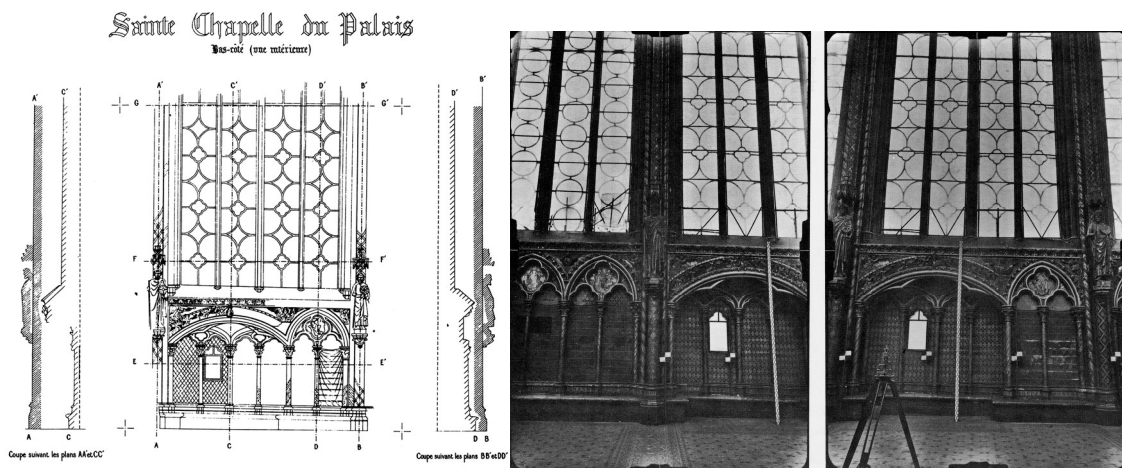


Figure 24: Elévation du mur sud de la chapelle. Figure 25: Stéréoscopie du mur sud de la chapelle. ³⁵

Relevés photogrammétriques des Statues du Temple d'Abou Simbel en Egypte en 1955 :

³⁴ http://cours-fad-public.ensg.eu/pluginfile.php/1913/mod_imscp/content/3/res/PHOTOGRAMMETRIE_ARCHITECTURALE_IGN_1967.pdf

³⁵ http://cours-fad-public.ensg.eu/pluginfile.php/1913/mod_imscp/content/3/res/PHOTOGRAMMETRIE_ARCHITECTURALE_IGN_1967.pdf



Figure 26: A gauche, le résultats de la prise de mesure analogique. Figure 27: A droite, une prise de vue du temple d'Abou Simbel.³⁶

Ce document vidéo nous donne des renseignements sur les différentes étapes de la photogrammétrie en 1955. Abou Simbel était un site archéologique en danger et devait être déplacé. Une prise de clichés photographiques a été faite sur place et les ingénieurs de l'IGN ont alors interprété les photos pour en déterminer les mesures.

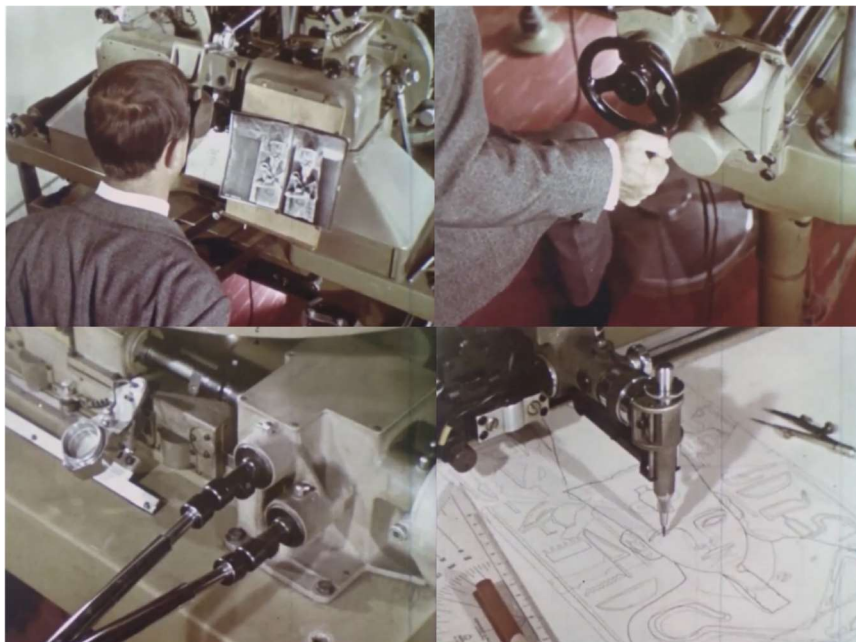


Figure 28: De gauche à droite de haut en bas, sur la première image on peut voir un homme passé en revue des images stéréoscopiques. Sur la deuxième, il tourne une manivelle qui actionne l'appareil visible sur la troisième image. Le mécanisme va dessiner le résultat de la reproduction sur la quatrième image.³⁷

³⁶ Film IGN "Numbie 64" - Une production de L'Institut Géographique National (France) Images et Réalisation de Robert Génot Assisté de Jean-Marie THOMAS

³⁷ Film IGN "Numbie 64"

La première étape de la photogrammétrie analogique dans les bureaux d'études consiste à interpréter des clichés stéréoscopiques puis à dessiner les plans des sujets photographiés. Ici, on peut voir une reproduction en courbes.



Figure 29: Sur ce montage photo, un homme repasse sur le dessin de l'étape précédente. Parallèlement, un instrument sculpte les profondeurs du relevé sur du polystyrène.³⁸

Le dessin contient des informations de profondeur qui vont permettre de créer un modèle en volume. L'image 2D est ainsi transformée en modèle 3D.



Figure 30: Cette image représente la finalité du processus de la photogrammétrie analogique.³⁹

Et voici le résultat final, une reconstruction avec les proportions exactes à une échelle de 0,01. La finalité de ce procédé a aidé les ingénieurs chargés du déplacement du site archéologique.

³⁸ Film IGN "Numbie 64"

³⁹ Film IGN "Numbie 64"

2- Photogrammétrie numérique

En utilisant des photographies argentiques, la photogrammétrie analogique permettait d'obtenir des prises de mesures d'un espace grâce à des appareillages mécaniques. Ce processus était principalement utilisé depuis le début des années 1910 jusqu'à la fin des années 80.

L'évolution technologique aboutira à la photogrammétrie analytique où les photos sont toujours argentiques mais les appareils de mesures sont numériques, jusqu'au milieu des années 90.

Au milieu des années 90, les images deviennent progressivement numériques et les machines mécaniques sont remplacées par des ordinateurs au fur et à mesure du progrès technologique.

Dans l'exposition "Cartes mémoires" à l'IGN, on voit que cette institution a traversé les différentes périodes de développement de la photogrammétrie via son historique des sites scannés depuis 1944 jusqu'à aujourd'hui :

1944 - *Sainte-Chapelle de Paris*
1955 - *Abou Simbel Egypte*
1960/74 - *Nubie Egypte/Soudan*
1966 - *Lascaux*
1967 - *Cathédrale de Strasbourg*
1969 - *Petra, Jordanie*
1970 - *Basilique de Saint-Denis*
1971 - *Acropole d'Athènes Grèce*
1973 - *Borobudur Indonésie*
1973 - *Panthéon*
1973 - *Palais idéal du Facteur Cheval*
1976 - *Temples de Bagan Birmanie*
1982 - *Cathédrale Notre-Dame de Paris*
1988 - *Opéra Bastille*
1989 - *Mont Saint-Michel*
1992 - *Tour de Pise en Italie*
1993 - *Temple d'Angkor Cambodge*
2010 - *Cathédrale d'Amiens*
2015 - *Château de Chambord*
2016 - *Collégiale Saint-Ours Loches*
2017 - *Château de Muroi*

Google earth utilise le principe de la photogrammétrie pour ses modélisations de bâtiments. Pour les prises de vue aérienne, le principe est simple ; un avion survole une zone en prenant plusieurs photos sur le même axe mais à des distances différentes tout en s'assurant que les photos se superposent un minimum. Une fois un axe photographié, l'avion repart dans l'autre sens pour faire d'autres prises de vue et ainsi, quadrille la zone. Les prises de vue sont effectuées à 45 degrés pour avoir tous les côtés des bâtiments afin de mieux construire la 3D.⁴⁰

Les Google Cars utilisent la technologie du LIDAR. De plus, cette multinationale a développé un sac à dos pour effectuer des prises de vue à 360°, le Street View Trekker ou la Caméra Street View.

40

<http://blog.alexandrecazaux.fr/?p=79&fbclid=IwAR1xY7SRU5dsoRFFPAQdgdRj4kXkcFplXb4BynaCOdCvUU5LF05s5GaZX81w>

Google permet à n'importe qui voulant effectuer une visite dans un site difficile d'accès, un prêt de caméra gratuit, en échange des images récupérées.⁴¹

3- Procédé

Les techniques de prise de vue vont être différentes vis à vis du sujet d'étude. Plus le sujet est petit et fin et plus il va être compliqué comme de la dentelle ou de l'herbe. Il faut faire en sorte lors d'une prise de vue, d'avoir assez d'images qui se superposent. On appelle cela le principe du recouvrement. De ce fait, le logiciel va pouvoir corrélérer les pixels entre eux.

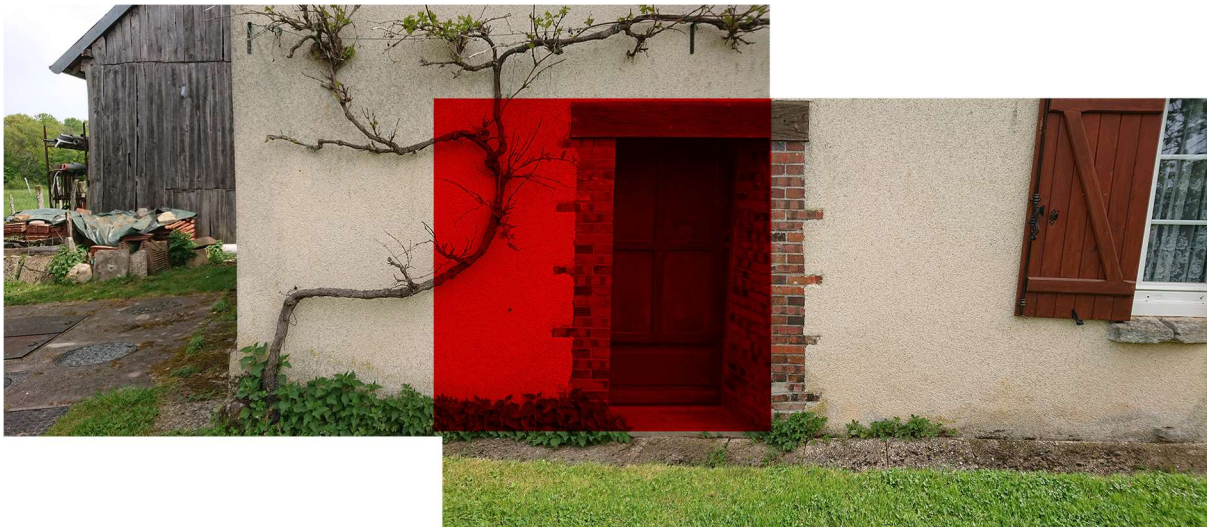


Figure 31: Ici en rouge, on observe le recouvrement de deux images. L'algorithme va alors pouvoir les lier.

Photogrammétrie d'intérieur

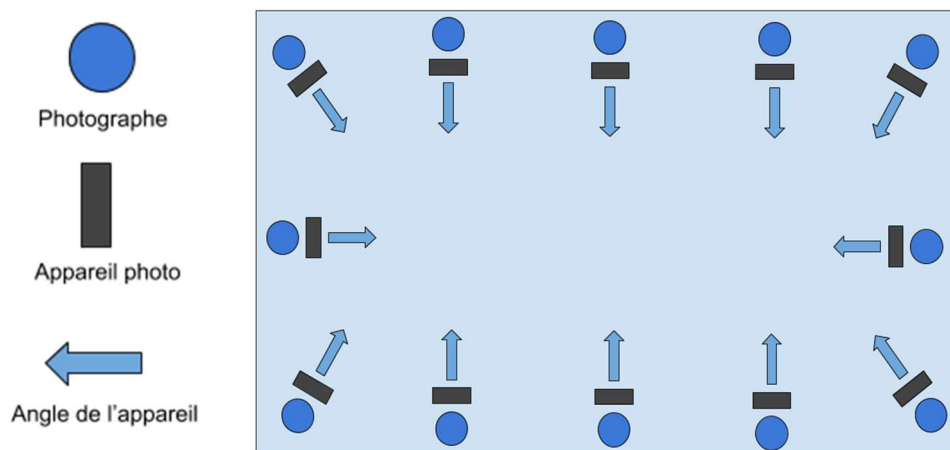
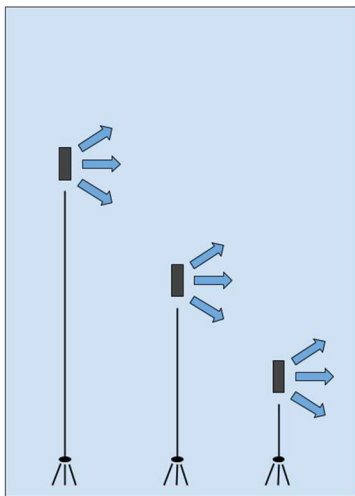


Figure 32: Schéma vue de haut montrant le procédé pour prendre une photogrammétrie d'intérieur.

⁴¹ <https://www.google.com/intl/fr/streetview/loan/>



Le principe est de prendre un maximum de clichés d'une pièce en étant dos au mur afin d'avoir le champ le plus large possible pour le recouvrement. Pour ce type de photogrammétrie, il est conseillé d'imprimer des markers pour permettre aux algorithmes des logiciels de photogrammétrie de mieux situer les grands espaces. Le plus compliqué dans les espaces en intérieur est d'avoir un éclairage constant et diffus. C'est important de prendre des photos avec des hauteurs et des angles différents.

Figure 33: Schéma de côté montrant les différentes hauteurs de prises de vue et d'angles..

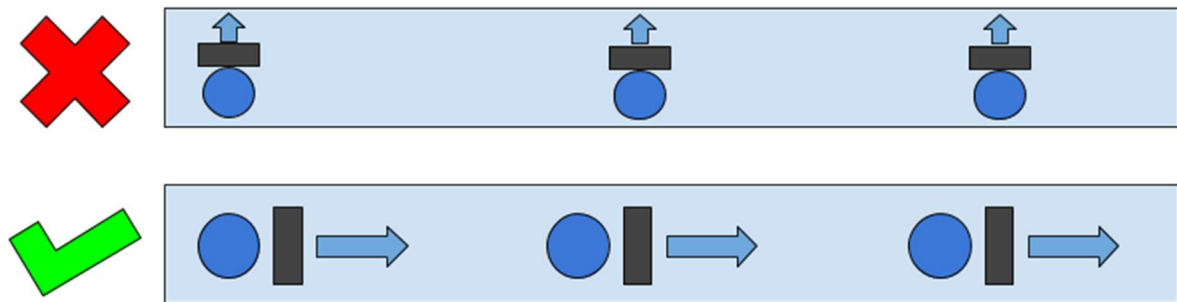


Figure 34: Schéma vue de haut montrant le procédé pour prendre une photogrammétrie d'intérieur dans un espace étroit.

Si l'intérieur est trop étroit, il est peu probable que le logiciel ne reconnaisse pas toutes les photos. Dans ce style de configuration, il vaut mieux prendre les photos disposant d'un champ aussi large que possible.

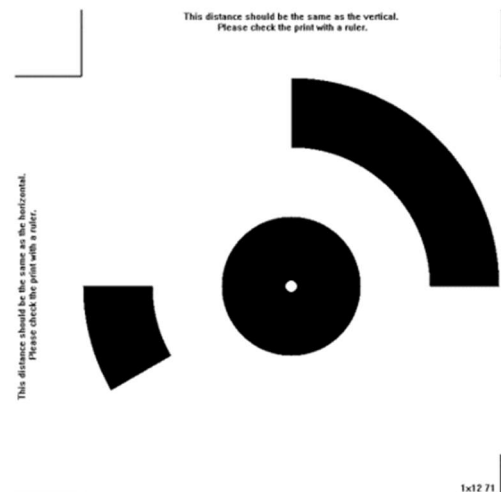
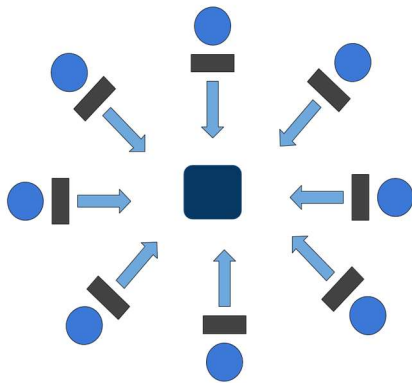


Figure 35: Un exemple de markers que peut générer un logiciel de photogrammétrie, ici Reality Capture.⁴²

Photogrammétrie d'objet

⁴² <https://support.capturingreality.com/hc/en-us/articles/360003869672-How-to-use-Detect-Markers-Tool-experimental-version->



Pour récupérer un modèle 3D d'un objet, il faut l'éclairer de façon à avoir le moins d'ombres possibles sur celui-ci et avoir un maximum de prises de vue. Pour simplifier la tâche, on peut utiliser un plateau tournant pour faire une rotation de l'objet sans avoir à déplacer l'appareil photo manuellement.

Les objets avec de forte réflexion, transparents et en verre ne sont pas adaptés à la photogrammétrie. La lumière ne va pas se réfléchir de la même manière sur le sujet en fonction de l'angle de prise de vue de la photo.

Figure 36: Schéma vue de haut montrant le procédé pour effectuer une photogrammétrie d'objet.

Photogrammétrie d'extérieur

La photogrammétrie d'objet en extérieur est plus pratique car la lumière est diffuse, l'espace est plus adapté à la rotation de l'appareil photo autour du sujet. Toutefois pour un résultat optimal elle nécessite des conditions de météo spécifique. Par exemple, s'il y a du vent cela peut rendre la prise de vue compliquée. Cependant, un ciel nuageux produira un éclairage diffus ne surexposant pas l'objet.

La prise de vue aérienne se démocratise actuellement grâce aux drones ce qui permet d'effectuer des prises de vue en hauteur de bâtiments ou d'objets très larges, sans avoir besoin d'un hélicoptère ou d'un avion. Il faut effectuer un premier balayage en hauteur du bâtiment en plongé à 90°, un second à 45°, un troisième où le drone tourne tout autour du bâtiment avec des hauteurs différentes en le fixant et un dernier au sol pour récupérer un maximum d'infos.

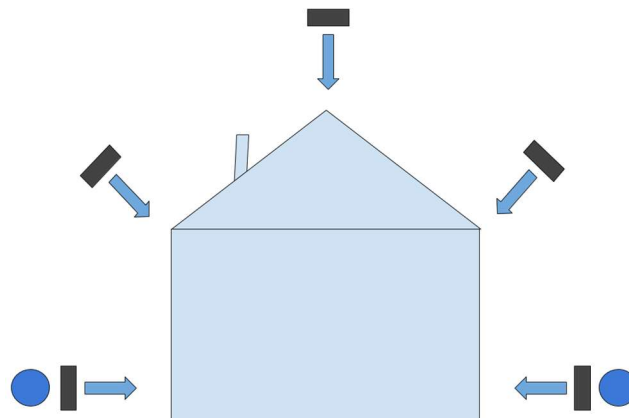


Figure 37: Schéma en vue de coupe montrant le procédé pour prendre une photogrammétrie de bâtiment.

Photogrammétrie d'humain

Les humains ou les animaux ont besoin d'une prise instantanée d'une multitude de photo car un micromouvement peut empêcher le processus photogrammétrique de fonctionner. Il existe donc une configuration d'appareil photo dans un espace, qui relie une multitude d'appareil photo entre eux, fixant le même point pour capturer en photos tous les angles du sujet visé en instantané.

Ce procédé est utilisé par le cinéma depuis longtemps pour créer des "bullets time", le plus connu étant la scène de Matrix où le héros se baisse en arrière et la caméra tourne autour de lui au ralenti tout en regardant le sujet éviter des balles de pistolet.



Figure 38: Exemple d'un rig de photogrammétrie pour les humains. ⁴³

Pour conclure mon constat de l'état de l'art autour du scan 3D j'ai comparé en application direct plusieurs méthodes de numérisations accompagnées par Florian Delgheier. Voici notre expérimentation :



Figure 39: Photo prise par Florian, on me voit commencer une photogrammétrie numérique.

⁴³ <https://www.supinfo.com/articles/single/7476-fonctionnement-faceid>

Nous avons numérisé un buste de statue de 40 cm avec l'éclairage ambiant de la pièce et avec plusieurs types d'appareils de prises de vue différents. Nous avons donc testé des appareils photos, GoPro, Samsung J5 et Canon 5D, avec lesquels nous avons traité la suite d'image sur Reality Capture, une Kinect One, une application mobile sur téléphone et un Scanner Artec.

Le scanner Artec et Le Canon 5D permettent de garder la plus grande qualité de texture et un maximum de détails sur la morphologie de la statue. Ces appareils sont similaires et ont fourni les meilleurs exports qu'on ait pu obtenir. Le Artec récupère une meilleure qualité de texture mais en termes de topologie, il est moins performant que le Canon. Sur sa numérisation, on remarque quelques trous et polygones volants. En termes de temps passé sur chaque numérisation, la photogrammétrie dure deux heures environ du début de la prise de vue à l'export de l'objet 3D alors qu'une heure environ suffit pour passer le scanner.

La deuxième comparaison se fera entre l'utilisation d'une application mobile et la prise de vue d'un appareil photo sur portable et d'une GoPro. L'application mobile prend 10-15 minutes du début de la numérisation à l'export contre 45 minutes - 1 heure vis à vis de la GoPro ou du Samsung. La GoPro est plus rapide à la prise de vue car elle prend de la vidéo mais il faut alors exporter la vidéo en séquences d'images, le temps gagné à la numérisation étant perdu à l'export. La GoPro est plus précise en termes de textures mais le Samsung est performant en termes de topologie. L'application mobile du Sony Xperia est beaucoup plus rapide et a le même résultat de texture que la GoPro, cela dit, le modèle est lissé à l'export et conserve donc moins d'informations sur sa topologie.

Et pour finir, en termes de temps, la Kinect est assez rapide d'utilisation, 20 - 25 minutes pour capturer la statue, mais sa texture est pixelisée et sa topologie reste peu détaillée. On ne récupère que très peu d'informations sur le modèle via cette technologie.

Ce test montre donc les différences de qualités de numérisations à éclairage égal sur ce buste de 40 cm. Le temps passé sur un objet peut être intéressant à prendre en compte, même si la qualité est moindre, si une production nécessite de numériser un grand nombre d'objets, l'application mobile ou la Kinect sera plus adaptée que la photogrammétrie avec le 5D. Vis à vis du type d'élément, entre un objet de 10 cm, un humain, une architecture d'intérieur, une architecture d'extérieur ou un paysage, la qualité des résultats obtenue variera.

Kinect One : Sortie 2014 - prix 50 euros (2019 chez Micromania) - 1080p - 25 minutes
3D Scan - 162 000 polygones - Textures 634 x 767

GoPro 4K : Sortie 2016 - 180 euros (2019 chez Dhgate) - 1080p - 1 heure
MP4 1920 x 1080 - Export de 167 photos sur reality capture - 795 000 polygones - Textures 4K

Samsung J5 : Sortie 2017 - 230 euros (2019 chez Darty) - 13 mp - 45 minutes
JPEG 4128 x 2322 - Export de 95 photos sur reality capture - Textures 4K

Sony Xperia ZX3 : 2018 - 800 euros (2019 chez Sonymobile) - 19 mp - 15 minutes
Générateur 3D - 162 000 polygones - Textures 4K

Canon 5D Objectif EF 16-35mm : Sortie 2005 - 5580 euros (2019 chez Canon) - 12,3 mp - 2 heures
Raw 5760 x 3840 - Export de 111 photos sur reality capture - 2 millions polygones - Textures 8K

Artec MHT : Sortie 2010 - 15 000 euros (estimation) - 1310p – 1 heure

Artec Studio 10- 590 000 polygones - Textures 4K.



Figure 40: A gauche, scan de la Kinect one, au centre, scan de la Gopro 4K, à droite, scan de la Samsung G5.



Figure 41: A gauche, scan de la Sony Xperia ZX3. au centre, scan de la Canon 5D, à droite, scan de la Artec MHT.

C - Le patrimoine

La numérisation du patrimoine est une activité qui prend de plus en plus d'ampleur dans la médiation culturelle. Les musées peuvent ainsi exposer leurs collections sur internet et proposer des visites virtuelles, le ministère de la culture peut archiver un nombre incalculable de livres, films ou données via des entreprises publiques ou privées. On peut constater une démocratisation de l'accès aux archives via des sites comme L'Institut National de l'Audiovisuelle ou la Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine.⁴⁴

Le traitement du numérique peut nous faire découvrir de nouvelles informations sur les œuvres. Par exemple DStretch est un plugin de traitement colorimétrique créé par Jon Harman qui permet de mieux visualiser les anciennes peintures rupestres, effacées avec le temps.



Figure 42: L'image original à gauche, celle retouchée via DStretch à droite. Au "Rancho Bernardo Style site", photo de Jeff LaFave.⁴⁵

Les "Digital Humanities" analysent ce fait dans leur manifeste :

"1- Le tournant numérique pris par la société modifie et interroge les conditions de production et de diffusions des savoirs.

2- Pour nous, les Digital Humanities concernent l'ensemble des Sciences Humaines et Sociales, des Arts et des Lettres. Les Digital Humanities ne font pas table rase du passé. Elles s'appuient, au contraire, sur l'ensemble des paradigmes, savoir-faire et connaissances propres à ces disciplines, tout en mobilisant les outils et les perspectives singulières du champ du numérique.

3- Les Digital Humanities désignent une transdiscipline, porteuse des méthodes, des dispositifs et des perspectives heuristiques liés au numérique dans le domaine des Sciences Humaines et Sociales."⁴⁶

⁴⁴ <http://www.mediathèque-patrimoine.culture.gouv.fr/>

⁴⁵ <http://www.dstretch.com/>

⁴⁶ <https://tcp.hypotheses.org/318>

1- Quelles sont les différents types de patrimoines numérisés ?

Commençons par quelques définitions.

Patrimoine : Bien, héritage commun d'une collectivité, d'un groupe humain.

Héritage : Ensemble des biens acquis ou transmis par voie de succession.

Définition Le Petit Larousse

Le patrimoine regroupe tous les savoirs, monuments, arts ou traces que les sociétés humaines nous ont transmis. Il y a plusieurs types de patrimoine, le patrimoine mondial et le patrimoine culturel immatériel :

Le site internet de l'Unesco définit le patrimoine Culturel immatériel comme «...les traditions orales, les arts du spectacle, les pratiques sociales, rituels et événements festifs, les connaissances et pratiques concernant la nature et l'univers ou les connaissances et le savoir-faire nécessaires à l'artisanat traditionnel. »⁴⁷

Le patrimoine Mondial « ...désigne un ensemble de biens culturels et naturels présentant un intérêt exceptionnel pour l'héritage commun de l'humanité... ».⁴⁸

L'Unesco a défini 10 règles, pour qu'un bien ou un site soit sur la liste du patrimoine mondial, il doit respecter au moins un critère :

«

- 1- Représenter un chef-d'œuvre du génie créateur humain
- 2- Témoigner d'un échange d'influences considérable pendant une période donnée ou dans une aire culturelle déterminée, sur le développement de l'architecture ou de la technologie, des arts monumentaux, de la planification des villes ou de la création de paysages.
- 3- Apporter un témoignage unique ou du moins exceptionnel sur une tradition culturelle ou une civilisation vivante ou disparue.
- 4- Offrir un exemple éminent d'un type de construction ou d'ensemble architectural ou technologique ou de paysage illustrant une ou des périodes significative(s) de l'histoire humaine.
- 5- Être un exemple éminent d'établissement humain traditionnel, de l'utilisation traditionnelle du territoire ou de la mer, qui soit représentatif d'une culture (ou de cultures), ou de l'interaction humaine avec l'environnement, spécialement quand celui-ci est devenu vulnérable sous l'impact d'une mutation irréversible.
- 6- Être directement ou matériellement associé à des événements ou des traditions vivantes, des idées, des croyances ou des œuvres artistiques et littéraires ayant une signification universelle exceptionnelle (Le Comité considère que ce critère doit préférablement être utilisé en conjonction avec d'autres critères).
- 7- Représenter des phénomènes naturels ou des aires d'une beauté naturelle et d'une importance esthétique exceptionnelles.
- 8- Être des exemples éminemment représentatifs des grands stades de l'histoire de la terre, y compris le témoignage de la vie, de processus géologiques en cours dans le développement des formes terrestres ou d'éléments géomorphiques ou physiographiques ayant une grande signification.

⁴⁷ <https://ich.unesco.org/fr/qu-est-ce-que-le-patrimoine-culturel-immateriel-00003>

⁴⁸ https://fr.wikipedia.org/wiki/Patrimoine_mondial#Statut_des_biens_inscrits

- 9- Être des exemples éminemment représentatifs de processus écologiques et biologiques en cours dans l'évolution et le développement des écosystèmes et communautés de plantes et d'animaux terrestres, aquatiques, côtiers et marins.
- 10- Contenir les habitats naturels les plus représentatifs et les plus importants pour la conservation in situ de la diversité biologique, y compris ceux où survivent des espèces menacées ayant une valeur universelle exceptionnelle du point de vue de la science ou de la conservation. »⁴⁹

Il y aura donc plusieurs techniques de numérisations du patrimoine vis-à-vis de sa nature :

Numérisation Audio : Concerne le patrimoine sonore (types de dialectes, chants, sons naturels...)

Numérisation Vidéo : Concerne le patrimoine qui va être en mouvement (arts du spectacle, utilisations de technologie, vies de la faune...)

Numérisation Picturale : Concerne le patrimoine écrit, immuable ou visuel (beaux-arts, livres, paysages, architectures...)

Le rapport Tessier sur la « Numérisation du patrimoine écrit » interroge l'aspect politique et économique de la numérisation.⁵⁰ Ces questions sont universelles vis à vis du type de patrimoine. Une bonne circulation de celles-ci nécessite une indexation et une traduction littérale des codes du sujet numérisé pour qu'il soit compris par tous.

La question politique et économique est compliquée : « un patrimoine numérique détenu par une institution public et mis en ligne par un autre acteur »⁵¹ pose la question de savoir s'il faut laisser à une entreprise privée des droits sur des œuvres publics.⁵²

Google et Amazon « démocratisent » une grosse partie de la culture en la rendant plus accessible et ont un très bon système d'indexation. Cependant, il y a des dérives qui ne peuvent pas être acceptées et peuvent être considérées comme ironiques. En 2009, Amazon efface de sa base de données et donc, de celles de ses utilisateurs, le livre « 1994 » et « La ferme des animaux », deux romans qui dénoncent les dérives autoritaires de sociétés « fictives ». D'ailleurs dans 1994, le héros est amené à effacer et à modifier des documents publics pour « corriger le passé » en faveur de son gouvernement.

⁴⁹ <http://whc.unesco.org/fr/criteres/>

⁵⁰ <http://www.culture.gouv.fr/Thematiques/Livre-et-Lecture/Documentation/Publications/Etudes-et-rapports-numerique-en-bibliotheque/Rapport-Tessier-sur-la-numerisation-du-patrimoine-ecrit>

⁵¹ *Numérisation du patrimoine. Quelles médiations ? Quels accès ? Quelles cultures ? Éditions Hermann, coll. « Cultures numériques », 2013*

⁵² *Patrimoine et collections numériques : politiques, pratiques professionnelles, usages et dispositifs.*

Article inédit, mis en ligne le 15 septembre 2015

<https://lesenjeux.univ-grenoble-alpes.fr/2015-dossier/00-Clavier-Paganelli/00-dossier2015-Clavier-Paganelli.pdf>



Figure 43: A gauche une photo de Staline avec le chef du ministère de l'intérieur, à droite, une photo truquée sans le ministre qui a été démis de ses fonctions.⁵³

La suppression d'un livre dans une base de données est plus rapide et discrète à organiser qu'un autodafé. La modification de certains paragraphes d'un livre aussi est plus prompte si un type de numérisation est détenu en grande partie par une institution non dirigée par le public. Dans le livre Numérisation du Patrimoine, la question de Google qui entreprend une numérisation complète des bibliothèques nationales peut être considérée comme préoccupante.

Ces dérives peuvent être étendues à d'autres type de numérisation. Si un monument détruit ne correspond pas au récit national présent d'un état dont les derniers vestiges textuelles, 2D ou 3D sont entièrement numériques, la suppression de ceux-ci de la base de données entraînera la destruction pur et simple du souvenir de ce monument au bout de quelques générations.

L'histoire regorge d'exemples de patrimoines détruits. Les catastrophe naturelles, les virements idéologiques ainsi que les guerres entraînent souvent la disparition de monuments historiques telle la démolition des bouddhas de Bamiyan par les talibans en Afghanistan ou encore plus récemment la destruction de la vieille ville de Palmyre durant le conflit Syrien .

Des entreprises se sont spécialisées dans la conservation de patrimoine en danger, notamment Iconem, une entreprise française créée en 2013 par un architecte. Sa principale spécialité sont les relevés numérique 3D de sites menacés. Iconem a scanné certains sites en Syrie grâce à ses propres fonds.

L'UNESCO est un acteur mondial de la conservation et de la numérisation du patrimoine, elle a été créé en 1945 après la seconde guerre mondial pour « contribuer au maintien de la paix et de la sécurité en resserrant, par l'éducation, la science et la culture, la collaboration entre nations, afin d'assurer le respect universel de la justice, de la loi, des droits de l'homme et des libertés fondamentales pour tous, sans distinction de race, de sexe, de langue ou de religion, que la Charte des Nations Unies reconnaît à tous les peuples ». ⁵⁴

La numérisation du patrimoine n'est donc pas juste une conservation des traces du passé, elle permet dans le présent de lier les cultures et les différents pays grâce à un patrimoine commun, celui de l'humanité.

⁵³ https://fr.wikipedia.org/wiki/Grandes_Purges

⁵⁴ *Textes fondamentaux: édition 2018, comprenant les textes et amendements adoptés par la Conférence générale à sa 39e session (Paris, 30 octobre-14 novembre 2017)*
https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261751_fre.page=148

L'incendie récent de la Cathédrale Notre Dame de Paris nous montre à quel point la destruction d'un patrimoine peut influencer la politique d'un état et peut susciter l'engouement du peuple pour sa restauration. L'entreprise française Art Graphique et Patrimoine a d'ailleurs relevé la totalité de Notre Dame de Paris et a un double numérique de ce bâtiment.

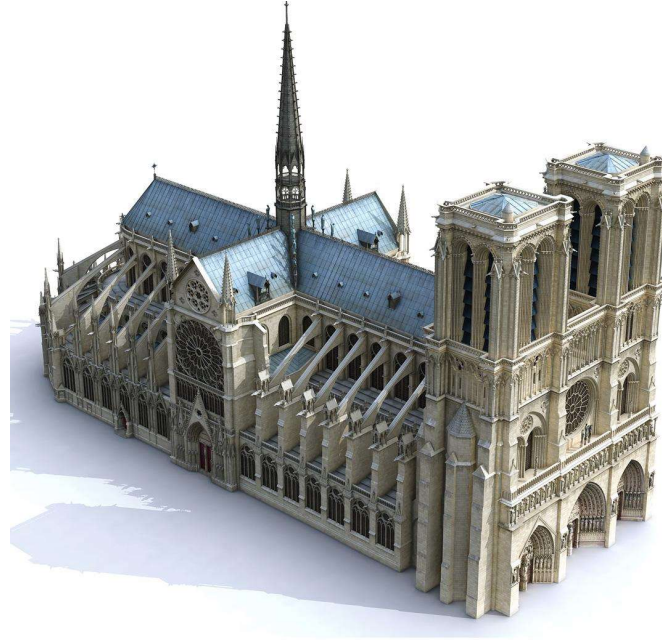


Figure 44: Sur cette image on peut voir une représentation 3D de notre dame de paris.⁵⁵

Art Graphique et Patrimoine a 25 ans d'activités de relevés laser et photogrammétriques. Uniquement pour la toiture de Notre Dame de Paris, ils ont 150 scans constitués entre 3 et 5 milliards de points, 1 à 2 points par mm². C'est bien sûr un support qui va considérablement aider les architectes chargées de la reconstruction de la charpente.⁵⁶

Les Bouddhas de Bamiyan ont été dynamités car ils allaient à l'encontre de l'idéologie des talibans. Symbole d'une religion interdite taillée dans une montagne de 47 mètres de haut, ils affirmaient l'opulence d'un culte autre que celui de ses détracteurs. Durant les conquêtes en Amérique Latine, les expéditions espagnoles ont détruit la quasi-totalité des écrits et des monuments des civilisations précolombiennes car ils n'avaient ni les mêmes dieux ni les mêmes modes de vies. Le patrimoine de ces peuples a ainsi été effacé de leur mémoire, facilitant leur conversion à la chrétienté par la privation de leur récit national. L'héritage joue un rôle important dans la création de l'identité de chaque individu.

Tuer les derniers survivants d'une culture, brûler des textes, détruire des architectures ou des objets symboliques ou le remplacer le patrimoine par l'imposition d'une religion, d'une langue ou d'un mode de vie est purement politique. Les pays colonisateurs ont souvent pillé les objets d'art des autres pays car ils ont beaucoup de valeur et peuvent s'ajouter à leur héritage.

⁵⁵ <http://www.artgp.fr/notre-dame-numerisee-en-3d-par-agp.html>

⁵⁶ <http://www.artgp.fr/notre-dame-numerisee-en-3d-par-agp.html>

Le Bénin a demandé la restitution d'objets d'art pillés durant la colonisation au quai Branly en 2016. De nombreuses demandes de restitutions de biens posent problème aux musées occidentaux qui sont remplis de trésors coloniaux. Pour certains, la restitution ne serait pas idéal car notre économie permet d'accueillir, de conserver et d'exposer ces objets dans de bonne condition. D'autres pensent que la restitution serait naturelle et obligatoire car le patrimoine a été volé. La France a été un berceau du métissage culturel, et donc les pièces archéologiques venus d'horizons lointains font aussi parties de l'Histoire de France.

Les restitutions des patrimoines pillés durant les conquêtes ou les colonisations sont-elles légitimes ?⁵⁷

Le patrimoine des pays conquis et pillés par notre pays fait-il désormais partie du patrimoine français ?

Par exemple l'obélisque de la place de la Concorde à Paris, offert par l'Égypte en 1828, est considéré comme faisant partie du patrimoine Français par la majorité de ses citoyens.⁵⁸

2- Quel est la législation autour de la numérisation ?

Avec le prêt de matériel pour numériser une visite, Google rend ses usagers acteurs de la numérisation et permet une numérisation de masse gratuite pour eux⁵⁹. Google a récemment ouvert un site de visualisation de patrimoine en 3D, "Open Heritage"⁶⁰ et également une numérisation de masse concernant les livres et leur accès gratuit ⁶¹.

Ces trois exemples nous montrent que Google travaille sur de nombreux types de numérisation, mais l'aspect massif de ces activités ne permet pas un contrôle législatif de celles-ci. De plus, la législation des droits d'auteurs est différente vis à vis du type de numérisation, du pays où celle-ci est entreprise, de la nationalité de l'auteur...

Google est une multinationale qui peut payer les amendes et donc passer outre les lois. Les droits à l'image concernant la photogrammétrie n'ont pas encore été définies précisément.

Code de la propriété intellectuelle, Article L111-3

"La propriété incorporelle (...) est indépendante de la propriété de l'objet matériel. L'acquéreur de cet objet n'est investi, du fait de cette acquisition, d'aucun des droits prévus par le présent code, (...)" ⁶²
Cet article stipule que les droits d'exploitation ne sont pas détenus par le propriétaire légal de l'œuvre. C'est au créateur ou à ses légataires qu'il faut adresser une requête pour un droit de reproduction.

⁵⁷ https://www.francetvinfo.fr/culture/arts-expos/sculpture/pillee-pendant-des-annees-l-afrique-reclame-a-l-europe-le-retour-des-tresors_3334043.html

⁵⁸ <http://leplus.nouvelobs.com/contribution/1336180-faut-il-rendre-l-obelisque-de-place-de-la-concorde-a-l-egypte-un-imbroglio-culturel.html>

⁵⁹ <https://www.google.com/intl/fr/streetview/loan/>

⁶⁰ <https://artsandculture.google.com/project/openheritage>

⁶¹ <https://books.google.fr/>

⁶² Code de la propriété intellectuelle - Article L111-1, <https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?cidTexte=LEGITEXT000006069414&idArticle=LEGIARTI000006278867&dateTexte=&categorieLien=cid>

Code de la propriété intellectuelle, Article L123-1

“L'auteur jouit, sa vie durant, du droit exclusif d'exploiter son œuvre sous quelque forme que ce soit et d'en tirer un profit pécuniaire. Au décès de l'auteur, ce droit persiste au bénéfice de ses ayants droit pendant l'année civile en cours et les soixante-dix années qui suivent.”⁶³

Au-delà de 70 ans après la mort de l'auteur, l'œuvre de celui-ci est sous la législation du domaine public.

“(…)il existe aussi un droit au profit du propriétaire matériel. C'est ainsi que les musées ou certains collectionneurs monnayent une sorte de « droit d'accès » à leur propriété(…) A cette occasion, les propriétaires de biens mobiliers négocient parfois en plus de ce droit d'accès un véritable droit d'auteur sur les clichés de leurs biens quand ils les ont réalisés ou fait réaliser par leurs propres photographes. Un droit à l'image ainsi qu'un droit d'auteur s'appliquent ainsi alors même que l'œuvre initiale (tableau, sculpture, etc.) appartient au « domaine public »”⁶⁴

“(…) la prise de vues d'œuvres appartenant aux collections d'un musée public, à des fins de commercialisation des reproductions photographiques ainsi obtenues, doit être regardée comme une utilisation privative du domaine public mobilier impliquant la nécessité, pour celui qui entend y procéder, d'obtenir une autorisation ainsi que le prévoit l'article L. 2122-1 du code général de la propriété des personnes publiques. Une telle autorisation peut être délivrée dès lors qu'en vertu de l'article L. 2121-1 de ce code, cette activité demeure compatible avec l'affectation des œuvres au service public culturel et avec leur conservation. Il est toutefois loisible à la collectivité publique affectataire d'œuvres relevant de la catégorie des biens mentionnés au 8° de l'article L. 2112-1 du même code, dans le respect du principe d'égalité et sous le contrôle du juge de l'excès de pouvoir, de ne pas autoriser un usage privatif de ce domaine public mobilier.”⁶⁵

“D'une part, au regard de l'objet de la mesure en cause, qui concerne une autorisation d'utilisation privative de tout ou partie du domaine public mobilier constitué par les collections d'un musée, les photographes professionnels sollicitant une telle autorisation pour réaliser des clichés des œuvres à des fins de commercialisation pour leur propre compte des reproductions obtenues ne sont pas placés dans la même situation que les photographes auxquels l'autorité domaniale délivre une telle autorisation afin qu'ils réalisent, à sa demande et pour ses propres besoins, des photographies des œuvres du musée, sans qu'ait à cet égard d'incidence la circonstance que l'autorisation délivrée à cette seconde catégorie de photographes pourrait avoir, le cas échéant, indirectement pour effet de leur permettre de commercialiser pour leur propre compte les reproductions réalisées”⁶⁶

“ Les dispositions de l'article L. 123-1 du code de la propriété intellectuelle, qui prévoient qu'à l'expiration des soixante-dix années suivant l'année civile du décès de l'auteur d'une œuvre, il n'existe plus, au profit de ses ayants droit, de droit exclusif d'exploiter cette œuvre, n'ont ni pour objet, ni pour effet de faire obstacle à l'application à des œuvres relevant du 8° de l'article L. 2112-1 du code général de la propriété des personnes publiques des règles découlant de ce code, et notamment de celles relatives aux conditions de délivrance

⁶³ Code de la propriété intellectuelle, Article L123-1

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?idArticle=LEGIARTI000006278937&cidTexte=LEGITEXT000006069414>

⁶⁴ <https://www.livreshebdo.fr/article/le-droit-des-images-des-collections-de-musees-et-de-bibliotheques>

⁶⁵

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichJuriAdmin.do?oldAction=rechJuriAdmin&idTexte=CETATEXT000033684999&fastReqId=467675901&fastPos=1>

⁶⁶

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichJuriAdmin.do?oldAction=rechJuriAdmin&idTexte=CETATEXT000033684999&fastReqId=467675901&fastPos=1>

d'une autorisation devant être regardée comme tendant à l'utilisation privative de ce domaine public mobilier"⁶⁷

L'exploitation d'un œuvre tombé dans le domaine public est donc régie par les propriétaires de celle-ci dans le cadre d'une utilisation privé.

“Les œuvres peuvent néanmoins être utilisées sans autorisation de l'auteur dans le cas, notamment :

- D'une représentation privée et gratuite et exclusivement dans un cercle familial.
- De reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinée à une utilisation collective.
- De parodie, pastiche ou caricature.
- Des bibliothèques, musées et services d'archives.
- De consultation par des personnes handicapées.
- D'analyses, citations, revues de presse, sous réserve que soient indiqués clairement le nom de l'auteur et la source.”⁶⁸



Figure 45: Représentation graphique de la charte synthétique de l'usage de la photographie dans un établissement patrimonial⁶⁹

⁶⁷

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichJuriAdmin.do?oldAction=rechJuriAdmin&idTexte=CETATEXT000033684999&fastReqId=467675901&fastPos=1>

⁶⁸ <https://www.service-public.fr/professionnels-entreprises/vosdroits/F23431>

⁶⁹ <http://www.culture.gouv.fr/Espace-documentation/Documentation-administrative/Tous-photographes-I-La-charte-des-bonnes-pratiques-dans-les-etablissements-patrimoniaux>

Durant mon projet intensif d'étude, j'ai voulu scanner des lieux en souterrain (crypte, cave, carrière...) dans la région d'Ile de France. J'ai donc contacté un maximum de lieux pour demander des autorisations de tournage.

Je me suis vite rendu compte que les demandes d'autorisation prenaient du temps et parfois demandaient de l'argent. J'ai eu plusieurs types de réponses lors de mes demandes, soit des refus, soit des demandes de rémunérations des lieux pour avoir les autorisations pour mes prises de vues, soit des réponses positives :

- Caves du Roy à Sèvres - Disponible qu'à partir de Février.
- Catacombes de Paris - Plus de 15 demandes de tournages à traiter par jour (inaccessible dans l'immédiat donc).
- Carrière Médiévale des "Capucins" - Disponible début février, cotisation de 30 euros et chèque de caution de 150 euros à donner, récupération de celui-ci après avoir transmis les images.
- Egouts de paris - En travaux jusqu'en 2020.
- Crypte Notre-Dames-Des-Champs - En pourparlers avec la mairie de Paris pour un possible rachat de celle-ci, ne fait plus de visite avant la fin de l'année.
- Association D'Exploitation du Matériel Sprague - Je l'ai contacté pour savoir si je pouvais scanner les lieux où étaient entreposées les rames de métro qu'elle entretenait mais il n'y avait que la possibilité de scanner celles-ci et non les lieux.
- Cimetière du père Lachaise - Toujours en attente de réponse.

Et finalement c'est la "Maison de la Pierre du Sud de l'Oise" à Saint Maximin qui m'a autorisée à prendre des clichés avec du matériel d'éclairages et de photographies sans contrepartie financière. Elle m'a juste réclamée de leur envoyer mes clichés photographiques de leur lieu pour qu'ils puissent éventuellement l'utiliser dans leur communication externe.

Je suis aussi aller prendre des photos d'œuvres à la Cité de l'Architecture. A l'accueil du musée, j'ai demandé l'autorisation de pouvoir utiliser un trépied pour faire des prises de vue. Avec leur accord j'ai, pendant plus de deux heures, pris des photos d'œuvres jusqu'à ce qu'un gardien ne m'arrête en me disant qu'il fallait une autorisation pour utiliser un trépied. Je ne m'étais pas, à l'époque, renseigné sur la charte "Tous photographes". Le gardien m'a donné le numéro qu'il fallait contacter pour demander les autorisations.

Après avoir joint le numéro, la responsable du service de presse m'a certifiée qu'il ne fallait pas d'autorisations pour l'utilisation d'un pied (contradiction au cœur même d'une administration), mais que ce document était indispensable pour l'utilisation des images. J'ai donc fait les démarches pour l'obtenir. J'y suis ensuite retourné pour prendre mes clichés photographiques et tout s'est alors bien passé à la présentation de ce document aux gardiens présents dans le musée.

1 place du Trocadéro et du 11 Novembre, 75116 Paris
Tél. : (33) 01 58 51 52 00 - fax : (33) 01 58 51 59 91
www.citedelarchitecture.fr

AUTORISATION PRISES DE VUE

La Cité de l'architecture et du patrimoine autorise **Paul Fructus, étudiant en master à Arts et Technologies de l'Image, Université Paris 8**, à réaliser des prises de vue **le mercredi 24 janvier entre 11h et 18h** dans les galeries des moulages et des peintures et faire usage de ces images dans le cadre de son mémoire de master **Arts et Technologies de l'Image**.

Lieu des prises de vues : Galeries Carlu et Davioud, galeries des peintures

Crédit obligatoire : *Cité de l'architecture & du patrimoine – Palais de Chaillot - Paris*

Composition de l'équipe : Paul FRUCTUS

Mention devant figurer au générique : *Remerciements pour son concours à la Cité de l'architecture et du patrimoine – Paris (France). www.citedelarchitecture.fr*

Pour un usage unique et durée de 3 ans : France - Etranger

L'autorisation d'utilisation des images susvisées est concédée à titre non-exclusif et à titre gratuit et emporte pour Paul FRUCTUS, le droit de reproduire, de représenter et d'adapter lesdites images afin de les utiliser dans le cadre de son mémoire, portant sur la photogrammétrie, ainsi que dans un jeu vidéo qu'il réalise dans le cadre de sa formation uniquement, et qui seront diffusées gratuitement sur le site <https://paulfructus.artstation.com/>.

Pour les prises de vues effectuées dans les galeries Carlu et Davioud ainsi que dans les salles de la galerie des peintures (l'autorisation ne porte pas sur la galerie d'architecture moderne et contemporaine dont les maquettes sont soumises à droit), la Cité de l'architecture & du patrimoine se dégage de la responsabilité d'obtention des autorisations de droits à l'image des personnes ou silhouettes qui pourraient figurer sur les images faisant l'objet d'une exploitation.

Monsieur Paul FRUCTUS s'engage à remettre une copie des prises de vue à la Cité de l'architecture et du patrimoine et l'autorise à l'exploiter dans le cadre de sa communication institutionnelle (presse et site internet citedelarchitecture.fr). Par ailleurs, Paul FRUCTUS s'engage à envoyer à la Cité de l'architecture et du patrimoine le(s) programme(s) exploitant la prise de vue avant toute mise en ligne ou diffusion de quelque nature que ce soit.

Lieu et date : Paris, le 22 janvier 2019

Signature

Mention manuscrite « Bon pour autorisation »

Bon pour autorisation

Paul FRUCTUS - 06.47.43.18.31

Lieu et date : Paris, le 21 janvier 2019

Signature

Mention manuscrite « Lu et approuvé »

Figure 46: Autorisation de prise de vue de la cité de l'architecture.

3- Analyse d'œuvres.

Roswell, autopsie d'une controverse

Dans le début des années 1990 un film a été présenté au public où l'on voit l'autopsie d'un extraterrestre. Lors d'une conférence à Paris 8, François Garnier a présenté une œuvre qui a utilisé cette vidéo pour en extraire l'espace 3D. Son utilisation se fait alors dans le cadre d'une expérience interactive de réalité virtuelle.

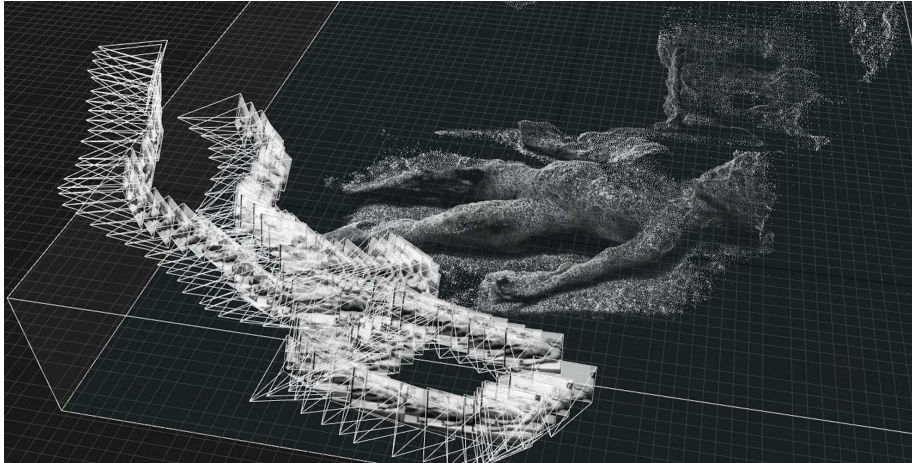


Figure 47: Sur cette image, on voit le nuage de points récupérés de la vidéo.⁷⁰

La vidéo d'archive est présente sur internet. Pour l'utiliser dans un processus de photogrammétrie il faut juste exporter la vidéo sous forme de suite d'images. Le logiciel a réinterprété les positions des caméras et a créé un nuage de points. Le procédé est très simple mais élargit le champ de possibilités offertes par la technique de la photogrammétrie. En effet, ici le créateur n'est pas acteur de sa prise de vue. Ce qui est intéressant, c'est que l'on peut recréer des espaces 3D réels extraits de bibliothèques de vidéos.

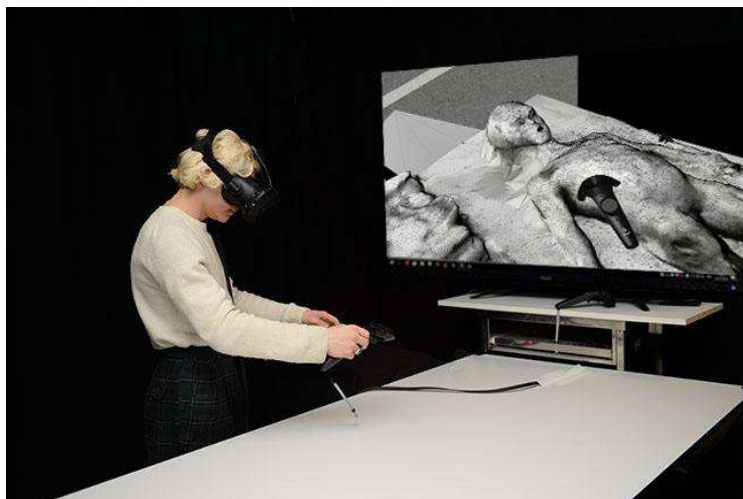


Figure 48: Une photo de l'expérience VR.⁷¹

⁷⁰ <https://spatialmedia.ensadlab.fr/roswell/>

⁷¹ <https://spatialmedia.ensadlab.fr/roswell/>

Le projet consiste à utiliser des images qui ont fait polémiques par leur authenticité et à reconstituer l'espace 3D du lieu où elles ont été tournées. Ce qui est intéressant, c'est que le fait de les utiliser via ce processus les rend concrètes. Ce ne sont pas juste des images qui sont falsifiées. Ici, l'algorithme du logiciel a pu reconstituer cette autopsie et a même permis de créer une expérience immersive. Le public qui a testé l'expérience a vécu, un instant qui n'a sûrement jamais existé mais qui a bien été réel.

L'utilisation de vidéos d'archives pour restaurer des espaces disparus ou qui ont été modifiés avec le temps, est une piste de recherche intéressante.

Institut du Monde Arabe, exposition "Les Cités Millénaires"

J'ai appelé Gaël Labousse via Skype pour lui poser des questions sur l'exposition des cités millénaires. C'est lui qui s'est occupé de la scénographie de l'exposition à l'IMA, en réalisant et scénarisant certaines animations. Diplômé d'un master design beaux art, artiste autodidacte et généraliste 3D, c'est un ancien d'Arts et Technologie de l'Image qui est actuellement directeur artistique à ICONEM. Voilà les informations que j'ai pu extraire de cet entretien :

L'Institut du Monde Arabe a fait appel à Iconem pour faire une rétrospective du patrimoine détruit dans certains pays arabes en raison des guerres actuelles au Proche Orient. Pour cette exposition, l'IMA s'intéressait beaucoup aux visualisations des destructions faites sur les scans 3D des sites. En effet, cette technique permet non seulement de faire un constat actuel de la situation des monuments, de les visualiser comme avant les détériorations qu'ils ont subies mais aussi de faire une simulation de la façon dont ils ont été détruits. La réalité du marché ne permet pas à la partie artistique du métier de s'épanouir. En raison des délais courts entre la réalisation de l'exposition et l'ouverture au public, l'équipe technique n'a eu que très peu de temps pour concevoir ces démonstrations d'explosions. C'est grâce au partenariat avec Ubisoft que ces simulations ont été possibles et cela a aussi ouvert l'exposition à un plus large public.

Iconem fait essentiellement de la photogrammétrie et utilise des drones pour créer ses relevés. Ils travaillent en nuage de points pour gagner en qualité. Pour leurs traitements d'images, ils utilisent Reality Capture et Cloud Compare.⁷²

Sites scannés présentés durant l'exposition :

- Mausolée de l'imam Awn Al-Din.
- Mossoul église Notre Dame de l'heure.
- Mosquée Al Nouri.
- Citadelles et Mosqué d'Alep.
- Les souks d'Alep.
- Arc de septime Sévère à Palmyre.
- Ninives et le mausolée de Jonas.

⁷² Discussion Skype avec Gaël Labousse, Directeur artistique chez ICONEM.



Figure 49: Photos de l'installation de l'exposition à l'Institut du monde arabe.⁷³

L'exposition est impressionnante car elle projette des vidéos de nuages de points sur des murs hauts de cinq ou six mètres, et larges d'une dizaine de mètres. Ces échelles sont importantes à prendre en compte car elles favorisent l'immersion du spectateur dans les lieux visités numériquement. La salle de Palmyre contient deux écrans incurvés horizontalement d'une dizaine de mètres.



Figure 50: Reconstitution du temple de Baalshamin à Palmyre.⁷⁴

La photogrammétrie permet de garder les proportions du lieu pour modéliser les sites tels qu'ils étaient avant leur destruction. Les sites détruits, re-modélisés en 3D, conservent un texturing monochrome pour contraster avec la scène. L'utilisation du nuage de points permet à la caméra numérique de visiter librement les sites en ne tenant pas compte des murs et des pierres. Plus la caméra se rapproche d'une partie du nuage de point, plus le nuage désépaissit et devient transparent. La trace conservée par le nuage de points est authentique et n'est pas retouchée, ce qui permet par exemple de conserver des graffs comme "Fuck Isis" sur la mosquée Al Nouri.

La photogrammétrie a aussi été utilisée pour constater l'état de certaines fouilles et remplace la simple utilisation de photos en deux dimensions.

Dans beaucoup de sites, on retrouve de la végétation foisonnante et c'est une donnée que la photogrammétrie a beaucoup de mal à analyser car trop fine. De plus, elle peut bouger au gré du vent pendant la prise de vue.

⁷³ <https://www.youtube.com/watch?v=59qKxLrq4BY>

⁷⁴ <https://www.youtube.com/watch?v=59qKxLrq4BY>

Les musiques contribuent à l'immersion des spectateurs dans les cultures des pays présentés. La Grande Mosquée des Omeyyades a été scannée. Son minaret était détruit, il a donc été modélisé, est visible sur certains plans et disparaît telle du sable s'envolant à cause d'une tempête. L'utilisation d'un bâton de pluie pour la musique de cette scène rend cette destruction mélodieuse. Les Souks d'Alep ont été scannés et, lorsque le spectateur regarde les vidéos du nuage de points, on entend des enregistrements sonores issues de ce lieu avant sa destruction. L'utilisation du son est cohérente car c'est l'une des traces les plus représentatives des Souks et cela permet de réanimer un lieu dépourvu de vie actuellement.

Durant l'exposition, il y a des images d'archives représentant les bâtiments scannés qui sont projetées sur les côtés des salles. Cela renforce l'aspect de reconstruction du patrimoine et ajoute une donnée importante au site présenté, celle du temps. Au centre de certaines salles, des plans des lieux scannés sont projetés avec l'échelle de ceux-ci.



Figure 51: Image de l'application VR proposée à l'Institut du monde arabe pour l'exposition "Cités millénaires".⁷⁵

A la fin de l'exposition il y a une expérience de réalité virtuelle. Les sites projetés durant l'exposition ont été triangularisés et adaptés au temps réel. C'est Ubisoft qui a exécuté ce travail et ils ont ajouté quelques animaux et effets spéciaux à l'intérieur des ruines pour leur donner vie.

⁷⁵ <https://www.youtube.com/watch?v=1Yqxtajdv4>

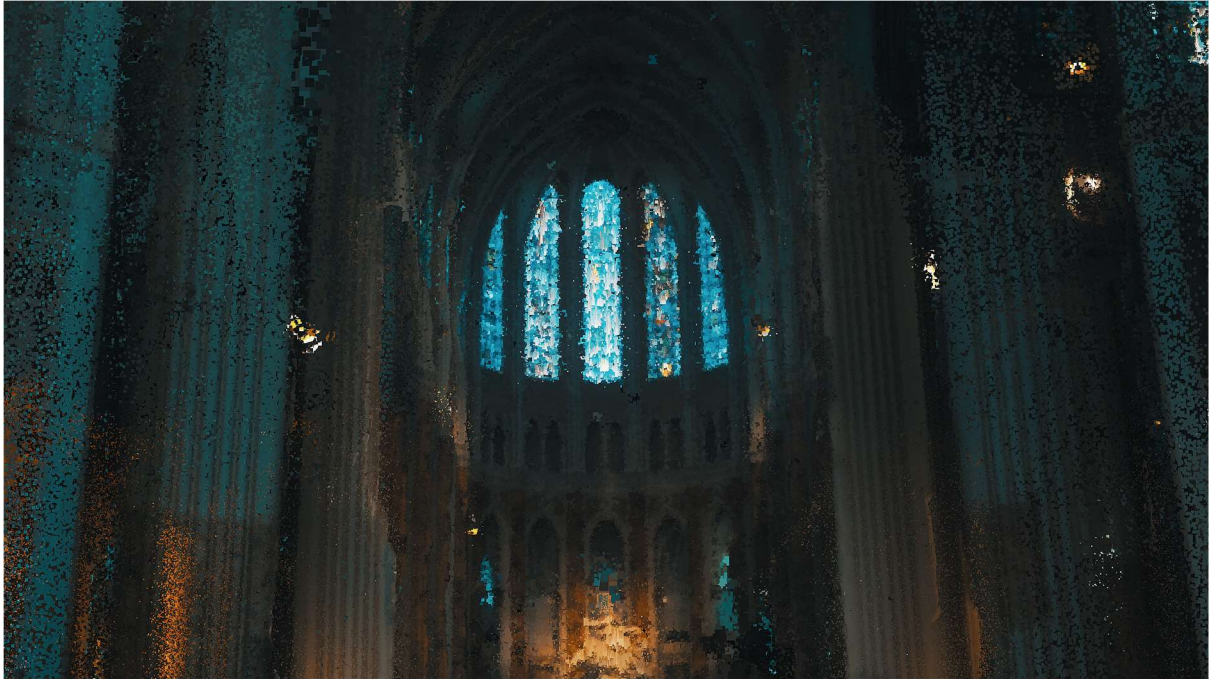


Figure 52: Images venant du court métrage "La Cathédrale".⁷⁶

Benjamin Bardou est un artiste français qui réalise des courts métrages à partir de nuage de points. Son travail est intéressant car il réussit à insuffler de la vie dans un nuage de points juste avec du compositing et un mouvement de caméra à l'épaule.

Outre le fait qu'il utilise la photogrammétrie à sa première phase, l'approche fait gagner un temps de production considérable car il n'y a pas besoin de retouches, le nuage étant exploité brut, on ne voit pas les défauts de son scan et il n'y a pas de compression de texture. La transparence laisse libre court à notre imagination. L'utilisation ici d'un édifice religieux rend la création plus forte, on entre dans un monde "surnaturel". Le rendu de l'image nous rappelle le pointillisme.

Cette artiste n'utilise donc pas la numérisation pour une finalité technique ou concrète, il l'utilise de façon artistique, pour sublimer les lieux qu'il visite.

⁷⁶ https://benjaminbardou.com/projects/VdLDmX?album_id=73182

Menara - Nuage de points Sketchfab



Voici le scan d'un arbre haut de cent mètres. Le végétal est un sujet compliqué à numériser en extérieur pour deux raisons ; tout d'abord, la météo, à cause notamment du changement de lumière ou de vent, ensuite c'est un sujet organique. Il y a une multitude d'informations à capturer entre les branches à l'intérieur des amas de feuilles etc... Le fait que ce modèle soit au milieu d'une forêt le rend d'autant plus compliqué à scanner, sa taille rajoute encore plus de difficultés. C'est un scan qui a été réalisé avec un LIDAR et une prise de vue par drone. ⁷⁷

Figure 53: Sur cette image on peut voir un arbre en nuage de points, image extraite d'une capture d'écran Sketchfab. ⁷⁸

OFabulius - Edwige Lelièvre

OFabulius est un jeu de rôles et d'aventures en ligne, un projet porté par Edwige Lelièvre qui s'intéresse dans son travail à la valorisation du patrimoine.

Il était possible de visiter plusieurs monuments dans ce jeu : "Basilique Cathédrale de Saint-Denis, Villa Savoye, Château de Vincennes, Panthéon, Château de Maisons (Maisons-Laffitte), Abbaye du Mont-Saint-Michel, Alignements de Carnac, Site archéologique de Glanum, Tours de la Rochelle, Palais du Tau, Château de Castelnau-Bretenoux, Monastère de Saorge, Château d'Azay-le-Rideau, Abbaye de Cluny, Château de Bussy-Rabutin, Maison de George Clemenceau, Château d'If, Fort Saint-André et Place forte de Mont-Dauphin." ⁷⁹

Grâce au point and click, le personnage mène des enquêtes qu'il lui faut résoudre en explorant les divers monuments. Ce principe ludique permet d'apprendre l'histoire des lieux présentés. Le projet est intéressant car il rend la représentation des lieux historiques interactive.

⁷⁷

https://www.eci.ox.ac.uk/news/2019/0408.html?fbclid=IwAR3OqEErP7uQwG8i4sLutBHGQGJGHH6UHTe5IHgiXGOLNe3LnJh416_f4HM

⁷⁸ <https://sketchfab.com/3d-models/lidar-uav-model-of-menara-b828f4569ab14188b07c9609511330b7>

⁷⁹ <http://www.armaghia.fr/ofabulispres/>

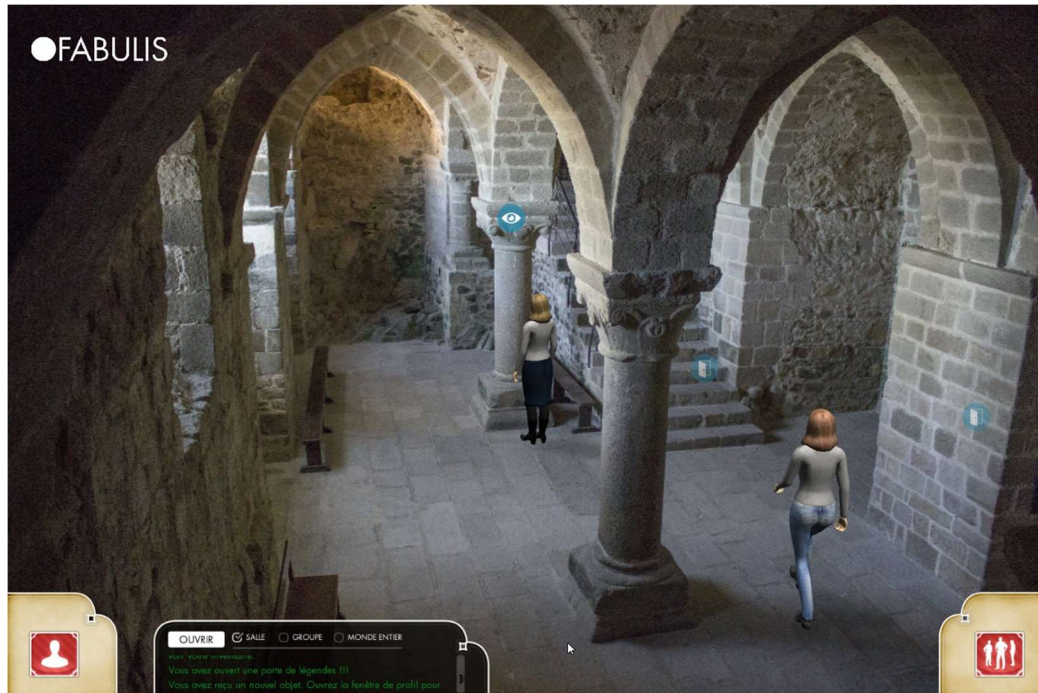


Figure 54: Image tiré du jeux vidéo OFabulis.⁸⁰

Nefertari's Tomb, Steam VR et Youtube 360° :

Il existe deux œuvres similaires sur le tombeau de Nefertari. L'une est une vidéo en prise de vue réelle 360° "CuriosityStream 360: Nefertari's Tomb"⁸¹ et l'autre est un jeu Steam en VR "Nefertari: Journey to Eternity"⁸². Les deux œuvres présentent chacune le même lieu mais ont des témoignages différents.

- La vidéo 360° nous montre comment le tombeau est actuellement ; aménagement pour la visite, lumière, outils pour travaux de restauration ou d'entretien, l'état dans lequel on peut le visiter à ce jour.
- L'expérience VR nous présente le tombeau à sa découverte, avant les aménagements d'aujourd'hui, juste avec quelques lumières. Le joueur peut contrôler une lampe torche avec sa manette et décide du lieu où il veut se rendre pour visiter le tombeau. Le jeu le guide sur les hiéroglyphes importants en les entourant de bleu quand il s'en approche. Le fait que les développeurs de ce jeu gardent le site tel quel et non en essayant approximativement de le rendre comme il était à l'époque de sa construction, est intéressant ; elle permet de conserver l'authenticité de l'expérience.

⁸⁰ <http://www.armaghia.fr/ofabulispres/>

⁸¹ <https://www.youtube.com/watch?v=tzQbLUzQHcA>

⁸² <https://www.youtube.com/watch?v=Alk1T15imMQ>



Figure 55: CuriosityStream 360: Nefertari's Tomb, Vidéo 360°. ⁸³



Figure 56 : Nefertari: Journey to Eternity Expérience VR. ⁸⁴

Atelier des Lumières :

L'Atelier des Lumières est un centre d'Art Numérique qui a ouvert en 2018 à Paris. Le lieu est une ancienne fonderie et dispose donc d'une grande surface. Les œuvres présentées dans ce lieu sont soit des tableaux numérisés, soit des créations numériques, projections sur tout l'espace de la salle. Il y a une réappropriation numérique du support pictural. Les œuvres que le public a l'habitude de voir dans des musées plus classiques, ici, sont exposées de manière surdimensionnée. Le fait de créer une animation nous raconte autrement la peinture, les œuvres sont liées les unes aux autres et font naître une cohérence dans l'ensemble de la production du peintre.

L'atelier a projeté des œuvres de Klimt, de Van Gogh et des œuvres picturales japonaises. C'est une immersion collective dans du patrimoine sublimé, autant en mouvement qu'en musique, par conséquent une approche ludique de l'histoire de l'art. Les artistes ici ont une démarche créative via la numérisation. ⁸⁵

⁸³ <https://www.youtube.com/watch?v=tzQbLUHQhCA>

⁸⁴ <https://www.youtube.com/watch?v=Alk1T15imMQ>

⁸⁵ <https://www.atelier-lumieres.com/fr/home>



Figure 57: Photo de l'exposition "Van Gogh, La nuit étoilée", Atelier des Lumières, Paris 2019. ⁸⁶

Bibliothèque de modèle 3D en ligne - Sketchfab :

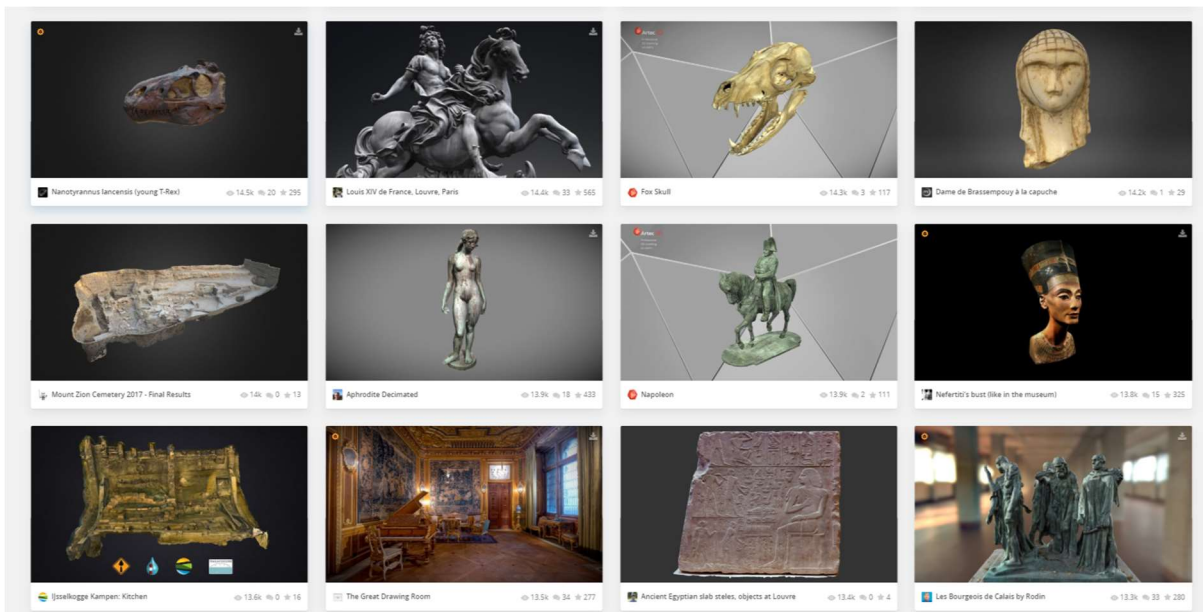
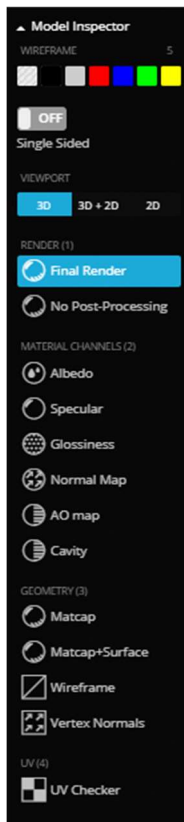


Figure 58: Exemple d'objet 3D visualisable sur l'interface de Sketchfab. ⁸⁷

⁸⁶ <https://www.atelier-lumieres.com/fr/van-gogh-nuit-etoilee> © Culturespaces / E. Spiller

⁸⁷ <https://sketchfab.com/3d-models/categories/cultural-heritage-history>



Sketchfab est une plateforme française de modèles 3D visualisable en temps réel. Cette bibliothèque contient plusieurs millions de modèles 3D visualisables et certains téléchargeables. L'index de référencement contient de nombreux sujets : Animaux, architecture, art, véhicule, personnage, héritage culturelle, nourriture...

Les artistes qui publient leurs œuvres sur ce site peuvent mettre en vente leurs modèles. Sur l'interface de visualisation des modèles, il est possible d'isoler les différentes couches de matériaux, d'afficher le maillage de l'objet ou les UVs...

Il y a plusieurs types d'utilisateurs sur cette plateforme, des musées internationaux s'intéressent déjà à ce type de numérisations interactives pour archiver les créations qu'ils détiennent, des entreprises comme ICONEM y publient leurs modèles et des indépendants peuvent exposer leurs travaux.

Ci-dessous, le Taureau Androcéphale du Musée du Louvre. Sur ce type d'œuvre exposé, on peut constater l'intérêt de les numériser. La statue fait plusieurs mètres de haut et donc n'est pas entièrement visualisable par le public.

Figure 59: Menu de l'interface de Sketchfab.

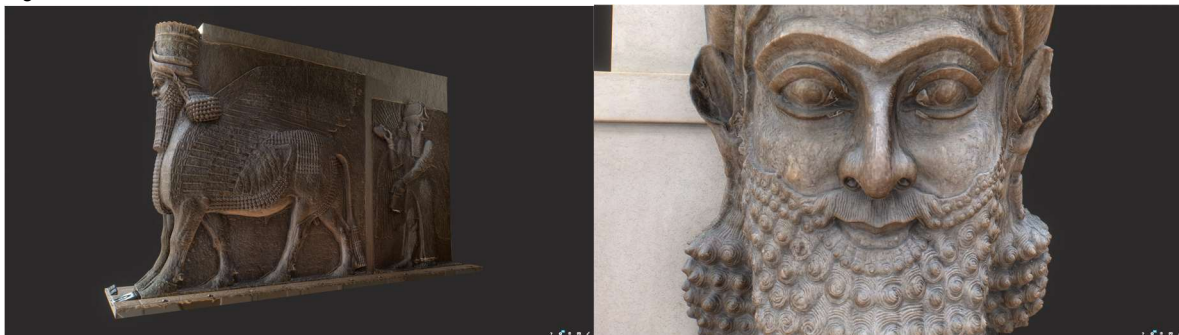


Figure 60: Visualisation interactive du Taureau Androcéphale du Musée du Louvre sur Sketchfab.⁸⁸

⁸⁸ <https://sketchfab.com/3d-models/taureau-androcephale-du-musee-du-louvre-11897a591e5347629543c79434b4a9ab>

Notre dame - Assassin's creed unity :



Figure 61: Image du jeu Assassin's Creed Unity.⁸⁹

Dans le jeu Assassin's Creed Unity, Ubisoft a modélisé Notre Dame de Paris au plus juste, seulement avec les informations d'internet.⁹⁰

Après son incendie, Ubisoft décide de mettre le jeu en téléchargement gratuit pour une semaine et le jeu a été téléchargé 3 millions de fois.⁹¹ Ce jeu fait une bonne utilisation du patrimoine modélisé en l'intégrant au cœur d'un gameplay, ici la modélisation est interactive à échelle humaine, on peut visiter notre dame et escalader le toit.

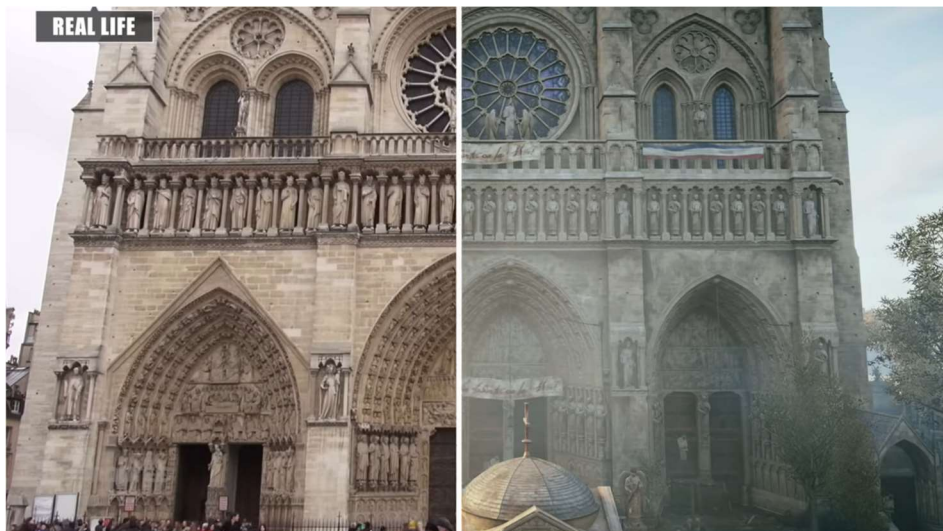


Figure 62: Un parallèle entre une photo et une image tiré du jeux vidéo.⁹²

⁸⁹ <https://www.jeuxactu.com/notre-dame-ubisoft-offre-assassin-s-creed-unity-pendant-une-semaine-118033.htm>

⁹⁰ <https://www.youtube.com/watch?v=KLKLOtxFGps>

⁹¹ <https://www.millennium.org/news/331035.html>

⁹² <https://www.youtube.com/watch?v=A5skN3mM-pc>

Arche de Palmyre - Impression 3D :



Figure 63: Machine qui taille le matériau avec un jet d'eau sous pression et une fraiseuse. ⁹³

Après la destruction du site archéologique de Palmyre, son arche, toujours debout, a été scannée. Un projet a été créé pour imprimer cette numérisation et pour l'exposer en Angleterre et aux États Unies dans le but d'une prise de conscience du monde du patrimoine mondial en danger. Cette prouesse est intéressante pour créer des répliques à l'identique d'œuvres via le scan ou la modélisation 3D. ⁹⁴



Figure 64: Photo de l'impression 3D d'une partie de l'Arc de Septime Sévère exposé à Washington. ⁹⁵

⁹³ <https://vimeo.com/161046225>

⁹⁴ <https://www.youtube.com/watch?v=IGVMPCBSfw>

⁹⁵ https://www.youtube.com/watch?time_continue=222&v=mvylakWVi8o

Mont-Saint-Michel - Art graphique et Patrimoine :

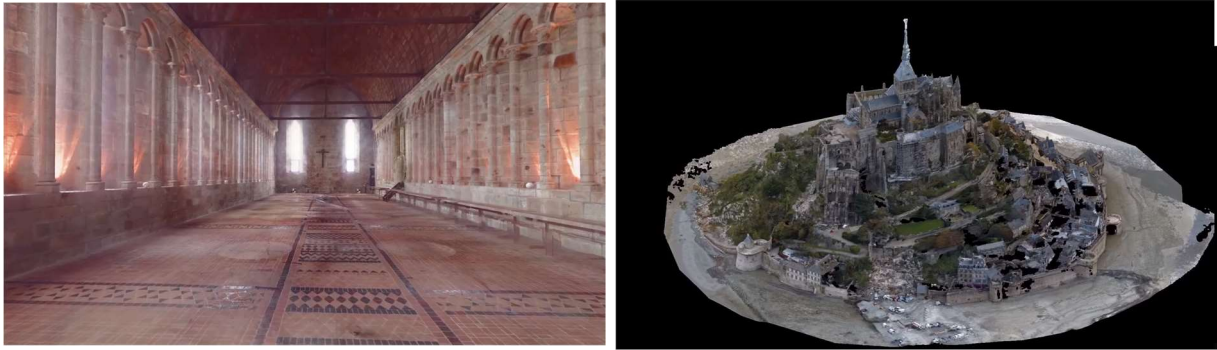


Figure 65: Balade dans le nuage de points du Mont Saint-

Michel.⁹⁶

Cette œuvre témoigne de plusieurs utilisations d'échelles dans un même nuage de points. Ici, le Mont Saint Michel est scanné dans sa globalité, mais cette numérisation nous permet aussi de visiter les différents sites qu'il héberge. Les nuages de points permettent une numérisation de grande échelle jusqu'à ses moindres détails.

Quixel megascans :

Quixel est une société suédoise ayant créé une bibliothèque de matériaux 3D. Les textures produites par cette société sont des numérisations d'éléments réels : Végétation, pierre, asphalte, neige, sol, mur, moisissure, eau, plastique, papier...

Ces types de numérisations sont du patrimoine au sens large, elles sont similaires aux herbiers ou aux illustrations dans les encyclopédies mais sont utilisées dans un contexte de production.

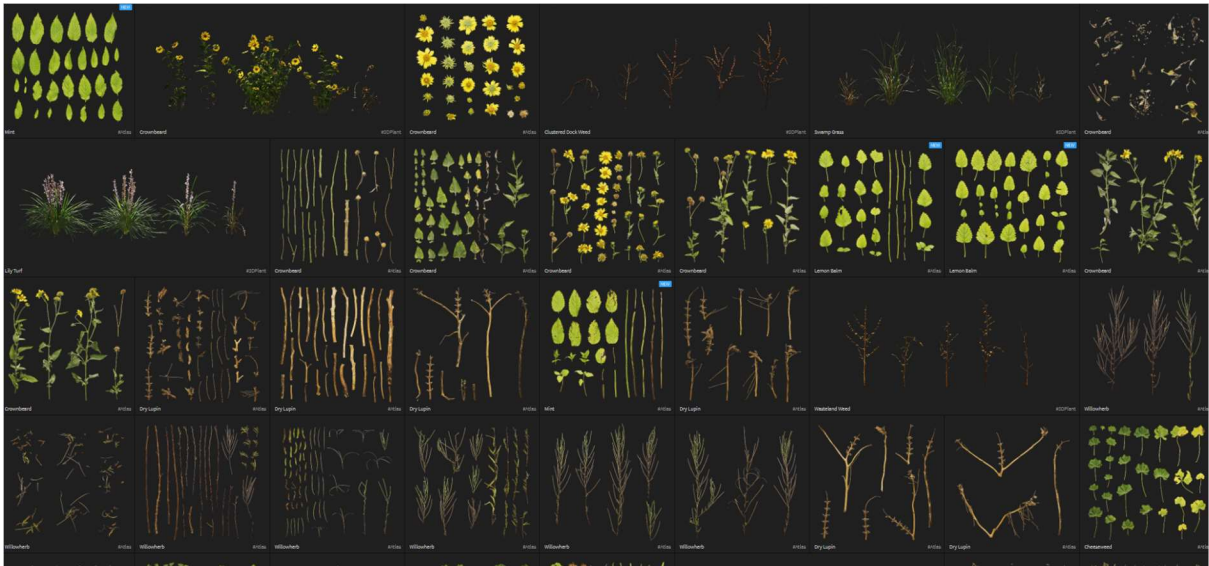


Figure 66: Image de l'interface du site internet de quixel où l'on peut sélectionner le type de plants que l'on veut télécharger.⁹⁷

⁹⁶ <https://www.youtube.com/watch?v=mdQ2Yiy2j7w>

⁹⁷ <https://quixel.com/megascans/library?category=plants>

Conclusion

Cette première partie expose différentes technologies de numérisation. Certains procédés comme la réflectance peuvent être utilisés via un appareil photo, d'autres ne sont pas accessibles au grand public vis à vis de sa dangerosité et de son prix.

Nous avons vu l'évolution de l'histoire de la photogrammétrie. Ces premiers balbutiements nécessitaient un grand nombre de compétences diverses ainsi qu'un temps considérable, tandis qu'aujourd'hui, en quelques minutes, un simple téléphone suffit à produire une photogrammétrie numérique décente.



Le patrimoine peut être quelque chose de complexe à aborder. Plus le sujet d'étude est ancien, plus il est susceptible de faire partie de notre patrimoine malgré le fait qu'il soit obsolète ou inutile. Les collections des musées regorgent d'éléments qui étaient considérés, à l'époque, comme utilitaires par leur contemporain, et qui aujourd'hui font partie intégrante du patrimoine, comme peut le témoigner cette photo de hache exposée au musée d'archéologie nationale.

Figure 67: Hache emmanchée à gaine, Photo (C) RMN-Grand Palais (musée d'Archéologie nationale).⁹⁸

⁹⁸ https://musee-archeologienationale.fr/phototheque/oeuvres/hache-emmanchee-a-gaine_bois-de-cerf_silex

II - De la conception à la finalisation d'une œuvre

Introduction

Dans cette partie je vais exposer mes diverses expérimentations autour de la photogrammétrie. Pour mieux comprendre les différentes étapes de production de la conception d'un modèle 3D via cette technique, j'ai fait un schéma ou j'ai défini chaque étape.

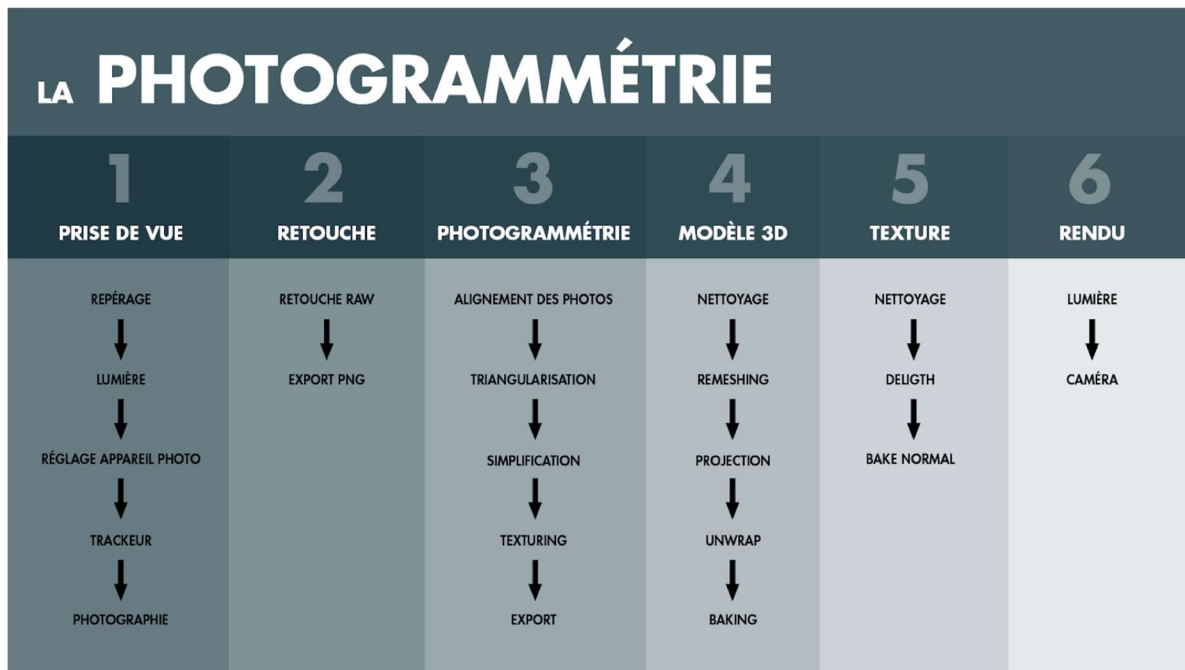


Figure 68: Schéma explicatif des étapes du procédé photogrammétrique.

1- Prise de vue

Repérage

La première étape pour débiter une photogrammétrie réussie est d'appréhender l'espace où celle-ci sera effectuée. Si elle se fait dans un lieu inconnu, difficile d'accès ou extrêmement fréquenté, la visite préalable du lieu est conseillée pour repérer et anticiper les éventuels problèmes météo, législatifs lors de la prise de vue.

Lumière

Avant de commencer une prise de vue, il faut s'assurer d'une bonne installation lumineuse. Si c'est en intérieur on peut soit utiliser l'éclairage ambiant de la pièce (ce sera plus facile car cela ne nécessite pas d'installation mais cette technique ne permet pas de contrôle de précision), soit se servir d'éclairages portatifs. Cela dit, l'installation lumineuse une fois terminée, il faudra vérifier qu'aucune ombre due au mouvement du photographe ne vienne se superposer à l'objet d'étude. Si c'est en extérieur, il faut s'assurer d'une météo constante dans sa luminosité. Deux types d'éclairage existent; soit le technicien veut supprimer les ombres, de ce fait il va utiliser la lumière de façon à ce que le sujet ait une uniformité lumineuse sur lui, soit il veut représenter l'objet d'étude avec son éclairage naturel, dans ce cas il faut juste utiliser les lumières comme elles sont. Cette phase va être la plus importante en photogrammétrie, c'est cette partie qui va influencer tout le travail qui va suivre.

Réglage appareil photo

Lorsqu'il est certain de la stabilité de la lumière, le technicien doit adapter les réglages de son appareil photo vis à vis de son environnement. Si l'appareil photo le permet, le choix de l'export en raw est un plus non négligeable, ce qui pourra permettre une retouche des photos sans compression d'images. La balance des blancs, l'isométrie et la focal sont des réglages qui devront rester fixes dès la première prise de photo.

Trackeur

Les trackers aident les algorithmes de reconnaissances de zones. Ils vont être utiles sur des étendus trop uniforme ou dans les espaces trop grands, ils peuvent aussi être disposés sur des surfaces que la photogrammétrie a des difficultés à reconnaître, comme des vitres par exemple.

Prise de vue

Cette étape ne nécessite que de la rigueur dans la prise de vue. Il n'y a pas de réflexion artistique à avoir juste un procédé à adapter en fonction du lieu pour photographier la salle dans tous les recoins possibles avec un maximum de points de vue différents et en accentuant la prise de vue dans les angles. Il faut des photos nettes et des lumières uniformes. Assurez-vous de ne pas déplacer d'objets sur votre trajet de prise de vue, car sinon, il sera corrompu lors de l'export.

2- Traitement de la prise de vue

Retouche du Raw

Si les images ont été enregistrées en Raw, lorsqu'elles sont ouvertes avec un logiciel Adobe la fenêtre du "Camera Raw" apparaît. Elle permet de retoucher l'image sans affecter ses propriétés. Des informations sont données concernant la nature des réglages de la prise de vue. Cette fenêtre va vous permettre d'atténuer autant que possible les ombres de votre séquence d'image.

Export en PNG

Si vous avez pris une vidéo pour effectuer votre prise de vue, vous devrez obligatoirement passer par cette étape. Un export fait en général entre 60 et 2000 photos pour les plus grands espaces, au-delà de 2000 photos, le logiciel risque de ne pas bien interpréter les images.

Les logiciels de photogrammétrie traitent les images par rapport à l'appareil natif de la prise de vue. Il n'est pas rare de devoir ré-exporter la prise de vue en séquence PNG via After Effect car l'appareil utilisé lors du shooting n'est pas dans la base de données du software.

3- Photogrammétrie

Alignement des photos

Le logiciel fait un track de positionnement de caméra et aligne dans un espace (x,y,z) les photos les unes par rapport aux autres. C'est après cette étape que l'on récupère un nuage de points. Le processus peut s'arrêter ici vis à vis du type de rendu final voulu.

Triangularisation

Ce procédé permet de transformer le nuage de points en objet 3D. C'est en général à ce moment précis que l'on peut se rendre compte de la réussite ou de l'échec de la prise de vue ou du processus d'alignement.

Simplification

Les modèles triangularisés peuvent être très lourds allant jusqu'à plusieurs centaines de milliards de triangles. Suivant le type de logiciel utilisé, il est possible de grandement réduire le nombre de triangles de l'objet.

Texturing

Certains logiciels permettent un accès avancé en ce qui concerne les options de dépliage d'Uvs. On peut choisir le type d'export du fichier comme le jpeg, le png ou encore le tiff, sa taille numérique 2k, 4k, 8k, 16k... C'est une partie qui ne faut pas négliger si l'on veut optimiser la qualité de texture final.

Export

Cette phase va permettre de régler les paramètres d'export du mesh, du nuage de point, ainsi que de la texture.

4- Traitement du modèle 3D

Nettoyage

Les modèles 3D brut extraits des logiciels de photogrammétrie ont souvent besoin d'être nettoyés globalement avant toute retouche. Vous devrez par exemple supprimer ou raccorder des polygones, modifier la position de l'objet ou encore mettre celui-ci à l'échelle voulue.

Remeshing

Cette phase va vous permettre de contrôler le nombre de polygones de votre modèle. Si votre sujet va être animé, il est préférable d'entreprendre une retopologie manuelle pour adapter sa topologie à l'animation, sinon vous pouvez utiliser des outils d'automatisation de la tâche comme le "Zremesher" du logiciel Zbrush. Si vous voulez faire un rendu temps réel avec votre sujet, réduisez un maximum le nombre de polygones de celui-ci tout en conservant le plus d'information possible.

Projection

Une fois que votre objet a le nombre de polygones voulus, vous pouvez faire une projection de votre objet natif sur le nouveau pour récupérer le plus grand nombre d'information du modèle brut à celui retravaillé.

Unwrap

Vous devrez entreprendre cette action car le remeshing va effacer les informations de dépliage d'Uvs de votre précédent modèle. Cette action peut être entrepris manuellement ou automatiquement suivant votre type d'objet d'étude et le rendu souhaité.

Baking

Le baking va transférer la texture du modèle natif sur l'objet retravaillé. Attention au logiciel utilisé pour cette action car certains restreignent la taille de l'export. Pour cette tâche, j'utilise Marmoset Viewer car il n'a pas de taille restrictive et permet aussi la visualisation du résultat de cette action en temps réel.

5- Traitement de la texture

Clean

Si la texture contient des défauts d'exports ou des zones trop sombres, lumineuses ou sans informations, cette phase permet de réinterpréter ceux-ci.

Deligth

Cette étape va servir à atténuer un maximum les ombres. Des logiciels comme Unity permettent de réaliser cette action automatiquement mais ont une taille d'export restreinte. Vous pouvez également utiliser des logiciels de retouches photographiques basiques.

Bake normal

Il est possible de transférer les informations normal map sous forme de textures du modèle natif à l'objet travaillé. Cette étape nécessite aussi un nettoyage de la texture obtenue.

6- Rendu

Lumière

Une fois toutes ces étapes accomplies, éclairer votre scène 3D et importer l'objet pour faire des rendus.

Caméra

Positionner votre caméra avec l'angle de vue souhaité pour faire le rendu final de votre scène.

Peu de livres sont disponibles actuellement sur ces sujets. Cela dit, il existe de très bons tutoriels détaillés sur ce processus.⁹⁹

⁹⁹ <https://80.lv/articles/full-photogrammetry-guide-for-3d-artists/>
<https://www.youtube.com/watch?v=BrRzeMY-aQI&feature=youtu.be&fbclid=IwAR1D9ZB2vJh1xTjVhzFPPJKSWEcVNjZsrtabr6LQ0QPmqFz2KKb1NbQa-n0>

A- Prise de vue

Dans la première partie de mon mémoire, j'ai expliqué les multiples procédés théoriques de prises de vue dans différents types de lieux. Je vais à présent exposer mes expérimentations dans des cas pratiques.

1- Intérieur

Masque

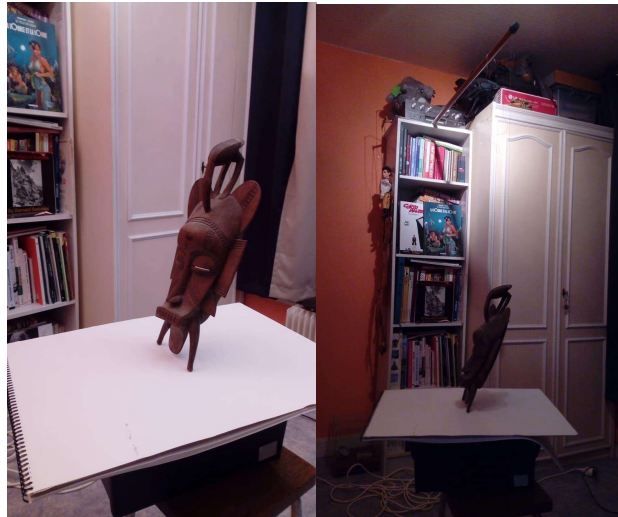


Figure 69: Avec ces deux images, je présente ma première installation pour photographier ce masque.

Cette expérimentation a nécessité de prendre en photo le masque ci-dessus. Comme vous pouvez le constater, il était difficile de le faire tenir debout durant la prise de vue. J'ai réussi à passer outre cette difficulté en l'attachant à un manche à balai via un fil pour qu'il reste stable. J'ai réalisé une soixantaine de photographies en tournant autour de l'objet depuis trois hauteurs de prises de vues différentes. Pour ce projet, j'ai utilisé un Ipad pour réaliser mes prises de vues, pour ce qui est des lumières, j'ai utilisé l'éclairage ambiant de la pièce, un plafonnier, et rajouté deux halogènes.

Cave - Rosny

La problématique ici était de faire une photogrammétrie d'intérieure dans un espace étroit, il s'agit d'une cave rectangulaire remplie d'éléments. Dans un premier temps, j'ai essayé de faire une vidéo avec un appareil photo basic Sony. J'ai fait 10 minutes de vidéos où je prenais les éléments en plan large puis en plan rapproché. Pour les plans larges, je me suis mis dos au mur et j'ai tourné autour de la pièce en ayant plusieurs angles et hauteurs différentes et pour les plans rapprochés, je tournais autour des éléments avec le plus d'informations. Ce premier test n'a pas fonctionné parce que la vidéo était trop longue et lors de mon export, j'ai essayé d'utiliser 8000 puis 4000 images. Beaucoup de photos n'étaient pas nets du fait que je maniais l'appareil photo à la main. A l'export de la vidéo, After Effect a gardé les plans en mouvements rapides et donc flous. Je suis retourné dans ma cave avec un Ipad, en gardant la même méthode de prises de vue mais cette fois ci, en prenant des photos. J'ai pris 240 photos et cela a fonctionné.

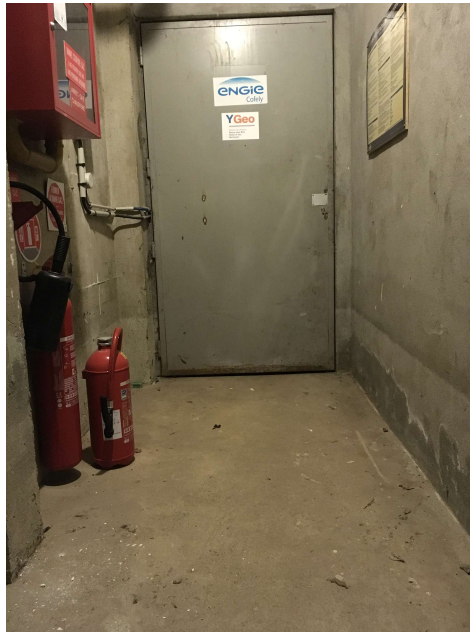


Figure 70: Photo de la cave.

Cave du Roy - Sèvres

Mon premier projet de grande ampleur a été de faire une photogrammétrie des Caves du Roy à Sèvres. J'ai envoyé un mail à la personne se chargeant de l'entretien de ses caves. Elle a accepté de me faire visiter ce lieu pour que je fasse un repérage des différentes salles. J'y suis allé avec des éclairages Led sur batteries, deux de 30 watts et deux de 20 watts, ainsi qu'avec un appareil photo Sony. Pendant la visite, j'ai fait des tests de scan sur quelques objets et espaces pour éviter des désagréments lors du tournage. J'ai utilisé des vidéos pour ces tests car lors de la visite, le guide avait un temps limité à nous accorder. La technique est plus rapide à effectuer sur le terrain mais perd de sa qualité de rendu.

L'homme qui s'occupe de l'entretien du site m'a donné les clés ainsi que l'autorisation de rester une journée entière dans ces caves pour scanner ce qui m'intéressait.

J'y suis retourné avec un Canon 5D, des lumières à éclairages Led 2x30w/2x20w et des diffuseurs improvisés draps blancs, plaques de polystyrène et un pare soleil de voiture. Trois personnes m'accompagnaient ; Florian, Yorgos et Bruno.

L'objectif de la journée était de scanner une salle entière. Le site est complètement plongé dans l'obscurité et les batteries des éclairages Led 20 watts ne tiennent que 5h, ceux de 30 watts ont une autonomie de 2h30 à puissance maximum de leurs capacités et 5h à puissance moyenne. Après avoir choisi une salle, nous avons décomposé le scan de la salle en plusieurs parties.

Les murs

Les quatre lumières éclairaient un point fixe. La prise de vue avait pour objectif de capturer tout l'espace lumineux disponible avant de changer les lumières de place et de répéter cette action en tournant autour de la pièce.

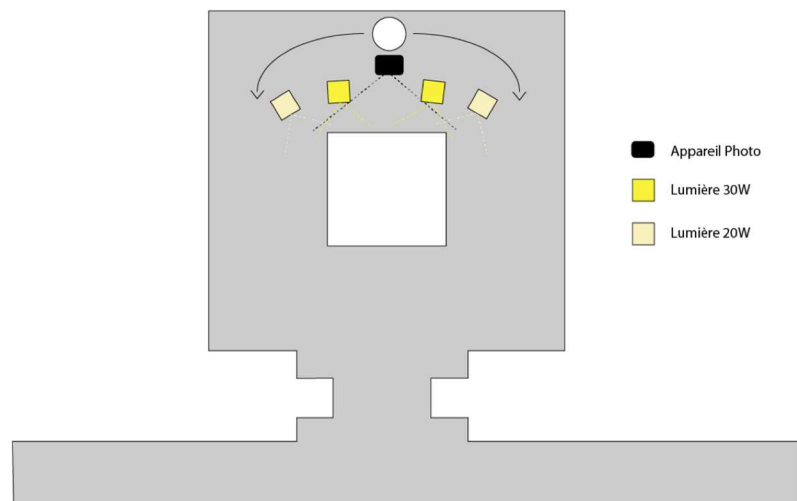


Figure 71: Schéma expliquant la démarche de prise de vue des Cave du Roy.



Le plafond

Après avoir fini la captation des murs, nous avons répété le même processus que précédemment mais en orientant les lumières vers le haut et en prenant des clichés photographiques avec un angle allant de 180° à 100°.

Figure 72: Photo expliquant la démarche de prise de vue des Cave du Roy.

Durant cette prise de vue, nous n'avions pas accès à un éclairage permettant de couvrir l'entièreté de l'espace. Nous avons donc dû trouver une solution de remplacement, la plus évidente était d'utiliser celle présentée ci-dessus. Durant la prise de vue, nous ne savions absolument pas si cela allait fonctionner.

Nous avons compris après ce test que les règles de la bonne prise de vue photogrammétrique peuvent être détournées. J'ai constaté aussi que les tournages devaient être un maximum préparé, autant au niveau technique que logistique au risque de devenir rapidement fatigants et inefficaces.

Salle de la Coupole - Père Lachaise



Figure 73: Photo de la salle de la coupole au Père Lachaise

Je suis allé à la salle de la Coupole au Père Lachaise pour faire une photogrammétrie de l'endroit. Je disposais de deux heures dans le lieu et lorsque je suis arrivé, les conditions n'étaient pas optimales pour la prise de vue souhaitée. Je ne pouvais ni déplacer le mobilier ni changer l'éclairage, d'abord par manque de temps et ensuite parce que la salle est bien trop grande. Il y avait aussi des salariés qui répétaient pour les cérémonies du lendemain dans la salle lorsque je procédais aux photos. J'ai donc effectué la prise de vue avec l'éclairage et en laissant les objets que j'aurais autrement déplacé si j'en avais eu le temps et l'autorisation. J'ai capturé le lieu au naturel.

Maison de la Pierre - Saint-Maximin



Figure 74: Photo de la Maison de la Pierre à Saint-Maximin

Lors de mon projet intensif, je devais faire une prise de vue d'un souterrain. J'ai demandé une autorisation de prise de vue à la Maison de la Pierre à Saint-Maximin, ai eu une réponse rapide ce qui m'a beaucoup aidé vis à vis du temps imparti pour mon exercice. J'y suis donc allée avec un ami qui

allait m'aider pour les lumières. Le lieu était beaucoup trop grand et trop ouvert ainsi que peu éclairé pour scanner une pièce dans sa totalité. De plus, les personnes qui l'entretiennent avaient organisé des visites scolaires durant notre captation. J'ai donc décidé de prendre des morceaux de murs séparément pour les réassembler après.

J'ai compris qu'il fallait que j'investisse dans des pieds de lumière à roulettes à la fin de la journée lorsque je me suis rendu compte que mon ami était fatigué de tenir les lumières et qu'on devait constamment les changer de place.

Cave - projet intensif

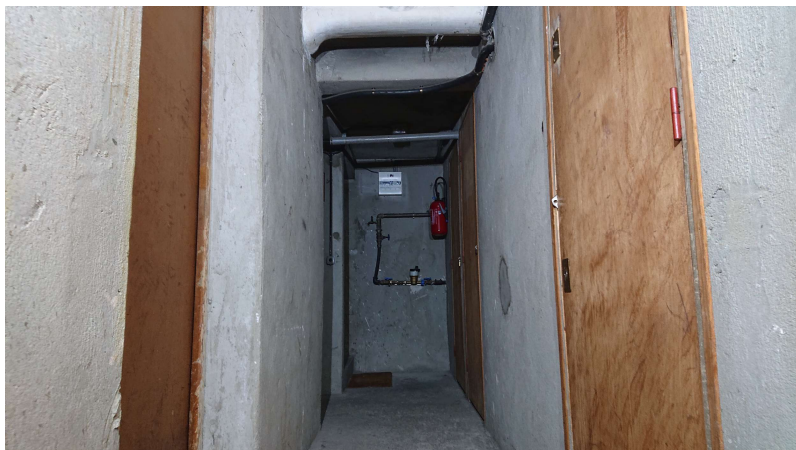


Figure 75: Photo de la cave.

Mon projet intensif nécessitait aussi un scan de cave. J'ai été chez un ami qui habite un immeuble avec une cave collective assez étroite et rencontré plusieurs soucis; l'éclairage ambiant n'était pas du tout uniforme et mon ami n'a aucune cave dans ce lieu collectif. Nous avons donc dû tourner la nuit en essayant de ne pas être repérés par ses voisins.

Pour ce premier essai, j'ai utilisé un reflex sur pied et mon ami m'a suivi avec la lumière. A chaque fois que j'avais dans le couloir, il éclairait au rythme des mouvements de mon appareil photo. Cette technique n'a pas du tout fonctionné.

J'y suis retourné avec deux amis le lendemain soir pour essayer une prise de vue avec deux lumières mais qui ne se déplacent que lorsque je change de lieux. J'ai aussi changé d'appareil photo et pris mon portable pour avoir plus de recul. Même résultat, cette technique a aussi échoué. Je me suis rendu compte que je ne pouvais pas scanner des lieux trop étroits en éclairant moi-même l'espace. J'aurais dû essayer la prise de vue avec l'éclairage du lieu.

J'ai réessayé de faire des prises de vue dans une autre cave moins grande. Nous avons utilisé quatre lumières ce qui permettait d'avoir plus d'uniformité dans la prise de vue. Cela n'a pas toujours pas fonctionné comme nous le souhaitions.

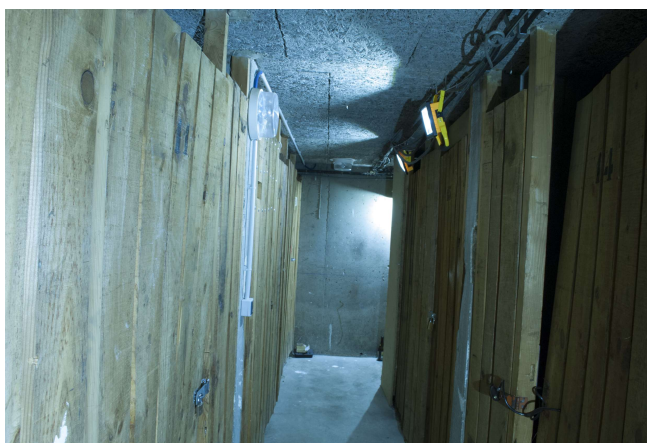


Figure 76: Photo de la cave.

Cité de l'Architecture - Paris

Dans la première partie de mon mémoire, je vous ai exposé comment j'ai dû obtenir une autorisation pour tourner dans ce lieu. Mon projet intensif nécessitait des statues. J'ai donc été à la Cité de l'Architecture pour faire mes prises de vues. Je voulais rester la journée dans le musée pour capter un maximum de modèles. La capture d'œuvre dans les musées est assez compliquée car la scénographie de certains d'entre eux ne permet pas de pouvoir faire un tour complet des œuvres. De plus, arrivé à une certaine heure, il y avait trop de visiteurs pour que je puisse continuer à travailler dans de bonnes conditions. Je suis donc rentré en milieu d'après-midi traiter les objets que j'avais réussi à capturer dans le musée.



Figure 77: Photo de la cité de l'architecture, exposition permanente. Paris 2019

2- Extérieur

Assets et textures- Projet intensif



Figure 78: Photo d'une boîte à outils.

Mon projet intensif nécessitait la création d'assets en photogrammétrie. Dans mes productions du premier semestre, je ne trouvais pas le moyen d'optimiser les prises de vue d'objets ou alors, cela me demandait beaucoup de temps d'installation de lumières uniformes. J'ai vite compris que les prises de vue avec une lumière led en intérieure étaient trop longues pour la quantité d'assets que j'avais à produire. J'ai donc essayé les prises de vue en extérieur avec un temps nuageux. J'ai capté un spray

à peinture, un pneu, une lampe, un extincteur, un duvet et une boîte à outils sans problèmes. J'ai cependant rencontré une difficulté lors d'une prise de vue de boîte en carton car il y avait du vent. Pour cette utilisation, la photogrammétrie en extérieur est plus rapide et trouve plus de points de tracking dans son traitement.



Figure 79: Photo des quais de seine, Paris.

J'ai aussi pris en photos des textures à Paris. Au début je voulais aller sur l'accès de la petite ceinture qui est à l'est. Manque de chance, il était fermé. J'ai donc dû improviser une ballade dans Paris à la recherche de textures exploitables pour le projet. A la fin de la journée, j'avais quelques textures de roches, pavés et autres assets mais vu que je n'avais pas prévu plus de lieux à l'avance j'ai perdu beaucoup de temps sur mes prises de vue. J'ai aussi voulu prendre une porte du père Lachaise dans les jardins publics de celui-ci. Cependant, plusieurs gardes du jardin me regardaient avec insistance lorsque j'ai sorti mon pied d'appareil photo. Je me suis alors résigné à ne pas faire la prise de vue qui aurait duré plusieurs heures.

3- Intérieur et extérieur

Maison des Mougères



Figure 80: Photo prise d'un drone des Mougères, Région centre.

Ayant récemment acquis un drone, j'ai voulu apprendre à m'en servir tout en réalisant un projet, à savoir faire un scan complet d'une maison, intérieur et extérieur. Je souhaitais trouver la méthode pour réussir à fusionner mes prises de vue pour ne récupérer qu'un seul modèle 3D. Après avoir passé une journée à prendre en main le matériel et à estimer le parcours aérien que j'allais faire emprunter à mon drone, j'ai pu passer à la prise de vue. Une fois la captation aérienne terminée, j'ai commencé une prise de vue externe avec un point de vue au sol de la maison.

J'ai rencontré un problème lorsque j'ai voulu entreprendre l'intérieur ; pour faire la liaison des deux captations, il fallait que j'ouvre la porte, ce que j'avais oublié de faire pour les captations externes. J'ai quand même voulu entreprendre le processus à l'intérieur mais le soleil ne m'a pas permis de faire des prises de vue optimales.

La prochaine fois que je ferais cet exercice, j'imprimerai des trackers que je disposerai sur toute l'ouverture et fenêtre présente sur le modèle.

Je vous ai présenté mes différentes expériences de prise de vue, abordons à présent le traitement des photos.

B- Traitement des photos

Pour cette partie, je vais vous exposer mes expérimentations les plus intéressantes concernant les logiciels de photogrammétrie. J'en ai utilisé trois différents durant toutes mes tentatives mais j'en ai adopté un très vite, à savoir reality capture. Je vais commencer par une brève présentation de chaque logiciel.

Meshroom ¹⁰⁰

Meshroom est un logiciel open source avec une interface nodale complètement automatique. Une fois les photos importées, il suffit d'appuyer sur un bouton pour créer tout le processus de photogrammétrie en un seul clic. Il est aussi possible de moduler à sa guise les nodes présents dans l'interface. Je ne l'ai utilisé que pendant les débuts de mes tests sur la photogrammétrie car ses calculs prennent beaucoup de temps comparés aux autres logiciels. De plus, il a une limite d'import de photos, 200 par projet.

Agisoft - Photoscan ¹⁰¹

Agisoft est un logiciel très utilisé dans le monde professionnel de la photogrammétrie. Son utilisation est plus complète que Meshroom mais je ne l'ai mis en œuvre que pour quelques essais. J'ai trouvé son interface moins facile d'accès que celle de Reality capture et son processus reste plus long que celui-ci.

Reality capture ¹⁰²

Reality capture est un soft complet en termes de numérisation 3D. Il peut traiter un nombre important de photos ainsi que des données laser. Son processus reste pour moi le plus rapide parmi les logiciels maniés. Son interface est bien plus intuitive que celle de Photoscan.

1- Alignements des photos

Cave - Rosny

Suite à la prise de vue précédemment faite en vidéo de la cave, j'ai exporté celle-ci via After Effect en séquences png. J'ai fait ce test avec Reality Capture en utilisant 8000 images. Au bout de deux heures, le logiciel n'a pas pu faire correspondre toutes les images entre elles. J'ai alors réalisé un deuxième test avec 4000 images, mais j'ai rencontré le même problème que lors du premier essai. Lorsque j'ai recommencé la captation du lieu avec 240 photos, celui-ci a fonctionné dans sa totalité lors de l'alignement des photos.

La vidéo fait gagner du temps durant la prise de vue. Cela dit, il vaut mieux avoir un nombre inférieur d'images de meilleures qualités plutôt qu'un nombre colossal de photos qui ne pourront pas toutes être reconnues dans le logiciel.

¹⁰⁰ <https://alicevision.github.io/>

¹⁰¹ <https://www.agisoft.com/>

¹⁰² <https://www.capturingreality.com/>

Cave du roy

Après avoir importé toutes les photos sur Reality Capture, le logiciel a réussi à reconstituer le modèle et ne l'a divisé qu'en deux modèles ; l'entrée et la salle principale. Je ne connaissais pas encore la fonctionnalité du control point qui permet de relier les différentes parties entre elles en trouvant des points communs dans l'espace sur les deux modèles. Cela aurait permis de les faire fusionner en recommençant la phase d'alignements des photos.

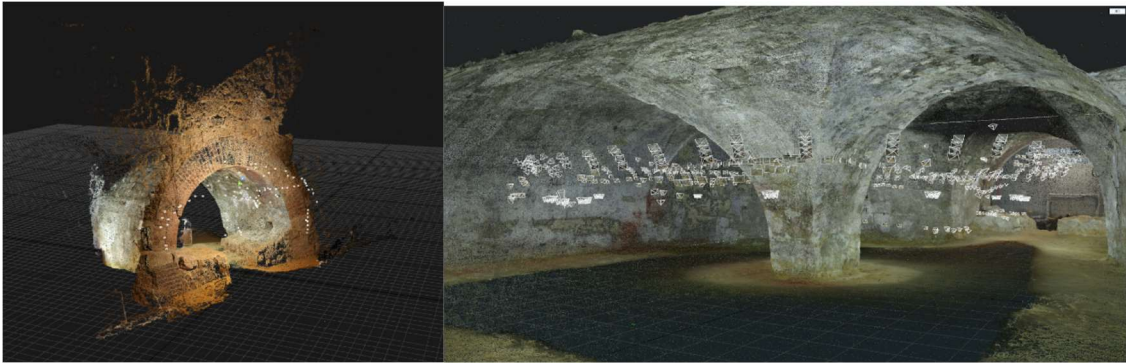


Figure 81 et 82: Capture d'écran des nuages de point des Caves du Roy.

Menhir vidéo



Figure 83: Capture d'écran du nuage de point du Menhir.

Le projet ici est d'assister un artiste sculpteur à reconstruire un menhir en 3D pour l'aider dans une modélisation réelle de celui-ci. J'avais le nom de la référence du site où se trouvait le menhir, j'ai donc cherché s'il existait une vidéo sur internet pour voir si je pouvais prendre des références de divers angles de vue sur celles-ci. Il s'est avéré qu'il existait une vidéo où une personne tournait autour de ce menhir en 360°¹⁰³. J'ai donc exporté en séquences png, je l'ai importé dans reality capture et son alignement de photos a parfaitement fonctionné.

104

¹⁰³ <https://www.youtube.com/watch?v=jp7XlovuNSw&t=24s>

¹⁰⁴ <https://www.youtube.com/watch?v=jp7XlovuNSw&t=1s>

Maison mougères

J'ai exporté les images récupérées via la vidéo du drone et je les ai importées dans reality capture avec celles que j'ai prise au sol et à l'intérieur de la maison. L'alignement des photos n'a pas fonctionné comme voulu, les images extérieures au sol n'ont pas toutes été jointes à celles prises via le drone. Celles de l'intérieur n'ont pas du tout été reconnues lors de l'alignement. Après avoir essayé de faire fusionner un maximum de parties différentes entre elles via le control points, j'ai voulu exporter ce scan en un nuage de points car il contient beaucoup de défauts qui sont moins visibles en utilisant cette technique.



Figure 84: Capture d'écran du nuage de point de la maison de Mougères.

J'ai utilisé un logiciel externe à reality capture pour cette partie ; Cloudcompare, un software libre de droit utilisé par ICONEM car il peut traiter un grand nombre de points bruts.

2- Triangularisation du modèle

Masque

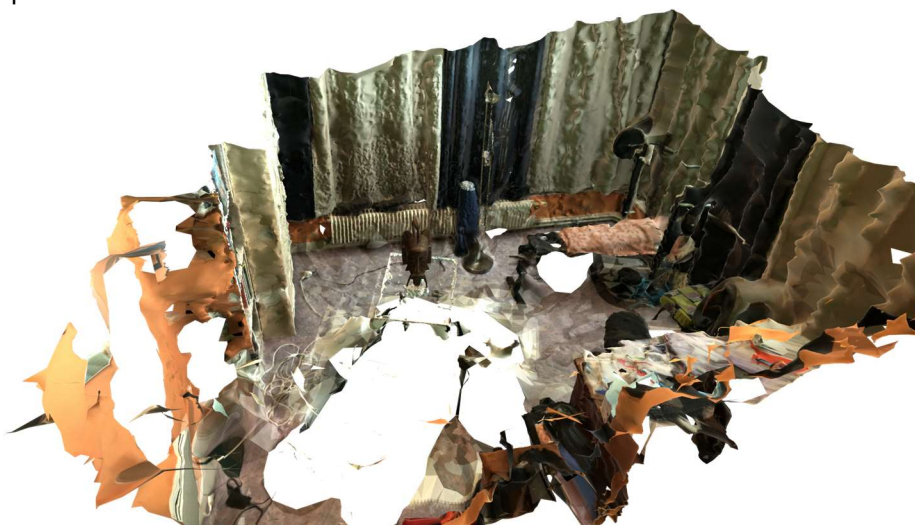


Figure 85: Capture d'écran de la triangularisation du masque.

J'ai compilé toutes les photos du masque sur Meshroom. Le système de nodes sur le logiciel est assez facile de prise en main. Je ne sais pas s'il y a un moyen d'isoler une partie du nuage de points car sur la photogrammétrie terminée, l'objet compte moins de 20% des triangulations et à l'export la texture en est grandement affectée.

Cave - Rosny



Figure 86,87 et 88: Trois captures d'écran de la triangularisation de la cave.

Voilà le résultat de la triangularisation du scan brut. De la prise de vue à l'export sur internet, cela m'a pris entre cinq et six heures.

Cave du Roy - Sèvres



Figure 89 et 90: Capture d'écran de la triangularisation d'une pierre et d'un tonneau des Cave du Roy.

J'ai testé Photoscan pour la pierre et Reality Capture pour le tonneau. Les deux logiciels sont beaucoup plus rapides que Meshroom et permettent plus de modifications sur l'export de l'objet comme par exemple l'optimisation du mesh, la retopologie et la sélection de zone à exporter. Les deux softs sont aussi beaucoup plus rapides et permettent de traiter un volume d'images bien plus important.

Assets - Projet intensif



Figure 91: Capture d'écran de la triangularisation de plusieurs assets.

Voici le résultat de certaines triangularisation d'assets faite pour mon projet intensif.

Maison de la pierre à Saint-Maximin



Figure 92: Capture d'écran de la triangularisation des divers parties la Maison de la Pierre.

Voilà toutes les parties que j'ai réussi à récupérer lors de mes prises de vue à la maison de la pierre. Il va falloir maintenant que je les fusionne en un seul objet.

Salle de la coupole - Père Lachaise

Lorsque j'ai perçu la triangularisation de ce scan, j'ai été étonné du résultat, je ne pensais pas que les hauteurs du lieu allaient aussi bien être représentées. Ma prise de vue s'étant uniquement faite au sol, je pensais que la coupole aurait été pleines de défauts.



Figure 93: Capture d'écran de la triangularisation de la salle de la coupole.

C- Nettoyage du modèle 3D

Pour commencer la partie du nettoyage de modèle, je vais vous présenter cette expérimentation qui décrit bien les allers-retours entre les différents logiciels pour effectuer un clean complet de l'asset.

Cave du Roy - Sèvres

La première phase de nettoyage du modèle 3D pour cet objet consiste à réduire le nombre de polygones. Une fois cette action terminée, j'ai entamé un processus de nettoyage du modèle en faisant un premier bake des textures sur les nouveaux dépliages d'Uvs de mes objets. Et pour terminer, le plus compliqué, a été de fusionner les deux modèles avec leurs textures respectives. Voici mon processus résumé avec les différentes actions faites sur les logiciels.

Maya :	Import modèle brut
	Nettoyage
Zbrush :	Zremesh
	Projection
Maya :	Clean et merge
	Uv
Marmoset :	Bake
Maya :	Merge
	Bake uv
Zbrush :	Close hole
	Zremesh
	Projection
Maya:	Clean
Marmoset :	Bake
Maya :	Clean
Painter :	Bake normal
Maya :	Export



Figure 94: Image brut de la salle des Cave du Roy. Figure 95: Dépliage d'uv brut de la salle des Cave du Roy.



Figure 96: Image travaillé de la salle des Cave du Roy. Figure 97: Dépliage d'uv travaillé de la salle des Cave du Roy.

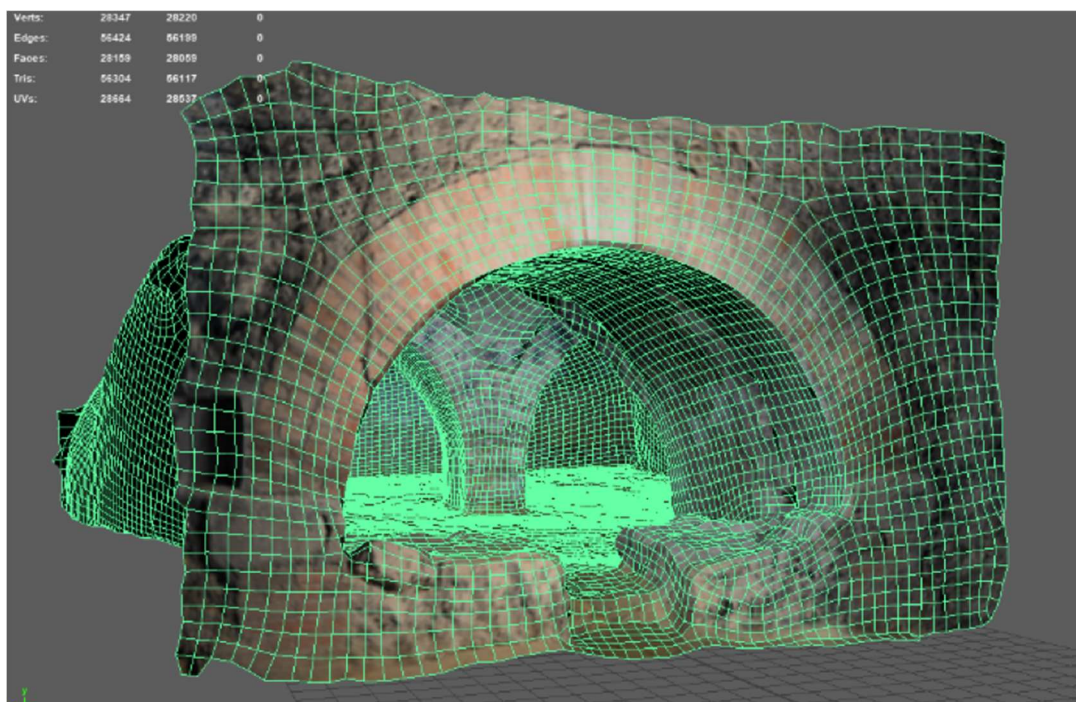


Figure 98: Capture d'écran de la salle des Cave du Roy.

Une fois la phase de nettoyage réalisée, je me retrouve avec un objet de 56 000 triangles.

- Brut - Reality capture = 47 000 000 000 Triangles
- Simplifié - Reality capture = 2 000 000 Triangles
- Zremesh - Zbrush = 56 304 Triangles

1- Topologie

Masque



Figure 99: Capture d'écran de la retopologie du masque.

Sur ce projet, j'ai tenté de faire une retopologie à la main sur Houdini. Finalement, cette tâche s'est avérée longue et laborieuse, j'y ai probablement passé une dizaine d'heures. Puis, j'ai découvert que je pouvais obtenir le même résultat avec la fonctionnalité du Zremesher; en un clic sur Zbrush, je suis passé de 182 000 points à 2 700 points.

Cave - Rosny



Sur cette espace d'intérieur, il manquait plein d'informations sur la topologie. Le plus simple était de re-modéliser tout l'espace en se basant sur l'objet existant. J'ai donc entrepris une phase de modélisation sur Maya en essayant d'avoir le moins de polygones pour pouvoir l'intégrer facilement dans des logiciels de rendu temps réel. Le plus compliqué ici, était d'interpréter tous les détails des assets de la cave avec le minimum de polygones.

Figure 100: Rendu de la cave modélisé.

Maison de la Pierre à Saint-Maximin



Figure 101: Rendu de la salle de la Maison de la Pierre.

J'ai commencé le traitement des différents lieux de la Maison de la Pierre une fois les opérations photogrammétriques terminées. J'ai obtenu sept murs différents qu'il fallait assembler entre eux. Le défi était de réussir à faire les raccords entre les différentes parties et de traiter la colorimétrie de façon uniforme. J'utilisais alternativement Marmoset, Zbrush et Photoshop pour nettoyer la texture et en même temps pour en lier les différentes parties. Une solution a été de mettre des poutres en bois devant les raccords trop présents et de recréer le sol et le plafond avec les textures de certaines prises de vue de la cave.

Salle de la coupole - Père Lachaise



Figure 102: Rendu de la Salle de la Coupole, Père Lachaise.

J'ai entrepris un nettoyage de la topologie de l'objet. Puis, j'ai compris que ce processus allait me prendre beaucoup plus de temps que prévu. La salle contient une multitude de chaises qui n'ont pas

bien été capté lors de la prise de vue. De ce fait, il fallait les supprimer du modèle et possiblement réinterpréter le sol en dessous. J'avais fait la photogrammétrie d'une chaise en deux parties sur le lieu pour en faire un objet nettoyé avant de le dupliquer dans la salle. Mais le processus de liaison d'objets prend beaucoup de temps comme expliqué dans l'introduction. De nombreux objets présents dans cette salle n'ont pas bien été interprétés par reality capture. L'éclairage n'était pas approprié à un processus de photogrammétrie. J'ai donc décidé de ne pas modifier ce scan car le procédé allait être laborieux et aurait demandé beaucoup de réinterprétation de ma part ce qui n'était pas le but de l'exercice.

Menhir vidéo

Ici, la topologie du dolmen sur le dessus était incomplète. J'ai longuement cherché comment faire pour réinterpréter cette partie en utilisant la méthode du Zremesh tout en gardant un maximum de détails sur le mesh d'origine.



Figure 103 et 104: Rendu de deux tests de la topologie du menhir.

Puis après plusieurs essais, j'ai bouché le trou à l'aide d'un logiciel de modélisation et j'ai utilisé l'outil Sculptris pro dans Zbrush qui permet d'augmenter le nombre de polygones d'une seule zone ce qui m'a permis de réinterpréter les détails du dessus de la surface du dolmen tout en gardant la photogrammétrie de base.



Figure 105: Rendu final de la topologie du menhir.

Dans cette première partie, nous avons vu le processus de nettoyage de la topologie. Passons à présent au second procédé qui nous permettra de finaliser l'objet.

2- Texture

La dernière étape de nettoyage concerne la texture. Ici, c'est essentiellement des logiciels de rendu et de retouche photo qui vont être utilisés. On va commencer par définir les deux types de textures qui vont être pratiqués durant ce processus.

Albedo (ce nom peut changer vis à vis des logiciels)

Contient toutes les informations de couleurs natives de l'objet sans information de lumière. Le problème avec la photogrammétrie est qu'à la récupération de cette texture, il y aura forcément des apports lumineux dûs à la numérisation.

Normal map

Cette texture va retranscrire les informations de volumes. Dans le processus de la photogrammétrie, elle va être simulée grâce au modèle 3D natif et au modèle retravaillé avec un dépliage d'Uvs. On appliquera donc un bake à ces objets, les informations de volume vont être retranscrites sur le dépliage d'uv en 2D.

Masque



J'ai utilisé le bake de texture sur maya, après avoir déplié les uvs du nouveau modèle. Sur l'ancienne texture, le masque ne prenait qu'une infime proportion de place, grâce au bake, la texture du sujet d'étude s'adapte au nouveau dépliage d'uv. Le travail de nettoyage de texture sous Photoshop et Substance Painter, sert à remplacer les zones sombres par des informations de texture récupérées autour de la zone non détaillée. Photoshop possède un outil adapté au nettoyage de texture, "Spot healing brush tool" qui permet de fusionner et de dupliquer les pixels environnants à la sélection faite avec l'outil afin de remplacer les zones voulues.

Figure 106: Rendu du masque.

Cave - Rosny

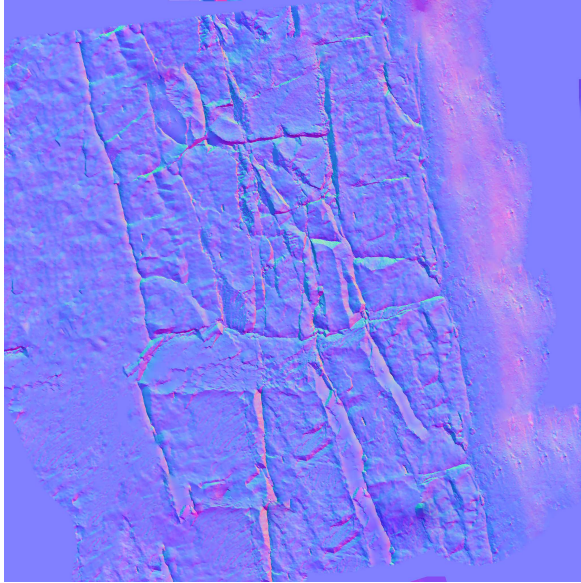
J'ai fait des tests de baking sur Maya mais j'étais bloqué car le bake ne peut pas aller au-dessus du 4k et je voulais exporter du 8k. Après plusieurs recherches, j'ai appris que Marmoset Toolbag pouvait faire du bake en 8k. J'ai donc importé ma photogrammétrie brute sur marmoset ainsi que les objets re-modélisés low poly pour procéder au bake. J'ai ensuite nettoyé les textures avec Photoshop et Substance Painter. Je n'avais pas de texture assez propre pour pouvoir réutiliser les matériaux sur certains objets, j'ai donc dû recréer les textures avec Painter.

Au final sur ce projet j'ai utilisé la photogrammétrie comme une base de création, j'ai interprété et modifié beaucoup de textures.



Figure 107: Rendu de la cave.

Maison de la Pierre à Saint-Maximin



Les modifications de topologie sur ces modèles ont été nombreuses. Lorsque j'ai entrepris un bake de normal sur ces différents modèles, le rendu réinterprétait les défauts de mes meshes natifs. Les différents trous ou erreurs de la triangularisation des modèles sont apparus sur la texture. Son nettoyage reprend le même principe que celui de la texture albedo.

Cette partie peut dénaturer le principe du témoignage de la photogrammétrie s'il va trop loin dans son application. Le but, ici, est de simuler la réalité. Cependant, il est facile et plaisant de nettoyer plus que nécessaire, cela peut être dû à une prise de vue mal exécutée ou encore un matériel de captation de mauvaise qualité ou mal réglé.

Figure 108: Exemple d'une normal map.

Conclusion

Dans cette seconde partie, je vous ai présenté mes diverses expérimentations autour de la photogrammétrie. Le plus plaisant dans ce mémoire a été de réaliser les prises de vue sur le terrain. Mon dernier travail en date a été le scan complet de la maison. Je ne suis pas parvenu au résultat escompté, à savoir faire une photogrammétrie entière, extérieure et intérieure d'un bâtiment, mais, je compte bien réussir à atteindre ce but. Grâce à toutes ces expérimentations et ce travail de synthèse de techniques, je vais pouvoir être plus rigoureux dans la préparation pour affronter les divers problèmes que je rencontrerai dans le futur.

Conclusion

Les récents événements concernant différentes destructions de patrimoine, que ce soit l'incendie de Notre Dame de Paris ou les destructions de certains sites archéologiques au Moyen-Orient, ont prouvé l'importance des techniques de numérisations dans la conservation mais aussi dans la restauration des patrimoines en danger.

“L'émotion soulevée par la destruction du patrimoine de l'humanité se double parfois d'un questionnement éthique qui doit nous interpeller : les fonds engagés pour restaurer les pierres ne seraient-ils pas mieux dépensés pour soigner les hommes ?”¹⁰⁵ Cette question posé par Jean Luc Martinez concernait le patrimoine détruit au Proche-Orient. Il y a partiellement répondu en disant que “sur le terrain, l'indispensable action humanitaire est indissociable d'une action culturelle pour préparer l'avenir.”¹⁰⁶

C'est un débat qui a éclaté en France juste après l'annonce du chiffrage des dons pour la reconstruction de Notre Dame de Paris, qui s'est élevé à 800 millions d'euros en quelques semaines.¹⁰⁷ Ce chiffre peut être mis en relation avec le budget annuel alloué au patrimoine durant les dernières années s'élevant autour d'un milliard d'euros.¹⁰⁸ Un article du quotidien Economie Matin estimait qu'en 2009, l'état français a réalisé 15,5 milliards de bénéfice dus à la visite de divers bien patrimoniaux.¹⁰⁹

On peut constater un deux poids, deux mesures, quand des fortunes privées allouent 800 millions d'euros dans la seule reconstruction de Notre Dame alors que dans le même temps, seulement 1 milliard par an est versé pour l'entretien du patrimoine national. L'état engrange quinze fois les sommes qu'il attribue au patrimoine chaque année. Ces chiffres témoignent d'un manque de financement de la conservation du patrimoine. De plus, un rapport du CNRS de 2016 alertait déjà des risques d'incendie à Notre Dame de Paris sans pour autant que l'état ne réagisse avant qu'il ne soit trop tard.¹¹⁰

“Ces projets de réhabilitation nous placent toutefois face à une question ancienne renouvelée par le développement des nouvelles technologies : jusqu'où faut-il restaurer un monument ?”.¹¹¹

“Faut-il procéder, comme le permet désormais la numérisation, à son clonage intégral telle qu'il était avant la destruction, au risque de nier les mutilations dont-il a été l'objet, et d'effacer ses dernières traces archéologiques authentiques ?”.¹¹²

Les méthodes de numérisations se répandent rapidement d'année en année. Chacun peut se rendre acteurs de l'alimentation des différents types de bibliothèques numériques sur internet. Le patrimoine mondial est chaque jour rendu un peu plus visible grâce à ces progrès technologiques. Son futur dépend de ce que notre civilisation décidera de préserver pour les générations futures.

¹⁰⁵ *Cités millénaires, voyage virtuel de Palmyre à Mossoul, catalogue Institut du monde arabe, octobre 2018*

¹⁰⁶ *Cités millénaires, voyage virtuel de Palmyre à Mossoul, catalogue Institut du monde arabe, octobre 2018*

¹⁰⁷ <https://www.europe1.fr/economie/reconstruction-de-notre-dame-les-entreprises-et-les-grosses-fortunes-se-mobilisent-3892895>

¹⁰⁸ https://www.performance-publique.budget.gouv.fr/sites/performance_publique/files/files/documents/jaunes-2019/Jaune2019_culture_communication.pdf

¹⁰⁹ <http://www.economiematin.fr/news-journees-patrimoine-tourisme-retombees-economiques>

¹¹⁰ https://www.liberation.fr/checknews/2019/04/24/un-rapport-du-cnrs-de-2016-alertait-il-sur-le-risque-majeur-d-incendie-pour-la-cathedrale-notre-dame_1722897

¹¹¹ *Cités millénaires, voyage virtuel de Palmyre à Mossoul, catalogue Institut du monde arabe, octobre 2018*

¹¹² *Cités millénaires, voyage virtuel de Palmyre à Mossoul, catalogue Institut du monde arabe, octobre 2018*

Annexes

Bibliographie

Larousse. *Le petit Larousse illustré: en couleurs : 87000 articles, 4600 illustrations, 292 cartes, 100 planches visuelles*. Édité par Michel Legrain et Yves Garnier. Paris, France: Larousse, 2001.

Les Dossiers d'archéologie. Les technologies du futur font revivre le passé. Dijon, France: SFDB Archéologia, 1990.

Dossiers d'archéologie. La restitution de monuments et sites archéologiques. Dijon, France: SFDB Archéologia, 2014.

Institut Géographique National - *Photogrammétrie architecturale, Application des méthodes photogrammétriques au relevé des monuments*, avril 1967.

Numérisation du patrimoine. Quelles médiations ? Quels accès ? Quelles cultures ? Éditions Hermann, coll. « Cultures numériques », 2013.

Patrimoine et collections numériques : politiques, pratiques professionnelles, usages et dispositifs. Article inédit, mis en ligne le 15 septembre 2015.

Textes fondamentaux: édition 2018, comprenant les textes et amendements adoptés par la Conférence générale à sa 39e session (Paris, 30 octobre-14 novembre 2017).

Sirinelli, Pierre, Sylviane Durrande, Antoine Latreille, Nathalie Maximin, et France. *Code de la propriété intellectuelle*. Paris, France: Dalloz, 2017.

Cités millénaires, voyage virtuel de Palmyre a Mossoul, catalogue Institut du monde arabe, octobre 2018.

Webographie

80.lv. « Full Photogrammetry Guide for 3D Artists ». Consulté en 2019. <https://80.lv/articles/full-photogrammetry-guide-for-3d-artists/>.

« Accueil - Médiathèque de l'architecture et du patrimoine ». Consulté en 2019. <http://www.mediathèque-patrimoine.culture.gouv.fr/>.

« Agisoft Metashape ». Consulté en 2019. <https://www.agisoft.com/>.

« Assassin's Creed Unity a été téléchargé plus de 3 millions de fois ». Millenium. Consulté en 2019. <https://www.millenium.org/news/331035.html>.

« Azure Kinect DK - Développer des modèles IA | Microsoft Azure ». Consulté en 2019. <https://azure.microsoft.com/fr-fr/services/kinect-dk/>.

« Benjamin Bardou - La Cathédrale ». Consulté en 2019. https://benjaminbardou.com/projects/VdLDmX?album_id=73182.

Capelle, Jeanne. « Reflectance Transformation Imaging (RTI) et épigraphie ». Billet. RAAN (blog). Consulté en 2019. <https://raan.hypotheses.org/1326>.

« Comment LiDAR fonctionne-principes, connaissances technologiques, applications de cartographie 3D UAV. » YellowScan (blog). Consulté en 2019. <https://www.yellowscan-lidar.com/fr/applications-and-users/how-lidar-works>.

- « Cultural Heritage & History 3D Models | Categories ». Sketchfab. Consulté en 2019. <https://sketchfab.com/3d-models/categories/cultural-heritage-history>.
- Dacos, Marin. « Manifeste des Digital humanities ». Billet. THATCamp Paris (blog). Consulté en 2019. <https://tcp.hypotheses.org/318>.
- « OFabulis – Edwige Lelièvre ». Consulté en 2019. <http://www.armaghia.fr/ofabulispres/>.
- « Droits d'auteur ». Consulté en 2019. <https://www.service-public.fr/professionnels-entreprises/vosdroits/F23431>.
- « DStretch.com home page ». Consulté en 2019. <http://www.dstretch.com/>.
- « Envoyez-nous une demande pour emprunter une caméra 360° et créer votre histoire dans Street View ». Google Maps Street View. Consulté en 2019. <https://www.google.com/streetview/loan/>.
- « Faut-il rendre l'obélisque de place de la Concorde à l'Égypte ? Un imbroglio culturel ». leplus.nouvelobs.com. Consulté en 2019. <http://leplus.nouvelobs.com/contribution/1336180-faut-il-rendre-l-obelisque-de-place-de-la-concorde-a-l-egypte-un-imbroglio-culturel.html>.
- « France : Le Patrimoine, Ça Rapporte ! - EconomieMatin ». Consulté en 2019. <http://www.economiamatin.fr/news-journees-patrimoine-tourisme-retombees-economiques>.
- « Google fait le choix de la photogrammétrie | Le blog d'Alexandre Cazaux ». Consulté en 2019. <http://blog.alexandrecazaux.fr/?p=79>.
- « Google Livres ». Consulté en 2019. <https://books.google.fr/>.
- « Grandes Purgés ». In Wikipédia, 31 janvier 2019. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Grandes_Purgés&oldid=156352044.
- « Hache emmanchée à gaine | Musée archéologie nationale ». Consulté en 2019. https://musee-archeologienationale.fr/phototheque/oeuvres/hache-emmanchee-a-gaine_bois-de-cerf_silex.
- « Home - CapturingReality.com ». Consulté en 2019. <https://www.capturingreality.com/>.
- « How to Use Detect Markers Tool (Experimental Version) ». RealityCapture Support. Consulté en 2019. <http://support.capturingreality.com/hc/en-us/articles/360003869672-How-to-use-Detect-Markers-Tool-experimental-version->.
- « La photographie stéréoscopique : l'impression du relief ». Le chronoscaphe, 16 février 2015. <https://lechronoscaphe.com/la-photographie-stereoscopique-impression-du-relief/>.
- « L'Atelier des Lumières - Site officiel - Créé par Culturespaces ». Consulté en 2019. <https://www.atelier-lumieres.com/fr/home>.
- « Le droit des images des collections de musées et de bibliothèques ». Livres Hebdo. Consulté en 2019. <http://www.livreshebdo.fr/article/le-droit-des-images-des-collections-de-musees-et-de-bibliotheques>.
- « Le fonctionnement de FaceID | SUPINFO, École Supérieure d'Informatique ». Consulté en 2019. <https://www.supinfo.com/articles/single/7476-fonctionnement-faceid>.
- « Leica Geosystems P40/P30 High Definition Scanner ». Transit and Level. Consulté en 2019. <https://transitandlevel.com/product/leica-p30-high-definition-scanner/>.

- LiDAR + UAV Model of Menara - 3D Model by Alexander Shenkin (@ashenkin). Consulté en 2019. <https://sketchfab.com/models/b828f4569ab14188b07c9609511330b7/embed?autostart=1>.
- « LM Scans, Simon Hegarty ». ArtStation. Consulté en 2019. <https://www.artstation.com/artwork/X22Bw>.
- « Machines à mesurer tridimensionnelles portables (MMT) - Accueil - FARO ». Consulté en 2019. <https://www.faro.com/fr-fr/>.
- Maxwell, Mary Jane. « U.S. Technology Helps to Unearth Mayan Past ». ShareAmerica (blog), 13 novembre 2018. <https://share.america.gov/u-s-technology-helps-unearth-mayan-past/>.
- « Momies | Tridilogy ». Consulté en 2019. <http://www.tridilogy.com/momies/>.
- Mondial, UNESCO Centre du patrimoine. « Les critères de sélection ». UNESCO Centre du patrimoine mondial. Consulté en 2019. <http://whc.unesco.org/fr/criteres/>.
- « Notre-Dame numérisée en 3D par AGP ». AGP. Consulté en 2019. <http://www.artgp.fr/notre-dame-numerisee-en-3d-par-agp.html>.
- « Notre-Dame : Ubisoft offre Assassin's Creed Unity pendant une semaine et fait un don de 500 000€ ». JeuxActu. Consulté en 2019. <https://www.jeuxactu.com/notre-dame-ubisoft-offre-assassin-s-creed-unity-pendant-une-semaine-118033.htm>.
- « Œuvres d'art | Tridilogy ». Consulté en 2019. <http://www.tridilogy.com/oeuvres-d-art/>.
- « Open Heritage - Google Arts & Culture ». Google Arts & Culture. Consulté en 2019. <https://artsandculture.google.com/project/openheritage>.
- « Patrimoine mondial ». In Wikipédia, 4 mai 2019. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Patrimoine_mondial&oldid=158991751.
- « Pillée pendant des années, l'Afrique réclame à l'Europe le retour de ses trésors ». Franceinfo, 27 mai 2018. https://www.francetvinfo.fr/culture/arts-expos/sculpture/pillee-pendant-des-annees-l-afrique-reclame-a-l-europe-le-retour-de-ses-tresors_3334043.html.
- « Poly ». Consulté en 2019. <https://poly.google.com/>.
- « Prise de vues photogrammétriques: Support de cours visualisable à l'écran ». Consulté en 2019. <http://cours-fad-public.ensg.eu/mod/imscp/view.php?id=494>.
- « Publications 3D - Partage - Documentation ». Facebook for Developers. Consulté en 2019. <https://developers.facebook.com/docs/sharing/3d-posts/>.
- « Quixel Megascans Library ». Quixel. Consulté en 2019. <https://quixel.com/megascans/library?category=plants>.
- « Radiographie ». In Wikipédia, 17 avril 2019. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Radiographie&oldid=158516815>.
- « Rapport Tessier sur la numérisation du patrimoine écrit - Ministère de la Culture ». Consulté en 2019. <http://www.culture.gouv.fr/Thematiques/Livre-et-Lecture/Documentation/Publications/Etudes-et-rapports-numerique-en-bibliotheque/Rapport-Tessier-sur-la-numerisation-du-patrimoine-ecrit>.
- « Reconstruction de Notre-Dame : déjà plus de 800 millions d'euros de dons récoltés par les entreprises, les grosses fortunes et les collectivités ». Europe 1. Consulté en 2019. <https://www.europe1.fr/economie/reconstruction-de-notre-dame-les-entreprises-et-les-grosses-fortunes-se-mobilisent-3892895>.

- « Rmn-Grand Palais (@francecollections) ». Sketchfab. Consulté en 2019. <https://sketchfab.com/francecollections>.
- « Roswell – Spatial Média ». Consulté en 2019. <https://spatialmedia.ensadlab.fr/roswell/>.
- « RTI Gallery ». American Southwest Virtual Museum (blog), 11 août 2016. <http://swvirtualmuseum.nau.edu/wp/index.php/national-parks/grand-canyon-national-park/rti-gallery/>.
- « Scan Anything with Dave Riganelli and his Homemade Scanbox | Substance ». Consulté en 2019. <https://www.allegorithmic.com/blog/scan-anything-dave-riganelli-and-his-homemade-scanbox>.
- « Scanner ou tomodensitométrie - Définition, intérêt, déroulement de l'examen ». Doctissimo. Consulté en 2019. <http://www.doctissimo.fr/html/sante/imagerie/scanner.htm>.
- « Scientists discover, climb and describe the world's tallest tropical tree | Environmental Change Institute, University of Oxford news ». Consulté en 2019. https://www.eci.ox.ac.uk/news/2019/0408.html?fbclid=IwAR3OqEErP7uQwG8i4sLutBHGQGJGHH6UHTe5IHqjXGOLNe3LnJh4I6_f4HM.
- « Scintigraphie ». In Wikipédia, 23 avril 2018. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Scintigraphie&oldid=147796269>.
Taureau Androcéphale Du Musée Du Louvre - 3D Model by Iconem (@iconem). Consulté en 2019. <https://sketchfab.com/models/11897a591e5347629543c79434b4a9ab/embed?autostart=1>.
- « Tomographie ». In Wikipédia, 1 avril 2019. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Tomographie&oldid=158055545>.
- « Tous photographes ! La charte des bonnes pratiques dans les établissements patrimoniaux - Ministère de la Culture ». Consulté en 2019. <http://www.culture.gouv.fr/Espace-documentation/Documentation-administrative/Tous-photographes-!-La-charte-des-bonnes-pratiques-dans-les-etablissements-patrimoniaux>.
- « Un rapport du CNRS de 2016 alertait-il sur le risque majeur d'incendie pour la cathédrale Notre-Dame ? » Libération.fr, 24 avril 2019. https://www.liberation.fr/checknews/2019/04/24/un-rapport-du-cnrs-de-2016-alertait-il-sur-le-risque-majeur-d-incendie-pour-la-cathedrale-notre-dame_1722897.
- « UNESCO - Qu'est-ce que le patrimoine culturel immatériel ? » Consulté en 2019. <https://ich.unesco.org/fr/qu-est-ce-que-le-patrimoine-culturel-immateriel-00003>.
- « Van Gogh, La nuit étoilée | Atelier des Lumières - Site officiel ». Consulté en 2019. <https://www.atelier-lumieres.com/fr/van-gogh-nuit-etoilee>.
- « Visites en ligne | Musée du Louvre | Paris », 27 juillet 2015. <https://www.louvre.fr/visites-en-ligne>.
- Wooden Lion - Download Free 3D Model by AliceVision - Sketchfab. Consulté en 2019. <https://sketchfab.com/models/791850b543fe4616b26a08bbc0134bad/embed?autostart=1>.
- « Your Smartphone is a Material Scanner: Vol. II | Substance ». Consulté en 2019. <https://www.allegorithmic.com/blog/your-smartphone-material-scanner-vol-ii>.

Vidéographie

- Art Graphique & Patrimoine. *Balade dans le nuage de points du Mont-Saint-Michel*. Consulté en 2019. <https://www.youtube.com/watch?v=mdQ2Yiy2j7w>.
- Bardou, Benjamin. *La Cathédrale*, 2018. <https://vimeo.com/303163403>.
- Chimaging. *Performing Reflectance Transformation Imaging*. Consulté en 2019. <https://www.youtube.com/watch?v=zddxcSayxcg>.
- C-Media. *Tutorial | Photogrammetry Asset*. Consulté en 2019. <https://www.youtube.com/watch?v=BrRzeMY-aQI&feature=youtu.be&fbclid=IwAR1D9ZB2vJh1xTjVhzFPPJKSWecVNjZsrtabr6LQ0QPmgFz2KKb1NbQa-n0>.
- CuriosityStream. *CuriosityStream 360: Nefertari's Tomb*. Consulté en 2019. <https://www.youtube.com/watch?v=tzQbLUsQHcA>.
- DigiArchaeo. *Triumphal Arch of Palmyra Under Construction*, 2016. <https://vimeo.com/161046225>.
- FRANCE 24. *L'archéologie en mode makers #Tech24*. Consulté en 2019. <https://www.youtube.com/watch?v=IGVMPCPBSfw>.
- IGN - "Numbie 64" - Une production de L'Institut Géographique National (France). Consulté en 2019. Images et Réalisation de Robert Génot Assisté de Jean-Marie THOMAS
- Imarabe. *Cités Millénaires - Exposition*. Consulté en 2019. <https://www.youtube.com/watch?v=59qKxLrq4BY>.
- Imarabe. *Cités Millénaires - Ubisoft*. Consulté en 2019. <https://www.youtube.com/watch?v=1IYqxtajdv4>.
- Institute for Digital Archaeology. *The IDA's Triumphal Arch Unveiled in Washington D.C*. Consulté en 2019. https://www.youtube.com/watch?time_continue=222&v=mvylakWVi8o.
- Le Monde - Ecole polytechnique fédérale de Lausanne - Une technique aux rayons X permet de lire des livres sans les ouvrir. Consulté en 2019. https://www.lemonde.fr/sciences/video/2018/01/05/une-technique-aux-rayons-x-permet-de-lire-des-livres-sans-les-ouvrir_5237825_1650684.html
- LiDAR + UAV Model of Menara - 3D Model by Alexander Shenkin (@ashenkin). Consulté en 2019. <https://sketchfab.com/models/b828f4569ab14188b07c9609511330b7/embed?autostart=1>.
- Paris, Ecole des Arts Déco-. *Roswell*, 2019. <https://vimeo.com/314198184>.
- PC Games. *Assassin's Creed: Unity vs. Real-Life*. Consulté en 2019. <https://www.youtube.com/watch?v=A5skN3mM-pc>.
- Pinyo Gaming HD. *Nefertari: Journey to Eternity - Steam Trailer HTC Vive*. Consulté en 2019. <https://www.youtube.com/watch?v=ah1pnPXpl8Q>.
- Rev3Games. *ASSASSIN'S CREED UNITY Developer Interview: Building Notre Dame (and Paris)*. Consulté en 2019. <https://www.youtube.com/watch?v=KLKLOtxFGps>.
- Ropertos Georgiou. *Reflectance Transformation Imaging (RTI) for Archaeology*. Consulté en 2019. <https://www.youtube.com/watch?v=atLzmmeb4XM>.
- Simonrcherry. *EXPLORER Total Body PET scan*. Consulté en 2019. https://www.youtube.com/watch?time_continue=11&v=thGvKuqDPDE.

Spiritofthegreenman. *Lanyon Quoit, Cornwall*. Consulté en 2019. <https://www.youtube.com/watch?v=ip7XllovuNSw&t=1s>.

Taureau Androcéphale Du Musée Du Louvre - 3D Model by Iconem (@iconem). Consulté en 2019. <https://sketchfab.com/models/11897a591e5347629543c79434b4a9ab/embed?autostart=1>.

Tridilogy. *seramon video tridilogy*. Consulté en 2019. <https://www.youtube.com/watch?v=YTqJyvMNqN8>.

Tridilogy. *Tableautridilogy*. Consulté en 2019. https://www.youtube.com/watch?time_continue=35&v=7j-l_Yi0hIY.

Wooden Lion - Download Free 3D Model by AliceVision - Sketchfab. Consulté en 2019. <https://sketchfab.com/models/791850b543fe4616b26a08bbc0134bad/embed?autostart=1>.

Ludographie

- Assassin's creed unity, 2014, Ubisoft.
- OFabulius, 2014, Edwige Lelièvre.

Index des illustrations

Figure 1 et 2: Photo d'un document scellé analysé par rayon x. (Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2018) https://www.lemonde.fr/sciences/video/2018/01/05/une-technique-aux-rayons-x-permet-de-lire-des-livres-sans-les-ouvrir_5237825_1650684.html

Figure 3, 4 et 5: Images 3D d'une momie passée au scanner. (Tridilogy, 2013) <https://www.youtube.com/watch?v=YTqJyvMNqN8>

Figure 6, 7 et 8: Radiographie de tableau. (Samuel Mériegeaud, Tridilogy, 2013) <http://www.tridilogy.com/oeuvres-dart/>
https://www.youtube.com/watch?time_continue=35&v=7j-l_Yi0hIY

Figure 9: Images 3D d'un corps humain scanné. (Explorer. 2018) https://www.youtube.com/watch?time_continue=11&v=thGvKuqDPDE

Figure 10: Image de scan laser d'une route. (Simon Hegarty, Artstation, 2017) <https://www.artstation.com/artwork/X22Bw>

Figure 11: Photo d'un scanner Leica. (2015) <https://transitandlevel.com/product/leica-p30-high-definition-scanner/>

Figure 12 et 13: Vues comparatives du site Tikal au Guatemala, une photo et un scan LIDAR. (Estrada-Belli/PACUNAM, 2018) <https://share.america.gov/u-s-technology-helps-uneearth-mayan-past/?fbclid=IwAR2dpES9HosY5lvFwc1iKVYEuuAkhsiq5Qfsu3uOOMRYCbQ-CrmffZJoJM8>

Figure 14: Schéma expliquant le fonctionnement de la technologie LIDAR. (2017) <https://www.yellowscan-lidar.com/fr/applications-and-users/how-lidar-works>

Figure 15: Photo du matériel de la technique de réflectance. (Performing Reflectance Transformation Imaging, 2010) <https://www.youtube.com/watch?v=zddxcSayxcq>

Figure 16 et 17: Capture d'écran du visualisateur de réflectance représentant une montre à gousset (Reflectance Transformation Imaging (RTI) data) <http://swvirtualmuseum.nau.edu/wp/index.php/national-parks/grand-canyon-national-park/rti-gallery/>

Figure 18 et 19: Une relique contenant de l'eau bénite de l'époque post byzantine. (Reflectance Transformation Imaging (RTI) data, 2012) <https://www.youtube.com/watch?v=atLzmmeb4XM>

Figure 20: Capture d'écran de l'interface de Substance Designer. (Anthony Salvi, 2018) https://www.allegorithmic.com/sites/default/files/3SWorld_SD03.jpg

Figure 21: Photo stéréoscopique La Porte Saint-Martin, Paris. (19ème siècle)

<https://lechronoscaphe.com/la-photographie-stereoscopique-impression-du-relief/>

Figure 22 et 23: Elévations d'ensemble de la chapelle du palais de justice, Paris. (1944)

Figure 24: Elévation du mur sud de la chapelle du palais de justice, Paris. (1944)

Figure 25: Stéréoscopie de la chapelle du palais de justice, Paris. (1944)

[http://cours-fad-](http://cours-fad-public.ensg.eu/pluginfile.php/1913/mod_imsjsp/content/3/res/PHOTOGRAMMETRIE_ARCHITECTURALE_IGN_1967.pdf)

[public.ensg.eu/pluginfile.php/1913/mod_imsjsp/content/3/res/PHOTOGRAMMETRIE_ARCHITECTURALE_IGN_1967.pdf](http://cours-fad-public.ensg.eu/pluginfile.php/1913/mod_imsjsp/content/3/res/PHOTOGRAMMETRIE_ARCHITECTURALE_IGN_1967.pdf)

Figure 26: Résultats graphique de la prise de mesure analogique.

Figure 27: Photo du temple d'Abou Simbel.

Figure 28: Extrait vidéo représentant le procédé photogrammétriques de reproduction de photographie analogique.

Figure 29: Extrait vidéo représentant le procédé photogrammétriques de reproduction de photographie analogique.

Figure 30: Extrait vidéo représentant le procédé photogrammétriques de reproduction de photographie analogique.

Film IGN "Numbie 64" - Une production de L'Institut Géographique National (France)

Images et Réalisation de Robert Génot Assisté de Jean-Marie THOMAS (1964)

Figure 31: Montage photo expliquant le recouvrement. (2019)

Figure 32: Schéma sur le procédé photogrammétrique d'intérieur.

Figure 33: Schéma sur le procédé photogrammétrique sur les différentes hauteurs de prises de vue.

Figure 34: Schéma sur le procédé photogrammétrique d'intérieur dans un espace étroit.

Figure 35: Image d'un markers de Reality Capture. (2018)

<https://support.capturingreality.com/hc/en-us/articles/360003869672-How-to-use-Detect-Markers-Tool-experimental-version->

Figure 36: Schéma sur le procédé photogrammétrique d'objet.

Figure 37: Schéma sur le procédé photogrammétrique de bâtiment.

Figure 38: Photo d'un rig de photogrammétrie pour les humains. (2018)

<https://www.supinfo.com/articles/single/7476-fonctionnement-faceid>

Figure 39: Photo de me préparant photogrammétrie numérique. (2019)

Figure 40: Rendu 3D, à gauche, scan de la Kinect one, au centre, scan de la Gopro 4K, à droite, scan de la Samsung G5. (2019)

Figure 41: Rendu 3D, à gauche, scan de la Sony Xperia ZX3. au centre, scan de la Canon 5D, à droite, scan de la Artec MHT. (2019)

Figure 42: Photo du "Rancho Bernardo Style site", à gauche l'image original, à droite celle retouchée via DStretch. (Jeff LaFave, 2006)

<http://www.dstretch.com/>

Figure 43: Photo, à gauche de Staline avec le chef du ministère de l'intérieur, à droite, une photo truquée sans le ministre. (1937-1939)

https://fr.wikipedia.org/wiki/Grandes_Purges

Figure 44: Représentation 3D de notre dame de paris. (Art graphique et patrimoine, 2019)

<http://www.artgp.fr/notre-dame-numerisee-en-3d-par-agp.html>

Figure 45: Charte graphique de l'usage de la photographie dans un établissement patrimonial. (Ministère de la culture, 2014)

<http://www.culture.gouv.fr/Espace-documentation/Documentation-administrative/Tous-photographies-!-La-charte-des-bonnes-pratiques-dans-les-etablissements-patrimoniaux>

Figure 46: Autorisation écrite de prise de vue de la Cité de l'architecture. (2019)

Figure 47: Extrait de Roswell autopsy d'une controverse, on voit un nuage de points. (Ecole nationale supérieure des Arts Décoratifs, 2018)

Figure 48: Extrait de Roswell autopsy d'une controverse, image de l'expérience VR. (Ecole nationale supérieure des Arts Décoratifs, 2018)

<https://spatialmedia.ensadlab.fr/roswell/>

Figure 49: Extrait de Cités Millénaires - Exposition, installation de l'exposition. (Institut du monde arabe, 2018)

Figure 50: Extrait de Cités Millénaires - Reconstitution du temple de Baalshamin à Palmyre. (Institut du monde arabe, 2018)

<https://www.youtube.com/watch?v=59qKxLrq4BY>

Figure 51: Extrait de Cités Millénaires - Ubisoft, Image de l'application VR. (Institut du monde arabe 2018)

<https://www.youtube.com/watch?v=1Yqxtajdv4>

Figure 52: Images venant du court métrage "La Cathédrale". (Benjamin Bardou, 2018)
https://benjaminbardou.com/projects/VdLDmX?album_id=73182

Figure 53: Image extraite d'une capture d'écran Sketchfab d'un modèle de Menara. (Alexander Shenkin, 2019)
<https://sketchfab.com/3d-models/iidar-uav-model-of-menara-b828f4569ab14188b07c9609511330b7>

Figure 54: Image tiré du jeux vidéo OFabulius. (Edwige Lelièvre, 2014)
<http://www.armaghia.fr/ofabulispres/>

Figure 55: Extrait de la vidéo 360°: CuriosityStream 360: Nefertari's Tomb. (CuriosityStream, 2018)
<https://www.youtube.com/watch?v=tzQbLUsQHcA>

Figure 56 : Extrait de l'expérience VR: Nefertari, Journey to Eternity - Steam Trailer HTC Vive. (2018)
<https://www.youtube.com/watch?v=Alk1T15imMQ>

Figure 57: Photo de l'exposition "Van Gogh, La nuit étoilée". (Culturespaces / E. Spiller - Atelier des Lumières, Paris 2019)
<https://www.atelier-lumieres.com/fr/van-gogh-nuit-etoilee>

Figure 58: Image représentant un exemple d'objet 3D visualisable sur Sketchfab. (2019)
<https://sketchfab.com/3d-models/categories/cultural-heritage-history>

Figure 59: Image du menu de l'interface de Sketchfab. (2019)
<https://sketchfab.com/feed>

Figure 60: Image du Taureau Androcéphale du Musée du Louvre sur Sketchfab. (2018)
<https://sketchfab.com/3d-models/taureau-androcephale-du-musee-du-louvre-11897a591e5347629543c79434b4a9ab>

Figure 61: Image du jeu Assassin's creed unity. (Ubisoft, 2014)
<https://www.jeuxactu.com/notre-dame-ubisoft-offre-assassin-s-creed-unity-pendant-une-semaine-118033.htm>

Figure 62: Extrait tiré de Assassin's Creed: Unity vs. Real-Life. (Pc Games, 2014)
<https://www.youtube.com/watch?v=A5skN3mM-pc>

Figure 63: Extrait de "Triumphal Arch of Palmyra Under Construction Machine" on voit une machine qui taille le matériau avec un jet d'eau sous pression et une fraiseuse. (DigiArchaeo, 2016)
<https://vimeo.com/161046225>

Figure 64: Photo de l'impression 3D d'une partie de l'Arc de Septime Sévère exposé à Washington. (Institute for Digital Archaeology, 2018)
https://www.youtube.com/watch?time_continue=222&v=mvylakWVi8o

Figure 65: Extrait de "Balade dans le nuage de points du Mont Saint-Michel". (Art graphique et Patrimoine, 2017)
<https://www.youtube.com/watch?v=mdQ2Yiy2j7w>

Figure 66: Image de l'interface du site de Quixel. (2019)
<https://quixel.com/megascans/library?category=plants>

Figure 67: Photo d'une Hache emmanchée à gaine. (RMN-Grand Palais, Musée d'Archéologie nationale, 2018)
https://musee-archeologienationale.fr/phototheque/oeuvres/hache-emmanchee-a-gaine_bois-de-cerf_silex

Figure 68: Schéma explicatif des étapes du procédé photogrammétrique.

Figure 69: Photographies de masque. (2018)

Figure 70: Photo d'une cave. (2018)

Figure 71: Schéma expliquant la démarche de prise de vue des Cave du Roy.

Figure 72: Photo expliquant la démarche de prise de vue des Cave du Roy. (2018)

Figure 73: Photo de la salle de la coupole au Père Lachaise. (2019)

Figure 74: Photo de la Maison de la Pierre à Saint-Maximin. (2019)

Figure 75: Photo d'une cave. (2019)

Figure 76: Photo d'une cave. (2019)

Figure 77: Photo de la cité de l'architecture, exposition permanente. (Paris, 2019)

Figure 78: Photo d'une boîte à outils. (2019)

Figure 79: Photo des quais de seine. (Paris, 2019)

Figure 80: Photo prise d'un drone des Mougères, Région centre. (2019)

Figure 81 et 82: Capture d'écran des nuages de point des Caves du Roy.

Figure 83: Capture d'écran du nuage de point du Menhir.

Figure 84: Capture d'écran du nuage de point de la maison de Mougères.
Figure 85: Capture d'écran de la triangularisation du masque.
Figure 86,87 et 88: Trois captures d'écran de la triangularisation de la cave.
Figure 89 et 90: Capture d'écran de la triangularisation d'une pierre et d'un tonneau des Cave du Roy.
Figure 91: Capture d'écran de la triangularisation de plusieurs assets.
Figure 92: Capture d'écran de la triangularisation des divers parties la Maison de la Pierre.
Figure 93: Capture d'écran de la triangularisation de la salle de la coupole.
Figure 94: Image brut de la salle des Cave du Roy.
Figure 95: Dépliage d'uv brut de la salle des Cave du Roy.
Figure 96: Image travaillé de la salle des Cave du Roy.
Figure 97: Dépliage d'uv travaillé de la salle des Cave du Roy.
Figure 98: Capture d'écran de la salle des Cave du Roy.
Figure 99: Capture d'écran de la retopologie du masque.
Figure 100: Rendu de la cave modélisé.
Figure 101: Rendu de la salle de la Maison de la Pierre.
Figure 102: Rendu de la Salle de la Coupole, Père Lachaise.
Figure 103 et 104: Rendu de deux tests de la topologie du menhir.
Figure 105: Rendu final de la topologie du menhir.
Figure 106: Rendu du masque.
Figure 107: Rendu de la cave.
Figure 108: Exemple d'une normal map.