



HAL
open science

L'archivage numérique et la diffusion du patrimoine local mauricien à travers la photogrammétrie

Darëll Némorin

► **To cite this version:**

Darëll Némorin. L'archivage numérique et la diffusion du patrimoine local mauricien à travers la photogrammétrie. Architecture, aménagement de l'espace. 2021. dumas-04279731

HAL Id: dumas-04279731

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04279731>

Submitted on 10 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

“L’archivage numérique et la diffusion du patrimoine local mauricien à travers la photogrammétrie.”

Darëll NÉMORIN

Mémoire de Master - Séminaire “Récits Digitaux”

sous la direction de:
Dr. Laurent LESCOP

ENSA Nantes-Mauritius
02 Février 2021

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de mémoire, Dr. Laurent Lescop de m'avoir encadré et suivi pour ce mémoire dans le séminaire "Récits digitaux" au sein de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes. Je tiens à le remercier pour son intérêt vis-à-vis de ce sujet de mémoire et ainsi que sa disponibilité tout au long de son élaboration.

Le résultat est que le travail effectué et les apprentissages acquis forment maintenant partie intégrante de ma personnalité.

Je remercie également la manageuse section technique de la National Heritage Fund, Mme. Jayshree Medhi-Mungur pour son soutien et son conseil, aussi bien que les techniciens de la NHF qui ont partagé leur expérience professionnelle avec moi.

En dernier lieu, j'ai une pensée spéciale pour les archéologues de l'organisation Our Heritage Foundation: Mme. Chesta Hoolash et M. Nipon Medhi pour m'avoir fourni les outils nécessaires dont j'avais besoin dans un délai serré et pour m'avoir grandement aidé dans la réalisation de mes affectations notamment pour la prise de photo et de relevés.

Sigles et abbréviations

2D	Deux dimensions
3D	Trois dimensions
DSM	Digital Surface Model
DTM	Digital Terrain Model
HTML	HyperText Markup Language
JPEG	Joint Photographic Experts Group (format d'images numériques)
MP	Megapixel
OBJ	Format de données numériques géométriques
ONG	Organisation Non-Gouvernementale
PNG	Portable Network Graphics (format d'images numériques)
SFM	Structure from Motion
SIG	Système d'Information Géographique
STL	Format de données numériques originaire de la stéréolithographie
TIFF	Tagged Image File Format (format d'images numériques)
UAS	Unmanned Aircraft Systems
VR	Réalité Virtuelle
VRML	Virtual Reality Modeling Language
CRSI	Centre for Research on Slavery and Indenture
NHF	National Heritage Fund
NMCAC	Nelson Mandela Centre for African Culture
OHF	Our Heritage Foundation
SSRN	Sir Seewoosagur Ramgoolam National Hospital
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
UOM	University of Mauritius

Glossaire

analogique	La modélisation analogique consiste à construire un système physique qui reproduit plus ou moins un phénomène que l'on souhaite étudier.
cluster	Groupement de serveurs ou de ferme de calcul (computer cluster en anglais) pour désigner des techniques consistant à regrouper plusieurs ordinateurs indépendants appelés nœuds.
étalonnage	Opération qui concerne les appareils de mesure ou de restitution de données
géoreférencement	Processus dans lequel on applique à une entité cartographique un emplacement spatial en lui donnant des coordonnées géographiques et en appliquant une transformation.
itération	Une itération en informatique est la répétition d'un bloc d'instructions dans un programme informatique. Elle peut être utilisée comme un terme général, synonyme de répétition, ou décrire une forme spécifique de la répétition avec un état immuable.
mappage	Mappage de texture fait référence au mappage diffus, une méthode qui mappait simplement des pixels d'une texture à une surface 3D («enveloppant» l'image autour de l'objet).
numérique	La modélisation numérique consiste à construire un ensemble de fonctions mathématiques décrivant le phénomène. En modifiant les variables de départ, on peut ainsi prédire les modifications du système physique.
orthomosaïque	Une orthomosaïque, ou orthophotographie, numérique est une image obtenue par traitement d'un cliché numérique dont la géométrie a été redressée de sorte que chaque point soit superposable à une carte plane qui lui correspond.
triangulation	La triangulation fait référence au processus de détermination d'un point dans l'espace 3D en fonction de ses projections sur deux images ou plus.
tridimensionnelles	Trois dimensions, tridimensionnel ou 3D sont des expressions qui caractérisent l'espace qui nous entoure, tel que perçu par notre vision, en termes de largeur, hauteur et profondeur.

Table des Matières



ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Remerciements
 Sigles et abréviations utilisés dans le mémoire
 Glossaire

1	Intérêt et but du mémoire	8
1.1	Introduction	8
1.2	Intérêt pour la photogrammétrie	9
1.3	Choix du sujet	10
1.4	Objectif du mémoire	11
1.5	Contenu du mémoire	11
2	Le patrimoine local mauricien	13
2.1	Présentation de la NHF	14
	Origine et missions	14
	Acteurs et Collaboration OHF et NMCA	15
	Archivage du patrimoine	16
2.2	Choix du site	17
	Critères de sélection	17
	Historique et contexte du site	19
	Etat de l'art en archivage	21
3	Principes de base et développement	24
3.1	La photogrammétrie	25
	Introduction	25
	Principe de multi-images	26
	Règle de recouvrement	26
3.2	La photographie	27
	Matériel et outils	27
	Collecte de données photographiques	28
	Mesures physiques et relevés complémentaires	29
3.3	La modélisation 3d	30
	Choix du logiciel numérique de traitement	30
	Méthodologie de modélisation	32
	Essais préliminaires	33
	Restitution de la maquette 3d	34
4	Finalité du travail	40
	Posture technique d'archivage et d'état des lieux	42
	Tour virtuel avec Sketchfab	43
	Immersion avec la réalité virtuelle	44
	Diffusion du résultat	45
5	Conclusion	47
	Évaluation	48
	Critique et opinion personnelle	48
	Suggestions	49
	Perspectives	50
	Bilan Global	50
6	Bibliographie	51
7	Annexes	58

Intérêt et but du mémoire

Introduction

L'île Maurice a un très grand passé sous l'ère coloniale. Dès les premiers européens notamment les Portugais en 1510, en passant par les Hollandais en 1598, puis les Français en 1715 et enfin, les Anglais qui ont conquis le pays en 1810, l'île Maurice a connu un grand mouvement colonial avec une forte domination politique et l'exploitation économique du territoire.

Après l'indépendance en 1968, nous gardons la mémoire de nos ancêtres issus de diverses origines (africaines, européennes ou asiatiques) à travers les vieux bâtiments construits par les esclaves, descendants immigrés et colons durant cette période. Ce travail de la sauvegarde de notre patrimoine historique et culturel est fait par les institutions publiques ou ONG à Maurice telles que le National Heritage Fund, l'Aapravasi ghat trust fund ou SOS Patrimoine.

Cependant, nous relatons une forte difficulté aujourd'hui de pouvoir conserver les architectures dites « protégées » car ces institutions sont confrontées à une réelle barrière politique et financière qui leur est allouée. Je me suis donc posé la question :

Dans quelle mesure, l'archivage numérique et la diffusion digitale du patrimoine local peut aider à éduquer et sensibiliser de manière ludique la population ?

Je m'intéresse à la question de la conservation du patrimoine mauricien avec un regard d'architecte axé sur l'informatique. Mon travail consiste à faire un mémoire "action", c'est-à-dire, au-delà de faire un texte inédit relatant mes recherches, analyses et expériences, je voudrais produire quelque chose de concret (un objet, un service, un produit.). Cela comprend de faire comme un relevé numérisé d'un bâtiment et de stocker les informations sous forme d'une maquette 3D qui sera exploitée dans diverses manières telles que la réalité virtuelle et la visite immersive pour la pédagogie.

À travers la photogrammétrie (technique qui sert à reconstituer un modèle numérique à l'identique, en utilisant simplement plusieurs photos prises dans chaque angle autour du sujet), je voudrais produire cette maquette 3D étant mon "mémoire action" en question.



Intérêt pour la photogrammétrie

L'usage de la photogrammétrie pour ce travail s'est paru évident parce que c'est une technique qui permet d'utiliser le modèle 3d pour différents usages:

1. Un relevé du site précis avec un état des lieux décrivant le bâtiment dans la forme, la taille, les fonctions, les circulations, les matériaux et textures, la structure, les ambiances, etc.
2. Avoir l'aspect initial du bâti et une projection d'un futur prochain projet architectural lié au bâtiment existant (avant – maintenant – après).
3. Avoir une fonction didactique qui sert à instruire les gens par le biais de la réalité virtuelle et immersion totale dans le sujet.

Mon intérêt pour la photogrammétrie découle de mes expériences précédentes à l'école où j'ai pu tester brièvement cette technique.

Ayant exploré la photogrammétrie dans divers exercices académiques de projet architectural, j'ai trouvé très intéressant d'approfondir mes connaissances à ce sujet et de développer un mémoire complet autour de cette thématique tout en intégrant la notion du patrimoine pour faire service aux travaux en cours dans ce domaine à Maurice.

S4 Relevé maison P.Louis, 14.03.2018



S4 maquette physique projet P.Louis, 12.04.2018



Choix du sujet



Ce sujet émane de mes interrogations en fin de Master-1, où j'ai réalisé une cartographie mentale pour poser mes réflexions et faire émerger mes idées. Tout est parti de la problématique de la gestion du patrimoine local mauricien et la nécessité de référencer et archiver les sites historiques. Cela a ensuite conduit vers

l'évaluation de mes ressources matérielles, la durée, la possibilité de collaborer avec d'autres acteurs du métier et la viabilité. Le tout converge vers la photogrammétrie où mes idées sont traduites en solutions applicables au problème posé. La finalité de ce mémoire diverge pour exprimer les multiples ouvertures à ce projet.

Mise en valeur de l'histoire de Maurice via l'architecture

Révéler et recenser les éléments remarquables, réhabilitation du patrimoine, archivage et conservation, diffusion de la culture, numérisation du patrimoine.

Patrimoine

Indexation, inventoirer, numérisation - photos, vidéos, hébergement sur des sites, présentation de la recherche.

Intervenants

Durée

Lieu

Collaboration, temps 1 an, choix d'un site, ressources financières, transport, équipement disponible.

Matériel

Opération

Photogrammétrie

Photographier le site, méthodologie de relevé, développement de la maquette numérique.

Finalité

Visualisation, immersion, réalité virtuelle, hébergement, diffusion et communication autour du projet

Objectif du mémoire

Le but du mémoire est que la maquette 3d soit un vrai outil pédagogique: la modélisation 3D peut être un atout pour garder la mémoire du lieu et pour partager la culture d'une manière très accessible.

Cela fait aussi partie d'une intention de fabrication d'outils et de méthodes pour mettre en place un système d'archivage numérique et d'étude d'un modèle photogrammétrique afin d'améliorer la communication et la diffusion des informations. Cette démarche passe tout d'abord par la recherche de questions pratiques et par la suite, ce mémoire peut mener vers une mention 'recherche' et un doctorat.

L'ouverture serait de faire des essais afin de trouver des solutions d'optimisation de la photogrammétrie dans divers champs d'applications. Il y a des données sur le patrimoine - documents, supports de travail (publications et guides), fiches techniques et commerciales, photos. Mais il est nécessaire aujourd'hui de bien archiver ces informations sous une forme accessible, ludique et pédagogique et surtout, de manière pro-active parce que nous continuons à perdre notre patrimoine à un rythme effarant avec les pressions croissantes du changement climatique, du développement urbain, des catastrophes naturelles et des conflits armés. Je cherche donc à créer un registre de ces lieux avant de nouvelles pertes.

Contenu du mémoire

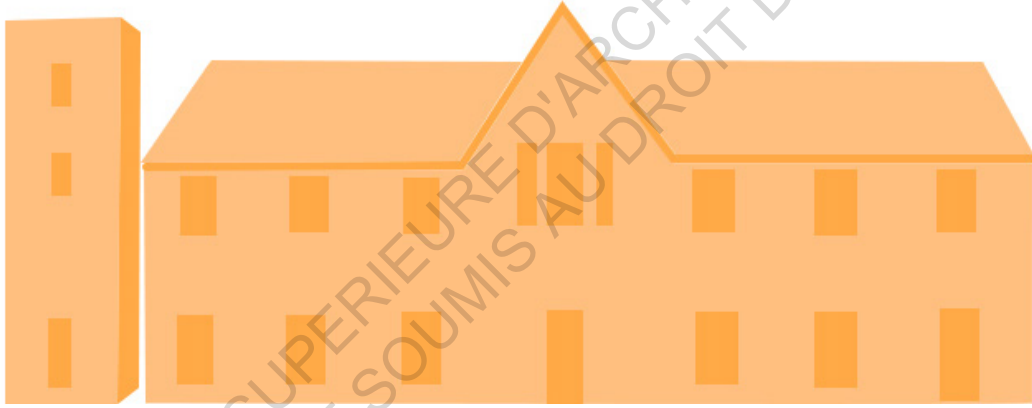
Le mémoire est un compte rendu détaillé et commenté du développement du modèle photogrammétrique d'un bâtiment du patrimoine local mauricien. L'objectif de ce mémoire est donc de réunir les informations et connaissances acquises durant le déroulement de ce mémoire.

Le mémoire et ses annexes forment un dossier qui recouvre le but du mémoire, le développement et les tâches réalisées. Il s'échelonne sur trois grandes parties:

Dans un premier temps, une présentation de l'organisme public avec laquelle j'ai collaboré et une description du site choisi. Ensuite, je présenterai les principes de base en photographie et photogrammétrie assimilés et les productions réalisées avant d'arriver au modèle 3d. Enfin, une troisième et dernière partie abordera la finalité de ce mémoire et son usage futur.

Au-delà d'un mémoire relatant uniquement les faits marquants et le produit final du développement, j'ai décidé de suivre une méthodologie plutôt chronologique, car j'ai suivi un processus ordonné et eu un emploi du temps bien défini autour de ce mémoire. De ce fait, le mémoire est comme un récit d'expériences entre la période de recherche du sujet, les premiers tests en photogrammétrie, les questionnements et erreurs, mes limites et l'aboutissement du projet.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR



Le patrimoine architectural mauricien et son identité locale.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Présentation de la NHF

Origine

La National Heritage Fund (NHF) a pour mandat d'identifier, protéger, gérer et promouvoir le patrimoine national de l'Île Maurice et ainsi développer un sentiment d'appartenance chez tous les habitants en prenant soin du passé et en le léguant à l'avenir.

Avant la création du NHF, le patrimoine de l'Île Maurice était géré en vertu de la loi sur les 'Ancient Monuments Act' en 1944, qui a été mise à jour en 1985 par la loi 'National Monuments Acts'. Dans une tentative de développer le concept de gestion du patrimoine national, la loi 'National Heritage Trust Fund Act' a été adoptée en 1998 et, est finalement devenue la loi 'National Heritage Fund' de 2003. L'institution opère sur le territoire de l'Île Maurice et l'Île Rodrigues selon la liste de sites de patrimoine national protégé.

La NHF est située au bureau du 4^e étage, Fon Sing Building, rue Edith Cavell à Port-Louis.

La National Heritage Fund fonctionne sous l'égide du Ministère des Arts et de la Culture et sa vision, sa mission et ses objectifs sont les suivants:

les objectifs

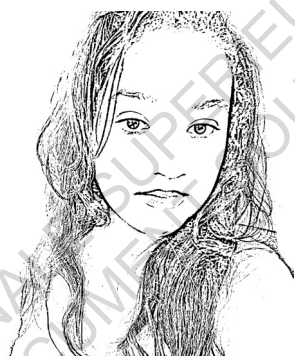
- Sauvegarder, gérer et promouvoir le patrimoine national de Maurice
- Préserver les sites du patrimoine national en tant que source d'investigation scientifique et culturelle et en tant que base durable aux fins du développement, des loisirs, du tourisme et de la jouissance des générations présentes et futures dans le monde entier
- Éduquer et sensibiliser le public aux valeurs culturelles, au patrimoine national et inculquer un sentiment d'appartenance et de fierté civique à l'égard du patrimoine national.



Acteurs & collaboration



J'ai contacté la manageuse de la NHF en début février 2020 pour collaborer avec cette institution sur un de leurs projets en cours. J'ai eu une réponse favorable à ma demande, avec une proposition de plusieurs sites au choix. La NHF a mis plusieurs ressources à ma disposition notamment le transport entre mon domicile et le site, des ouvrages et équipements qui m'ont permis de mener à bien mon travail. La finalité de mon travail est une contribution à leur projet, où la maquette serait utilisée comme appui à leur tâche de recherche et relevé sur le site en question.



J'ai travaillé avec les officiers de l'ONG Our Heritage Foundation - Mr. Nipon Medhi et Mme. Cheshta Hoolash lors de mes visites et relevés de site. J'ai eu la chance de collaborer avec eux et ils m'ont beaucoup aidé avec leurs équipements et savoir-faire notamment pendant la capture d'images aériennes avec le drone et les relevés physiques et archéologiques sur le site.



Le Centre Nelson Mandela pour la culture africaine est le dernier d'une série d'initiatives consacrées à l'avancement de la culture africaine et créole à Maurice. Depuis son ouverture en 1986, le Centre a joué un rôle important dans la projection d'une image positive de la culture africaine et créole à Maurice, valorisant la richesse et la variété des arts et de la culture africains et créoles par diverses formes d'activités culturelles et sociales à travers des expositions, des publications, réunions, causeries et arts de la scène.

Archivage du patrimoine

Dans le domaine du patrimoine, l'archivage et la conservation se font à travers diverses méthodes notamment :

- Tracer et collecter les archives historiques existantes des bâtiments: textes, photos, illustrations, relevés, plans.
- Photographie à couverture complète, vidéographie et scan laser 3D
- Reconstruction numérique virtuelle

“La photogrammétrie est utilisée dans des domaines tels que la cartographie topographique, l’architecture, l’ingénierie, la fabrication, le contrôle de la qualité, les enquêtes policières, le patrimoine culturel et la géologie.”

Cela propose des réparations préventives en réponse aux futures catastrophes naturelles, des visites virtuelles de bâtiments célèbres et des remplacements imprimés en 3D d'œuvres d'art détaillées avec les mêmes caractéristiques. Les sauvegardes numériques permettront aux futurs gardiens, chercheurs et experts en rénovation de préserver les sites architecturaux et monuments avec un haut niveau de détail et refaire des copies parfaites des parties détruites d'un site. Ce catalogage des sites du patrimoine culturel est fait pour que les générations futures aient des données avant et après pour aider à évaluer les dommages et les informer sur le processus de restauration.

CHAMPS D'APPLICATION DE LA PHOTOGRAMMÉTRIE ET LA RÉALITÉ VIRTUELLE DANS LE PATRIMOINE

Aujourd'hui, il y a une croissance exponentielle de l'utilisation de la photogrammétrie et de la réalité virtuelle dans le patrimoine. Cela a été un apport pour éduquer et expérimenter sur divers sujets qui ne pourraient pas être possible autrement que par la réalité virtuelle. Par exemple, les sites de patrimoine culturel qui n'existent plus ou qui sont exposés aux catastrophes naturelles ou actions humaines hostiles.

La cathédrale historique Notre-Dame de Paris a été incendiée en 2019. Le feu a détruit définitivement des parties du bâtiment. Heureusement, le site a été modélisé par plusieurs particuliers comme (Ubisoft pour le jeu Assassin's Creed, Andrew Tallon - historien du Vassar College, Art Graphique Patrimoine, TARGO etc..) et permettront la reconstruction de sa flèche, les toitures de la nef et du transept et sa charpente à l'identique. Idem pour les temples bouddhistes de Bagan où les membres de l'ONG CyArk ont effectué des scans numériques et ont été utilisés dans la rénovation après un tremblement de terre en 2016. Ils ont également travaillé dans des pays en guerre comme la Syrie et l'Iraqe où l'État Islamique détruit les sites et antiquités du patrimoine culturel.

Choix du site



Critères de sélection

En lisant des articles et m'appuyant sur les actualités, j'ai préétabli une liste de sites qui dégagent un réel potentiel que ce soit au niveau architectural, historique, identitaire ou économique.

Afin de sélectionner le site sur lequel je vais réaliser mon mémoire, je me suis basé des critères de l'UNESCO dans la classification du patrimoine architectural pour faire mon choix final.

1. Représenter un chef-d'œuvre du génie créateur humain
2. Témoigner d'un échange d'influences considérables 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 significatives 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
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 grandes étapes 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
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.

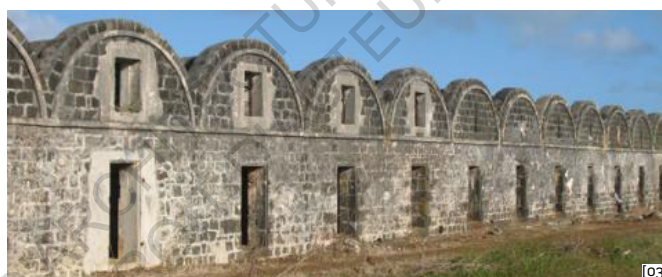
01 Fort Adelaïde communément appelé 'La Citadelle' « Construite en roche basaltique, juchée sur la Petite Montagne, une citadelle imposante surplombe la ville de Port Louis et son port. Erigée sous l'administration britannique et communément appelée La Citadelle, elle est moins connue sous son nom d'origine, le Fort Adélaïde, en hommage à l'épouse du roi William IV d'Angleterre. »



02 Fort Frederik Henrik Le site de Frederik Hendrik (1638) comprenait une loge, une prison, une boulangerie et un atelier de forgeron. Sur les murs du lodge, il y a des graffitis représentant des navires des XVIIIe et XIXe siècles. En l'an 2000, les restes du fort néerlandais Frederik Hendrik ont été fouillés. Il repose à environ 50 cm de profondeur dans le sol.



03 Trianon Barracks Mauritius (Old Labourers Quarters) Les quartiers des anciens travailleurs sont l'un des rares exemples restants de logements non périssables construits pour les travailleurs sous contrat, même si tous les domaines sucriers de l'île à l'époque ne suivaient pas ce type de logement. Sur d'autres domaines, c'était plutôt des maisons en paille.



04 Ex-Hôpital Militaire Port-Louis, futur Musée Intercontinental de l'Esclavage L'hôpital militaire, construit par Mahé de Labourdonnais est parmi les plus anciens bâtiments de l'île. (1740) Prochainement, il y aura des travaux de restauration de l'ancien hôpital militaire, à Port-Louis en un nouveau Musée de l'Esclavage. Un projet initié en 2011, arrêté et repris cette année début 2020.



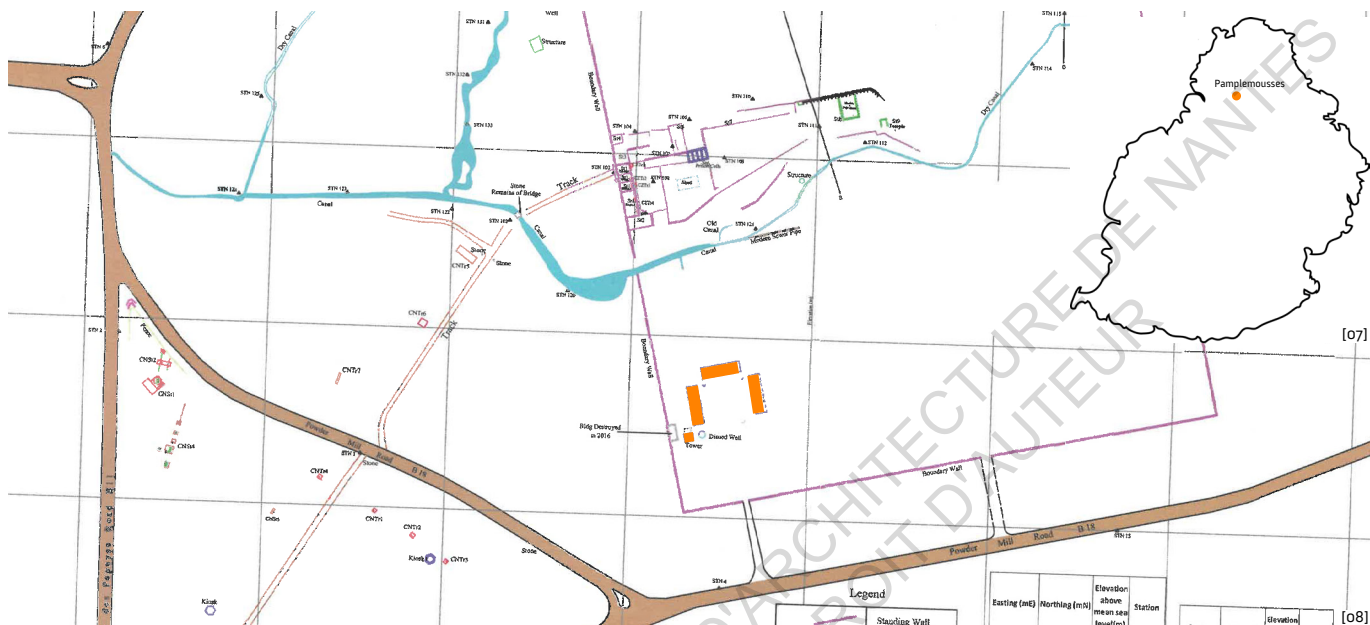
05 Asile Orphelinat (ex Moulin à Poudre) Le Moulin à Poudre fut construit en 1774 et devait remplacer l'ancien moulin à poudre de la Baie aux Tortues qui avait explosé. Ainsi, à la fin du XVIIIème siècle et ce jusqu'en 1810, le Moulin à Poudre de Pamplemousses fut le principal fournisseur en poudre à canon de l'île et employait près de 900 esclaves. Le site reconverti servit à diverses fonctions au XIXe siècle.



06 Edith Cavell Government School (Ecole Beugeard) fut le lieu de naissance de Robert Edward Hart, un grand poète mauricien. Il fut aussi la résidence d'Adrien d'Epinaï, leader des « colons contre l'action de l'Anti Slavery Society ». Puis, le bâtiment a été transformé en une école primaire pour filles connu sous le nom de l'école centrale Girls primaire publique, puis est devenue l'Edith Cavell Govt. School.



Après avoir analysé les bâtiments, le site (05) **Moulin à Poudre** a finalement été sélectionné pour son importance culturelle et sa qualité architecturale. Elle marque significativement l'identité du lieu et témoigne d'une époque charnière à Maurice.



Historique du site

La poudre à canon était fabriquée au XVIII^e siècle dans les établissements gouvernementaux français, le plus connu étant à l'Essonne. *La Manufacture Royale des Poudres de Guerre* à Balaclava et plus tard, à Pamplemousses dans l'Île de France (Maurice) était la seule usine de poudre à canon dans la période coloniale française.

Il y avait déjà des plans d'implantation d'une usine de poudre à canon à Maurice dès l'arrivée du Gouverneur Labourdonnais sur l'île. Cependant, le premier moulin à poudre s'est établi sur l'île à Baie aux Tortues (Balaclava). Sa destruction suite à une explosion en 1774 a conduit à la reconstruction d'un autre moulin à Pamplemousses sur l'ancien site des Forges de Mon Désir. Cela a permis

de déplacer le Moulin à Poudre dans un endroit isolé pour des questions de sécurité puisque le situer à l'intérieur de l'île serait moins vulnérable face aux attaques des ennemis. La présence d'infrastructures existantes aux Forges de Mon Désir a joué un rôle prépondérant sur la décision de l'emplacement du nouveau moulin par les administrateurs, car les bâtiments et équipements existants pouvaient facilement être réutilisés et adaptés à la production de poudre à canon et cela permettait au gouvernement français de gagner du temps et de l'argent au lieu de tout reconstruire à nouveau. La poudre à canon était utilisée par l'armée française dans le cadre du commerce des esclaves et pour les batailles contre les Anglais notamment.

Contexte et fonctions



LES DORTOIRS DE L'ASILE D'ORPHELINS DES 1860s

Le site du nouveau Moulin à Poudre (post-1774) fait une superficie totale de 22 ha avec notamment des raffineries, magasin à salpêtre, magasin à bois et charbon, logement des poudriers, moulin à pulvériser, tour, moulin à cylindres, vivier, moulin à pilons, poudrière, parc à boeufs, logement du commandant, magasin à poudre et le Camp des Noirs.

Après 1810 (période coloniale anglaise), les Britanniques ont cessé la production de poudre à canon et les bâtiments ont été adaptés et réutilisés pour d'autres fonctions. En 1849, une muraille d'enceinte carrée est délimitée pour créer une prison. Les plans de la prison faits en 1874 par Département de Relevé de Maurice démontrent uniquement les

infrastructures de la prison. De nombreux changements prennent place au sud de la prison, notamment près de la tour avec l'orphelinat ou dit 'asile d'orphelins'.

J'ai décidé de me focaliser uniquement sur ces infrastructures qui se composent de 2 bâtiments parallèles utilisés comme dortoirs (1864 et 1865), le bâtiment perpendiculaire au centre qui avait pour fonction d'école pour l'orphelinat et la tour du 18ème siècle. L'asile accueillait des orphelins des immigrants sous contrat. Selon les plans de 1891 par l'établissement gouvernemental de la poudre à canon, l'asile d'orphelin fut converti en léproserie (hôpital pour le traitement des malades de lèpre). La tour a également survécu les époques et était initialement conçue pour sécher l'étuve, mais ce projet est abandonné avant 1778 quand une horloge de 8-9 pieds de haut y fut installée. Sa fonction ultérieure demeure inconnue.

État de l'art



Les vestiges du Moulin à Poudre demeurent inconnus par la population mauricienne. Ce site a été délaissé pendant plusieurs années avant que les autorités s'intéressent à la valorisation de ce patrimoine. Le plus affligeant est que ce site dit 'protégé' a été pillé par des voleurs de pierre taillée en 2016 et l'environnement qui l'entoure est pollué par de nombreux déchets médicaux et détritiques en plastique. Aujourd'hui, le site accueille un centre de dialyses de l'hôpital SSRN dans son enceinte en face des dortoirs de l'orphelinat en ruine.

Entre 2015-2017, des travaux de fouille et de relevés archéologiques ont été réalisés sous l'initiative du Mauritius Research Council avec une équipe de recherche composée de Dr. V Teelock - Professeur agrégé au Centre for Research on Slavery and Indenture (CRSI) à l'Université de Maurice (UoM) avec l'appui de Mrs J. Mungur-Medhi, membre de National Heritage Fund (NHF), collaboratrice et chercheuse CRSI et UoM.

Les découvertes font ressortir des structures et des caractéristiques jusque-là inconnues sur une histoire antérieure, celle des Forges de Mon Désir (avant 1774). Les trouvailles ont également mis en lumière des structures ultérieures telles qu'un temple bouddhiste construit pour les prisonniers kandyens qui y étaient détenus (années 1830), et les vestiges de la prison

plus tardivement, y compris des quartiers pour femmes détenues (années 1830) et des cellules d'isolement cellulaire.

La recherche a adopté une approche multidisciplinaire combinant recherche archivistique, recherche archéologique, documentation architecturale et relevés topographiques, avec la participation des étudiants et arpenteurs du Ministère du Logement et des Terres.

L'ouvrage "*The Moulin à Poudre Cultural Landscape*" a été publié en 2018 par le CRSI et je me suis beaucoup appuyé sur ce travail pour rédiger mon mémoire, documenter et référencer le site.

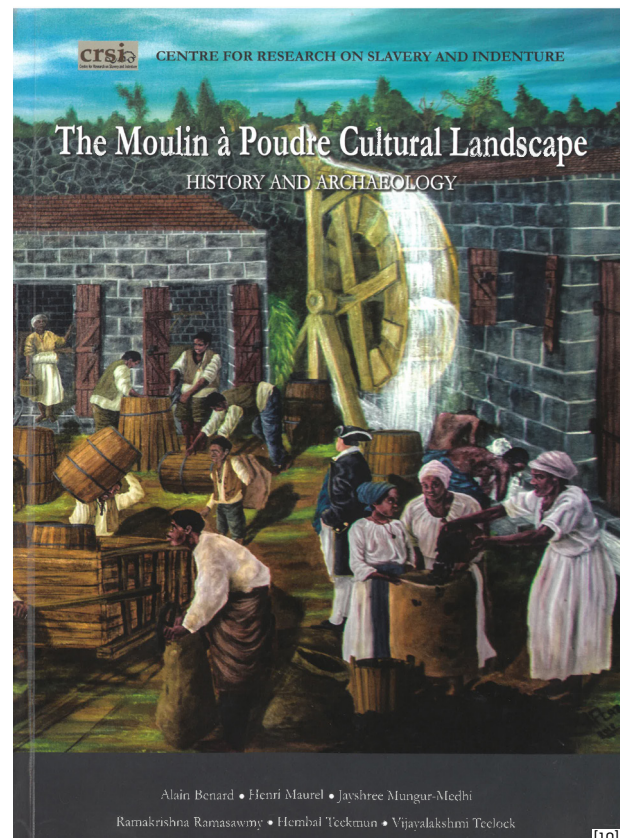
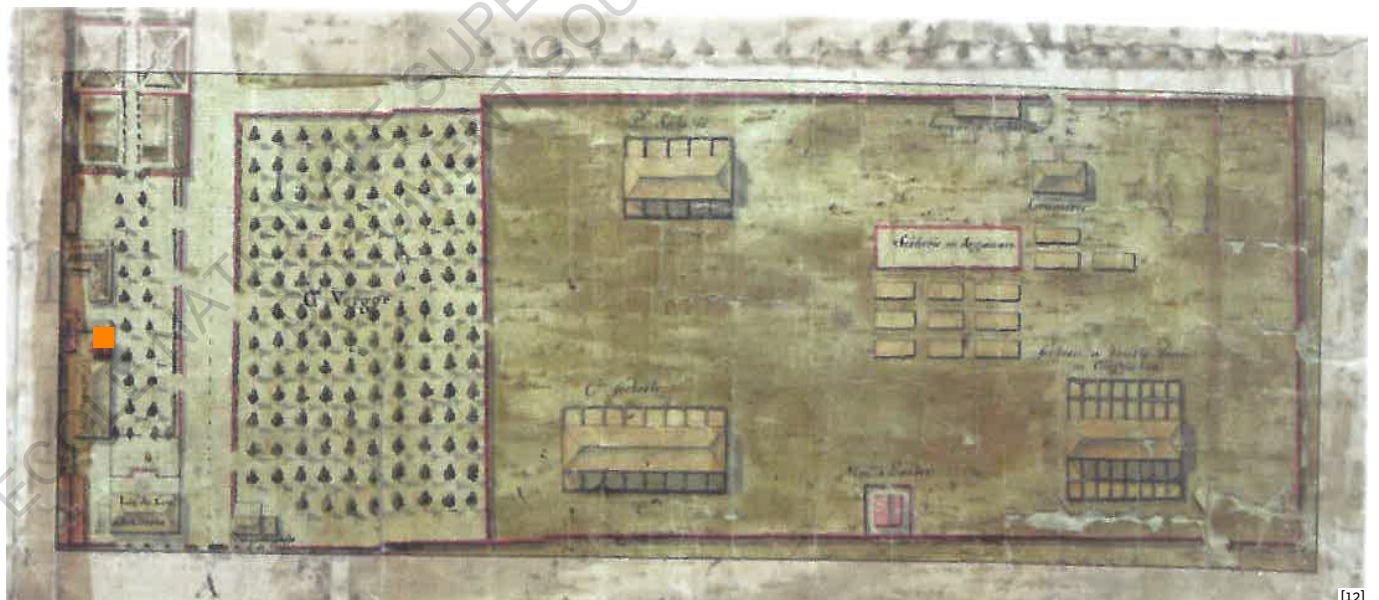




Figure 5:6 1785 Plan de la Manufacture Royale des Poudres de Guerres (Anonymous)

1785 - Plan de la Manufacture Royale des Poudres de Guerres

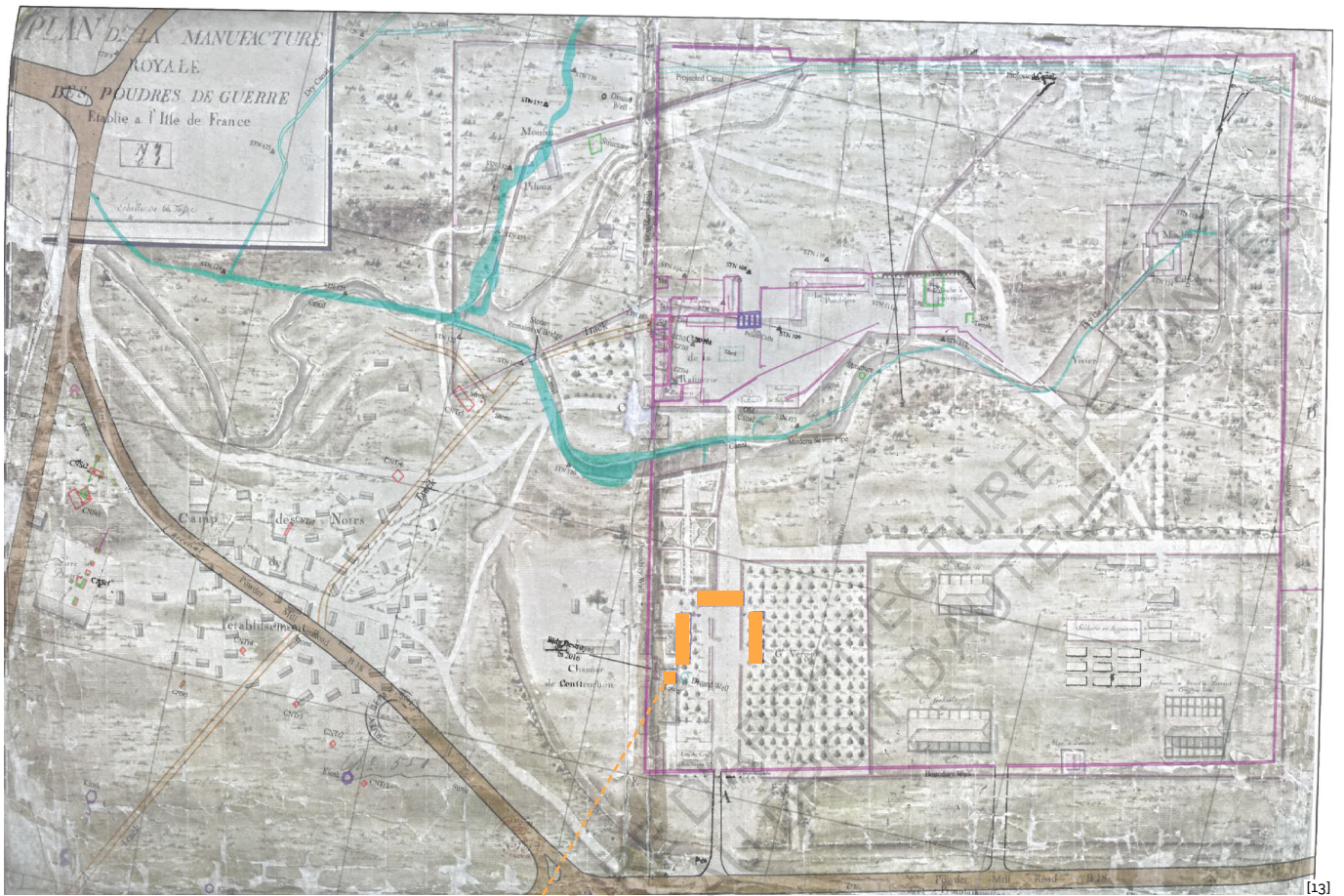
■ Tour



1785 - Zoom sur la partie sud du site avec les vergers et la zone des sècheries

■ Tour

Il y avait des jardins bien aménagés où les épices étaient cultivées. Le jardin a complètement été rasé pendant la période britannique et dans les années 1860s, trois bâtiments furent érigés pour l'asile d'orphelins (dortoirs et école/chapelle) qui devint plus tard une léproserie.



Une superposition du plan de 2017 sur 1785

■ Tour



Aujourd'hui, les bâtiments demeurent des vestiges emblématiques qui témoignent d'une histoire symbolique certes, après la période 'Moulin à Poudre', sauf la tour, qui elle date possiblement de l'époque française. Les archives décrivent que la tour est construite en pierre datant pré-1778 alors que les deux autres bâtiments (r+1) sont construits entre 1864/65 avec des façades en belles pierres taillées et des toitures en pente en tuile de bois. Le bâtiment perpendiculaire a une architecture en rez-de-chaussée uniquement avec une véranda, chaperon et piliers.

Principes de base de la photogrammétrie et développement

La photogrammétrie

Définition et principes

La photogrammétrie est un ensemble de techniques qui, à partir d'une série d'images photographiques prises, permet de reconstituer un modèle 3D du sujet exact de la réalité. La photogrammétrie a été instaurée par Aimé Laussedat, officier de l'armée française en 1849 sur la façade de l'Hôtel des Invalides.

La photogrammétrie peut être classifiée en différentes catégories comme :

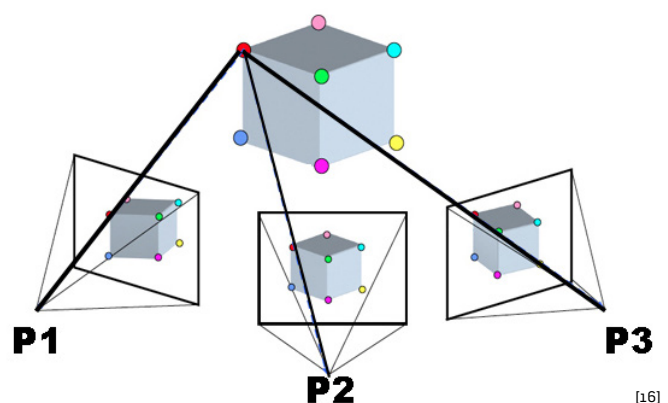
1. la photogrammétrie analogique.
2. la photogrammétrie analytique.
3. la photogrammétrie numérique.

Grâce aux avancées technologiques, c'est la photogrammétrie numérique qui est actuellement la plus utilisée. Elle porte de nombreux avantages notamment: une grande stabilité des images, la visualisation est plus facile, on utilise les données à partir du logiciel, le processus est automatisé, le résultat est donné sous forme numérique et une meilleure distribution des images. Cependant, cela requiert beaucoup d'espace pour stocker des volumes de données importantes.

Le principe fondamental utilisé par la photogrammétrie est la triangulation. En prenant des photographies à partir d'au moins deux endroits différents, ce que l'on

appelle des «lignes de visée» peuvent être développées de chaque caméra vers des points sur l'objet.

Ces lignes de visée (parfois appelées rayons en raison de leur nature optique) sont croisées mathématiquement pour produire les coordonnées tridimensionnelles des points d'intérêt. La base est une triangulation entre des points et une reconstruction de surface 2,5D ultérieure basée sur des points de contrôle des coordonnées spatiales connues dans plusieurs images se chevauchant.



[16]

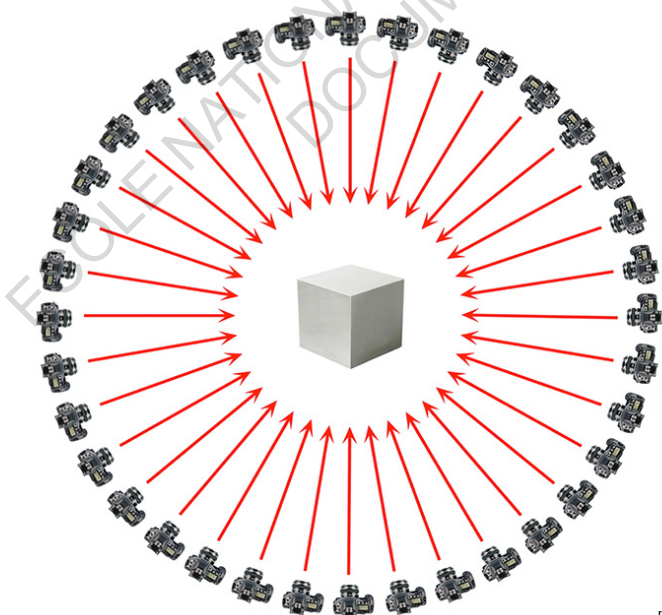
La photographie est la projection d'une scène 3D sur un plan 2D, perdant des informations de profondeur. Le but de la photogrammétrie est d'inverser ce processus en projetant un maximum d'images pour modéliser une forme 3D.

Multi-images

La reconstruction 3D multi-images, désigne la technique qui permet d'obtenir une représentation en trois dimensions d'un objet ou d'une scène à partir d'un ensemble d'images prises sous différents points de vue de l'objet ou de la scène.

D'une manière plus générale, le problème appelé reconstruction 3D est le suivant : on dispose d'une ou plusieurs représentations en 2D d'un objet et on souhaite déterminer les coordonnées des éléments visibles sur ces représentations dans un repère de l'espace réel 3D.

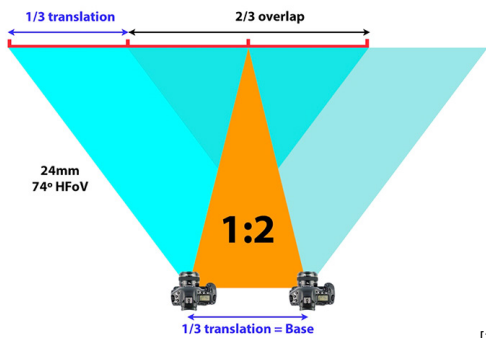
Dans un cadre plus spécifique et simplifié, les représentations 2D sont des photographies, il s'agit de retrouver la profondeur des points visibles sur l'image, qui est perdue durant le processus de projection qui produit l'image.



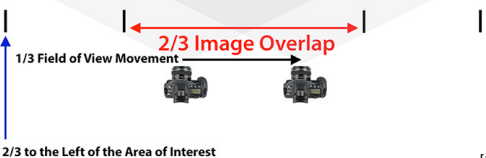
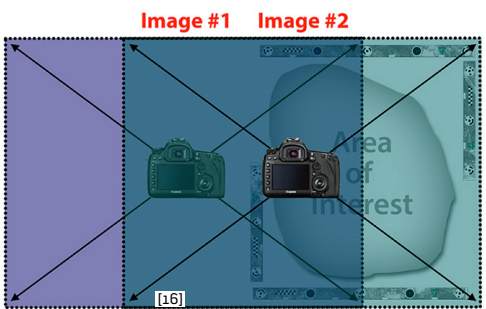
[17]

Recouvrement

Les étapes pour un processus photogrammétrique réussi est l'obtention d'une bonne séquence photographique. Pour déterminer où prendre les photos, il faut conserver un chevauchement (ou superposition) constant de 66 %, l'appareil photo doit être déplacé d'une distance équivalente à 34 % du champ de vision de l'appareil photo entre les photos, de gauche à droite ou de haut en bas. Tout le sujet est couvert par au moins trois cadres dans chaque rangée. Le procédé est systématique de gauche à droite sur toute la longueur du sujet en prenant autant de photos que nécessaire pour assurer une couverture complète.



[18]



[19]

Photographie



Les progrès technologiques récents dans les appareils photo numériques, les processeurs informatiques et les techniques de calcul, telles que la correspondance d'image sous-pixel, font de la photogrammétrie une technique portable et puissante. Il produit des données de surface 3D extrêmement denses et précises avec un nombre suffisamment limité de photos, capturées avec un équipement de photographie numérique standard, dans un laps de temps relativement court.

Matériels et outils

La session photographique du site a été réalisée avec trois équipements. Pour la phase d'essais, je me suis muni de mon téléphone portable Samsung J5 avec caméra 12mp pour faire des tests photogrammétriques sur une des façades du bâtiment. Ensuite, pour le relevé photographique final de plus de 4000 photos, une meilleure configuration avec appareil photo numérique compact Canon PowerShot SX40HS pour sa petite taille. Cela a été utilisé pour photographier les zones au rez-de-chaussée et des coins difficilement accessibles (à l'intérieur des bâtiments et en extérieur, auprès des arbres et de la végétation).

La majeure partie du site a été photographié par image aérienne avec un drone DJI Phantom 4 Pro FC 6310 pour avoir une capture adéquate des toitures

et planchers vu de haut. Cela a permis de faire un balayage complet du site entier et de photographier les points hauts de chaque bâtiment avec une vue plongeante sur le terrain.

Le drone a une meilleure qualité d'image et est connecté à une tablette tactile via Wi-Fi et il est alors possible de filmer à distance. Cependant, nous étions limités quant à la durée d'exploitation des batteries et la détection d'obstacle car les arbres obstruaient certaines vues.



[20]



[21]

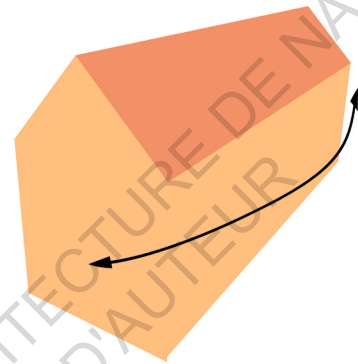
Collecte de données photographiques

Le planning de travail s'est déterminé suite à la réponse positive de l'institution NHF, j'ai défini aussi mon temps alloué pour faire la photogrammétrie que je vais réaliser durant le mois de mars-avril. Cependant, avec la pandémie de la Covid-19, la majeure partie du travail a pu être exécuté durant la période entre août-septembre.

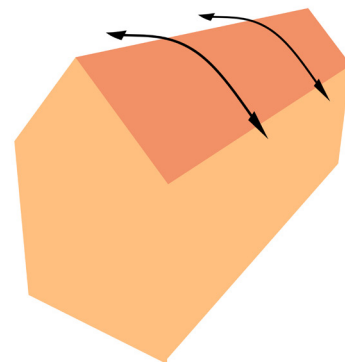
Le relevé photographique a été réalisé sur 5 séances sur le site. Un pré-relevé en début d'année le 7 mars 2020, et les relevés finaux en 12 août, 18 août et 01 septembre 2020 respectivement.

J'ai pratiqué un balayage très large et systématique pour la prise de photo autour des bâtiments afin d'avoir un recouvrement d'au moins 50 % entre chaque image. Avec l'appareil photo, j'ai réalisé une séquence photographique horizontale autour des bâtiments au rez-de-chaussée en prenant les images de gauche à droite.

Le drone a été plus utile pour faire des photos de haut en bas pour la tour et également dans un balayage circulaire pour capturer les points hauts des toitures en plan et élévation.



Prises de photos au rez-de-chaussée avec l'appareil photo



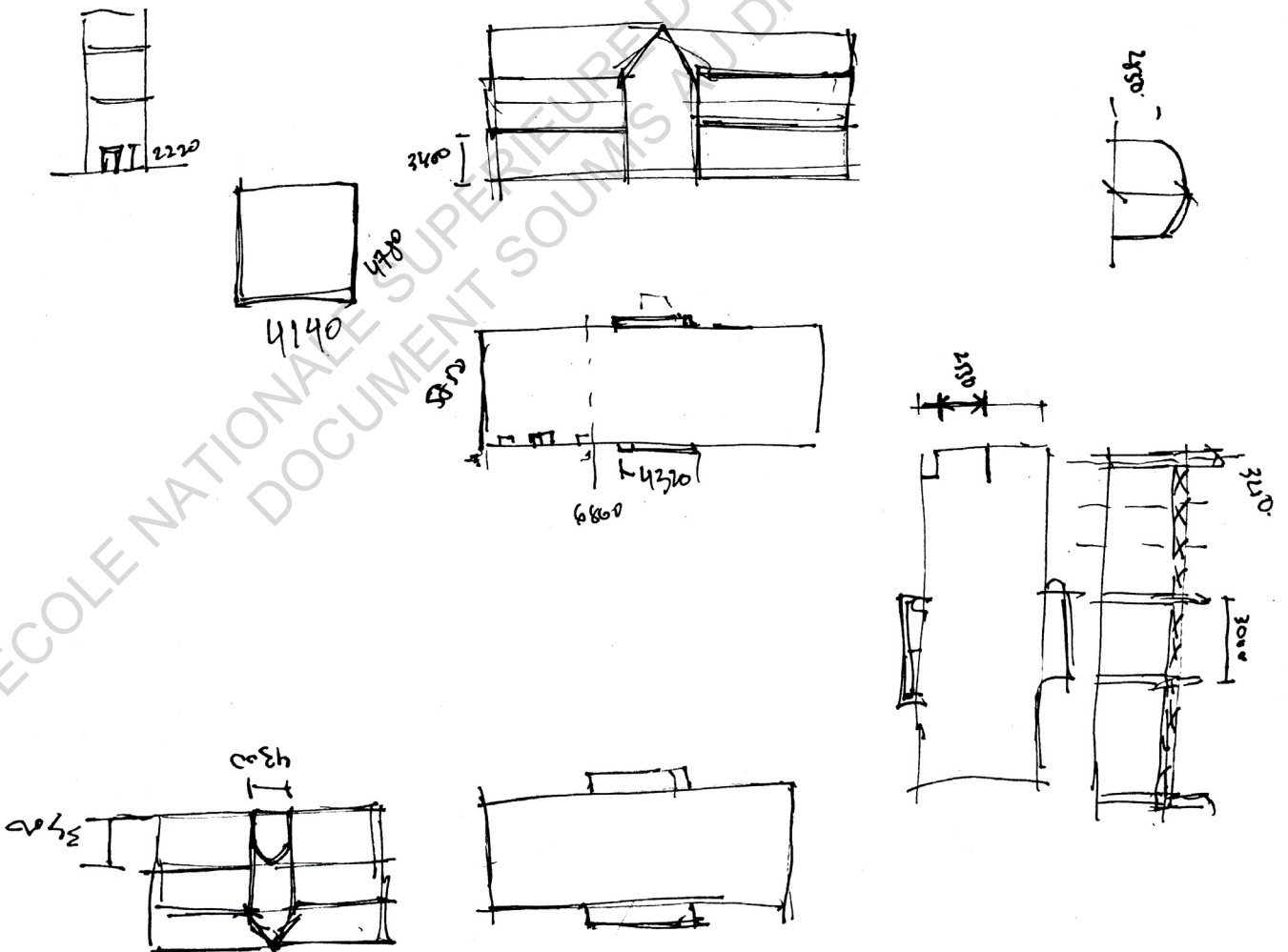
Photos du r+1 et des toitures avec le drone

Mesures physiques et relevés complémentaires

Afin de remettre le modèle 3d à la bonne échelle, une session de relevé physique a été réalisée pour mesurer la taille du bâtiment. Les dimensions ont été marquées autour de repères précis qui seront ensuite traduites en similarité sur la maquette 3d. Pour cela, je me suis muni d'un ruban à mesurer métrique de 5m et j'ai noté sur mon carnet de bord les grandes dimensions des façades comme référence dans les axes X, Y et Z.



[22]



Modélisation 3d



Choix du logiciel

La modélisation 3d peut se faire sur divers logiciels numériques de traitement photogrammétrique. On peut retrouver notamment Agisoft Metashape (anciennement Photoscan), Autodesk Recap, 3DF Zephyr, PhotoModeler, Pix4Dmapper et RealityCapture parmi les plus connus.

J'ai opté pour Agisoft Metashape pour modéliser le projet, car c'est un logiciel autonome qui fonctionne hors ligne, avec une interface simple et un processus très linéaire qui facilite l'avancée entre chaque étape. Il peut traiter des images aériennes, à courte portée, UAS et imagerie satellitaire. Toutefois, il requiert beaucoup de puissance informatique pour les calculs.

Metashape génère des données spatiales 3D à utiliser dans les applications SIG,

la documentation du patrimoine culturel et la production d'effets visuels ainsi que pour les mesures indirectes d'objets de différentes échelles.

Le logiciel permet de traiter les images de caméras par RGB, thermiques ou multispectrales, y compris les systèmes multi-caméras, dans les informations spatiales sous la forme de nuages de points denses, de modèles polygonaux texturés, des orthomosaïques géoréférencées et de DSMs/DTMs.

Un post-traitement supplémentaire permet d'éliminer les ombres et les artefacts de texture des modèles, de calculer les indices de végétation et d'extraire des informations pour les cartes d'action des équipements agricoles, de classer automatiquement les nuages de points denses, etc.

Metashape est capable de traiter plus de 50000 photos sur un cluster local, grâce à la fonctionnalité de traitement distribué. Alternativement, le projet peut être envoyé dans le cloud pour minimiser l'investissement matériel, toutes les options de traitement étant toujours disponibles.



[23]

'Structure from Motion'

Le logiciel de photogrammétrie utilise la méthode Structure from Motion (SfM). L'approche SfM détermine simultanément la façon dont la lumière passe à travers le système optique de l'appareil photo (l'étalonnage de l'appareil photo) et la position et l'orientation (pose) de l'appareil photo, par rapport au sujet de l'image, pour chaque photo.

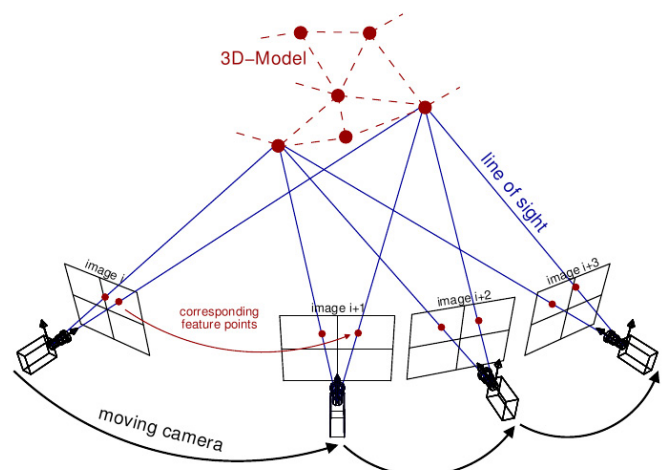
Lors du traitement, l'étalonnage et la pose de chaque caméra sont de plus en plus précis grâce à un processus itératif. Cela se fait en affinant de manière itérative un nuage clairsemé (eng. sparse cloud) de points dans la scène virtuelle représentant l'environnement du monde réel contenant le sujet d'imagerie.

Les points dans le nuage clairsemé sont créés à partir des correspondances de voisinages de pixels similaires identifiés dans plusieurs photos. Si des voisinages de pixels correspondants sont trouvés dans deux photos, ou de préférence plus, les zones occupées par les voisinages de pixels dans les photos respectives sont projetées dans la scène 3D virtuelle.

Ces projections se croisent sous la forme d'un volume commun dans la scène 3D et sont représentées comme un point dans le

nuage clairsemé. L'incertitude de position (précision) de ces points est réduite. Au fur et à mesure que les précisions des positions des points augmentent, les précisions de l'étalonnage et de la pose de la caméra augmentent également.

Lorsque l'étalonnage et la pose de la caméra souhaités sont au niveau de précision acceptable pour l'utilisateur, le processus SfM est terminé. Agisoft Metashape et d'autres logiciels offrant la SfM utilisent ensuite une variété ou une autre d'algorithmes stéréo multi-points de vue pour construire un nuage de points dense, qui peut être transformé en un modèle 3D texturé.



2. INSÉRER LES PHOTOS

Sélectionner et charger un ensemble d'images au format JPEG, JPEG 2000, TIFF, DNG, PNG, OpenEXR, BMP, TARGA, PPM, PGM, SEQ, ARA dans le chunk avec la commande 'Ajouter des photos' dans la barre d'outils.

4. CONSTRUIRE UN NUAGE DENSE

Sur la base des positions de caméra estimées, le logiciel calcule les informations de profondeur pour chaque caméra à combiner en un seul nuage de points denses. Les paramètres sont réglés sur 'haut' avec la valeur du filtrage de profondeur sur 'agressif'.

6. CONSTRUIRE UNE TEXTURE

La commande 'construire une texture' dans le traitement par lot permet de créer différents types de textures pour un modèle. L'attribut du mode de mappage est 'générique' et le mode de fusion est 'mosaïque'.

8. AJOUTER DES REPÈRES

Afin de calibrer tous les chunks, il faut ajouter au moins 3 repères. Les paramètres de référence sont sur 'coordonnées locale'. Avec les mesures physiques réelles, définir les coordonnées (x, y, z) des repères déterminés.

10. ASSEMBLER LES CHUNKS

Dans l'onglet de traitement, choisir 'aligner les morceaux' avec le paramètre 'basé sur les repères' et cocher 'échelle fixe'. Puis fusionner les morceaux avec le nuage dense uniquement et finalement, reconstruire maillage & texture.

1. AJOUTER CHUNK

Dans la barre d'outils, ajouter les chunks après chaque série d'étapes qui représenteront chacun un morceau du modèle final à assembler. Les morceaux peuvent être dupliqués indéfiniment s'il est nécessaire de modifier ses contenus.

3. ALIGNER LES PHOTOS

Une fois les photos chargées, elles doivent être alignées. À ce stade, Metashape trouve la position et l'orientation de la caméra pour chaque photo et crée un modèle de nuage de points clairsemés.

5. CONSTRUIRE UN MAILLAGE

Reconstruire un modèle de maillage polygonal basé sur les informations du nuage de points (nuage dense) et sélectionner le type de surface arbitraire 3D avec un haut nombre de face. Un modèle solide et ombré est créé.

7. NETTOYER LE MODÈLE

Dupliquer le chunk pour conserver la version originale et supprimer manuellement les sections inutiles et excessives des polygones maillées du modèle en utilisant l'outil de sélection rectangle, cercle ou de forme libre.

9. REMETTRE À L'ÉCHELLE

Vérifier que les repères ont au moins 2 projections placées sur les images alignées. Cocher tous les repères dans la liste de référence et cliquer sur le bouton 'Actualiser la transformation' dans la barre d'outils de référence. Réinitialiser la région pour remettre en fonction du nuage de points réels.

11. EXPORTER LE MODÈLE

Essais préliminaires



Lors de ma première visite sur le site le 7 mars 2020, j'ai réalisé une pré-relevé photographique d'une façade arrière d'un bâtiment afin d'établir mon protocole en terme de prise d'images.

Cela m'a servi à définir les outils et où installer mes dispositifs et déterminer mes prises de vues photos pour ainsi comprendre les difficultés.

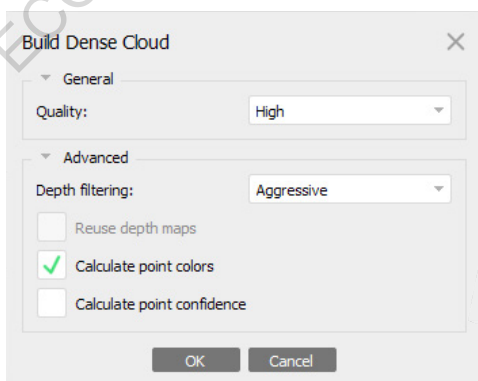
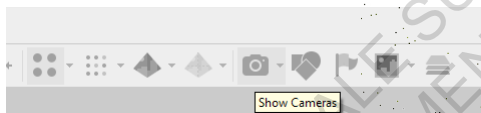
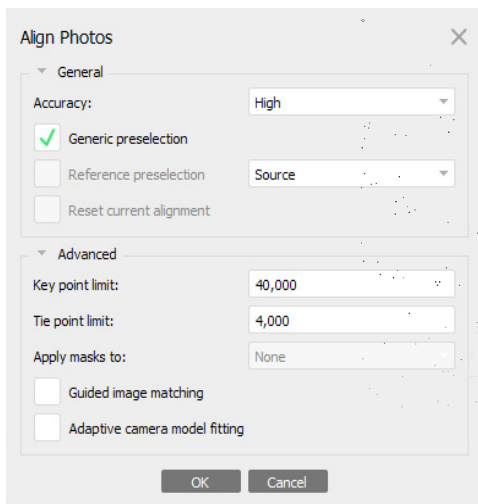
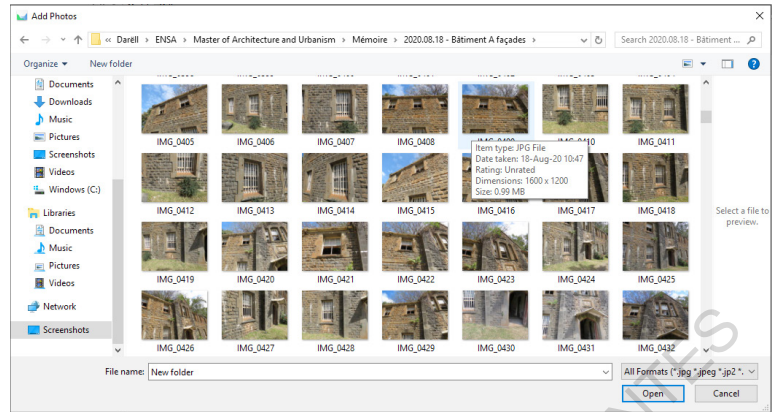
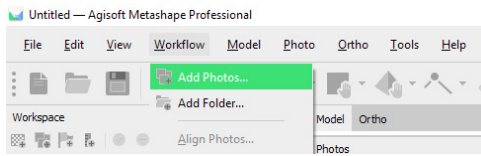


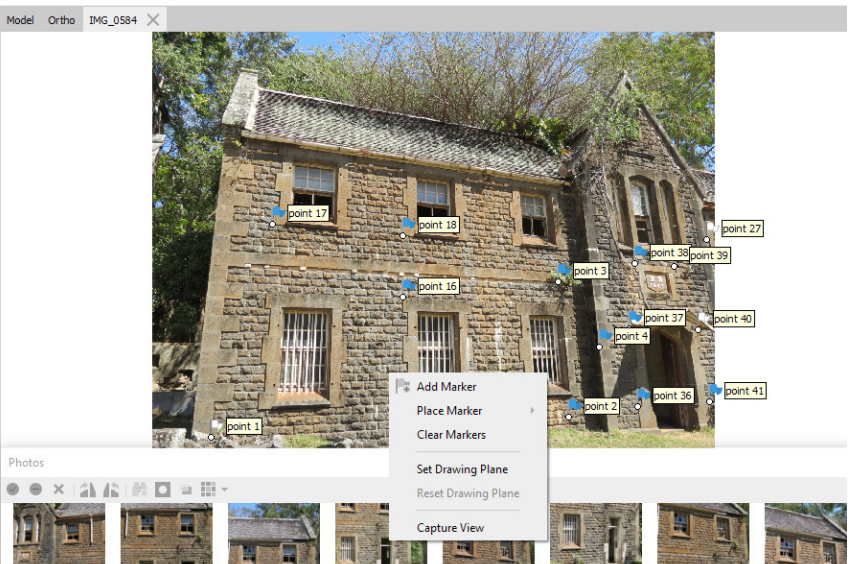
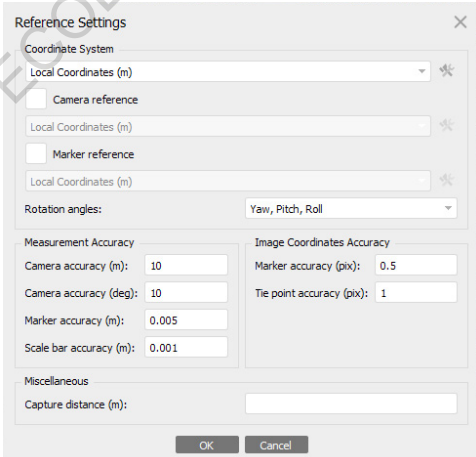
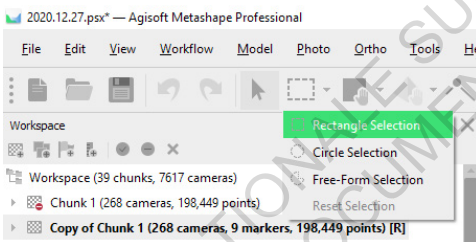
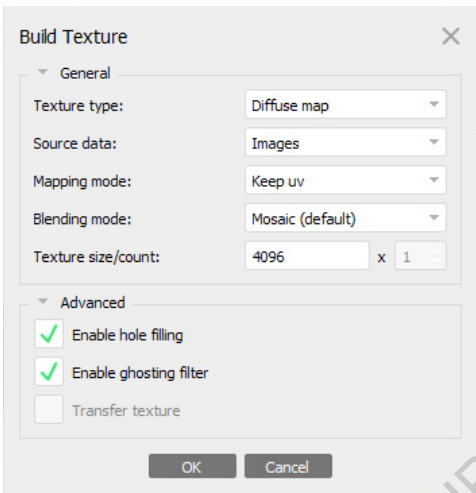
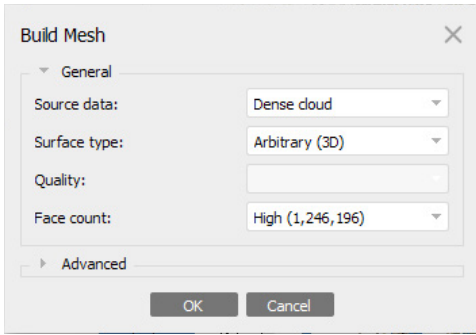
J'ai compris que la prise de photo avec mon téléphone portable serait inefficace et qu'un appareil photo plus avancé serait nécessaire.

J'ai aussi noté qu'il ne fallait pas zoomer en prenant les photos et au contraire, garder la focale constante et se déplacer avec

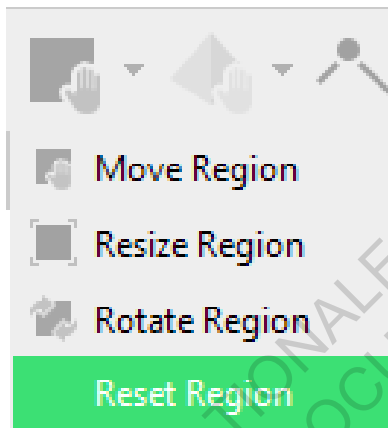
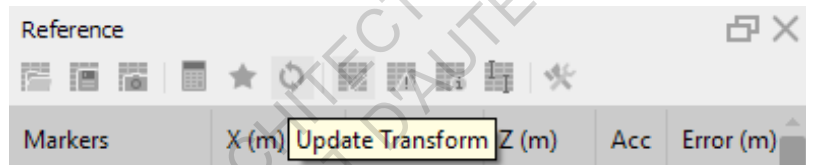
la caméra autour du sujet en s'avancant et reculant. Il est aussi très important de capturer les photos en étant focus au maximum, avec une lumière homogène tout au long du procédé.

Restitution de la maquette 3D



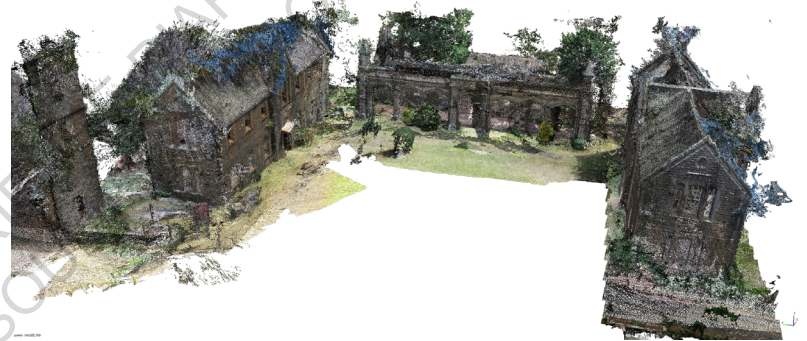
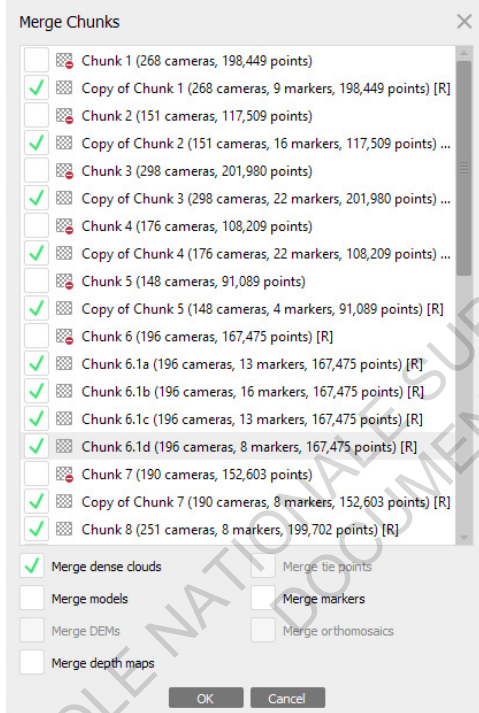
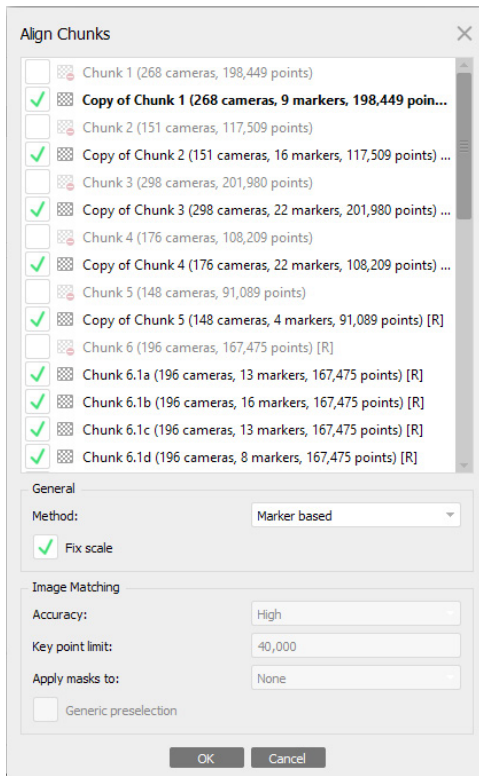


Markers	X (m)	Y (m)	Z (m)	Acc	Error (m)
point 1	0.000000	0.000000	0.000000	0.0...	0.038360
point 17	0.575000	0.000000	3.615000	0.0...	0.049674
point 16	3.135000	0.000000	2.420000	0.0...	0.021280
point 18	3.135000	0.000000	3.615000	0.0...	0.047351
point 2	6.775000	0.000000	0.000000	0.0...	0.081595
point 3	6.775000	0.000000	3.000000	0.0...	0.079246
point 4	7.525000	-0.325000	1.485000	0.0...	0.012619
point 36	8.450000	-0.350000	0.230000	0.0...	0.013929
point 37	8.450000	-0.350000	1.910000	0.0...	0.044146
point 38	8.850000	-0.350000	3.475000	0.0...	0.013873
point 39	10.100000	-0.350000	3.475000	0.0...	0.028075
point 40	10.625000	-0.390000	1.945000	0.0...	0.010609
point 41	10.625000	-0.390000	0.265000	0.0...	0.016236
point 5	11.525000	-0.438500	1.555000	0.0...	0.051683
point 27	11.880000	-0.080000	4.500000	0.0...	0.053576
point 6	14.725000	-0.150000	2.325000	0.0...	0.010049
point 7	18.155000	-0.215000	2.375000	0.0...	0.011965
point 47	18.160000	-0.220000	-0.1800...	0.0...	0.020737
point 28	18.400000	-0.185000	4.500000	0.0...	0.051001
point 8	19.400000	0.339000	3.055000	0.0...	0.002513



Cette méthodologie est dupliquée pour tous les morceaux du site et chaque 'chunk' est calculé avec les mêmes étapes (alignement des photos, nuage dense, maillage, texture) et une mise à l'échelle précise avec le nom de mêmes repères dans chacun des chunks.

L'assemblage final est fait avec l'étape d'alignement et fusionner les morceaux avant le dernier calcul.



Le modèle final texturé fait 16 millions de faces. Le chunk est alors dupliqué et réduit en nombre de faces à 500k avec la commande "Decimate Mesh" et une dernière étape de "Build Texture" afin de pouvoir visualiser le modèle 3d sous toutes les plateformes pour éviter des contraintes de stockage, connexion internet et de puissance informatique.

LISTE DE TOUS LES MORCEAUX
AVEC REPÈRES DU MODÈLE FINAL



LISTE DE COORDONNÉES DES REPÈRES DU MODÈLE FINAL

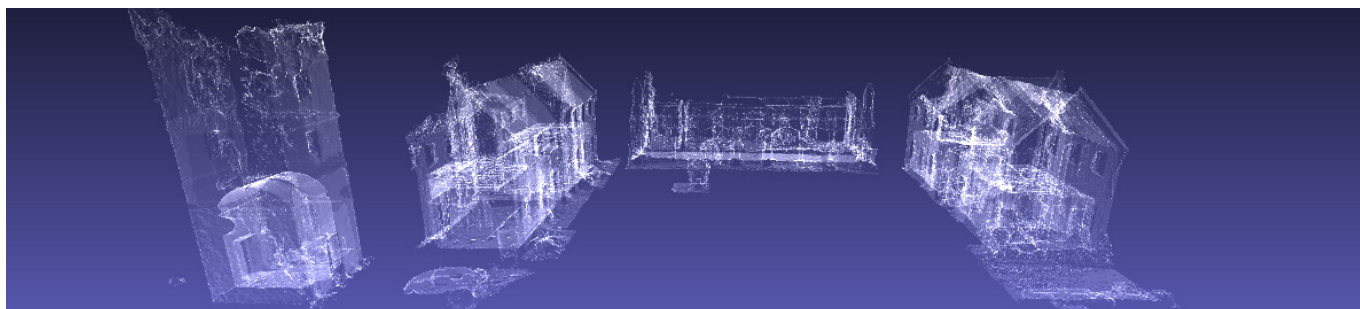
Point 1	0	0	0	Point 38	8.85	-0.35	3.475
Point 2	6.775	0	0	Point 39	10.1	-0.35	3.475
Point 3	6.775	0	3	Point 40	10.625	-0.39	1.945
Point 4	7.525	-0.325	1.485	Point 41	10.625	-0.39	0.265
Point 5	11.525	-0.4385	1.555	Point 42	1	5.475	-0.39
Point 6	14.725	-0.15	2.325	Point 43	8	9	-0.305
Point 7	18.155	-0.215	2.375	Point 44	9.5	9	1.01
Point 8	19.4	0.339	3.055	Point 45	11.5	6.38	1.1
Point 9	19.4	1.15	2.9	Point 46	12.3	5.55	-0.425
Point 10	19.52	3.79	2.815	Point 47	18.16	-0.22	-0.18
Point 11	-0.335	0.575	0.55	Point 48	17.8	5.3	1.77
Point 12	-0.315	1.4	0.685	Point 49	10.9	2.2	-0.37
Point 13	-0.325	4.035	2.65	Point 50	18.565	-4.15	0.42
Point 14	-0.345	4.035	3.65	Point 51	18.565	-4.15	4.02
Point 15	-0.345	1.4	3.65	Point 52	18.058	-14.6	0.645
Point 16	3.135	0	2.42	Point 53	21.9	-14.45	3.57
Point 17	0.575	0	3.615	Point 54	18.5	-16.5	3.35
Point 18	3.135	0	3.615	Point 55	21.82	-19.65	1.1765
Point 19	-6.25	6.9	2.365	Point 56	18.039	-26.8	2.6
Point 20	-5.35	6.9	2.365	Point 57	14	-26.8	2.6
Point 21	-2.035	10.032	0.322	Point 58	16.55	-26.8	0.675
Point 22	-6.25	6.93	0.347	Point 59	19.06	-28.3	0.607
Point 23	-6.05	6.8	5.9	Point 60	12.9	-32.3	2.6
Point 24	-5.365	6.8	5.9	Point 61	12.9	-26.8	2.6
Point 25	-3.75	6.58	7.63	Point 62	12.9	-26.8	3.9
Point 26	-7.515	6.505	10.35	Point 63	12.9	-32.3	3.9
Point 27	11.88	-0.08	4.5	Point 64	10.1	-26.5	2.05
Point 28	18.4	-0.185	4.5	Point 65	7.85	-26.5	2.05
Point 29	19.4	1.15	5.285	Point 66	5.07	-26.8	2.65
Point 30	-3.85	7.4	3.445	Point 67	5.07	-26.8	3.95
Point 31	-7.65	8.15	1.4	Point 68	10.2	-33.75	2.185
Point 32	-7.65	10.15	1.4	Point 69	5.07	-32.3	2.65
Point 33	-7.65	7.8	5.5	Point 70	5.07	-32.3	3.95
Point 34	-7.65	10.15	5.5	Point 71	8.35	-26.47	-0.157
Point 35	-5.3	11.37	0.45	Point 72	26.9	-11.5	3.7
Point 36	8.45	-0.35	0.23	Point 73	26.9	-11.5	1.4
Point 37	8.45	-0.35	1.91	Point 74	26.9	-5	1.75





Finalité du travail

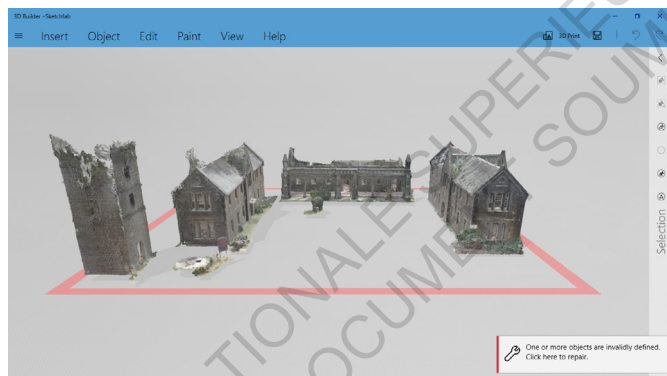




Posture technique

Le modèle final ayant une géométrie très complexe a été simplifié avec l'outil "decimate" sur Metashape pour réduire le nombre de faces à 5M, 1M puis 500k. Il est ensuite exporté au format .obj (.object file) car ce format peut être ouvert sur les logiciels tels que SketchUp et TwinMotion.

Le 3d Builder de Windows est utilisé pour visualiser le modèle final et pour réparer les éventuelles erreurs du modèle.



Le modèle est ensuite repris sur Meshlab (un système open source pour le traitement et l'édition de maillages triangulaires 3D). Il fournit un ensemble d'outils pour éditer, nettoyer, réparer, inspecter, rendre, texturer et convertir des maillages.

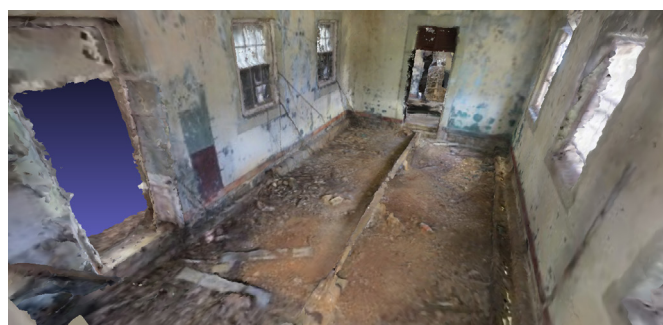
J'ai utilisé la commande "delete selected faces" pour nettoyer le modèle, "remove duplicated faces" afin d'effacer les faces

dupliquées. L'avantage avec Meshlab est que l'on peut décimer les faces en gardant la texture avec la fonction "Filters > Remeshing, Simplification and Reconstruction > Simplification: Quadratic Edge Collapse Decimation (with textures) pour réduire le nombre de faces.

L'intérieur des bâtiments sont nettoyés et retravaillés dans la mesure du possible même si une nouvelle session



photogrammétrique avec une nouvelle série de photos serait meilleure pour recalculer le maillage.





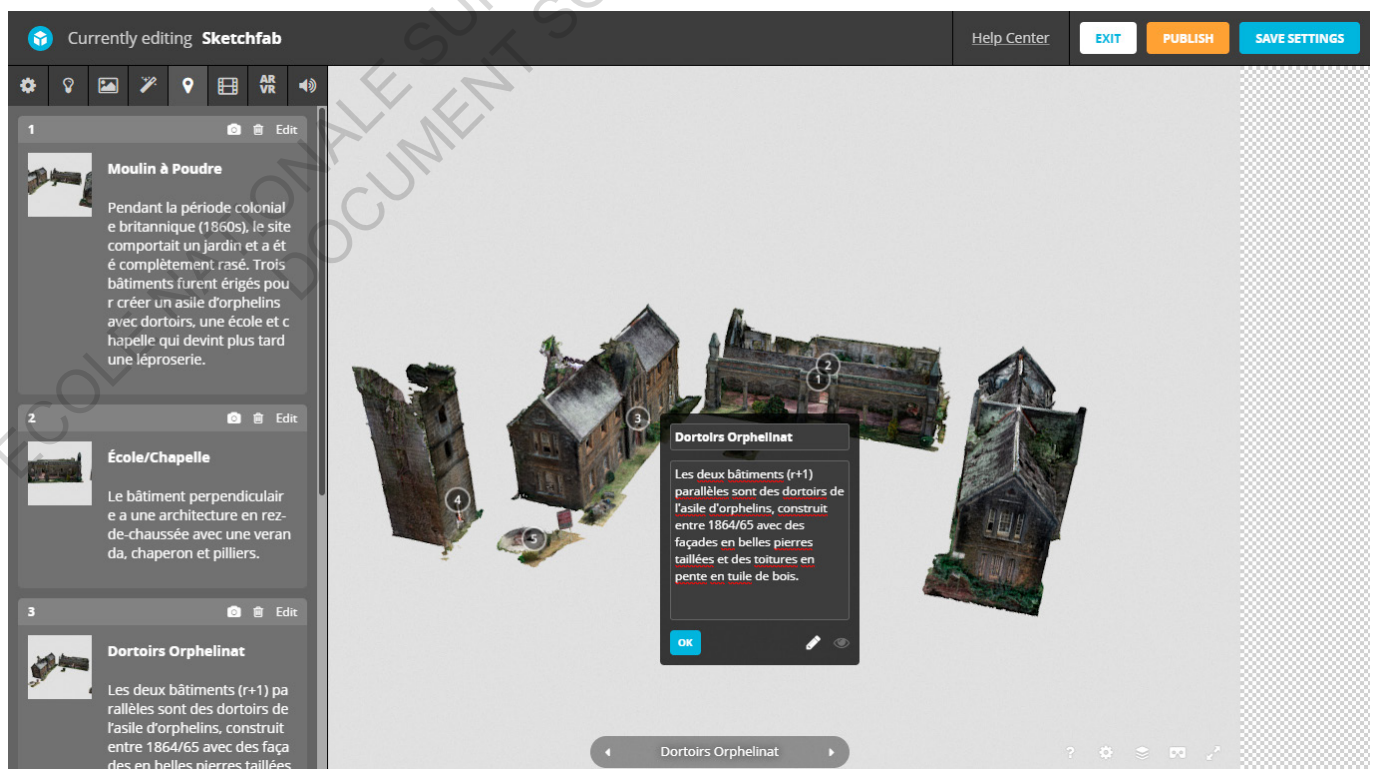
Tour virtuel

Le modèle 3D final a ensuite été chargé sur SketchFab, une plateforme servant à publier, partager, découvrir, acheter et vendre du contenu 3D, VR et AR. Le site fournit une visionneuse basée sur les technologies WebGL et WebXR qui permet aux utilisateurs d'afficher des modèles 3D sur le Web, à visualiser sur n'importe quel navigateur mobile, navigateur de bureau ou casque de réalité virtuelle.

Grâce à SketchFab, le modèle peut être diffusé partout sur des blogs et réseaux sociaux avec le lien ou en intégrant

les lignes de code HTML sur le blog. Sketchfab propose également d'ajouter des étiquettes descriptives sur le modèle, de modifier les paramètres quant à l'aspect visuel de la texture, la luminosité, des effets et filtres.

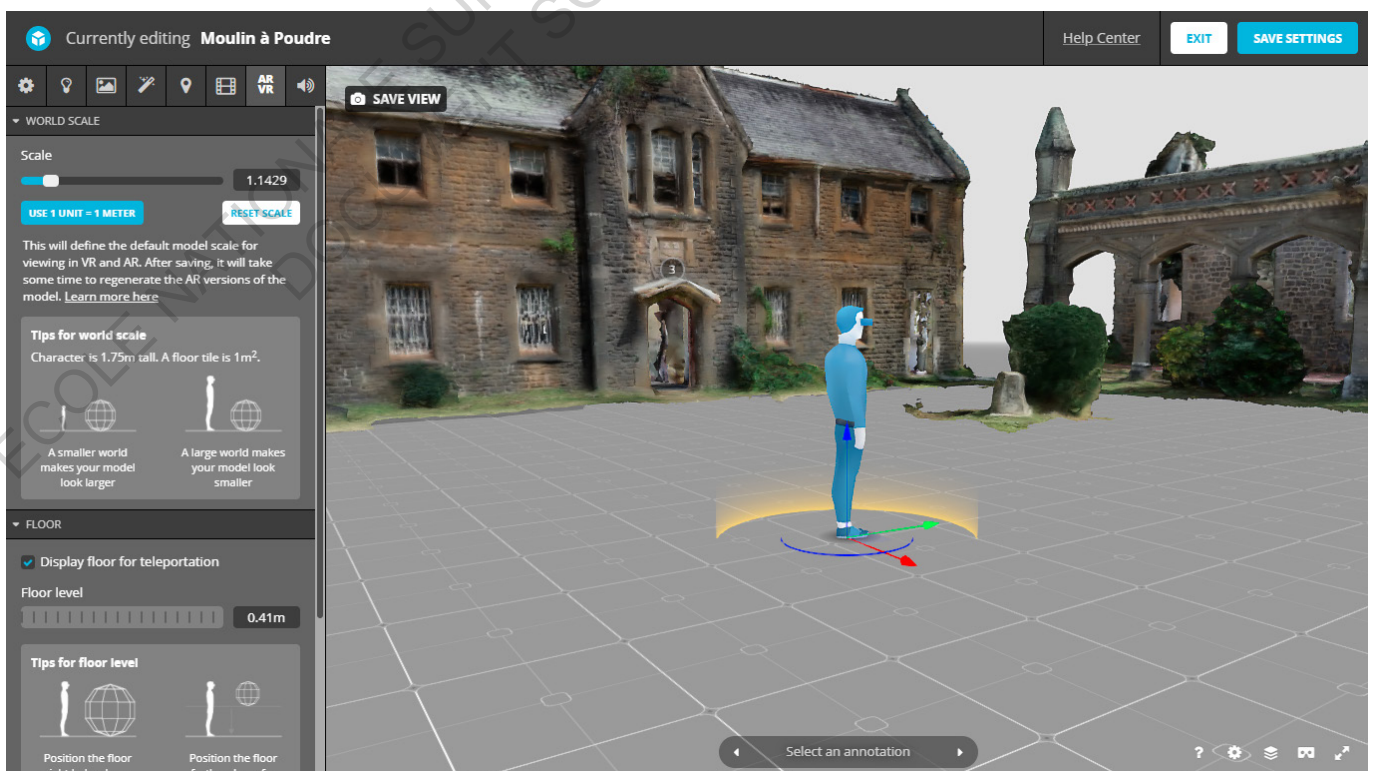
Le visiteur pourra alors orienter le modèle et lire les annotations qui servent à apprendre plus sur l'historique du site.





Immersion VR

Avec Sketchfab, j'ai également pu définir la position du corps humain pour la réalité virtuelle et la réalité augmentée de la maquette 3d. Le modèle 3d peut être visualisé en VR avec soit un téléphone mobile avec casque (cardboard/Daydream View/Lenovo Mirage Solo) ou bien avec un PC vr-ready et casque Oculus / SteamVR (HTC Vive, Valve Index, etc), Windows Mixed Reality, OpenXR compatible HMDs.



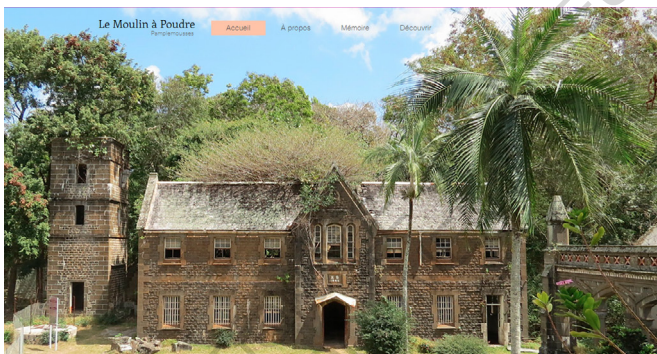


Diffusion du résultat

Afin de présenter le résultat de ce travail, j'ai décidé de créer un site web avec Wix - une plateforme en ligne qui permet de créer des sites web en HTML5. Cette proposition vient en alignement avec le discours de numérisation et diffusion du patrimoine en digital. Le souhait d'utiliser un site web permet de partager les connaissances, les données et l'histoire autour du site Moulin à poudre de manière accessible et ludique.

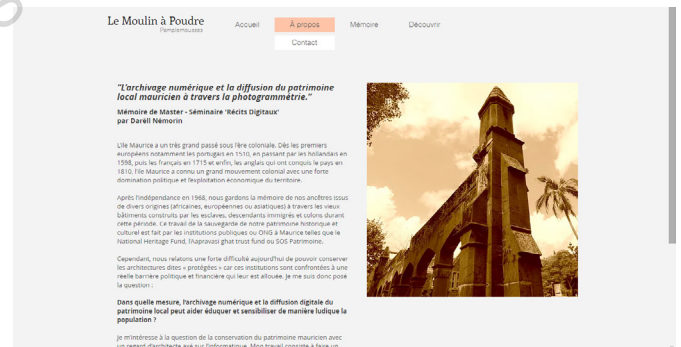
du mémoire papier, avec les références des sources sous chaque image et des articles cités dans la partie 'médias' et une page contact.

Le lien vers le site web est communiqué sur les réseaux sociaux (Facebook, Instagram, LinkedIn etc) et envoyé à la presse pour diffuser le travail. Ce qui est intéressant avec cette démarche est l'échange d'informations avec les visiteurs,



<https://lemoulinapoudre.wixsite.com/mysite>

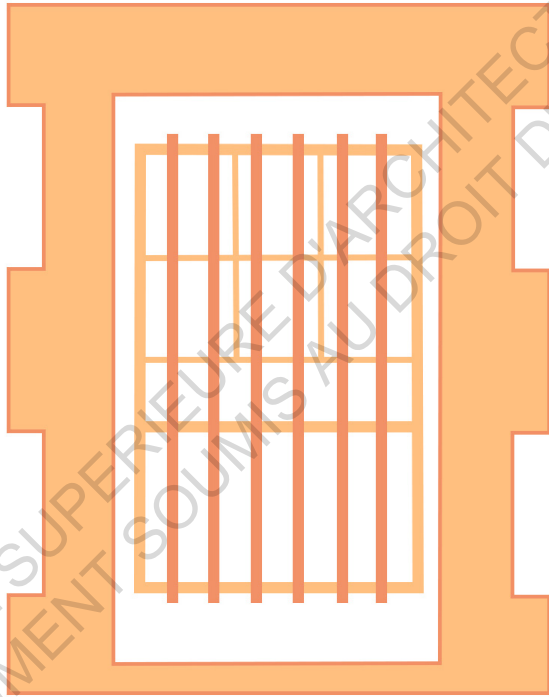
Le site web propose une introduction au sujet et la problématique du mémoire, le développement photogrammétrique, une partie historique et technique autour du site avec des textes, cartes, photos, une ligne chronologique, les collaborateurs et un tour virtuel 3D pour se balader dans la maquette numérique. Les pages reprennent plus succinctement les textes



la mise à jour facile et instantanée lorsque les recherches sont amendées ou pour ajouter de nouvelles données.

La présentation du projet collaboratif lors de la soutenance du mémoire se fait auprès de la NHF et d'autres acteurs du domaine, avec une immersion dans la maquette 3d et le lancement du site web.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR



Conclusion

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR



Évaluation

Les deux semestres de réalisation de ce mémoire ont été très enrichissants pour moi en tant qu'étudiant en architecture. Le travail était assez complexe, mais fut une grande réussite au final car j'ai atteint mon but d'acquérir de nouvelles connaissances en expérimentant des outils informatiques et l'apprentissage dans le patrimoine local.

J'ai beaucoup aimé travailler dans ce séminaire "Récits Digitaux" car le suivi du mémoire était bénéfique pour l'avancement et aussi avec la NHF puisque le personnel de l'institution était très chaleureux et dynamique. Avant de débiter ce mémoire, j'avais une petite appréhension car même si j'avais déjà un peu d'expérience dans la photogrammétrie, être confronté à la réalité et de passer du stade très conceptuel scolaire et fictif à une transition réelle et factuelle était un défi. J'ai également ressenti un peu de pression puisque le temps était limité et le site choisi avait une envergure assez conséquente à photographier.

Au final, je suis très fier d'avoir pu réaliser le modèle 3d et son développement photogrammétrique avec succès. Après ce mémoire, je pense que le travail pourra encore évoluer et pousser davantage sur la diffusion et la précision du modèle 3d pour apprendre et découvrir plus les techniques d'archivage dans le patrimoine local.

Critique et opinions

Après avoir fait ce mémoire, j'ai pu me rendre compte de certaines qualités et défauts dans la réalisation de la photogrammétrie et également les avantages et difficultés de travailler dans le domaine de la conservation du patrimoine. Au début, j'avais du mal à trouver un site parce que le choix dépendait beaucoup du temps de réponse concernant les autorisations - cela étant parce que les bâtiments présélectionnés avaient une grande taille et donc possèdent des charges légales considérables.

Les autres difficultés étaient plutôt au niveau ressources matérielles car je n'avais pas tous les outils nécessaires. J'étais limité à certains équipements comme l'appareil photo mais une perche aurait été opportun, les batteries du drone n'avaient pas beaucoup d'autonomie et mon ordinateur portable avait une puissance trop faible pour effectuer certains calculs.

Aussi, étant en France, la distance était une grande limite car le manque de relevés physiques précis pour la mise à l'échelle était contraignant. J'aurai également pu refaire une session photographique adaptée à mes besoins si je pouvais repartir régulièrement sur le site.



Apports essentiels

J'ai compris en faisant la photogrammétrie que le traitement d'images est essentiel pour le bon fonctionnement des étapes de construction de nuages denses. En effet, j'ai découvert après le développement que les photos avec les mêmes caractéristiques en terme de focal et luminosité produisaient un meilleur résultat. Quelques fois, la faible contribution des photos vagues ou zoomés peut avoir une influence négative sur les résultats d'alignement.

De ce fait, j'ai dû traiter les lumières de certaines images, notamment du toit d'un bâtiment qui réfléchissait beaucoup la lumière du soleil et il fallait réduire les pixels blancs des photos, ou au contraire améliorer la couleur quand il n'y avait pas de ciel bleu ou de soleil constamment.

Après les 2 semestres de réalisation de ce mémoire, mon niveau dans le numérique s'est beaucoup amélioré. Par ailleurs, le vocabulaire technique que j'ai acquis m'est très profitable dans le cadre de mes études et de mon avenir professionnel en tant qu'architecte. J'ai pu mettre en avant d'autres compétences auxquelles je n'avais pas encore eu l'opportunité comme l'immersion dans la réalité virtuelle, la gestion de données, la communication et la diffusion autour d'un travail effectué.

Suggestions

Après avoir évalué les qualités et défauts du résultat final, j'ai pu exprimer des propositions d'amélioration avec les avis et conseils de mon directeur de mémoire, les indications et conseils dans les forums en ligne et les avis d'experts dans le domaine.

Tout d'abord, si les conditions d'éclairage ont considérablement changé pendant la session de capture, il est recommandé d'utiliser l'option «calibrer les couleurs» du menu Outils avant la procédure de création de texture. L'option peut aider à uniformiser la luminosité et la balance des blancs des images sur l'ensemble de données.

L'utilisation de masques - les zones masquées peuvent être exclues lors de la détection des points caractéristiques. Ainsi, les objets sur les parties masquées des photos ne sont pas pris en compte lors de l'estimation des positions des caméras. Ceci est important dans les configurations, où l'objet d'intérêt n'est pas statique par rapport à la scène, comme lors de l'utilisation d'une table tournante pour capturer les photos. Le masquage peut également être utile lorsque l'objet d'intérêt n'occupe qu'une petite partie de la photo.

Perspectives

Ce mémoire m'offre beaucoup de possibilités pour travailler dans le milieu professionnel dans le domaine de l'architecture, du patrimoine et de la recherche. Cela m'ouvre des portes pour travailler avec ceux qui gèrent et préservent des sites patrimoniaux protégés en leur fournissant des dessins techniques et des cartes détaillées pour aider dans les travaux critiques de conservation.

Je peux aussi participer à capturer des enregistrements complets de sites qui peuvent être utilisés dans les efforts de reconstruction suite à des dommages ou des pertes catastrophiques. Et enfin, contribuer au partage de données de manière diffuse, y compris des expériences vraiment immersives qui transmettent la puissance de ces lieux.

Grâce à ce mémoire et une mention recherche, cela peut m'amener à faire un doctorat pour poursuivre mes expériences et travailler dans la fabrication d'outils pour l'archivage du patrimoine.

Ce travail pourrait continuer et se faire en partenariat avec des entreprises spécialisées, qui ont des technologies de capture de la réalité de pointe pour créer des modèles de surface 3D holistiques et précis de ces sites.

Bilan Global

Ce mémoire m'a fait comprendre que nous avons une grande responsabilité de protéger le patrimoine architectural et culturel de l'Île Maurice car ces sites ont une très grande valeur historique et identitaire dans le monde. Nous devons nous engager davantage dans l'archivage, conservation et la protection du patrimoine en vivant avec notre temps - utiliser les avancées technologiques pour partager la culture de manière ludique et pédagogique. Il faut faire usage d'internet - site web, réseaux sociaux, réalité virtuelle, réalité augmentée, vidéo 360° et la modélisation 3d pour communiquer sur l'Histoire auprès des jeunes, créer de l'intérêt et de l'interaction.

La diffusion numérique est d'autant plus importante aujourd'hui dans la période dans laquelle nous vivons. Avec la situation actuelle de pandémie Covid, nous n'avons plus accès aux centres culturels. Donc, la valorisation du patrimoine et de la culture au sens large, prend de davantage de sens parce que c'est l'art et la culture qui viennent à nous. Ramener la #KiltirKotNou et rendre accessible des ressources culturelles où le visiteur peut regarder, visiter, lire, écouter, jouer et participer autour de ceux-ci à distance. Le musée vient à nous.

Participer à la mission d'enregistrer, archiver et partager numériquement le patrimoine culturel parmi plus significatifs à Maurice et faire en sorte que ces lieux continuent d'inspirer émerveillement et curiosité pour les décennies à venir est une très belle mission réussie et accomplie.

Bibliographie

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Bibliographie



- A CRSI (Centre for Research on Slavery and Indenture). *The Moulin à Poudre Cultural Landscape History and Archaeology*. Mauritius Research Council. Mauritius. 2018. 225 pages.
- B Lanzi Lorenzo. *La photogrammétrie numérique combinée avec la modélisation 3D : applications aux sciences forensiques*. Thèse de Doctorat. Série criminalistique XXXVIII. Lausanne: Université de Lausanne, Faculté de Droit et des Sciences Criminelles, Ecole des Sciences Criminelles, Institut de Police Scientifique, 2009, 254 p. Disponible sur https://serval.unil.ch/resource/serval:BIB_7CA99759BFE5.P001/REF.pdf
- C Chatelon Vincent. *Définition d'une solution de photogrammétrie par drone aérien : cahier des charges et protocoles de validation*. Mémoire. Conservatoire National des Arts et Métiers, École Supérieure des Géomètres et Topographes. 2014, 82 p. Sciences de l'ingénieur [physics] (dumas-01334037)
- D Saleri Renato et Lequay Hervé. *Relevé photogrammétrique d'objets patrimoniaux: un protocole expérimental pour l'optimisation du placement de caméras pour le relevé aérien*. In Situ [En ligne], 39 | 2019, 19 p. URL : <http://journals.openedition.org/insitu/21409> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/insitu.21409>
- E Ory-Lavollee Bruno. *La diffusion numérique du patrimoine, dimension de la politique culturelle*. Rapport à Mme la Ministre de la Culture et de la Communication. [En ligne] 2002, 143 p. URL: <https://www.culture.gouv.fr/Espace-documentation/Missions/La-diffusion-numerique-du-patrimoine-dimension-de-la-politique-culturelle-ORY-LAVOLLEE-Bruno>
- F Seelen Amandine. *La photogrammétrie par smartphone au service du récolement de réseau en fouille ouverte*. Mémoire. Conservatoire National des Arts et Métiers, École Supérieure des Géomètres et Topographes. 2018, 66 p. Sciences de l'ingénieur [physics] (dumas-02094261) <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02094261>
- G Vandebroeck Marin. *Photogrammétrie par drone d'un petit glacier de montagne - Mise au point et application d'un protocole assurant la reproductibilité de levés répétés à intervalles saisonniers et interannuels*. Mémoire. Université de Liège. 2018, 95 p. [Sciences géographiques] <http://hdl.handle.net/2268.2/5586>
- H Ehtemami Anahid, Park Sang Bum, Bernadin Shonda, Lescop Laurent, Chin Andrew. *Review of Visualizing Historical Architectural Knowledge through Virtual Reality*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Virtual Reality. Paper Contribution. 2020, 6 p.

- I Samaan Mariam. *La photogrammétrie rapprochée au service de l'archéologie préventive*. Géographie. Université Paris-Est. 2016, 138 p. Français. NNT : 2016PESC1068. tel-01547923.
- J Dhestaratri Murtiyoso Arnadi. *Geospatial recording and point cloud classification of heritage buildings*. Modeling and Simulation. Université de Strasbourg, 2020. English. NNT : 2020STRAD007. tel-02953668f

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Sitographie



1	https://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_de_Maurice	8
2	http://www.nhf.govmu.org/	14
3	http://mandelacentre.govmu.org/English/Pages/default.aspx	15
4	https://fr.wikipedia.org/wiki/Photogrammétrie	16
5	https://archive.curbed.com/2019/5/3/18528077/castle-temple-restoration-historic-preservation-notre-dame	16
6	https://www.bbc.com/news/technology-47963835	16
7	https://www.cyark.org/	16
8	https://whc.unesco.org/fr/criteres/	17
9	http://www.patrimoineenperil.mu/inventaire/	18
10	http://www.nhf.govmu.org/English/National%20Heritage/Pages/default.aspx	18
11	https://www.lexpress.mu/article/361011/musee-lesclavage-time-action	18
12	https://www.lexpress.mu/article/367224/musee-lesclavage-passer-vitesse-superieure	18
13	https://www.lexpress.mu/photos/300505/moulin-poudre-lhistoire-fait-parler-canons	18
14	https://www.patrimoineenperil.mu/inventaire/item.php?itemId=430	18
15	https://www.lexpress.mu/article/ecole-de-grnw-la-fin-dun-batiment-historique	18
16	https://www.zinfos-moris.com/Moulin-a-poudre-un-patrimoine-historique-a-l-abandon_a6077.html	19
17	http://www.govmu.org/English/News/Pages/Seminar-examines-archeological-findings-on-Moulin-à-Poudre-Cultural-Landscape.aspx	21
18	https://fr.wikipedia.org/wiki/Photogrammétrie_numérique	25
19	https://www.geodetic.com/basics-of-photogrammetry/	25
20	https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/photogrammetry	25

21	https://thevirtualassist.net/3d-reconstruction-camera-tracking-photogrammetry-alicevision/	25
22	https://fr.wikipedia.org/wiki/Reconstruction_3D_à_partir_d'images	26
23	https://www.geodetic.com/basics-of-photogrammetry/	26
24	http://culturalheritageimaging.org/Technologies/Photogrammetry/	27
25	https://www.agisoft.com/downloads/user-manuals/	30
26	http://culturalheritageimaging.org/Technologies/Photogrammetry/	31
27	http://www.keris-studio.fr/	34
28	https://help.sketchfab.com/hc/en-us/articles/205852789-MeshLab-Decimating-a-model	42
29	https://sketchfab.com/features	43
30	https://help.sketchfab.com/hc/en-us/articles/206347706-Wix	45
31	https://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=9381.0	49
32	https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_6_en.pdf	49
33	https://www.cyark.org/ourMission/	50
34	https://bipat.nantes.archi.fr/construire-son-memoire/	52

Table figures et illustrations

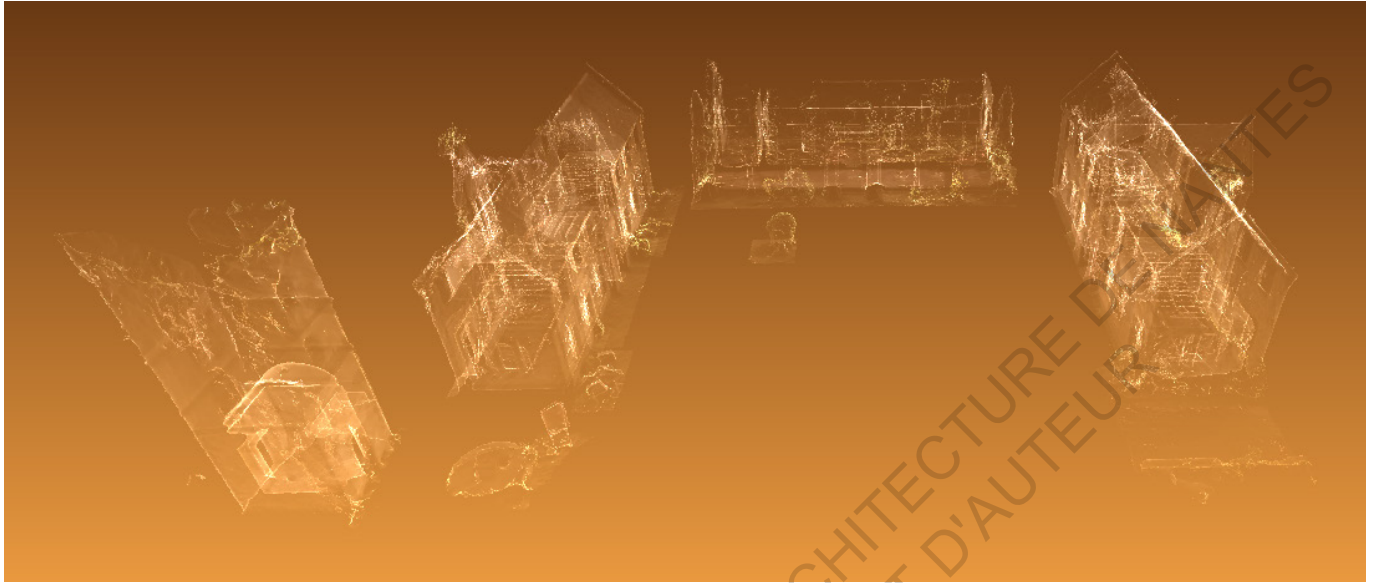


1	"La Citadelle" - le 21/04/2020 https://islandhomes.mu/la-citadelle	18
2	"Frederick Hendrik Museum" https://www.discovermauritius.app/page-map/i/20193483/frederick-hendrik-museum	18
3	"Trianon Sugar Estate" https://mauritianarchaeology.sites.stanford.edu/trianon-sugar-estate	18
4	"L'Hôpital Militaire" https://www.patrimoineenperil.mu/inventaire/item.php?itemId=145	18
5	"Moulin à Poudre" - Photos de Yann et Nathalie von Arnim, Tugdual de Langlais https://www.soc-histoire-maurice.org/promenademoulinpoudre.html	18
6	"École Beugeard" - Le Mauricien 28/11/2013 https://www.lemauricien.com/actualites/societe/ecole-beugeard-la-juge-devat-ordonne-l-arret-immediat-des-travaux/84163/	18
7	"Outline Map of Mauritius" https://www.worldatlas.com/maps/mauritius	19
8	"2017 Plan of site" Surveyed by H. Teckmun, Plan commissioned by CRSI, UoM (March 2017) Page 114 fig 5:14 The Moulin à Poudre Cultural Landscape History and Archaeology	19
9	"Moulin à Poudre : l'histoire fait parler les canons" par Aline Groëme-Harmon & Beekash Roopun L'Express 18/02/2017 https://www.lexpress.mu/photos/300505/moulin-poudre-lhistoire-fait-parler-canons	20
10	"The Moulin à Poudre Cultural Landscape History and Archaeology" cover design: Doorga Ujodha, UoM Press & cover painting - Slaves at the Pamplemousses Moulin à Poudre by artist: Mohammad Aftaz Kaderbaccus	21
11	"1785 - Plan de la Manufacture Royale des Poudres de Guerres" Page 133 fig 5:6 The Moulin à Poudre Cultural Landscape History and Archaeology	22
12	"A close up of the southern part of the site with verger and sècherie areas, extract from 1785 map" Page 157 fig 6:6 The Moulin à Poudre Cultural Landscape History and Archaeology	22

- 13 "A superimposition of the 1785 and 2017 plans of whole site" 23
Page 145 fig 5:15 | The Moulin à Poudre Cultural Landscape History and Archaeology
- 14 "The Tower" 23
Page 156 fig 6:4 | The Moulin à Poudre Cultural Landscape History and Archaeology
- 15 Drone Image by Nipon Medhi 23
- 16 "AliceVision: Advanced 3D Reconstruction, Photomodeling and Camera Tracking
through Photogrammetry" - 08/10/2018 25
[https://thevirtualassist.net/3d-reconstruction-camera-tracking-photogrammetry-
alicevision/](https://thevirtualassist.net/3d-reconstruction-camera-tracking-photogrammetry-alicevision/)
- 17 "Photogrammetry: How to Capture Photos" 26
<http://culturalheritageimaging.org/Technologies/Photogrammetry/>
- 18 "Photogrammetry: How to Determine Where to Take the Photographs" 26
<http://culturalheritageimaging.org/Technologies/Photogrammetry/>
- 19 "Photogrammetry: How to Determine Where to Take the Photographs" 26
<http://culturalheritageimaging.org/Technologies/Photogrammetry/>
- 20 "DJI Phantom 4 Pro" 27
<https://www.dji.com/fr/phantom-4-pro>
- 21 "Canon PowerShot SX40HS" 27
[https://www.canon.fr/support/consumer_products/products/cameras/digital_
compact/powershot_sx_series/powershot_sx40_hs.html?type=software](https://www.canon.fr/support/consumer_products/products/cameras/digital_compact/powershot_sx_series/powershot_sx40_hs.html?type=software)
- 22 "Measuring Tape" 29
<https://www.oukelongtape.com/3m-measuring-tape/56719881.html>
- 23 Logo "Agisoft Metashape" 30
<https://www.agisoft.com/>
- 24 "Figure 4- uploaded by Sjoerd van Riel Structure from Motion (SfM) photogrammetric
principle. Source: Theia-sfm.org (2016) 31
[https://www.researchgate.net/figure/Structure-from-Motion-SfM-photogrammetric-
principle-Source-Theia-sfmorg-2016_fig3_303824023](https://www.researchgate.net/figure/Structure-from-Motion-SfM-photogrammetric-principle-Source-Theia-sfmorg-2016_fig3_303824023)
- Credits to all other images, drawings, illustrations & screenshots to Darëll Némorin

Annexes

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR



Mémoire de Master

"L'archivage numérique et la diffusion du patrimoine local mauricien à travers la photogrammétrie."

est un mémoire du séminaire "Récits Digitaux" qui m'a permis de découvrir la richesse et la complexité du patrimoine architectural de l'île Maurice. Entre visites de site, relevé photographique, modélisation 3d, développement photogrammétrique, conception de site web parmi d'autres, ce mémoire est une synthèse d'un apprentissage continu...



68A, Charles Regnaud St,
Eau-Coulée, Curepipe



(+230) 59838771



nemorindarell@gmail.com