



HAL
open science

Optimisation de la chaîne de traitement photogrammétrique dans des espaces étroits et peu éclairés

Nicolas Maillard

► **To cite this version:**

Nicolas Maillard. Optimisation de la chaîne de traitement photogrammétrique dans des espaces étroits et peu éclairés. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2024. dumas-04806382

HAL Id: dumas-04806382

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04806382v1>

Submitted on 27 Nov 2024

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.



CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
ECOLE SUPERIEURE D'INGENIEURS GEOMETRES ET TOPOGRAPHES

MEMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : Géomètre et Topographe

par

Nicolas MAILLARD

Optimisation de la chaîne de traitement photogrammétrique dans des espaces
étroits et peu éclairés

Soutenu le 4 septembre 2024

JURY

Monsieur Ousmane DIOUF	Président du jury
Monsieur Laurent BERGEROT	Maître de stage
Monsieur Florent COMTE	Maître de stage
Monsieur Anthony PAMART	Maître de stage
Monsieur Pierre KERVELLA	Enseignant référent

Remerciements

Je voudrais remercier le laboratoire du MAP (Modèles et simulations pour l'Architecture et le Patrimoine) pour m'avoir ouvert ses portes et offert un accueil et un accompagnement idéal. Je remercie particulièrement mes maîtres de stage Laurent Bergerot, Florent Comte, ainsi qu'Anthony Pamart pour m'avoir encadré et aiguillé dans mes démarches de recherches et d'expérimentations.



Figure 1 : L'équipe d'encadrant. De gauche à droite : N.Maillard, F.Comte, L.Bergerot, et A.Pamart

Je remercie le personnel de la Citadelle de Marseille pour m'avoir accueilli et guidé dans les dédales de leur souterrain.

Aussi, je tiens à remercier mon professeur référent, Pierre Kervella, pour sa disponibilité et sa relecture.

Enfin, un grand merci à mon entourage, mon grand-père notamment pour son hospitalité ses 6 derniers mois, ma famille et amis, de m'avoir soutenu dans l'élaboration de mon mémoire.

Je vous souhaite une lecture enrichissante et agréable de mon mémoire. J'espère que vous y trouverez autant de plaisir à le parcourir que j'en ai eu à l'écrire.

Liste des abréviations

3D : 3 Dimensions

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

DNG : Digital Negative

FLOSS : Free and open-source software

Glossaire

Chaîne Opératoire : Une série d'étapes qui doivent être planifiées, lancées, suivies et évaluées une fois terminées.

Distorsion radiale¹ : Cette distorsion a tendance à arrondir les bords de l'image. Elle est due à la distance entre le diaphragme et le centre optique d'un appareil photographique. Plus la distance augmente, plus la distorsion radiale est forte.

Image Hyper Hémisphérique : Type d'image capable de capter les rayons lumineux provenant d'angles supérieurs à 180°.

Image équirectangulaire : Type d'image issue de l'assemblage de deux images hyper hémisphériques prises à partir d'un seul point. La projection équirectangulaire projette les coordonnées sphériques (longitude et latitude) sur une grille rectangulaire plate de pixels.

Image cubique : Type d'image issue de la projection d'une portion de l'image équirectangulaire en une perspective cubique.

Lumen² : Unité du flux lumineux émis dans un angle solide de 1 stéradian (sr) par une source lumineuse isotrope (ponctuelle uniforme) située au sommet de l'angle solide et dont l'intensité lumineuse vaut 1 candela.

Points homologues ou points de liaison³ : Points dans les images qui correspondent à un même détail sur l'objet.

Structure From Motion⁴ : Estimation des poses des caméras, calibrées ou non calibrées, et la reconstruction d'une scène en 3D à partir des images acquises dans un ordre quelconque.

Unité Mixte de Recherche⁵ : Laboratoire de recherche simple ou multi-sites ayant au moins deux tutelles partenaires avec des organismes comme des laboratoires de recherches universitaires et un organisme public civil de recherche français (CNRS, INRAE, INSERM).

Unité Propre de Recherche⁶ : Laboratoire de recherche dont la seule tutelle est le CNRS.

¹ Correction de la distorsion radiale : une approche non-linéaire, [en ligne]. Disponible sur : <https://t.ly/7A3uT>, consulté le 24/06/2024.

² Définition du lumen, [en ligne]. Disponible sur : <https://t.ly/Pqr24>, consulté le 24/04/2024.

³ Cours IG3 201-2022 de Photogrammétrie, SIMONETTO E, consulté le 24/04/2024.

⁴ Cours IG3 201-2022 de Photogrammétrie, SIMONETTO E, consulté le 24/04/2024.

⁵ Définition d'une UMR, [en ligne]. Disponible sur : <https://t.ly/Nt0Op>, consulté le 24/04/2024.

⁶ Définition d'une UPR, [en ligne]. Disponible sur : <https://t.ly/mkEf5>, consulté le 24/04/2024.

Table des matières

Remerciements.....	2
Liste des abréviations	3
Glossaire	3
Table des matières	4
Introduction	6
I Contexte du projet et État de l’Art	8
I.1 LE LABORATOIRE DE MODELES ET SIMULATIONS POUR L’ARCHITECTURE ET LE PATRIMOINE : LE MAP, LABORATOIRE CNRS.....	8
I.2 COMMENT PHOTOGRAPHIER UN ESPACE ETROIT	9
I.3 COMMENT PHOTOGRAPHIER UN ESPACE SOMBRE.....	11
I.4 TRAITER LES DONNEES AVEC DES FLOSS	12
I.4.1 MICMAC : LOGICIEL DE PHOTOGRAMMETRIE DE L’IGN.....	13
I.4.1.1 PRESENTATION	13
I.4.1.2 FONCTIONNEMENT	13
I.4.2 ALICEVISION MESHROOM : LOGICIEL DE PHOTOGRAMMETRIE POUR LES EFFETS VISUELS	15
I.4.2.1 PRESENTATION	15
I.4.2.2 FONCTIONNEMENT	15
II Définition du protocole d’acquisition et du traitement photogrammétrique	16
II.1 CHOIX DU MATERIEL	16
II.1.1 CHOIX DE L’APPAREIL PHOTOGRAPHIQUE	16
II.1.2 CHOIX DE L’ECLAIRAGE	19
II.2 PROPOSITION D’UNE GEOMETRIE D’ACQUISITION ET CONSTRUCTION DU RIG.....	19
II.2.1 ASSEMBLAGE DU DISPOSITIF	20
II.2.2 SCHEMA D’ACQUISITION	21
II.3 CONSTRUCTION D’UN TUNNEL COMME ZONE DE TEST.....	21
II.4 TRAITEMENT PHOTOGRAMMETRIQUE.....	22
II.4.1 CHOIX DES DONNEES D’ENTREE	22
II.4.2 CHOIX DU LOGICIEL DE TRAITEMENT	25
II.4.2.1 TEST DE TRAITEMENT AVEC MICMAC	25
II.4.2.2 TEST DE TRAITEMENT AVEC MESHROOM.....	25
II.5 CONCLUSION SUR LES CHOIX REALISES.....	27
III Relevé des souterrains de la Citadelle de Marseille	28
III.1 MATERIEL UTILISE	29
III.2 PROTOCOLE MIS EN PLACE	29
III.2.1 ACQUISITION DES DONNEES.....	30
III.2.1.1 ACQUISITION DE DIMENSIONNEMENT	30
III.2.1.2 ACQUISITION PHOTOGRAMMETRIQUE	30
III.3 TRAITEMENT DES DONNEES	31
III.3.1 TRAITEMENT DES DONNEES DE DIMENSIONNEMENT	31
III.3.2 TRAITEMENT DES DONNEES PHOTOGRAMMETRIQUES	32
III.3.2.1 LE TRAITEMENT PHOTOGRAMMETRIQUE DES CELLULES	32
III.3.2.2 LE TRAITEMENT PHOTOGRAMMETRIQUE DES TUNNELS	34

III.4	COMPARATIF GEOMETRIQUE DES DEUX TECHNIQUES D'ACQUISITION LASER ET PHOTOGRAPHIQUE	35
III.4.1	CAS DES CELLULES	35
III.4.2	CAS DES TUNNELS	37
III.4.3	CONCLUSION	37
IV	Diffusion des données	38
IV.1	OBJECTIFS	38
IV.2	OUTILS UTILISES.....	38
IV.3	REALISATION.....	39
	Conclusion	40
	Bibliographie.....	41
	Table des annexes	43
	Annexe 1 Codes mentionnés dans le texte	44
	Annexe 2 Protocole pour la prise de vue dans des pièces de 4m².....	45
	Annexe 3 Protocole pour la prise de vue dans des pièces de 26m².....	46
	Liste des figures	47
	Liste des tableaux	48

Introduction

La photogrammétrie est une technique de mesure qui consiste à déterminer les propriétés géométriques d'une scène à partir d'une collection de points de vue coordonnés et complémentaires. Elle a impacté durablement le travail des relevés scientifiques en SHS (Sciences Humaines et Sociales) depuis la "révolution numérique". Elle permet aujourd'hui de restituer la surface d'un sujet (mobilier/immobilier) au sein d'un espace spatial 3D interactif. Grâce à des représentations discrètes avec (maillages) ou sans (nuages de points) connexion polygonale continue. Ces représentations métriques contribuent à la documentation et à l'archivage numérique de l'objet dans le temps et aident à la diffusion et à l'analyse en détails par des spécialistes du sujet.

Cette technique est cependant contrainte par deux aspects. Le premier est un problème d'espace, dans un environnement restreint par l'étroitesse de certaines pièces. Le deuxième point est l'éclairage de l'objet. Elle permet d'une part, d'aider à la restitution géométrique lors du processus photogrammétrique et d'autre part, d'avoir une fidèle reconstitution des couleurs de la scène photographiée.

Des cellules de prison, des couloirs de châteaux étroits, des escaliers en colimaçon ainsi que des souterrains sont des espaces fortement problématiques. Une fois modélisés, cela permettrait d'une part de mieux les étudier et d'autre part de les exposer au public sans implanter d'installation de sécurité sur le site. Cela profiterait ainsi à toutes personnes ne pouvant se rendre sur les lieux comme les Personnes à Mobilité Réduite. C'est dans cette démarche que s'inscrit mon Travail de Fin d'Études (TFE) portant sur l'optimisation de la chaîne de traitement des données issus des relevés photogrammétriques.

Le terrain d'essai concret du dispositif se situe à Marseille, sur la rive Sud du Vieux-Port : Le Fort Saint Nicolas. Édifié en 1664 par le chevalier de Clerville, - sur ordre de Louis XIV, - afin de surveiller la ville et de la défendre en cas d'attaque par la mer, il fut classé « Monument Historique » en 1969. Enfin, depuis 2003, l'association ACTA VISTA® forme des personnes pour restaurer les remparts et les différentes parties intérieures du fort. En 2021, l'association « La Citadelle de Marseille » porte un projet s'étalant sur 40 ans avec comme mission la restauration et l'ouverture au public de l'entièreté du bâtiment, afin d'en faire un tiers-lieu patrimonial (concerts, expositions, etc.) Pour la première fois, en 2024, la Citadelle ouvre ses portes au public dans un cadre d'accès limité aux jardins. Une ouverture complète est à prévoir pour l'horizon 2030.

Depuis plusieurs années, le MAP à l'habitude d'employer des solutions photogrammétriques dans des espaces propices à la photogrammétrie traditionnelle, comme le fort Saint Jean à Marseille ou bien dans la cathédrale Notre-Dame de Paris. Aujourd'hui, dans une continuité de conservation et valorisation du patrimoine, vient la question de la modélisation de la nouvelle charpente de Notre-Dame de Paris. En amont de cette mission, il convient alors de préparer un protocole photogrammétrique. Celui-ci permettra d'évoluer dans un espace sombre et exigü, afin d'obtenir la donnée nécessaire à sa numérisation complète. Enfin, grâce à une chaîne de traitement utilisant des logiciels FLOSS, la scène pourra être restituée en 3D et visualisable à travers un casque de Réalité Virtuelle.

Ce travail se découpe donc en quatre étapes. Dans un premier temps, nous exposerons le contexte dans lequel s'inscrit cette démarche et aborderons les avancées faites jusqu'à maintenant dans le domaine de la photogrammétrie, spécialement dans des espaces sombres et exigü.

Dans la seconde partie, nous proposerons un protocole d'acquisition et de traitement photogrammétrique. L'objectif est de mettre en place des solutions permettant de réitérer le procédé sur une multitude de sujets ayant les mêmes problématiques techniques.

Puis, dans la troisième partie, nous expliquerons comment s'est déroulé le protocole sur le terrain et nous procéderons à l'analyse des résultats.

Enfin, nous verrons la valorisation possible de ces données, pour les rendre accessibles au public à travers l'intégration dans une visualisation web, ainsi que dans un espace de Réalité Virtuelle.

I Contexte du projet et État de l'Art

I.1 Le laboratoire de Modèles et simulations pour l'Architecture et le Patrimoine : le MAP, laboratoire CNRS

Mon TFE se déroule dans le laboratoire du MAP, fondé en 1998 par Michel Florenzano. Il était au départ une UMR (Unité Mixte de Recherche), en partenariat avec quatre écoles d'architecture (Marseille, Toulouse, Lyon et Nancy) multi-sites. Étant basé sur le campus de Luminy à Marseille, le laboratoire a déménagé en 2014 au campus CNRS de Marseille. Il est devenu depuis janvier 2024 une UPR (Unité Propre de Recherche). L'équipe du laboratoire est constituée de chercheurs et d'ingénieurs possédant divers profils et compétences, mais tous partagent un engagement envers l'utilisation du numérique dans leurs travaux autour du patrimoine et de l'architecture. Les objectifs sont d'une part le développement et la découverte de nouveaux protocoles d'acquisition et de traitement de données 3D, et d'autre part la modélisation et la gestion de connaissances historiques⁷.

Dans cette optique d'acquisition patrimoniale, la ville de Marseille avec ses nombreux monuments est un vrai terrain d'expérimentation. En particulier à l'entrée du Vieux-Port, sur la rive sud, sous la Citadelle de Marseille, se trouvent des tunnels et des salles creusés à différentes époques et inaccessibles au public par manque d'installations de sécurité. L'objectif de ce TFE est de réussir à modéliser les espaces situés sous la structure pour pouvoir cartographier la zone et la valoriser, en l'exposant au grand public.

⁷ Site du MAP [en ligne]. Disponible sur : <https://www.map.cnrs.fr/fr/le-laboratoire/historique/>. Consulté le 25/03/2024

I.2 Comment photographier un espace étroit

La photogrammétrie rapprochée est une technique bien établie dans la numérisation d'espaces architecturaux et patrimoniaux complexes. Les améliorations technologiques dans ce domaine sont en constante progression, rendant disponibles de nouveaux instruments et méthodes de traitement, adoptés comme alternatives peu coûteuses aux méthodes lasergrammétriques. Récemment, divers appareils multi-caméras, y compris des caméras 360° compactes (voir Figure 2), sont disponibles dans le commerce. Ces systèmes sont devenus de plus en plus populaires dans les applications métrologiques, en raison de leur facilité d'utilisation, de leur portabilité, de leur rentabilité et de leur productivité. Dans l'ensemble, ces dispositifs réduisent la complexité des opérations sur le terrain, permettant des acquisitions plus rapides dans les environnements intérieurs.

Les travaux de L. Barazzetti *et al.* en 2017 et de L. Perfetti *et al.* en 2017 attestent de l'intérêt grandissant et de l'efficacité de tels systèmes dans des espaces étroits. Ils sont généralement construits sur une armature multi-caméras avec des lignes de base fixes entre appareils photographiques. Il existe deux types d'acquisition de photos :

- Les configurations panoramiques, permettant d'extraire des images à 360° de la scène aussi appelées des images équirectangulaires.
- Les configurations non-panoramiques se rapprochant de la photogrammétrie rapprochée traditionnelle : la différence intervient sur la prise de photo sur des appareils variés en même temps, les photos issues de chaque appareil sont des photos rectilinéaires.

L'inconvénient d'une configuration non-panoramique reste que la plupart du temps, les lignes de base entre appareils sont grandes et que les dispositifs sont généralement des prototypes (Perfetti *et al.*, 2022). En comparaison, des solutions pour configurations panoramiques sont accessibles au grand public : leur design est très minimaliste et prêt à l'emploi dès l'allumage (A. M. G. Tommaselli *et al.*, 2023). Des projets comme SESAMES (Bergerot *et al.*, 2022), ont déjà tenté la reconstitution 3D avec ces systèmes. Ils ont observé qu'en augmentant le nombre de prises de vue avec une orientation différente pour chacune d'entre elles (protocole pyramidal), la scène est entièrement reconstituée. Une fois le nuage de points issu de cette photogrammétrie mis à l'échelle, les écarts à une référence sont de l'ordre du centimètre.



Figure 2 : Insta360 One R à gauche ; Insta360 X3 à droite.

Ces caméras 360 ont généralement de très courtes focales et donc une profondeur de champ et un champ de vision (FOV) très grands, engendrant des distorsions sur les contours de l'objectif. L'Insta360 One R ou l'Insta360 X3 sont un exemple des modèles disponibles au grand public sortis ces cinq dernières années.

Cependant, les photos fournies par de tels instruments ne sont pas conventionnelles, comme montre la Figure 3. Cette image représente deux images hémisphériques, correspondant à la vision de chaque objectif positionné sur les côtés de l'appareil. C'est ce type d'image correspondant à des images hyper hémisphériques (A. M. G. Tommaselli *et al.*, 2023).

Les objectifs hémisphériques sont de plus en plus populaires dans les projets de modélisation de petits espaces, en raison de leur large champ de vision, un avantage significatif par rapport aux objectifs rectilignes. Cet avantage à lui seul peut être crucial pour réduire le nombre total de photos (frugalité numérique) et, par conséquent, simplifier la phase d'acquisition dans le but de réduire considérablement le temps passé sur site et le temps de traitement au laboratoire. L'intérêt croissant pour ces objectifs est confirmé par la disponibilité de différents logiciels commerciaux intégrant un modèle de caméra hémisphérique.



Figure 3 : Double hyper hémisphériques issues de l'Insta360 X3.

Afin de surmonter le principal problème qui se pose lors de l'utilisation d'objectifs hémisphériques, à savoir le manque de règles et de lois de calibration pouvant être utilisées pour l'acquisition, des études ont été menées sur la formulation mathématique générale pour estimer avec précision la taille du pixel sol (L. Perfetti *et al.*, 2017).

I.3 Comment photographier un espace sombre

Les tunnels, couloirs et autres espaces confinés sont généralement dépourvus d'un éclairage suffisant pour pratiquer la photogrammétrie dans de bonnes conditions. L'absence de fenêtre faisant entrer la lumière naturelle ou la présence de lumières artificielles, souvent tamisées pour créer une atmosphère touristique, ne permet pas de retranscrire la scène réelle numériquement et complique la reconnaissance des points de liaison entre les photographies.

Mais, contrairement à la lumière du soleil, nous pouvons contrôler le nombre, la position, la luminosité et la dureté des lumières artificielles. Nous pourrions penser à utiliser le flash, mais dans notre cas, les appareils d'acquisition ne disposent pas de cette fonctionnalité et la synchronisation des deux n'est pas envisagée par le laboratoire dans le cadre de ce TFE. Vient alors la solution des éclairages continus en opposition à l'éclairage ponctuel créé par les flashes. Il en existe deux types :

- Les LEDs ou Lighting Emitting Diode
- Les halogènes

Ces éclairages permettent de voir en temps réel le rendu de la lumière sur la scène illuminée. Les halogènes ont un rendement lumineux bas (30 lm/W), une durée de vie courte



Figure 4 : Lykos LED de Manfrotto.
Source : Manfrotto

(3 000 heures), ainsi qu'un échauffement à l'usage. Les LEDs quant à elles, ont un rendement lumineux élevé (100 lm/W) et une longue durée de vie (100 000 heures). En général ce sont des panneaux ou des bandes LEDs comme ceux de la Figure 4.

Il existe des lampes LEDs permettant d'éclairer sur 360°, comme celle montrée ci-contre. Elles sont utiles pour des photos issues de caméra 360° qui n'ont besoin que d'un seul éclairage pour avoir une scène suffisamment lumineuse. Si une scène est bien éclairée et qu'elle est capturée avec un appareil adapté, il ne reste plus qu'à transférer les données pour leur traitement.



Figure 5 : Bushman HALO 360 LIGHT.
Source : Bushman Panoramic

I.4 Traiter les données avec des FLOSS

Une fois acquise, la donnée photographique doit être traitée afin de pouvoir extraire de ce processus la pose relative des caméras, un nuage de points ou un maillage. Cette étape passe par l'utilisation de logiciels dédiés au traitement photogrammétrique. Les grandes étapes sont résumées dans le graphique ci-dessous :

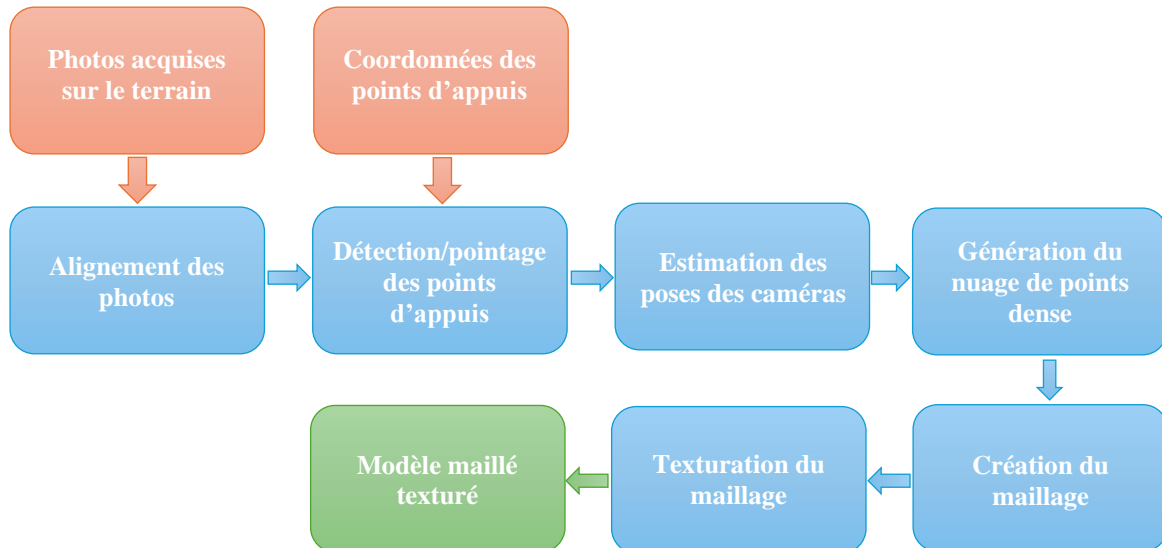


Figure 6 : Principales étapes du traitement dans des logiciels photogrammétriques
En rouge : données d'entrée, en bleu les étapes du traitement, en vert : les rendus finaux

Ces logiciels utilisent des algorithmes de reconnaissance de points de liaison en utilisant des descripteurs (SIFT, SURF, etc.). Ils permettent aussi de calculer la position relative de chaque prise de vue par rapport aux autres aussi appelé Structure From Motion. De plus, des calculs de densification et de nuage de points, de maillage ainsi que de texture permettent d'avoir des rendus utilisables pour des mesures tierces.

Il existe alors deux catégories de logiciels pour exécuter toutes ces tâches. D'un côté, les logiciels propriétaires, tels qu'Agisoft Metashape[®], RealityCapture[®] ou encore 3DF Zephyr[®] qui sont des solutions payantes et dans lesquels, très souvent les algorithmes utilisés derrière les étapes de calcul sont dits « boîte noire ». Ces logiciels sont avant tout, faits pour le monde professionnel et donc mettent en avant des chaînes opératoires génériques en simplifiant le processus. De l'autre côté, Meshroom, MicMac, VisualSFM ou encore COLMAP sont des FLOSS, fournissant des outils de calcul traçables dans leur fonctionnement. Leur utilisation est plus complexe (documentation peu fournie, absence de services clients), nécessitant de comprendre chaque étape et l'influence de chaque paramètre sur le résultat final.

I.4.1 MicMac : logiciel de photogrammétrie de l'IGN

I.4.1.1 Présentation

MicMac est une suite photogrammétrique open source gratuite (licence Cecill-B depuis 2007) qui peut être utilisée dans une variété de scénarios de reconstruction 3D⁸. Ce logiciel, développé par l'IGN depuis 2003, est ouvert à tous, bien que sa complexité de mise en œuvre et le peu d'informations mis à disposition restent des freins à un usage généralisé. Seules quelques personnes l'utilisent dans sa globalité. Des étudiants de l'École Nationale des Sciences Géographiques (ENSG) accompagnés de référents s'attellent à le rendre plus accessible au grand public grâce au travail sur la documentation, le développement d'une interface et de nouveaux outils de calcul.

MicMac permet actuellement le calcul de points de liaison, le calcul d'orientation de caméra, la création de nuage de points et de modèles 3D ainsi que la production d'ortho-imagerie. Les outils permettent également le géoréférencement des produits finaux dans un système de coordonnées locales, globales ou absolues.

I.4.1.2 Fonctionnement

MicMac fonctionne en ligne de commande, c'est-à-dire qu'il faut écrire dans une interface d'exécution chaque commande associée à un processus que nous voulons mettre en route. Par exemple, la commande ci-dessous permet d'identifier les points de liaison sur chaque image dans un dossier :

```
"C:/MicMac/bin/mm3d"(1) Tapioca(2) All(3) *.jpg(4) @SFS(5)
```

(1) : Appel du logiciel MicMac

(2) : Appel de la commande Tapioca, liée à la détection de points de liaison

(3) : Paramètre de Tapioca sur le mode d'identification des points de liaison

(4) : Modèle de nommage des images

(5) : Paramètre de Tapioca permettant d'améliorer la détection des points de liaison

⁸ Site de MicMac [en ligne]. Disponible sur : <https://micmac.ensg.eu/index.php/Presentation>. Consulté le 28/03/2024.

Le rajout de la lettre « v » avant l'appel du processus permet d'avoir une interface donnant accès à tous les paramètres d'une commande. Par exemple :

"C:/MicMac/bin/mm3d" vTapioca

Nous pouvons observer la quantité de paramètres personnalisables pour un processus, illustrant bien une volonté de laisser la liberté à l'utilisateur de choisir pour son cas d'étude, ses propres paramètres.

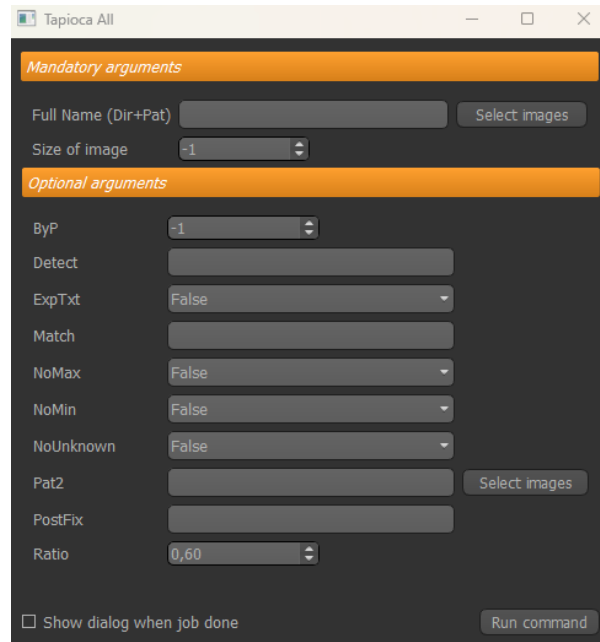


Figure 7 : Exemple d'exécution de la commande « Tapioca ».

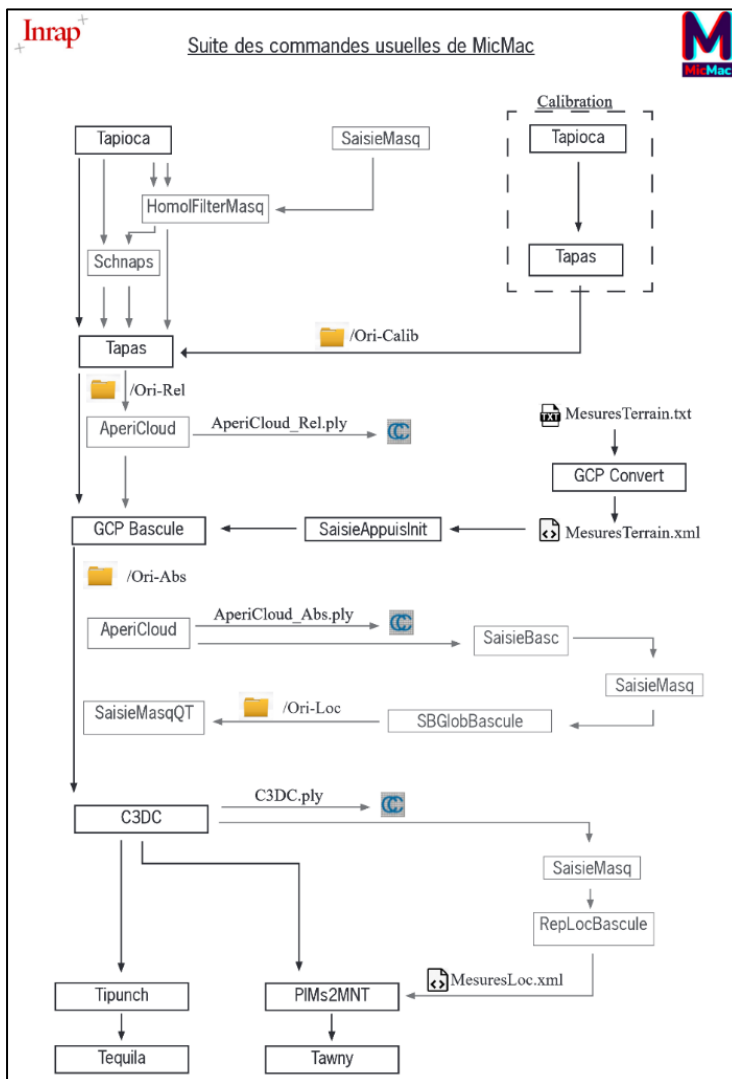


Figure 8 : Chaîne opératoire proposée par MicMac.
Source : <https://t.ly/Z2ush>

Un exemple de chaîne opératoire possible est fourni par MicMac sur sa page de documentation GitHub (Figure 8).

Nous pouvons observer l'enchaînement de commandes, de la détection de points de liaison, jusqu'à la création de la texture (*Tequila*) ou des orthomosaïques (*Tawny*).

I.4.2 AliceVision Meshroom : logiciel de photogrammétrie pour les effets visuels

I.4.2.1 Présentation

AliceVision Meshroom est un logiciel de vision par ordinateur et de photogrammétrie qui permet de générer un modèle 3D texturé à partir d'un ensemble de photos⁹. AliceVision est la bibliothèque mettant à disposition des algorithmes allant de la mise en correspondance des images à la reconstruction 3D et la construction de la texture du modèle. Meshroom est l'interface construite autour d'AliceVision. Elle s'organise en un système nodal, reliant les étapes de traitement les unes aux autres pour créer une chaîne opératoire. Tout comme MicMac, celle-ci est entièrement personnalisable. Nous pouvons ainsi modifier des étapes du processus de reconstruction pour s'adapter aux besoins selon le type d'application. Depuis 2014, le logiciel est notamment utilisé dans des milieux professionnels comme les effets spéciaux numériques, la réalité augmentée pour des applications médicales, ainsi que la numérisation du patrimoine culturel.

I.4.2.2 Fonctionnement

Comme vu précédemment, Meshroom fonctionne grâce à des nœuds, ceux-ci articulent et guident la chaîne opératoire sur les actions à exécuter et dans quel ordre. Des tâches peuvent être lancées parallèlement les unes aux autres. Dans la Figure 9, nous pouvons donc voir l'enchaînement de plusieurs fonctions comme l'estimation des paramètres internes de la caméra ou encore la mise en correspondance des points homologues entre les images et enfin l'estimation des poses de chaque caméra en les plaçant relativement les unes par rapport aux autres dans un espace en 3D.

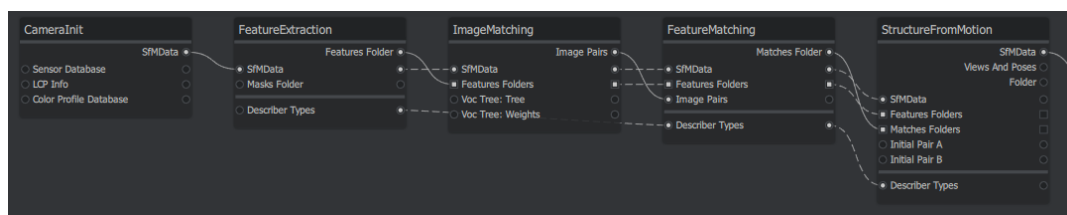


Figure 9 : Exemple de la chaîne opératoire "Photogrammetry" de Meshroom.

Un module MicMac a été développé au MAP avec la collaboration d'étudiants de l'ENSG, permettant ainsi d'avoir une interface Meshroom pour manipuler les fonctions de MicMac. Ce module s'appelle MeshroomMicMac. Il ne comprend pas encore tous les nœuds de calcul de MicMac car ce module est en cours de développement.

⁹ Page Wikipédia de AliceVision Meshroom [en ligne]. Disponible sur : https://fr.wikipedia.org/wiki/AliceVision_Meshroom. Consulté le 28/03/2024.

II Définition du protocole d'acquisition et du traitement

photogrammétrique

Dans cette partie, nous allons découvrir comment le matériel a été choisi, puis testé et comment un protocole d'acquisition a donc été mis en place pour la réalisation de l'étude finale. Dans un troisième temps, nous essayerons de trouver la meilleure solution pour traiter les données photogrammétriques fournies par les appareils.

II.1 Choix du matériel

II.1.1 Choix de l'appareil photographique

Le laboratoire disposait en février 2024 d'une Insta360 One R et d'une YI 360 VR. Ces deux caméras de types « Action Camera » sont destinées au grand public pour la production photo et vidéo, afin d'être en pleine immersion dans l'action. La surface est donc assez compacte et l'objectif dispose en général d'un grand-angle de capture.

Ces deux appareils de marques différentes sont capables de prendre des photos à 360° grâce à leurs deux lentilles hyper hémisphériques capables de capturer à plus de 180°. Les deux lentilles sont fixées de chaque côté de l'appareil afin de couvrir l'entièreté de la scène et de pouvoir cacher le boîtier du dispositif en lui-même. Ces photographies à 360° peuvent être traitées sur les logiciels propriétaires. Insta360 Studio 2024[®], permet de gérer les données issues de la caméra Insta360 One R, notamment en créant des images panoramiques aussi appelées images équirectangulaires (Figure 10).

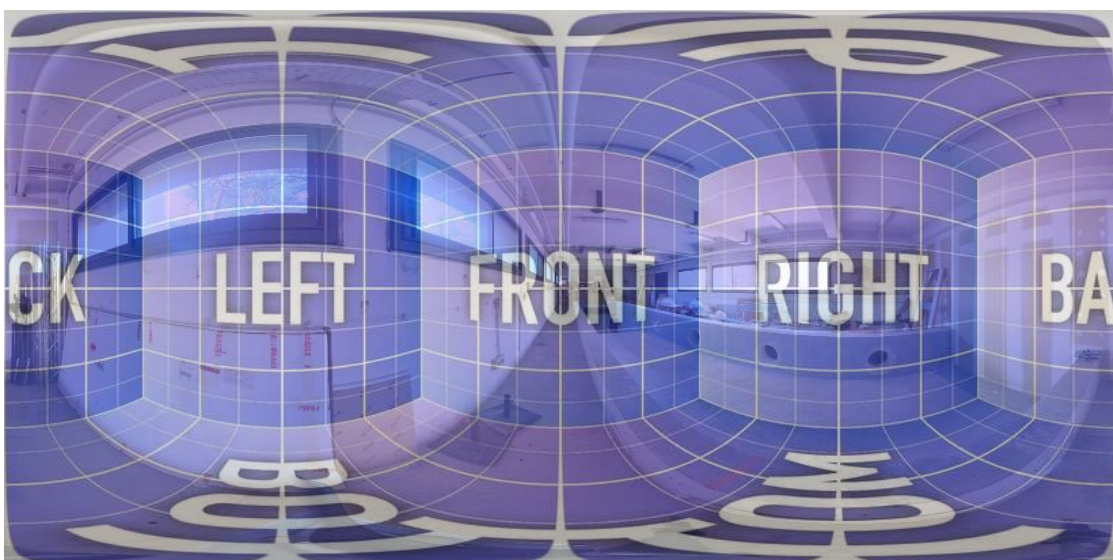


Figure 10 : Image équirectangulaire issue d'un traitement sur Insta360 Studio 2024[®].

Source : Personnel / <https://t.ly/nDRlg>

La YI 360 VR est une caméra datant de 2018 et ne disposant plus de support logiciel pour traiter les données des lentilles hyper hémisphériques (Figure 3). La piste de cette caméra a donc été écartée.

Pour donner suite à des retours antérieurs à ce TFE sur la qualité médiocre des photos provenant de l'Insta360 One R, la possibilité d'achat de nouvelles caméras 360 a été envisagée. Le Tableau 1 ci-dessous liste les caractéristiques de deux modèles de la marque Insta360 retenus.

Caractéristiques \ Appareil	Insta360 One R 360°	Insta360 One X3 360°
Définition du capteur photo (MP)	18.4	72
Résolution photo (pixels)	6080*3040	12000*6000
Taille du capteur (pouces / mm)	1/2.3" / 6.16*4.62	1/2" / 6.4*4.8
Ouverture	F2.0	F1.9
Focale équivalent 35 mm (mm)	7.2	6.7
Batterie (mAh)	1190	1800
Autonomie (minutes)	65	80
Prix (€ TTC)	530	470
Date de commercialisation	2020	2022

Tableau 1 : Caractéristiques des caméras retenues.
Source : Site d'Insta360

Nous pouvons observer que la caméra Insta One X3 avec son module 360° a une meilleure résolution avec un nombre de pixels quadruplé par rapport à l'Insta One R. La taille de son capteur étant plus grande, la qualité photo résultante s'en trouve donc améliorée. Le choix s'est donc porté sur l'achat d'une Insta360 One X3, dans le même temps, nous avons décidé d'acheter une nouvelle Insta360 One R. En effet, la possibilité d'évoluer dans l'espace avec deux caméras grand-angle ou deux caméras 360° de mêmes caractéristiques est envisageable. Les deux possibilités sont à coupler avec une caméra 360. Nous reviendrons sur les deux possibilités dans la partie « Assemblage du dispositif ».

L'autre problématique est le format d'enregistrement des appareils numériques d'un côté, le format d'origine des Insta360 est une extension en « .dng », fournissant le dual hyper hémisphérique et de l'autre le format « .insp » propriétaire à la marque. Dans les deux cas, il faut traiter ces fichiers sur leur logiciel Insta360 Studio 2024[©]. Si nous traitons le .dng nous aurons en sortie une image équirectangulaire en .dng et si nous traitons le .insp, nous aurons une image équirectangulaire au format .jpg.

L'avantage du format .dng est qu'il fournit des pixels étant enregistrés avec une plus grande profondeur de bit (12 à 14 bits pour le .dng contre 8 bits pour le .jpg). Ce qui permet de faire des développements plus poussés dans les photos sans perte de qualité, notamment dans les tons dégradés. D'autre part, la taille d'un fichier .dng est beaucoup plus grande que celle d'un fichier .jpg, ce qui nécessite plus d'espace de stockage. Un fichier .dng peut occuper entre 13 et 15 Mo. En revanche, un fichier .jpg de résolution équivalente se limitera à seulement 3 à 4 Mo.

D'après le test réalisé par Peter L. Falkingham¹⁰, sur la reconstruction photogrammétrique avec des fichiers .raw (dans notre cas le format .raw des caméras est le .dng) ou .jpg, différentes conclusions en résultent :

- L'ensemble d'images en .raw est traité plus rapidement (10-20% sur \approx 320 photos).
- Le maillage est équivalent sur les deux ensembles.
- La texture est un peu plus bruitée avec l'ensemble .raw, mais a une couleur plus proche de la réalité.

Il conseille notamment d'utiliser le type .raw dans des configurations d'éclairage moindres avec un faible contraste comme des tunnels. Nous optons donc pour l'utilisation d'images avec l'extension .dng.

¹⁰ Does shooting RAW or JPG make a difference?, [en ligne]. Disponible sur : <https://t.ly/PUXb8>, consulté le 24/04/2024.

II.1.2 Choix de l'éclairage

Le laboratoire dispose de panneaux LEDs comme illustré en Figure 4. Ces éclairages sont unidirectionnels et posent un problème de répartition de la lumière. Sachant que notre dispositif produit des images à 360°, les luminaires mis en place doivent éclairer la scène de façon homogène, donc chaque surface de la scène doit pouvoir être éclairée de façon similaire. Dans le même temps, il faut aussi que ces luminaires soient le moins visibles par les appareils d'acquisition. Nous avons donc pensé acheter les luminaires présentés dans la partie «Comment photographier un espace sombre», les Bushman 360 Halo. Cependant, ceux-ci coûtant environ 250 € hors-tax, nous nous sommes réorientés vers une solution ad hoc.



Figure 11 : Montage LEDs et Insta X2.
Source : <https://t.ly/xRyIL>

Illustré par un tutoriel en ligne¹¹, une idée possible serait de fixer des LEDs sur un pot en verre accroché en dessous de la caméra 360°. L'impact visuel du pot sur la scène sera donc très faible, car situé sous le capteur. Un exemple de montage est visible en Figure 11. Les bandes LED n'éclairent que dans un rayon 4 ou 5 mètres, mais dans un espace étroit cela suffit à éclairer de façon homogène l'endroit souhaité. Le pot en verre sert de stockage pour l'alimentation électrique de l'éclairage. Cette piste a été envisagée par le laboratoire, mais dans la réalisation nous avons gardé les panneaux LEDs. L'idée du tutoriel en ligne est donc une piste envisageable d'amélioration du dispositif d'éclairage.

II.2 Proposition d'une géométrie d'acquisition et construction du Rig

Le terme « Rig » est emprunté à l'anglais et signifie « Ensemble des équipements ajoutés sur une caméra ». Il permet notamment d'améliorer la stabilité de la caméra lors de la prise de vue. Ce rig va donc être déplacé dans l'espace afin de couvrir l'entièreté de la scène en créant le moins d'artefacts. Deux possibilités s'offrent à nous :

- Coupler deux caméras grand-angles Insta360 One R avec leur module grand-angle 4K avec une Insta One X3
- Coupler deux caméras Insta360 One R avec leur module 360° avec une Insta One X3

Nous les nommerons respectivement montage 1 et 2 tout au long de ce mémoire.

¹¹ Spherical LED Lamp for 360° Cameras, [en ligne]. Disponible sur : <https://t.ly/xRyIL>, consulté le 24/04/2024.

II.2.1 Assemblage du dispositif

Le montage d'un prototype avec les matériaux à disposition du laboratoire a permis d'avoir un dispositif léger et souple en termes d'envergure, allant de 87 cm au minimum à 150 cm au maximum. Le dispositif peut être agrandi ou rétréci en fonction de la longueur des barres en métal utilisées. Trois des panneaux LEDs peuvent coulisser le long du bras gauche et droit. Le quatrième panneau peut tourner autour de l'axe de la caméra centrale. Le dispositif s'adapte donc à n'importe quelle scène plus ou moins étroite et lumineuse. Voici les 2 montages envisagés :

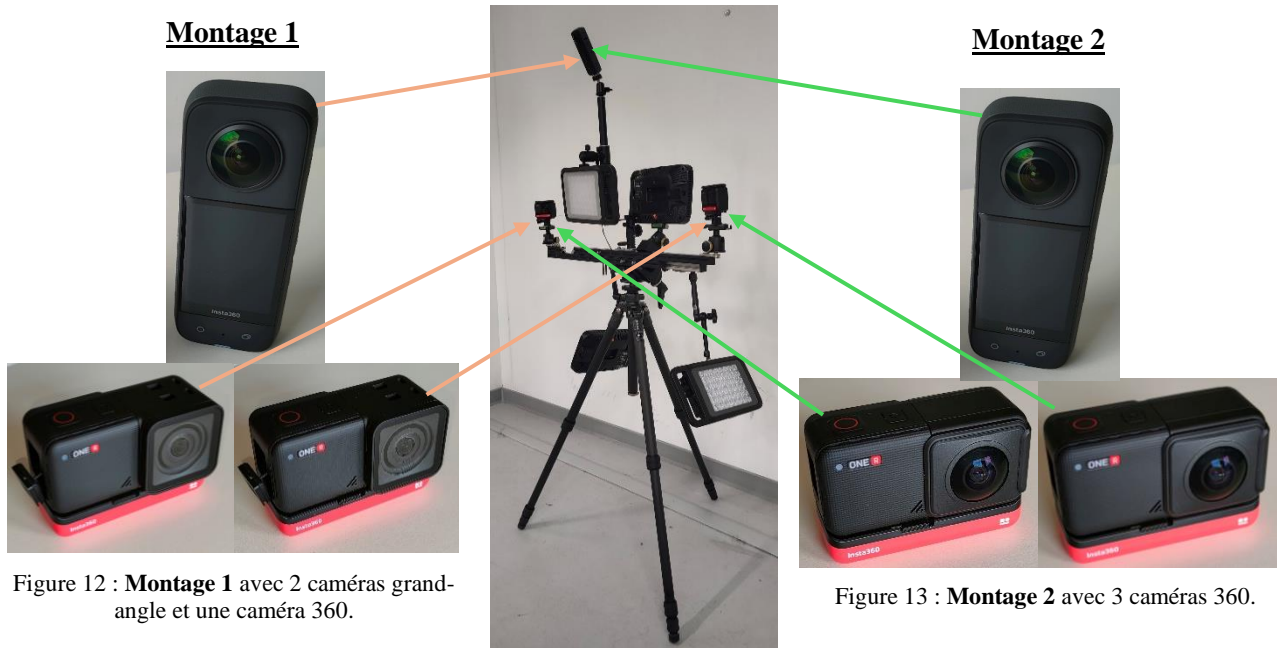


Figure 12 : **Montage 1** avec 2 caméras grand-angle et une caméra 360.

Figure 13 : **Montage 2** avec 3 caméras 360.

- **Montage 1 :**

Sur ce montage, nous accrochons à chaque extrémité une Insta360 One R avec son module 4K grand-angle, fixées à une rotule permettant de régler l'axe de visée de la caméra et son horizontalité. Ces caméras sont orientées en pointant vers leur paroi opposée et aussi inclinées vers le bas afin de capturer le sol au même moment. Entre les deux appareils photographiques, nous installons l'Insta360 X3, montée sur un bras photographique DIJI® et positionnée de façon à avoir les capteurs dirigés vers les parois latérales. Les 3 caméras sont rigidement fixées à la barre en métal afin de pouvoir mesurer la ligne de base entre chaque capteur.

- **Montage 2 :**

Sur ce montage, nous accrochons à chaque extrémité une Insta360 One R avec son module 360, toujours fixées à une rotule et pointant obliquement vers leur paroi respective. Entre les deux caméras nous installons l'Insta360 X3, positionnée de façon à avoir les capteurs hyper hémisphériques dirigés vers l'avant et l'arrière du tunnel. Nous inclinons dans le même temps la caméra vers l'avant afin d'avoir une image du sol moins déformée.

Par tradition, au laboratoire, chaque dispositif ou logiciel porte un nom spécifique, j'ai donc décidé d'appeler ce système le CAMÉLÉON pour Concept d'Appareil Multi-Camera photogrammétrique pour Lieux Etroits, Obscurs et Non-conventionnels.

II.2.2 Schéma d'acquisition

Les deux systèmes ont été testés dans un tunnel factice du laboratoire qui est détaillé dans « Construction d'un tunnel comme zone de test ». Pour les 2 montages, nous avons fait des stations tous les 50 cm à une hauteur de 90 cm du sol (104 cm pour les caméras latérales et 134 cm pour la caméra centrale). 8 stations dont 5 vers le fond du tunnel et 3 en direction de l'entrée ont été réalisées, l'appareil étant positionné perpendiculairement à l'axe longitudinal du tunnel.

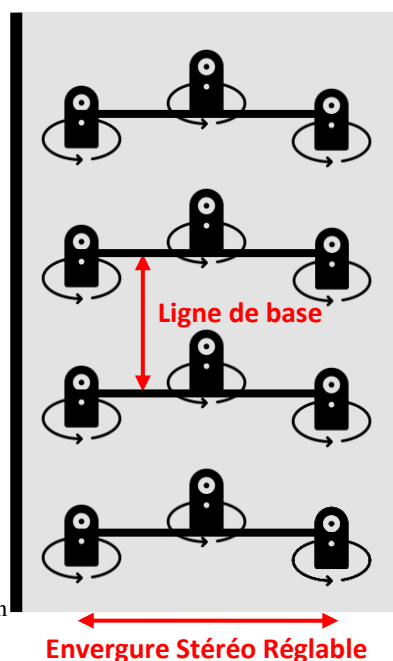


Figure 14 : Schéma d'acquisition du dispositif dans un couloir.

II.3 Construction d'un tunnel comme zone de test

Pour pouvoir expérimenter le dispositif d'acquisition avant d'aller sur le terrain, nous avons décidé de modéliser un tunnel grandeur nature pour ensuite valider la méthode d'acquisition sur un sujet concret.

Nous avons donc à l'aide de grands panneaux positionnés dans un coin d'une pièce, construit un espace de 3.80 mètres de long, 1.20 mètre de large et 2.50 mètres de hauteur.

Nous avons réparti sur ces parois, des posters et d'autres éléments d'accroches permettant ainsi l'identification d'un maximum de points homologues favorisant une meilleure reconstruction de la scène en 3D. Au plafond, une bâche floquée à la couleur du laboratoire est accrochée, simulant la moitié d'une voûte.

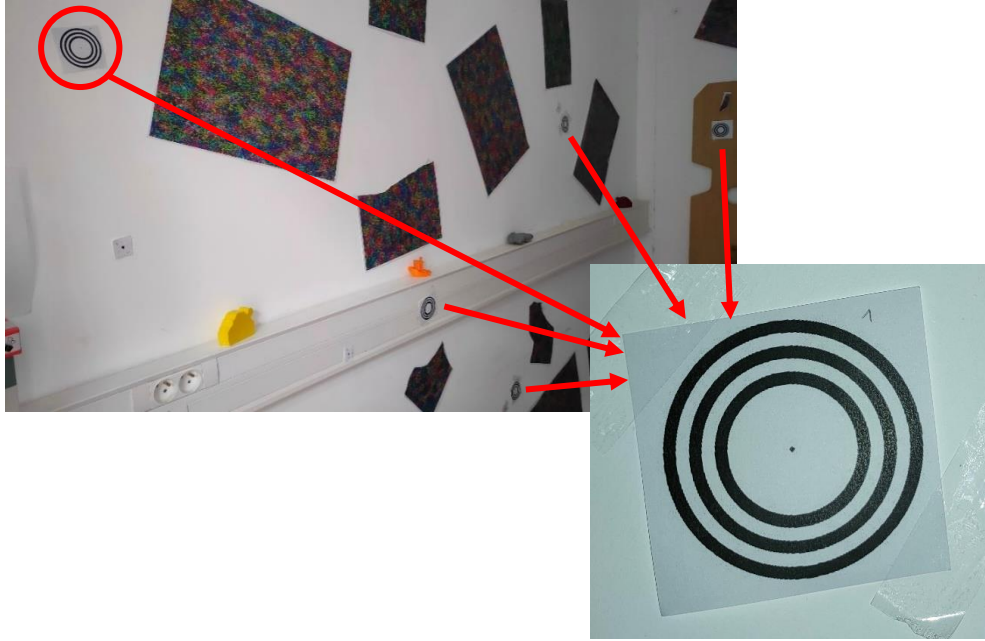


Figure 15 : Mur du sujet de test sur lequel sont accrochés des formes aléatoires et des CCTAG3 disposés de manière homogène.

Pour mettre à l'échelle le modèle 3D final, nous avons imprimé des CCTAG (Figure 15). Ce sont des cibles composées de 3 ou 4 cercles concentriques, que le logiciel Meshroom est capable de reconnaître et de différencier par leur épaisseur. Un point noir a été rajouté au centre des cibles. Ainsi, ces points ont pu être levés grâce à un télémètre laser Leica DISTO S910 et son adaptateur FTA 360-S, permettant de mesurer respectivement les distances et les angles horizontaux et verticaux. Ces cibles sont ainsi disposées de manière homogène le long du tunnel (Figure 15) pour contraindre le modèle sur les plans des parois gauche et droite et le plan du sol, ainsi que du plafond. Ces cibles servent aussi à contrôler sur les logiciels de traitement, la précision de reconstitution du modèle. Nous les appellerons des points d'appui.

II.4 Traitement photogrammétrique

II.4.1 Choix des données d'entrée

Comme vu précédemment, nous pouvons exploiter 2 types de photos : les hyper hémisphériques ou les équirectangulaires. Il existe une dernière catégorie de photographie que nous pouvons extraire des équirectangulaires. Ce sont les images cubiques, elles sont débarrassées de toutes distorsions liées à la caméra. Leurs côtés sont égaux et se construisent par 6 images contiguës construisant un domaine cubique dont l'appareil est le centre (Figure 16). Chacune des images s'apparente à une image rectilinéaire produite par des appareils photo standards, exceptée qu'elle ne subit aucune distorsion (radiale et tangentielle).

Nous avons donc cherché une solution existante permettant de découper nos images équirectangulaires en images cubiques. Des solutions comme RecToCube¹² ou Panorama to Cubemap¹³ existent mais ne permettent de créer seulement 6 images cubiques pour 1 image équirectangulaire. Nous avons donc codé en langage de programmation Python la manipulation d'extraction de celles-ci. Le programme a besoin en entrée d'un répertoire où sont stockées toutes les images équirectangulaires ainsi que d'un dossier en sortie où les images cubiques seront entreposées. Puis, une fonction va s'occuper de récupérer des photos du panorama, tout en corrigeant les distorsions (Voir Annexe 1¹⁴). Nous pouvons donc tirer d'une image équirectangulaire, une infinité de prises de vue.



Figure 16 : Transformation d'une image équirectangulaire en 6 images cubiques.

Dans notre cas, nous voulons du recouvrement pour la photogrammétrie. Donc dans notre code, 12 prises de vue sont extraites sur une ligne qui décrit un cercle autour de la station de prise de vue (Figure 17) au lieu de 4 (devant, derrière, gauche et droite), permettant de récupérer un recouvrement de 40% entre chaque image. Pour un recouvrement longitudinal de 80%, 20 photos sont nécessaires par bande et un angle de 30 degrés entre chaque bande assure un recouvrement transversal de 60%. Nous pouvons tout à fait augmenter ou réduire ces valeurs afin d'avoir un recouvrement souhaité ou un nombre de photographies donné.

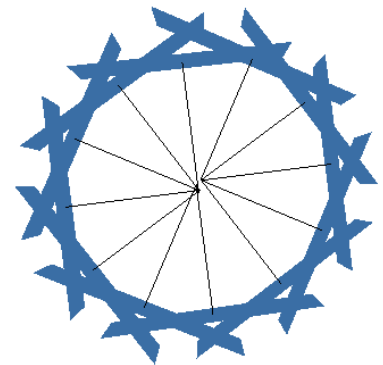


Figure 17 : Série de 12 photos cubiques autour de la station de prise de vue.

¹² RecToCube, [en ligne]. Disponible sur : <https://bit.ly/m/ToppiNappiCodes>, consulté le 11/07/2024.

¹³ Panorama to Cube, [en ligne]. Disponible sur : <https://jaxy.github.io/panorama-to-cubemap/>, consulté le 11/07/2024.

¹⁴ Annexe 1 : Codes mentionnés dans le texte.

La deuxième option part d'une image équirectangulaire. Cette fois-ci, nous allons la transformer en 6 hyper hémisphériques de dimensions variables.

Toujours grâce à un programme Python (Voir Annexe 1¹⁵), nous pouvons faire la transformation suivante :

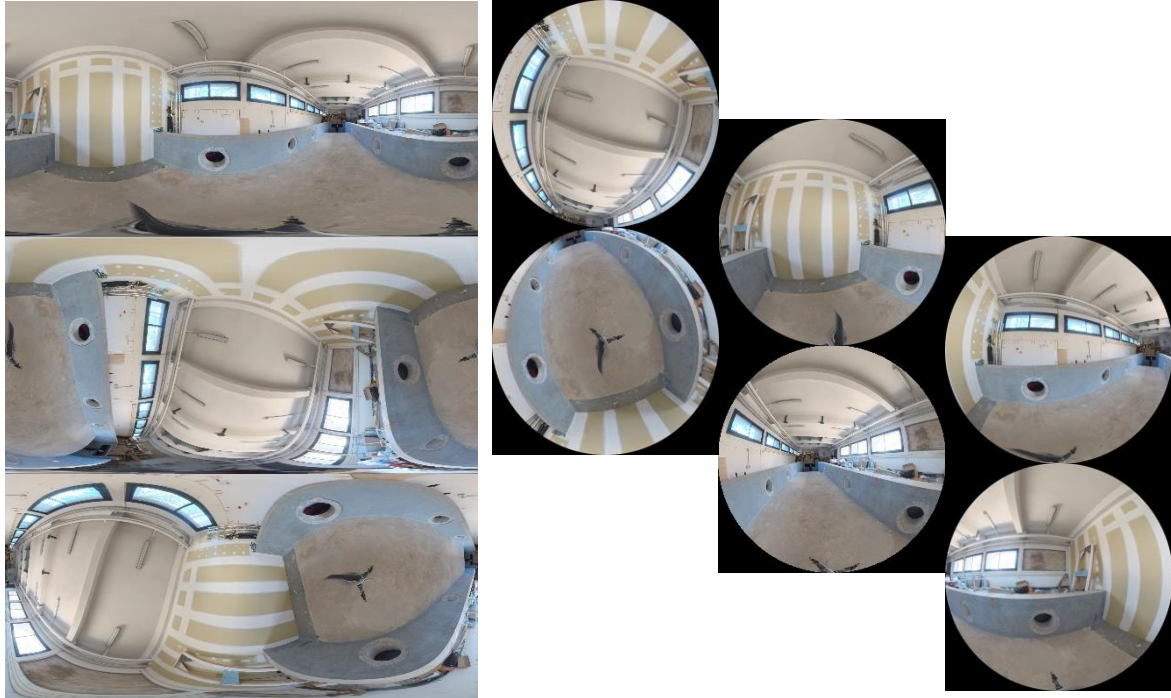


Figure 18 : Transformation d'équirectangulaire à 2 hyper hémisphériques.

Au départ, le programme prend l'image initiale en entrée et la coupe à la moitié sur sa longueur. Puis, il fait tourner de 180° l'image de la partie basse et étire les deux images pour qu'elles soient de forme carrée. Une transformation de coordonnées cartésiennes en coordonnées polaires est donc appliquée et les images sont ensuite extraites. La manipulation a été d'abord testée manuellement sur le logiciel GIMP, qui permet de certifier les étapes automatiquement programmées par la suite en Python. Pour avoir deux autres hyper hémisphériques, il nous a fallu parcourir tous les pixels de l'image initiale pour pouvoir les reprojeter sur un cylindre et ensuite extraire les hyper hémisphériques. Enfin, les deux dernières hyper hémisphériques sont issues de la reprojektion des pixels du panorama du milieu de la Figure 18.

Nous en venons donc à nous poser la question : avec quel type d'image allons-nous reconstituer la scène ? La réponse se trouve en partie dans les données prises en compte dans le logiciel de traitement.

¹⁵ Annexe 1 : Codes mentionnés dans le texte

II.4.2 Choix du logiciel de traitement

Grâce à ces données photographiques, nous pouvons passer au traitement et donc initier une chaîne opérationnelle pouvant s'appliquer à des photos à 360° grâce à des FLOSS.

II.4.2.1 Test de traitement avec MicMac

Pour tester la solution proposée par l'IGN, nous nous sommes penchés sur l'utilisation de MicMac. Il a fallu installer, puis prendre en main ce nouveau logiciel. Grâce aux tutoriels et à l'aide des connaissances d'Anthony Pamart, la compréhension du fonctionnement de ce nouvel outil fut plus aisée. Mais par soucis de temps et de manque de documentation, nous nous sommes réorientés sur Meshroom.

II.4.2.2 Test de traitement avec Meshroom

Meshroom est une solution plus démocratisée que Micmac, disposant d'un support technique en cas de besoin.

Traitement avec les images cubiques prédécoupées :

Pour les deux méthodes d'acquisition, les photographies 360° ont été prédécoupées en amont, grâce à notre programme Python, en 36 images chacune. L'alignement se fait donc avec des images cubiques issues de panoramas de 1500 pixels de longueur, qui ont toutes perdues leurs métadonnées, car elles ont été découpées avec Python.

Le Tableau 2 ci-dessous révèle le nombre d'images et le temps nécessaire à la reconstruction du tunnel pour les deux techniques de montage. Les deux chaînes opératoires sont identiques en tout point, utilisant la méthode de détection de points clés SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) et AKAZE (Améliored Fast Explicit Diffusion), car l'espace dans lequel nous évoluons possède des murs blancs et lisses et cela n'aide pas les algorithmes à trouver des points clés.

	Nb de photos à 360°	Nb d'images cubiques	Nb de photos rectilinéaires	Temps de traitement	Points de liaisons trouvés
Montage 1	8	288	16	≈ 2h	≈ 100 000
Montage 2	24	864	0	≈ 8h	≈ 230 000

Tableau 2 : Tableau récapitulatif du traitement des deux méthodes testées

La Figure 19 permet de comparer le résultat du montage 1 par rapport au montage 2.

Dans un premier temps, nous pouvons observer que le modèle 1 est plus lisse et représentatif de la réalité et possède moins de trous que le modèle 2. Les murs sont « droits » et le sol est entièrement représenté à droite. À gauche, la reconstitution ne s'est pas bien faite sur le mur de gauche et beaucoup d'artefacts apparaissent. Il ne faut pas oublier que nous sommes en présence d'images découpées à partir d'une photo sphérique et que la qualité et la netteté des images en sont impactées. Pour un appareil photo reflex comme le Canon[®] EOS 850D, la taille du capteur est de 22.3*14.9 mm et il contient 24 millions de pixels. Ici, les capteurs mesurent 6*5 mm et contiennent 18 millions de pixels.

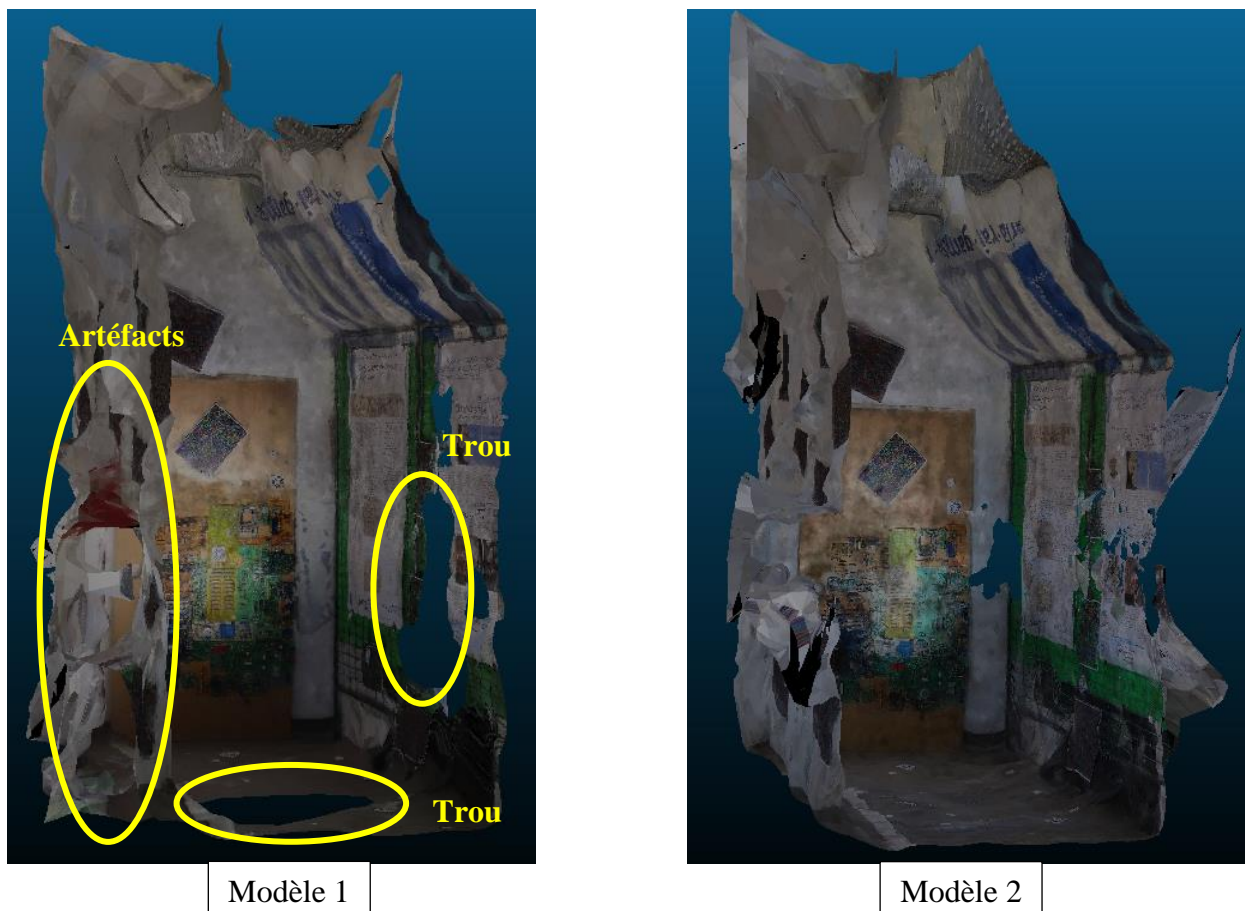


Figure 19 : A gauche le modèle 1 issu de l'acquisition avec le montage 1 et à droite le modèle 2 issu de l'acquisition avec le montage 2.

Pour comparer la géométrie issue de la photogrammétrie à la réalité, nous avons scanné le tunnel afin d'avoir une géométrie de référence. Grâce au BLK360 G2 de Leica Geosystems[®], un nuage de points fidèle a pu être exporté afin de remarquer les écarts existant entre les mesures lasers et photogrammétriques. Nous observons grâce à la Figure 20, après mise à l'échelle grâce aux points d'appui fixés sur les murs et le sol, que le modèle issu de la méthode 1 est écarté de 3.9 cm de la réalité, alors que celui issu de la méthode 2 est écarté de 2 cm. Cela conforte l'idée d'évoluer avec plus de photos. Le temps de traitement est plus long (6 h de différence) et la masse de données est plus lourde (600 Mo de différence), mais le modèle reflète mieux la réalité. Ici la méthode d'acquisition du montage numéro 2 a donc été retenue.



Figure 20 : Écarts entre la référence au laser et les modèles issus des méthode 1 (en rose) et 2 (en rouge).

Traitement avec les images équirectangulaires :

Une fonction nommée « Split360Images » existe dans Meshroom, mais celle-ci ne permet pas de traiter dans une chaîne opérationnelle les images découpées. En raison de ce problème technique survenu sur Meshroom, nous avons essayé de contacter à plusieurs reprises l'équipe de développement du logiciel. Les questions sont restées sans réponse et nous n'avons donc pas pu traiter directement avec les images équirectangulaires.

Traitement avec les images hyper hémisphériques :

La même raison qu'avec les images équirectangulaires nous a bloqué dans les essais de traitement avec les images hyper hémisphériques.

II.5 Conclusion sur les choix réalisés

Nous avons donc opté pour le montage 2 composé de 3 caméras 360 disposées en triangle, avec un éclairage de 4 panneaux LEDs à puissance variable, le tout monté sur une armature complètement variable géométriquement. L'acquisition dans des couloirs se fera tous les 50 cm avec les caméras inclinées vers l'avant pour faciliter la modélisation du sol. Le traitement se fera quant à lui sur Meshroom en prédécoupant les images équirectangulaires ou avec les images équirectangulaires au format .dng sur Agisoft Metashape[®], proposant une chaîne opératoire simple et rapide à mettre en place et prenant en compte le modèle de déformations de ces images dans ses calculs.

III Relevé des souterrains de la Citadelle de Marseille

Le 22 mai, le 4 juin et le 25 juin 2024, nous sommes allés dans la Citadelle de Marseille afin de valider notre protocole. L'étude sera réalisée sur 3 sujets. Les anciennes cellules de l'aile est du fort, l'aile souterraine ouest ainsi que l'aile souterraine sud du haut fort, ces deux ailes étant reliées. Les couloirs traversent ou rejoignent de nombreuses salles.



Figure 21 : A gauche : Couloir principal séparant les cellules ; au milieu : graffitis recouvrant les murs des cellules ; à droite l'aile souterraine ouest.

Les photos ci-dessus illustrent l'environnement dans lequel le dispositif doit évoluer. D'un côté, nous avons plusieurs petites pièces (4m²) collées les unes aux autres avec un couloir les reliant qui mesure 1 mètre de large. De l'autre, nous avons deux couloirs longs respectivement de 44 mètres et de 31 mètres pour 1.40 mètre de large au minimum avec des pièces bordant les tunnels ayant pour surface 26m² au maximum.

III.1 Matériel utilisé

Le matériel utilisé est récapitulé dans le tableau suivant avec sa référence exacte et son prix d'achat actuel, permettant ainsi d'apprécier le caractère low-cost du dispositif en comparaison au tarif d'un scanner 3D ou d'un appareil photo reflex combiné à un kit d'éclairage professionnel.

Marque	Référence	Prix à l'unité TTC (€)	Quantité
Insta360	One R	410	2
Insta360	X3	470	1
Insta360	GPS Action Remote	81	1
GITZO	Trépied GT2542	943	1
Manfrotto	Panneau LED Litepanels Lykos	209	4
JOBY	BallHead 3K	45	3
DIJI	Selfie Stick Extensible	30	1
FEISOL	Panorama-base PB-70	45	1
Joiry	Batterie 8800mAh	20	6

Tableau 3 : Récapitulatif tarifaire des différents éléments du Rig.
Sources : Différents revendeurs

Pour un coût approximatif de 3 550 €, le dispositif pourrait acquérir la géométrie d'une pièce après traitement photogrammétrique. Il permettrait de récupérer les images sphériques issues de l'Insta360 X3 afin de faire des visites virtuelles. Sachant que les photos sont prises à 360° et qu'il restitue l'espace en 3D, il aurait donc une utilisation similaire à un BLK360 de la marque Leica Geosystems[®] coûtant aux alentours de 25 000 €. Mais qu'en est-il de sa précision ?

III.2 Protocole mis en place

Avant le début de l'acquisition, la mesure au mètre ruban et décimètre des tunnels et des espaces que l'on va dimensionner est importante. Elle permet de placer au mieux les points d'appui en fonction de la scène étudiée. Dans les deux phases d'acquisition, les types de points d'appuis utilisés sont différents. Précisons que ceux-ci sont destinés à être détectés sur Meshroom, et donc que les points d'appui utilisés ici pourraient être remplacés par d'autres marqueurs reconnus par d'autres logiciels.

Dans un premier temps, nous avons imprimé des CCTAG3 en 31 exemplaires, sur des feuilles de papier classique. Nous les avons collées uniformément, le long du tunnel ouest, avec de la pâte adhésive, tous les 1.6 mètre. Malheureusement, dans un milieu comme les tunnels, forts en humidité le papier a tendance à absorber celle-ci et donc à se courber. Il fallait donc aplatir à la main ou avec de la pâte adhésive, les feuilles le long de la paroi, ce qui a monopolisé une trentaine de minutes.

Dans un second temps, pour le tunnel sud, nous avons anticipé l'humidité et collé au préalable une vingtaine de CCTAG4, sur des bouts de carton découpés par nos soins. Une fois la pâte adhésive fixée au carton et au mur, le papier ne se décolle pas et la cible reste droite pendant au moins 48 heures. Cette solution a donc été validée.

III.2.1 Acquisition des données

III.2.1.1 Acquisition de dimensionnement

Pour nous servir de référence, un scan 3D des différentes scènes de l'étude sera effectué avec un BLK360 G2 de la marque Leica Geosystems[®]. Il servira à comparer la réalité du terrain au produit issu du traitement photogrammétrique. Le BLK360 acquiert un nuage de point en moins de 3 minutes et sa précision est de 6 millimètres à 10 mètres. Son utilisation est très rapide pour des espaces très restreints, comme notre sujet d'étude. En 1h30, 19 stations ont été nécessaires pour acquérir géométriquement les cellules, et 54 stations dont 20 pour l'aile sud (en 1h30) et 34 pour l'aile ouest (en 2h30). Plusieurs scans sont pré-alignés sur le terrain grâce à une tablette et l'application Leica Cyclone FIELD 360. Il faut bien faire attention d'avoir assez de recouvrement entre les stations afin de pouvoir assembler les nuages n et n+1 ensemble grâce à une fonction ICP (Iterative Closest Point). Il ne reste plus qu'à exporter les stations et à les traiter au laboratoire.

III.2.1.2 Acquisition photogrammétrique

Deux méthodes de levé ont été envisagées, car la géométrie des cellules et du souterrain est différente. Pour le couloir des cellules, nous avons avancé station par station, tous les 50 cm dans le couloir principal séparant la pièce en deux (Figure 22 et Figure 23). Pour l'intérieur des cellules, 1 à 2 stations permettent de rattacher le couloir aux pièces individuelles et 9 à 10 stations ont été nécessaires pour capturer les angles et la voûte surplombant chaque cellule (Voir Annexe 2¹⁶).

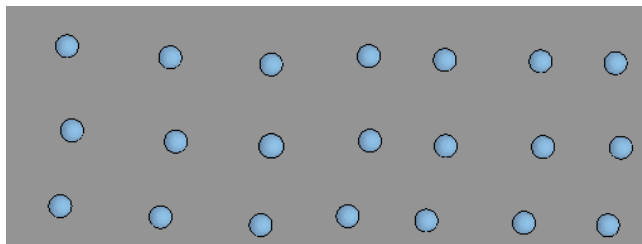


Figure 23 : Vue en plan du schéma d'acquisition du couloir principal séparant les cellules.

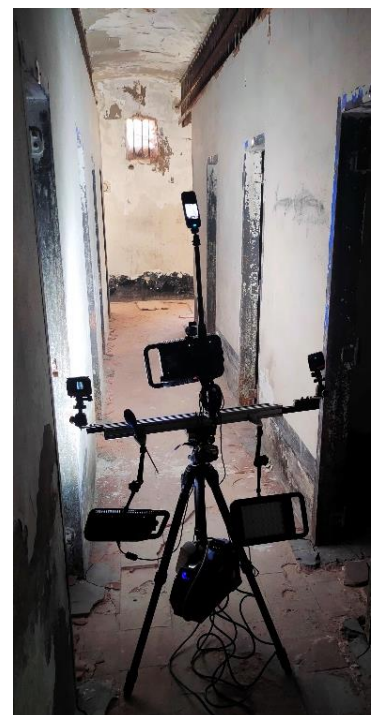


Figure 22 : Illustration de l'acquisition du couloir principal par photogrammétrie.

¹⁶ Annexe 2 : Protocole pour la prise de vue dans des pièces de 4m²

Pour les souterrains, nous avons placé le dispositif de biais par rapport à l'axe longitudinal du tunnel (Figure 24 et Figure 25). Ainsi, nous avons toujours la caméra à l'arrière faisant le lien entre la station n+1 et la station n. Pour les pièces attenantes au tunnel, un protocole similaire à celui appliqué dans les cellules a été mis en place (Voir Annexe 3¹⁷).

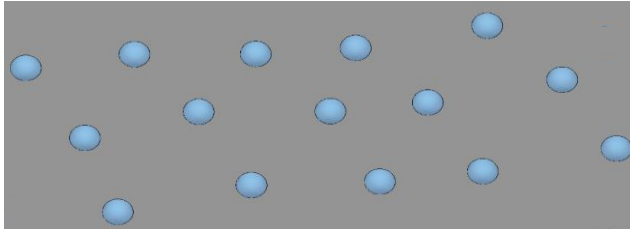


Figure 24 : Vue en plan du schéma d'acquisition du tunnel souterrain de l'aile ouest.



Figure 25 : Illustration de l'acquisition du souterrain par photogrammétrie.

Les panneaux LEDs ont quant à eux été orientés vers les endroits qui semblaient les moins éclairés afin d'avoir un rendu assez homogène en luminosité. Les cellules ont donc été acquises en 3h, le tunnel ouest en 3h30 et le tunnel sud en 2h30.

Pour 100 mètres de couloir, nous estimons ainsi à 10 minutes pour la pose des cibles et à 2h l'acquisition photogrammétrique, en étant habitué à utiliser ce dispositif. Pour les pièces nous conseillons d'utiliser une barre d'échelle pré-mesurée.

III.3 Traitement des données

III.3.1 Traitement des données de dimensionnement

Au bureau avec le logiciel Cyclone Register 360 Plus BLK Edition, nous avons pu aligner finement les nuages de points en créant des liens supplémentaires entre les stations, pour enfin extraire le nuage de référence de la scène étudiée. Pour les deux tunnels, ceux-ci ont été répertoriés dans des projets différents par soucis d'archivage plus fin, considérant ainsi une aile souterraine comme un objet architectural unique. Ensuite, les projets ont été fusionnés. La figure ci-dessous montre les différentes scènes modélisées.

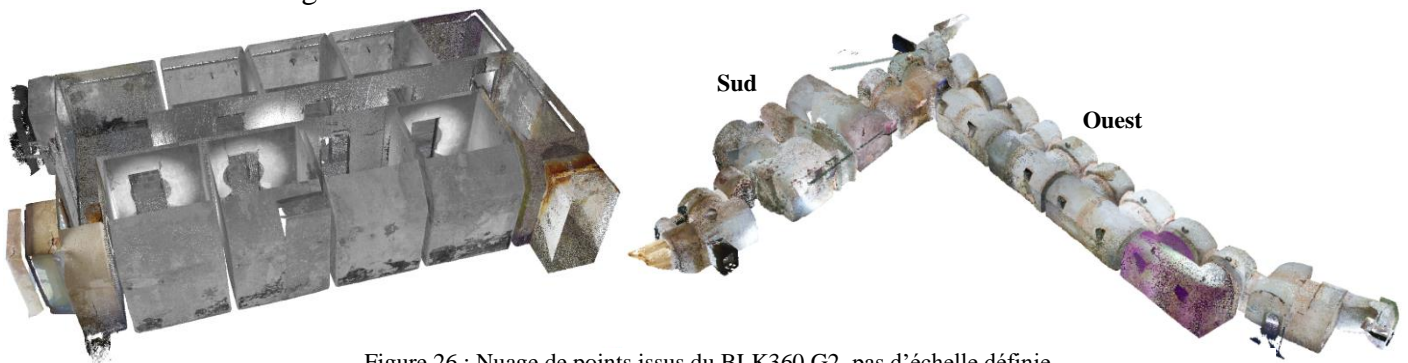


Figure 26 : Nuage de points issu du BLK360 G2, pas d'échelle définie.
À gauche : Les cellules ; À droite : L'aile souterraine sud et ouest

¹⁷ Annexe 3 : Protocole pour la prise de vue dans des pièces de 26m²

Le logiciel d'assemblage des stations fournit un rapport de fin de traitement et d'export du nuage de points dont j'ai reporté les données principales dans le tableau ci-dessous :

Type d'erreur \ Nom du groupe	Cellules	Tunnels
Erreur du groupe (m)	0.005	0.008
Recouvrement (%)	52	55
Force (%)	59	63
Nuage à nuage (m)	0.005	0.008

Tableau 4 : Types d'erreur lié à l'assemblage des scans issus du BLK360 G2.

Source : Rapport de Cyclone Register 360 Plus BLK Edition

D'après le Tableau 4, une exactitude de 5 et 8 mm est donc attendue sur les nuages qui serviront de référence à notre levé photogrammétrique. Un recouvrement supérieur à 50% entre scan signifie une répétition de mesures au même endroit dans l'espace et permet à l'algorithme ICP de fonctionner de manière optimale. Les deux projets pèsent respectivement ≈ 3 Go et ≈ 17 Go. Ils ont nécessité 1h30 de traitement chacun.

III.3.2 Traitement des données photogrammétriques

Le traitement s'est déroulé essentiellement sur Agisoft Metashape[®]. En effet, ayant passé une semaine et demie sur l'optimisation de la chaîne opératoire photogrammétrique sur Meshroom et n'ayant aucune réponse aux questions envoyées aux personnes s'occupant du développement logiciel, je me suis donc réorienté vers Agisoft Metashape[®], dans sa version Professional 2.1.1.

III.3.2.1 Le traitement photogrammétrique des cellules

415 photos ont été prises au total dans les cellules, ce qui fait un total approximatif de 138 stations, car parfois, les appareils se sont éteints et il n'y pas exactement le même nombre de prises de vue par caméra. Environ 240 photographies servent à la modélisation de l'intérieur des cellules et le reste représente l'entrée, le couloir, la salle donnant sur l'extérieur et la haute cour. Les données photos ont un poids total de 88 Go. Tout le traitement s'est déroulé dans un seul projet et dans un seul « groupe » dans lequel les photos et les coordonnées des points d'appui seront importées. Ensuite, nous appliquons les étapes de traitement visibles dans la Figure 6. En amont, nous spécifions le type d'images utilisé pour la reconstruction dans *Outils > Calibration de la caméra > Type de caméra > Sphérique*, et ceci pour les deux types de caméras utilisées.

Nous importons les coordonnées des points d'appui et nous pointons sur une dizaine de photographies l'emplacement des points d'appui en décochant 3 à 4 points qui serviront de vérification pour contrôler la qualité de l'alignement réalisé. Après cette étape, nous réalisons un alignement de haute précision avec une limite de 50 000 points de liaison trouvés par image.

	Point de d'appui		Point de vérification	
	Incertitude de reprojection (px)	Incertitude de triangulation (m)	Incertitude de reprojection (px)	Incertitude de triangulation (m)
Cellules	9.924	0.027	6.158	0.022

Tableau 5 : Tableau des incertitudes obtenues pour le calcul des cellules.
Source : Rapport de Agisoft Metashape®

Le Tableau 5 ci-dessus quantifie le résultat de l'alignement. L'incertitude de reprojection est la distance en pixel entre le point observé sur l'image et le point image calculé par le modèle à partir du point connu dans l'espace terrain. Quant à l'incertitude de triangulation, c'est la distance géométrique entre un point d'appui relevé sur le terrain par un instrument plus précis que la méthode photogrammétrique et le même point reconstruit par triangulation après l'avoir pointé dans les images¹⁸. Ici, une incertitude de moins de 5 cm convient pour une représentation géométrique architecturale. Si l'on veut une précision métrologique, en dessous du centimètre, il faut utiliser un tachéomètre et lever plus de points d'appui. Les points de contrôle servent à quantifier la qualité des paramètres estimés par photogrammétrie. Ils n'interviennent pas dans le calcul de l'alignement.

Nous pouvons passer à la densification du nuage en moyenne densité, car la haute densité nécessite un appareil de calcul plus puissant. Nous obtenons donc un nuage d'environ 28 millions de points, qui après nettoyage des points compris entre 0 et 2 de confiance par le logiciel, descend à un nombre d'environ 20 millions de points. Ces points serviront à la comparaison entre la lasergrammétrie et la photogrammétrie dans la section suivante.

	Détection des points d'appui	Alignement	Densification du nuage de points
Temps de traitement en heures	0.5	3	1.5

Tableau 6 : Temps des étapes de traitement pour les cellules.
Source : Rapport de Agisoft Metashape®

Le Tableau 6 ci-dessus donne une idée du temps de calcul nécessaire pour l'obtention d'un nuage de points dense et transcrivant la géométrie de la scène. Le temps de traitement est considérablement plus long que celui effectué sur Cyclone Register 360 Plus BLK Edition

¹⁸ E. Simonetto, 2023. Cours de Photogrammétrie IG4.

III.3.2.2 Le traitement photogrammétrique des tunnels

842 photos ont été prises au total dans les tunnels, dont 464 pour le tunnel ouest et 378 pour le tunnel sud. 280 stations ont été nécessaires pour modéliser ces deux tunnels et les pièces attenantes. Les données photos ont un poids total de 180 Go. Tout le traitement s'est déroulé dans un seul projet, et dans un seul « groupe » dans lequel les photos et les coordonnées des points d'appui seront importées. Ensuite, nous réappliquons les étapes de traitement visible dans la Figure 6.

	Point de d'appui		Point de vérification	
	Incertitude de reprojection (px)	Incertitude de triangulation (m)	Erreur de reprojection (px)	Incertitude de triangulation (m)
Tunnels	7.722	0.031	5.205	0.025

Tableau 7 : Tableau des incertitudes obtenues pour le calcul des tunnels.
Source : Rapport de Agisoft Metashape®

Nous sommes encore dans la tolérance des 5 cm. Les valeurs représentant l'erreur en pixel, sont ici d'environ 5 et 7 pixels et s'expliquent par la distorsion radiale des images qui impacte le modèle trouvé par Metashape et influence la distance en pixel entre le point cliqué sur l'image et sa position réelle dans le modèle estimé par Metashape. Ce dernier et les autres contenus dans le logiciel sont de plus en plus perfectionnés, ces erreurs tendent à se réduire dans les mises à jour à venir. Dans notre cas, ces valeurs ont moins d'influence sur la qualité de la restitution géométrique de la scène que celles issues de l'incertitude de triangulation.

Pour la densification, un total d'environ 54 millions de points est généré en moyenne densité. Après nettoyage par le paramètre de confiance, nous tombons à environ 40 millions de points.

	Détection des points d'appui	Alignement	Densification du nuage de points
Temps de traitement en heures	1.5	3.5	3.5

Tableau 8 : Temps des étapes de traitement pour les tunnels.
Source : Rapport de Agisoft Metashape®

Le Tableau 8 ci-dessus illustre la différence des temps de traitement globaux entre Agisoft Metashape® et Cyclone Register 360 Plus BLK Edition. Pour la photogrammétrie, plus de 8 heures sont nécessaires afin d'obtenir un nuage de points dense contre seulement 1 heure et demie pour le traitement du nuage lasergrammétrique.

III.4 Comparatif géométrique des deux techniques d'acquisition laser et photographique

Grâce au logiciel open-source, CloudCompare, nous pouvons importer nos nuages de points issus du traitement lasergrammétrique et photogrammétrique. Les coordonnées des points d'appuis provenant du nuage du Leica BLK360 G2 et servant au recalage et à la mise à l'échelle du projet photogrammétrique étant les mêmes, alors, les deux nuages sont censés se superposer. Une fois l'import effectué, nous pouvons grâce à l'outil « Cloud to cloud distance » (C2C) de CloudCompare, calculer la distance séparant deux nuages de points.

Les potentiels écarts sont calculés par un algorithme ICP, qui va permettre d'observer et de chiffrer ceux-ci entre les deux nuages. Cette méthode favorise une comparaison directe entre deux nuages de points bruts. Comme il est possible de quantifier cet écart, il est également possible d'observer certains endroits en particulier où la déformation est la plus importante. Nous calculons la distance séparant les deux nuages et en sélectionnant comme référence le nuage issu du scanner 3D. Nous obtenons donc une nouvelle valeur scalaire associée à chaque point comprise entre la distance minimale et maximale entre les deux nuages.

III.4.1 Cas des cellules

Une fois la comparaison effectuée, nous pouvons analyser plus finement la différence entre les deux nuages grâce à cet outil : « le filtre des points par valeurs ». Il permet de sélectionner des points en fonction de leur valeur scalaire associée. Un nouveau nuage est créé avec les points se situant dans la plage spécifiée (CloudCompare, 2015). Nous avons donc fixé arbitrairement un seuil de 5 cm acceptable entre la référence et le nuage issu de la photogrammétrie. Ce seuil est souvent utilisé dans d'autres articles scientifiques traitant de la précision d'une reconstruction 3D par photogrammétrie. Voici nos observations pour les cellules :

7 % des points ont un écart de plus de 5 cm par rapport à la référence et cela est dû notamment au fait que le scan était réalisé partiellement dans le couloir et dans les cellules et ne couvrait pas l'entièreté de celles-ci. Certaines zones ne sont pas couvertes par la référence (en gris sur la Figure 27 et en noir sur la Figure 28).

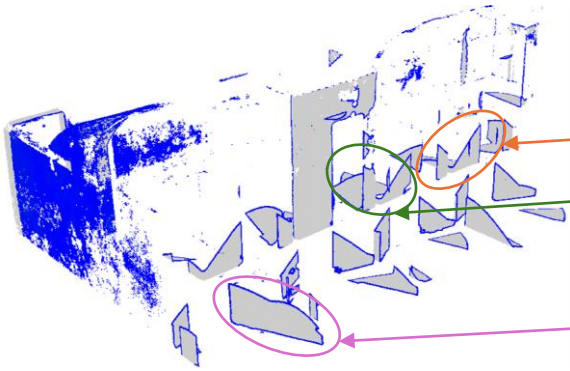


Figure 27 : Nuage comparatif entre la référence laser et le nuage photogrammétrique des points éloignés de 5 cm et plus, pas d'échelle définie.



Figure 28 : Vue du dessus de tous les scans des cellules. En noir : les zones non couvertes par le laser.

La partie en bleu sur la gauche est l'entrée des cellules qui n'a pas bénéficié de point d'appui et montre bien l'importance de les répartir uniformément. Cependant, l'écart entre ces points et la référence est compris entre 5 cm et 7 cm, montrant ainsi l'impact des autres points d'appui répartis dans la scène. Pour l'analyse des points se trouvant à moins de 5 cm de la référence nous avons pu en tirer ces valeurs :

Distance à la référence	1 cm <	1 cm < x < 2.5 cm	2.5 cm < x < 5 cm
Pourcentage de points compris dans l'intervalle	38%	35%	20%

Tableau 9 : Pourcentage de points compris entre certains intervalles de distances pour les cellules.
Source : Rapport de CloudCompare

Les points compris entre 2.5 cm et 5 cm sont en grande majorité localisés, soit à des endroits où il y n'a pas de point d'appui, comme c'est le cas pour l'entrée des cellules. Par exemple, la première salle à gauche de l'entrée a son plafond et son mur du fond très éloignés de la référence dans cet intervalle comme l'illustre la Figure 29. Soit, l'écart est dû à une incertitude de triangulation élevée sur certains points d'appui.

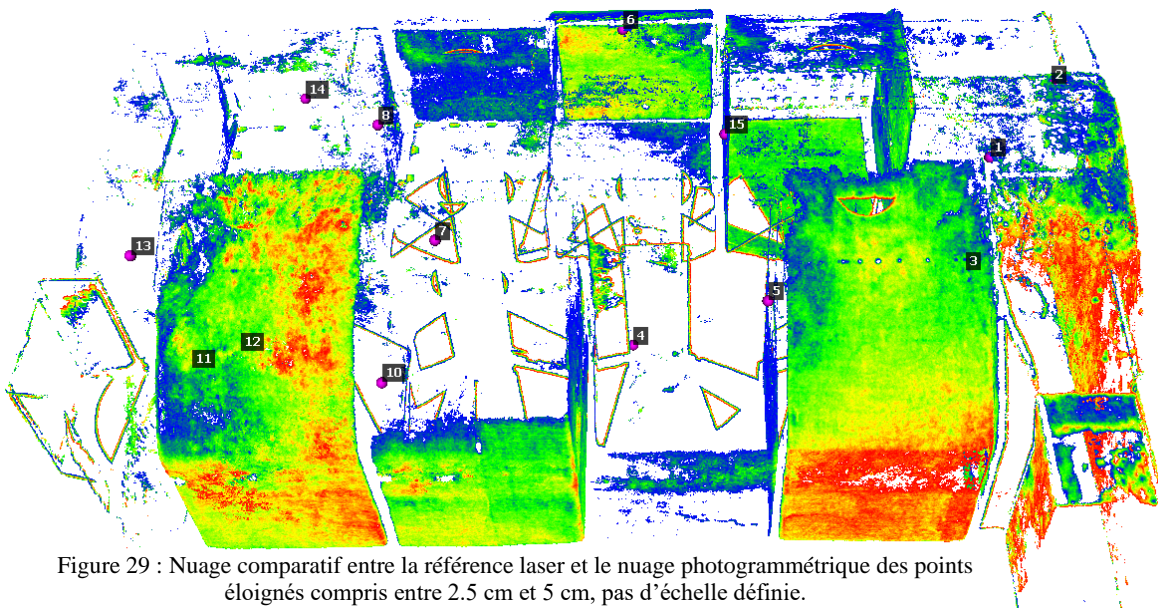


Figure 29 : Nuage comparatif entre la référence laser et le nuage photogrammétrique des points éloignés compris entre 2.5 cm et 5 cm, pas d'échelle définie.

III.4.2 Cas des tunnels

Pour l'analyse des tunnels assemblés, seulement 1.3% des points est supérieur à une distance de 5 cm par rapport à la référence et 85% de ces points sont compris entre 5 cm et 7 cm. Pour l'analyse des points se trouvant à moins de 5 cm de la référence, vous trouverez dans le tableau ci-dessous les résultats :

Distance à la référence	1 cm <	1 cm < x < 2.5 cm	2.5 cm < x < 5 cm
Pourcentage de points compris dans l'intervalle	31.7%	46%	21%

Tableau 10 : Pourcentage de points compris entre certains intervalles de distances pour les tunnels.

Source : Rapport de CloudCompare

La même observation que sur les cellules peut être faite sur les tunnels. Les points situés entre 2.5 cm et 5 cm sont des points éloignés de la référence en raison soit d'un manque de points d'appui dans ces zones, soit dû à une incertitude de triangulation élevée sur certains points en raison d'un mauvais pointage de ceux-ci sur Agisoft Metashape® ou de coordonnées peu précises. Nous remarquons d'ailleurs que plus de 75 % des points sont éloignés au maximum de 2.5 cm par rapport à la référence. Nous pouvons donc conclure que la répartition des points d'appui est plus uniforme et leur attribution de coordonnées est plus fine que les coordonnées des points d'appui des cellules.

III.4.3 Conclusion

Les deux méthodes d'acquisition géométrique d'un environnement ont montré leur potentiel. Le scanner laser a une rapidité d'acquisition et de traitement nettement supérieure à celle du dispositif photogrammétrique. De plus, la quantité de données issues des nuages de points laser est mineure comparée à la centaine de Gigaoctet des photos acquises. Le point le plus important est la qualité de mesure métrique du BLK360 G2, ne nécessitant pas de mise à l'échelle. Cependant, le point négatif majeur de ce système est son prix sept fois supérieur au prototype imaginé au laboratoire. Avec le CAMÉLÉON, la réutilisation des photos et l'acquisition avec un dispositif lumineux permettent de restituer au mieux les couleurs de l'environnement pour texturer et détecter plus de points homologues. Sa manutention est aussi facilitée, car l'ensemble est entièrement démontable. Enfin, le point fort de ce dispositif est sa capacité, grâce à des points d'appuis bien répartis dans l'espace à modéliser son environnement en 3D à moins de 5 cm de la référence (Tableau 9 et Tableau 10). Au vu des objectifs de cartographies rapides et du matériel à disposition, cette précision nous semble acceptable.

IV Diffusion des données

IV.1 Objectifs

Le principal objectif de ce TFE est la valorisation patrimoniale et l'accès public à travers la Réalité Virtuelle à des lieux normalement non-visibles. Grâce à cette activité contemporaine qu'est la découverte immersive d'un monument historique, cela donne de l'intérêt à un site exceptionnel qui fut longtemps fermé au grand public pour des raisons de sécurité. La création d'une visite virtuelle orientée web et visualisable sur ordinateur et casque de Réalité Virtuelle semble adaptée à la diffusion de données photographiques et photogrammétriques. Des logiciels payants comme 3DVista[®] ou Pano2VR de Garden Gnome[®] et d'autres alternatives gratuites comme la bibliothèque Marzipano¹⁹ et son outil en ligne, permettent de créer des visites virtuelles à partir de photographies acquises à 360°.

Dans un second temps, l'objectif est aussi de pouvoir stocker ces données nouvellement acquises sur un serveur pour une utilisation future à des fins cartographiques et d'étude des volumes existants.

Enfin, une approche expérimentale sera développée. Elle permettra notamment de définir comment l'acquisition et le traitement des données se sont déroulés.

IV.2 Outils utilisés

En premier lieu, Laurent Bergerot, du laboratoire MAP, a développé une plateforme équivalente aux solutions citées ci-dessus se nommant MYRTE (MY viRtual tour for archiTecture and cultural heritagE). C'est un système basé sur une interface web permettant de créer, éditer et visualiser des visites virtuelles, accessibles par navigateur, sur ordinateur, mais aussi sur des casques de Réalité Virtuelle²⁰. Cet outil est codé en HTML, CSS, Javascript et PHP. Ce sont plusieurs langages de programmation orientés web et permettant la création de page Internet. Le HTML (Hypertext Markup Language) structure le contenu d'une page web. Le code CSS (Cascading Style Sheets) définit l'apparence et la mise en forme des éléments d'une page HTML. Le JavaScript ajoute de l'interactivité et des fonctionnalités dynamiques aux pages web. Enfin, le PHP est un langage de scripts qui peut être intégré facilement au HTML²¹. Il se distingue du JavaScript, car ce langage est exécuté sur un serveur local ou distant.

¹⁹ Site de l'outil en ligne Marzipano [en ligne]. Disponible sur : <https://www.marzipano.net/tool/>. Consulté le 06/07/2024.

²⁰ Site du MAP [en ligne]. Disponible sur : <https://t.ly/V1MXm>. Consulté le 28/06/2024.

²¹ Site de PHP [en ligne]. Disponible sur : <https://www.php.net/>. Consulté le 28/06/2024.

Anthony Pamart a quant à lui développé MEMoS (Metadata Enriched Multimodal documentation System) qui est un cadre dans lequel des métadonnées d'acquisition et de traitement sont encodées, affichées, mais surtout, attachées à un ensemble d'images au moment de la capture. La description est réalisée au préalable à l'aide d'une structure inspirée du modèle ontologique W7 (Who, Where, When, What, Which, How, Why). L'encodage est réalisé avec des codes-barres 2D courants et simples.

Dans un premier temps, cela sert à structurer et à sauvegarder une trace des informations utiles à l'acquisition grâce à un fichier .json. Deuxièmement, l'acquisition photographique de ce QR code correspond à une nouvelle capture de données et permet de séparer deux méthodes utilisées, comme un clap dans un tournage sépare deux prises. La détection de QR code peut aider à structurer, étiqueter, trier et filtrer des séquences d'ensembles de données complexes en fonction de leurs métadonnées liées (A. Pamart, 2020). L'approche est actuellement au stade de tests expérimentaux.

IV.3 Réalisation

Nous avons donc pris des photos avec l'Insta360 X3 et plusieurs panneaux LEDs servant à éclairer l'espace environnant. Nous avons pu créer et personnaliser une visite virtuelle grâce à l'interface ludique de MYRTE, visible sur la Figure 30. La visite est disponible sur ce lien : <https://t.ly/EisnD>.

```

{
  "Activity": {
    "Type": "Acquisition",
    "WHO": {
      "Operator": "N. Maillard, A.Pamart, L.Bergerot, F.Comte",
      "Affiliation": "UPR 2002 MAP CNRS"
    },
    "WHERE": {
      "City in native language": "Marseille",
      "GeoNames_ID": "2977899",
      "HeritageObject": "Fort Saint-Nicolas",
      "GeoRef": {
        "type": "LatLng",
        "Lat": 5.36263889,
        "Long": 43.29100000
      }
    },
    "WHEN": {
      "Start_Date": "22/05/2024",
      "Time_Spent": "3:00:00",
      "End_Date": "22/05/2024"
    },
    "WHAT": {
      "Appellation": "Cellules_Haut-Fort_Aille_Est",
      "Attribute": "jail",
      "What3words_BB": {
        "geometry": "surface",
        "start": "appeler.digue.influer",
        "end": "chenaux.évacuer.guidon"
      },
      "ZoneOfInterest": {
        "Unit": "meter",
        "length": "9.80",
        "weight": "5.80",
        "height": "3.10",
        "OverlapWith": ""
      }
    }
  }
}

```

Figure 31 : Exemple de structure d'un fichier MEMoS.

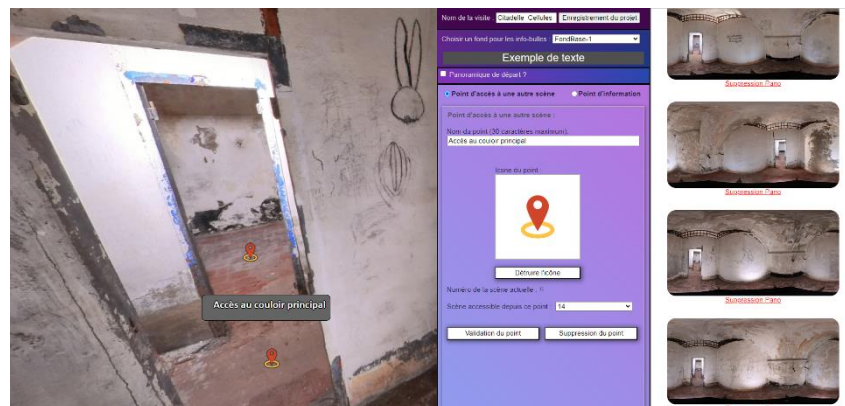


Figure 30 : Interface d'édition de MYRTE.

Pour l'archivage, un espace de stockage a été dédié au dépôt des données et 6 fichiers MEMoS ont été créés et enrichis afin de tracer la manière dont l'acquisition s'est déroulée et afin de connaître la quantité de données traitées. Un exemple des 3 premiers W : Où, Quand et Quoi est visualisable ci-contre sur la Figure 31.

Conclusion

Ce mémoire poursuit la recherche du laboratoire autour des acquisitions patrimoniales et notamment architecturales et à géométries complexes. Grâce à la conception et à la réalisation de l'instrumentation nommée CAMÉLÉON, ainsi qu'aux tests et validation des différents protocoles liés à celle-ci, d'autres expérimentations pourront être menées sur des scènes diverses comme la charpente de Notre-Dame de Paris. Les essais en conditions réelles du dispositif ont révélé sa maniabilité, son efficacité et sa capacité à s'adapter à son environnement faisant de ce montage un outil de référence. Le résultat des traitements sur les données acquises a su mettre en valeur une réelle alternative aux scanners laser 3D plus coûteux. Le double avantage de ces caméras est de pouvoir d'une part reconstituer l'espace en 3D et d'autre part valoriser cet espace en combinant les données photographiques à un outil de visite virtuelle, rendant ainsi le lieu visitable pour tous.

Ainsi, au vu des avancées réalisées lors de ce Travail de Fin d'Études, l'écriture d'un article scientifique est envisagée dans l'objectif de sa présentation lors du Workshop : Low-Cost 3D en décembre 2024.

Un des objectifs de ce TFE était de travailler avec des FLOSS et cet aspect n'a pas pu être développé, étant donné les problèmes de prise en main et de service technique à disposition. La proposition commerciale étant plus maniable mais ayant ce côté « boîte noire » ne permettant pas de décrire précisément les calculs effectués par le logiciel. Des perspectives d'évolution sont possibles pour poursuivre ce travail. Premièrement, la création d'une chaîne opératoire sur fond d'outils libres et flexibles en utilisant des images issues de caméras 360°. Deuxièmement, la réduction de l'impact visuel du dispositif sur les photographies par la création manuelle de masques ou la détection automatique par deep learning, assurerait une meilleure texture à appliquer sur le maillage. Troisièmement, pour la partie valorisation, l'implémentation du nuage de points photogrammétrique sur MYRTE en superposition des images panoramiques est en cours de développement et permettrait de mieux apprécier la géométrie et l'espace dans un environnement de Réalité Virtuelle.

Toutes ces questions et projections sont autant de pistes qui nous invitent à imaginer de nouvelles solutions en utilisant, développant ou associant des outils et méthodes déjà existants, afin de comprendre l'Histoire et de la faire découvrir au plus grand nombre.

Bibliographie

Articles de périodiques électroniques

BARAZZETTI L., PREVITALI M., RONCORONI F. (2017). Fisheye lenses for 3d modeling: evaluations and considerations. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences [en ligne]. **Volume XLII-2/W3**. Disponible sur : <<https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLII-2-W3/79/2017/isprs-archives-XLII-2-W3-79-2017.pdf>>, consulté le 18/03/2024.

BERGEROT L., BLAISE J.-Y., DUDEK I., *et al.* (2022). Combined Web-Based Visualisation of 3D Point Clouds and Acoustic Descriptors: An Interdisciplinary Challenge. MDPI Heritage [en ligne]. Disponible sur : <<https://doi.org/10.3390/heritage5040197>>, consulté le 19/07/2024.

BRUNO N., PERFETTI L., FASSI F., *et al.* (2024). Photogrammetric survey of narrow spaces in cultural heritage: comparison of two multi-camera approaches. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences [en ligne]. **Volume XLVIII-2/W4**. Disponible sur : <<https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLVIII-2-W4-2024/87/2024/isprs-archives-XLVIII-2-W4-2024-87-2024.pdf>>, consulté le 18/03/2024.

GRIWODZ C., GASPARINI S., Calvet L. *et al.* (2021). AliceVision Meshroom: An open-source 3D reconstruction pipeline. Données géospatiales ouvertes, logiciels libres [en ligne]. Disponible sur : <https://hal.science/hal-03351139/document>>, consulté le 18/03/2024.

JANISZEWSKI. M., TORKAN. M., UOTINEN. L., *et al.* (2022). Photogrammetry with a 360-Degree Camera for Tunnel Mapping. MDPI Remote Sensor [en ligne]. Disponible sur : <https://doi.org/10.3390/rs14215494>, consulté le 18/07/2024.

PAMART A., DE LUCA L., Véron P. (2020). A metadata enriched system for the documentation of multi-modal digital imaging surveys. Studies in Digital Heritage [en ligne] Disponible sur : <<https://hal.science/hal-03844472>>, consulté le 17/07/2024.

PERFETTI L., TERUGGI S., ACHILLE C., *et al.* (2022). Rapid and low-cost photogrammetric survey of hazardous sites, from measurements to VR dissemination. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences [en ligne]. **Volume XLVIII-2/W1**. Disponible sur : <<https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLVIII-2-W1-2022/207/2022/isprs-archives-XLVIII-2-W1-2022-207-2022.pdf>>, consulté le 18/03/2024.

PERFETTI L., POLARI C., FASSI F. (2017) Fisheye photogrammetry: tests and methodologies for the survey of narrow spaces. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences [en ligne]. **Volume XLII-2/W3**. Disponible sur : <<https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLII-2-W3/573/2017/isprs-archives-XLII-2-W3-573-2017.pdf>>, consulté le 18/03/2024.

RUPNIK E., DAAKIR M. et PIERROT-DESEILLIGNY. M. (2017). MicMac – a free, open-source solution for photogrammetry. Données géospatiales ouvertes, logiciels libres [en ligne]. Disponible sur : <<https://t.ly/tQIJS>>, consulté le 18/03/2024.

TOMMASELLI M. G., GARCIA T. A. C., CASTANHEIRO L. F., *et al.* (2023). Effects of hyper hemispherical field in bundle adjustment with fisheye images. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences [en ligne]. **Volume XLVIII-1/W1.** Disponible sur : <<https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLVIII-1-W1-2023/503/2023/isprs-archives-XLVIII-1-W1-2023-503-2023.pdf>>, consulté le 18/03/2024.

Table des annexes

Annexe 1 Codes mentionnés dans le texte	44
Annexe 2 Protocole pour la prise de vue dans des pièces de 4m ²	45
Annexe 3 Protocole pour la prise de vue dans des pièces de 26m ²	46

Annexe 1

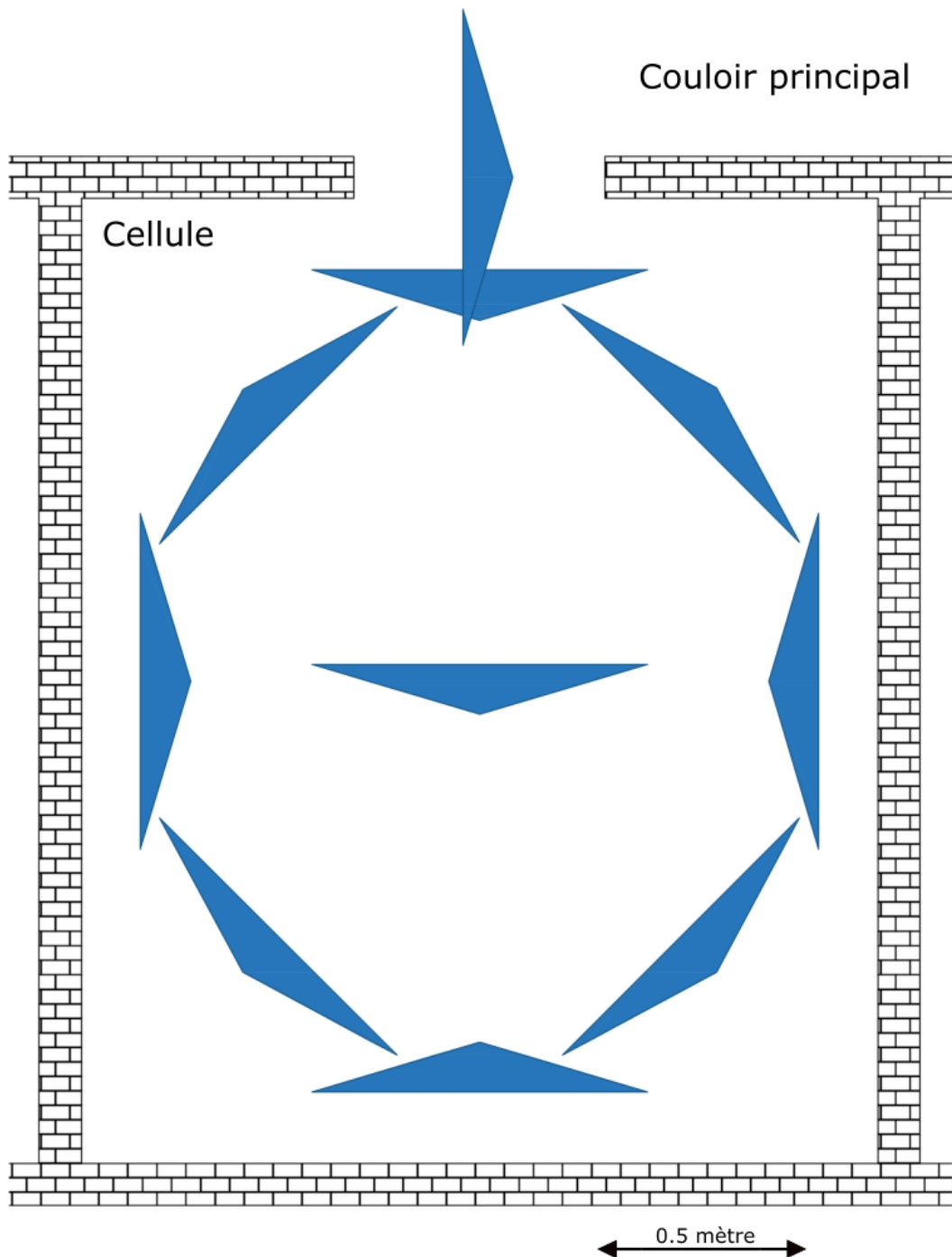
Codes mentionnés dans le texte

<https://zenodo.org/records/12773839>

Le lien Zenodo ci-dessus renvoie vers une page, sur laquelle se trouvent plusieurs fichiers avec une extension .py, qui peuvent s'ouvrir avec un IDLE ou autrement dit un interpréteur Python. Voici la liste détaillée des fichiers s'y trouvant avec leurs fonctionnalités :

- `Equirectangular_to_cubic.py` : ce code transforme une image équirectangulaire en autant d'images cubiques souhaitées et sur autant de lignes souhaitées, les paramètres à modifier sont spécifiés en fin de programme.
- `Equirectangular_to_fisheye.py` : ce code transforme une image équirectangulaire en deux images hyper hémisphériques.
- `Transform_equirectangular.py` : ce code transforme une image équirectangulaire en une autre image équirectangulaire afin de faire tourner son angle de vue dans le but de pouvoir générer deux nouvelles images hyper hémisphériques différentes.

Annexe 2
Protocole pour la prise de vue dans des pièces de 4m²

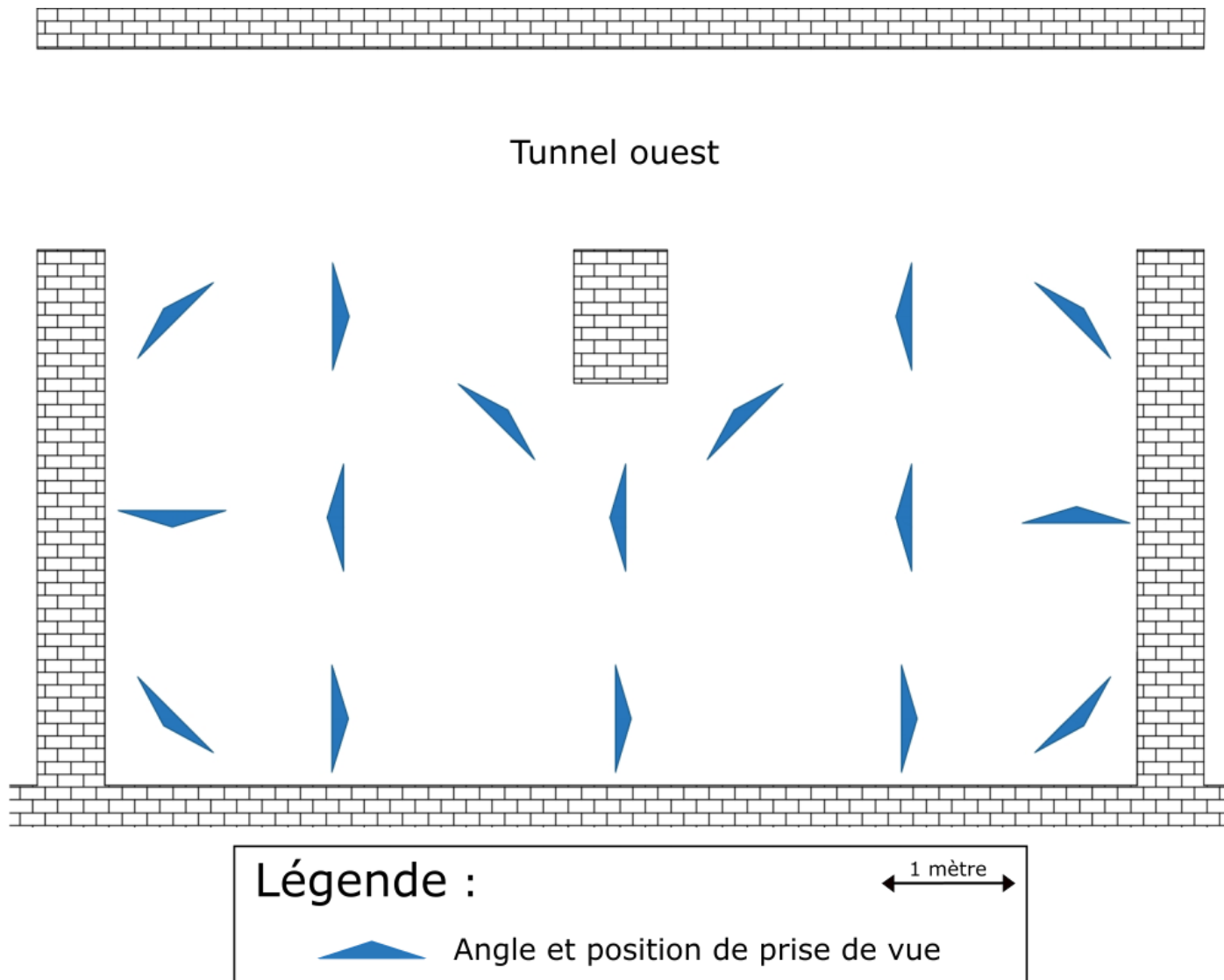


Légende :



Angle et position de prise de vue

Annexe 3
Protocole pour la prise de vue dans des pièces de 26m²



Liste des figures

Figure 1 : L'équipe d'encadrant. De gauche à droite : N.Maillard, F.Comte, L.Bergerot, et A.Pamart.....	2
Figure 2 : Insta360 One R à gauche ; Insta360 X3 à droite.	10
Figure 3 : Double hyper hémisphériques issues de l'Insta360 X3.....	10
Figure 4 : Lykos LED de Manfrotto.....	11
Figure 5 : Bushman HALO	11
Figure 6 : Principales étapes du traitement dans des logiciels photogrammétriques	12
Figure 7 : Exemple d'exécution de la commande « Tapioca ».....	14
Figure 8 : Chaîne opératoire proposée par MicMac.....	14
Figure 9 : Exemple de la chaîne opératoire "Photogrammetry" de Meshroom.....	15
Figure 10 : Image équirectangulaire issue d'un traitement sur Insta360 Studio 2024®.....	16
Figure 11 : Montage LEDs et Insta X2.	19
Figure 12 : Montage 1 avec 2 caméras grand- angle et une caméra 360.....	20
Figure 13 : Montage 2 avec 3 caméras 360.....	20
Figure 14 : Schéma d'acquisition du dispositif dans un couloir.	21
Figure 15 : Mur du sujet de test sur lequel sont accrochés des formes aléatoires et des CCTAG3 disposés de manière homogène.	22
Figure 16 : Transformation d'une image équirectangulaire en 6 images cubiques.	23
Figure 17 : Série de 12 photos cubiques autour de la station de prise de vue.	23
Figure 18 : Transformation d'équirectangulaire à 2 hyper hémisphériques.	24
Figure 19 : A gauche le modèle 1 issu de l'acquisition avec le montage 1 et à droite le modèle 2 issu de l'acquisition avec le montage 2.	26
Figure 20 : Écart entre la référence au laser et les modèles issus des méthode 1 (en rose) et 2 (en rouge).....	27
Figure 21 : A gauche : Couloir principal séparant les cellules ; au milieu : graffitis recouvrant les murs des cellules ; à droite l'aile souterraine ouest.	28
Figure 22 : Vue en plan du schéma d'acquisition du couloir principal séparant les cellules.....	30
Figure 23 : Illustration de l'acquisition du couloir principal par photogrammétrie.....	30
Figure 24 : Vue en plan du schéma d'acquisition du tunnel souterrain de l'aile ouest.....	31
Figure 25 : Illustration de l'acquisition du souterrain par photogrammétrie.	31
Figure 26 : Nuage de points issu du BLK360 G2, pas d'échelle définie.....	31
Figure 27 : Nuage comparatif entre la référence laser et le nuage photogrammétrique des points éloignés de 5 cm et plus, pas d'échelle définie.....	36
Figure 28 : Vue du dessus de tous les scans des cellules. En noir : les zones non couvertes par le laser.	36
Figure 29 : Nuage comparatif entre la référence laser et le nuage photogrammétrique des points éloignés compris entre 2.5 cm et 5 cm, pas d'échelle définie.	36
Figure 30 : Interface d'édition de MYRTE.....	39
Figure 31 : Exemple de structure d'un fichier MEMoS.....	39

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des caméras retenues.	17
Tableau 2 : Tableau récapitulatif du traitement des deux méthodes testées.....	25
Tableau 3 : Récapitulatif tarifaire des différents éléments du Rig.	29
Tableau 4 : Types d'erreur lié à l'assemblage des scans issus du BLK360 G2.	32
Tableau 5 : Tableau des incertitudes obtenues pour le calcul des cellules.....	33
Tableau 6 : Temps des étapes de traitement pour les cellules.	33
Tableau 7 : Tableau des incertitudes obtenues pour le calcul des tunnels.	34
Tableau 8 : Temps des étapes de traitement pour les tunnels.....	34
Tableau 9 : Pourcentage de points compris entre certains intervalles de distances pour les cellules.	36
Tableau 10 : Pourcentage de points compris entre certains intervalles de distances pour les tunnels.	37

Optimisation de la chaîne de traitement photogrammétrique dans des espaces étroits et peu éclairés.

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2024

RESUME

Pour numériser en 3D des couloirs et autres pièces sombres et étroites, la photogrammétrie s'impose comme étant une technique adaptée pour représenter avec précisions les moindres détails de ces espaces. Mais des problématiques techniques comme la luminosité du lieu et où son étroitesse ne permettent pas d'acquérir rapidement et qualitativement des photos suffisamment précises pour effectuer sa reconstruction géométrique. Pour répondre à la demande de la Citadelle de Marseille, cette étude présente la mise en place d'un relevé photogrammétrique dans l'objectif de cartographier les souterrains de la forteresse ainsi que de valoriser cet espace riche en histoire, aux yeux du grand public.

Pour cela, un prototype d'acquisition photographique va être construit en interne. Ensuite des protocoles vont être définis, testés et enfin utilisés sur site pour acquérir la donnée. Et enfin, des solutions gratuites et open-source seront envisagées pour traiter ces photographies et en restituer un espace 3D, visualisable sur le web ou dans un casque de Réalité Virtuelle. Si cette initiative se concrétise, elle sera ensuite utilisée pour numérisation des charpentes de la cathédrale Notre-Dame de Paris.

Mots clés : photogrammétrie, chaîne opératoire, panoramique, 360°, MicMac, Meshroom, Réalité Virtuelle.

SUMMARY

To 3D scan corridors and other dark and narrow rooms, photogrammetry is a suitable technique for accurately representing the smallest details of these spaces. But technical problems such as the brightness of the place or its narrowness do not make it possible to quickly and qualitatively acquire photos, allowing its geometric reconstruction. To respond to the request of the Citadel of Marseille, this study presents the implementation of a photogrammetry survey with the aim of mapping the underground passages of the fortress as well as promoting this space rich in history, in the eyes of the public.

For this, a photographic acquisition prototype will be built internally. Protocols will then be defined, tested and finally used on site to exploit the data. And finally, free and open-source solutions will be considered to process these photographs and restore a 3D space viewable on the web or in a Virtual Reality headset. If this initiative comes to fruition, it will then be used to digitize the frames of the Notre-Dame de Paris cathedral.

Key words : photogrammetry, pipeline, panoramic, 360°, MicMac, Meshroom, Virtual Reality.