



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
جامعة أبي بكر بلقايد تلمسان  
UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID-TLEMEN  
كلية التكنولوجيا  
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

**Mémoire de Projet de Fin d'étude**  
Présenté pour l'obtention du diplôme de **MASTER**  
En : **METIERS DE LA VILLE**

**Spécialité :**

**Géomatique et Gestion du Foncier**

Intitulé

---

**APPORT DE LA LASERGRAMMETRIE A LA  
DOCUMENTAION ET L'ANALYSE DES MONUMENTS :  
APPLICATION POUR LA TOPOGRAPHIE ET LA  
CONSERVATION DU PATRIMOINE**

---

Présenté par : **YECHEKOUR SAMI**

**MOULAI MOHAMMED**

Soutenu publiquement, le 30 / 06 / 2025, devant le jury composé de :

Mr SELKA Chihab	MCA	Université de Tlemcen	Président
Mme DERKAOUI Aicha	MAA	Université de Tlemcen	Examineur
Mme BENZIAN Imane Fazilet	MAA	Université de Tlemcen	Encadrante
Mr KHALFOUNEAlaa Eddine	Doctorant	Université de Tlemcen	Encadrant

## RESUME

Classée monument historique, la Casbah de Melouka est située à 1 400 km au sud d'Alger, dans la wilaya d'Adrar. Malheureusement elle a subi d'importantes dégradations structurelles au fil du temps, rendant nécessaire une intervention de restauration.

Dans ce contexte, notre étude propose l'utilisation de la lasergrammétrie, une méthode innovante permettant d'obtenir une modélisation 3D fidèle du site. Grâce à des équipements performants, cette technique offre un diagnostic précis de l'état du monument et facilite la planification des travaux de restauration.

Ce travail s'inscrit dans une démarche de sauvegarde numérique du patrimoine, tout en valorisant son accessibilité. En effet, les modèles 3D générés peuvent servir de supports interactifs et pédagogiques, adaptés aux nouvelles générations et contribuant à la diffusion culturelle.

**Mots clés :** Lasergrammétrie, Adrar, Casbah de Melouka, patrimoine historique, technologie LiDAR

### ملخص

تقع قسبة ملوكة المصنفة كنصب تاريخي، على بعد 1400 كلم جنوب الجزائر العاصمة بولاية أدرار. لسوء الحظ، عانت من تدهور هيكلي كبير مع مرور الوقت، مما يجعل من الضروري إجراء عملية ترميم.

في هذا السياق، تقترح دراستنا استخدام مقياس الليزر، وهي طريقة مبتكرة للحصول على نموذج ثلاثي الأبعاد دقيق للموقع. بفضل معدات عالية الأداء، توفر هذه التقنية تشخيصا دقيقا لحالة النصب التذكاري وتسهل تخطيط أعمال الترميم. يندرج هذا العمل في إطار مسعى للمحافظة الرقمية على التراث، مع تئمين إمكانية الولوج إليه. في الواقع، يمكن أن تكون نماذج ثلاثية الأبعاد التي تم إنشاؤها بمثابة مواد تفاعلية وتعليمية، ومناسبة للأجيال الجديدة، والمساهمة في الانتشار الثقافي..

**الكلمات المفتاحية:** مقياس الليزر، أدرار، قسبة ملوكة، التراث التاريخي، تقنية ليدار

### Abstract

The Melouka Kasbah is a listed historic monument located 1,400 km south of Algiers in the wilaya of Adrar. Unfortunately, it has undergone significant structural degradation over time, necessitating restoration.

In this context, our study proposes the use of lasergrammetry, an innovative method for obtaining a 3D model of the site. Thanks to high-performance equipment, this technique provides an accurate diagnosis of the condition of the monument and facilitates the planning of restoration work.

This work is part of an approach to the digital safeguarding of heritage, while enhancing its accessibility. In fact, the 3D models generated can serve as interactive and pedagogical media, adapted to new generations and contributing to cultural dissemination

**Key words:** Lasergrammetry, Adrar, Casbah of Melouka, historical heritage, LiDAR technology

# REMERCIEMENTS

Nous souhaitons exprimer notre gratitude aux membres du jury, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail

A Mr SELKA Chihab pour nous faire le grand honneur de présider ce jury.

A Mme DERKAOUI Aicha pour avoir pris le temps d'examiner ce travail, et pour toutes les remarques constructives qu'elle veut bien nous faire.

A Mme Benziane Iman et M. Khalfoun Alaa Eddin pour leur encadrement et leur orientation de ce travail, et pour leur capacité à nous guider et à nous conseiller tout au long de la préparation de cette thèse.

Nous remercions tous les enseignants et responsables de département d'Architecture ainsi que nos camarades de la promotion 2025.

Et enfin, un grand merci à toute personne ayant participé d'une façon directe ou indirecte à la réalisation de ce travail.

Nous tenons expressément et chaleureusement à remercier nos parents pour leurs soutiens leurs encouragements tout au long de nos études

Avec tout mon amour et ma gratitude, j'adresse mes plus sincères remerciements et ma plus grande reconnaissance à mes chers parents, qui m'ont consacré leur vie et m'ont été d'un grand soutien et d'une aide précieuse à chaque étape de mon parcours, ainsi qu'à mes chers frères, qui ont toujours été une source inépuisable de soutien et d'encouragement.

Vous avez toute ma reconnaissance et mon amour. Vous êtes le secret de ma réussite et de ma fierté. ❤️

MOULAI MOHAMMED & YECHEKOUR SAMI

## **JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL :**

➤ A mes très chers parents qui m'ont toujours soutenu pour l'atteinte de mes objectifs.

➤ A mes encadrants :

Pour leurs conseils précieux qui m'ont accompagné tout au long de mon stage, et qui ont en moi une grande confiance.

➤ A tout le personnel qui m'ont permis d'effectuer mon stage dans des meilleures conditions.

➤ A mes chers amis pour vos encouragements, votre amour ainsi que pour :

Les moments inoubliables qu'on a vécus ensemble durant cette année. Bonne chance pour vous aussi.

➤ Et enfin j'espère que ce rapport donnera satisfaction à toutes les Personnes qui auront l'occasion de le lire.

# TABLE DES MATIERES

## 1 Table des matières

<b>INTRODUCTION GENARALE</b> .....	11
<b>I. Problématique : Défier le temps et assurer l’avenir</b> .....	11
<b>II. Hypothèses : La lasergrammétrie, une solution innovante</b> .....	11
<b>CHAPITRE I : CADRE THEORIQUE ET ETAT DE L’ART</b> .....	13
<b>1. Introduction</b> .....	14
<b>2. Définition :</b> .....	14
<b>3. Origines et évolution de la technologie :</b> .....	15
<b>4. La lasergrammétrie</b> .....	15
<b>4.1. Principes de base :</b> .....	15
<b>4.2. Rôle du LiDAR dans la lasergrammétrie :</b> .....	15
<b>4.3. Types et les techniques des capteurs laser utilisés :</b> .....	16
<b>4.3.1. Les types :</b> .....	16
<b>4.3.2. Les techniques :</b> .....	17
<b>4.4. Applications principales de la lasergrammétrie</b> .....	18
<b>4.4.1. Cartographie et modélisation 3D :</b> .....	18
<b>4.4.2. Architecture &amp; génie civil :</b> .....	19
<b>4.4.3. Géologie et études environnementales :</b> .....	19
<b>4.4.4. Utilisation dans la sécurité et la défense :</b> .....	19
<b>4.5. Contribution de la lasergrammétrie à la conservation des monuments :</b> .....	19
<b>4.5.1 Documentation complète du monde archéologique :</b> .....	20
<b>4.5.2. Analyse structurelle &amp; construction avancée de modèles 3D :</b> .....	21
<b>4.5.3. Intégration à d'autres techniques de conservation</b> .....	22
<b>4.5.4. Restauration virtuelle &amp; reconstruction numérique :</b> .....	23
<b>5. Les avantages de la numérisation laser :</b> .....	23
<b>6. Les limites de la numérisation laser 3D dans la construction :</b> .....	24
<b>7. Conclusion :</b> .....	25
<b>CHAPITRE II : MATERIEL, METHODOLOGIE &amp; ACQUISITION DES DONNEES</b> <b>26</b>	
<b>1. INTRODUCTION</b> .....	27
<b>2. Presentation du site:</b> .....	27
<b>2.1. Situation geographies:</b> .....	27

# TABLE DES MATIERES

2.2.	Localisation :	27
2.3.	Historique :	27
2.4.	Classification nationale :	28
2.5.	Principaux matériaux de constructions :	28
3	Matériel utilisé:	30
3.1.	Scanner laser terrestre :	30
3.1.1.	Modèle :	30
3.1.2.	Spécification technique :	30
3.1.3.	Justification de choix :	32
3.2.	Equipements complémentaires :	32
3.2.1.	Sphères &Cible :	32
3.2.2.	Trépied :	33
	33	
3.3.	Configuration informatique :	34
3.3.1.	Configuration matérielle :	34
3.3.2.	Les logiciels de Traitement :	34
3.3.2.1.	Logiciel de prétraitement :	34
3.3.2.2.	Logiciel de modélisation :	35
4.	Acquisition des données:	35
4.1.	Objectifs de l'acquisition des données :	35
4.2.	Planification de relevé lasergrammétrique :	36
4.3.	Processus d'acquisition des données sur site :	36
4.3.1.	Installation du matériel :	36
4.3.2.	Contrôle du relevé :	37
4.3.3.	Enregistrement des données brutes :	37
4.4.	Précision et Fiabilité des Relevés Lasergammétriques : Fondements et Enjeux Scientifiques	38
4.5.	Définitions Fondamentales : Précision & Fiabilité	38
4.6.	Facteurs Influent sur la Précision des Relevés Lasergammétriques	38
4.7.	Facteurs Influent sur la Fiabilité des Relevés Lasergammétriques	40
4.8.	Évaluation de la Précision & de la Fiabilité	40
4.9.	Enjeux Scientifiques de la Précision & de la Fiabilité	41
5.	Conclusion	42

# TABLE DES MATIERES

CHAPITRE III : .....	43
TRAITEMENT, .....	43
ANALYSE & RESULTATS .....	43
1. INTRODUCTION.....	44
2. Fusion & optimisation des données ponctuelles .....	44
2.1. Fusion des données (Multi Scans).....	44
2.1.1. Alignement par cibles :.....	44
2.1.2. Alignement de nuage à nuage (ICP – Iterative closest point) :.....	45
2.2. Stratégies de gestion des recouvrements :.....	46
2.2.1. Lissage adaptatif :.....	46
2.2.2. Élimination des doublons :.....	46
2.2.3. Outils utilisés :.....	47
2.3. Optimisation de la qualité de nuages de points :.....	48
2.3.1. Les techniques de filtrages :.....	48
2.3.2. Réduction de densité :.....	49
2.4. Segmentation et extraction des détails architecturaux .....	50
2.5. Techniques avancées de segmentation :.....	50
2.5.1. Méthodes automatiques : il y a deux méthodes.....	50
2.5.2. Méthodes manuelles : .....	51
2.6. Extraction des détails architecturaux.....	51
2.6.1. Analyse de la courbure locale :.....	51
2.6.2. Cartographie des dégradations : .....	52
3. Modélisation 3D & visualisation .....	52
3.1 Modélisation 3D.....	52
3.1.1. Acquisition des données.....	52
3.1.2. CONSOLIDATION .....	54
3.1.3. MAILLAGE .....	56
3.1.4. INSPECTION.....	58
4. Lasergrammétrie & conservation du patrimoine : .....	59
4.1. Documentation précise et archivage numérique .....	59
4.2. Analyse et diagnostic des structures .....	60
4.2.1. Détection des déformations structurelles.....	60

# TABLE DES MATIERES

4.2.2.	Identification des pathologies superficielles .....	61
4.2.3.	Suivi temporel et monitoring .....	61
4.3.	Support technique à la restauration .....	61
4.3.1.	Production de documents techniques.....	62
4.3.2.	Fabrication de pièces sur mesure .....	63
4.4.	Documentation pérenne & archivage numérique : .....	63
4.4.1.	Préservation en cas de sinistre .....	63
4.4.2.	Base pour la recherche scientifique.....	63
4.5.	Valorisation, sensibilisation et transmission.....	63
4.5.1.	Reconstitution virtuelle .....	63
4.5.2.	Support à la médiation culturelle .....	64
4.5.3.	Transmission aux générations futures .....	65
5.	Conclusion .....	65
CONCLUSION GENERALE .....		66
Références bibliographiques .....		67
WEBOGRAPHIE .....		68

## Liste des figures

Figure 1 : Capteurs stationnaires.....	16
Figure 2: Capteurs mobiles .....	16
Figure 3: Capteurs aériens .....	17
Figure 4 : Mesure par triangulation .....	17
Figure 5 : Mesure par temps de vol .....	18
Figure 6 : Classification LiDAR multispectrale pour la cartographie urbaine - Source LIDAR Mag .....	18
Figure 7 : Acquisition dynamique.....	19
Figure 8 : Modèle 3D en nuage de points obtenu par lasergrammétrie, évêché d'Autun (Saône-et-Loire) (Numérisation et traitements, Camilla Cannoni, 2017).....	20
Figure 9 : Numérisation et traitements, Camilla Cannoni, 2017-2019 .....	22
Figure 10 : Intégration de la photographie haute résolution, de la modélisation 3D et des données géophysiques pour la documentation patrimoniale. ....	22
Figure 11 : Localisation de la Casbah de Melouka.....	29
Figure 12 : Scanner laser terrestre FARO FOCUS 3D X130 .....	30
Figure 13 : Sphère d'alignement    Figure 14 : Cible d'alignement .....	32
Figure 15 : Trépied BENRO .....	33
Figure 16 : Logiciel FARO SCENE .....	34
Figure 17 : Logiciel AUTODESK REVIT .....	35
Figure 18 : Paramètres du scan .....	36
Figure 19 : Visualisation de scan .....	37
Figure 20 : Alignement par cibles.....	45
Figure 21 : Alignement nuage à nuage .....	45
Figure 22 : Lissage adaptif.....	46
Figure 23 : Elimination des doublons avec un seuil de 1 cm.....	47
Figure 24 : Logiciel Cloud Compare V2.14 .....	47
Figure 25 : Image brute de la casbah de Melouka .....	48
Figure 26 : Filtrage statistique sur l'image de la Casbah de Melouka.....	48
Figure 27 : Filtrage morphologique de l'image de la casbah de Melouka.....	49
Figure 28 : Réduction de densité .....	49
Figure 29 : Segmentation automatique .....	50
Figure 30 : Segmentation par plan RANSAC.....	51
Figure 31 : Enregistrement des coordonnées sphériques et nuage .....	53
Figure 32 : Organigramme de la méthodologie du géoréférencement .....	54
Figure 33 : Consolidation de plusieurs scans.....	55
Figure 34 : Fusion des scans 1 et 2. ....	55
Figure 36 : Maillage.....	57
Figure 37: Qualité du maillage .....	58
Figure 38 : Extraction des profils sur le maillage 3D .....	58

Figure 39 : Extraction des profils sur le modèle 3D .....	59
Figure 40 Modèle 3D de la Casbah de Melouka.....	60
Figure 41 : Fissure au niveau des murs.....	61
Figure 42 : Coupe horizontale du monument .....	62
Figure 43 : Coupe verticale du mur .....	62
Figure 44 : Réalité virtuelle d'un patrimoine.....	64
Figure 45 : Médiation culturelle .....	64
Figure 46 : Dossier de vie numérique d'un patrimoine .....	65

## **Liste des tableaux**

Tableau 1 Caractéristiques techniques de Scanner 3D FARO FOCUS X130.....	31
Tableau 2 Caractéristiques techniques de Trépied.....	33
Tableau 3: Configuration PC .....	34

## INTRODUCTION GENARALE

Les monuments archéologiques, avec leur résilience éternelle, sont des témoignages vivants de l'histoire humaine à travers les âges. Ils ne sont pas de simples amas de pierres, mais plutôt le pouls des civilisations révolues et le murmure des peuples qui ont marqué leurs arts, leurs pratiques et leurs créations architecturales. Cependant, à notre époque, ces trésors historiques sont aujourd'hui menacés de disparition par les rigueurs de la nature, les méfaits de l'homme et les ravages du temps. Par conséquent, préserver ce patrimoine architectural n'est pas un luxe, mais une nécessité absolue, dictée par le zèle des peuples pour leur histoire, leur identité et leurs valeurs profondément ancrées.

Chaque nation possède son propre tissu culturel, reflet de son développement historique, artistique, économique et social. L'Algérie, riche d'une histoire métissée de civilisations et de cultures, est un exemple vivant de cette richesse. Son sol regorge de monuments et de vestiges qui racontent l'histoire de sociétés diverses, de l'aube de l'humanité à nos jours.

Au cœur de cette richesse, le « Palais Melouka », dans la Wilaya d'Adrar, brille comme un joyau architectural et historique rare au cœur de l'oasis enchantée du Touat. Construit au XI<sup>e</sup> siècle après J.-C. par la vénérable famille Belbali, ce palais n'est pas seulement un édifice ancien ; il est la mémoire vivante de l'histoire de la région et témoigne de l'ingéniosité de nos ancêtres. Grâce à sa valeur exceptionnelle, il est classé au patrimoine national depuis 1999, servant de phare culturel illuminant le chemin des générations.

Afin de pouvoir conserver encore son histoire à travers les temps, cette étude vient mettre en avant la contribution indispensable des technologies modernes, et notamment de la graphographie laser, dans la lutte pour la préservation de ce précieux patrimoine. Grâce à sa capacité à numériser en trois dimensions avec une extrême précision, la lasergrammétrie offre un outil scientifique innovant pour documenter et analyser les sites archéologiques et proposer des solutions radicales aux problèmes de dégradation auxquels ils sont confrontés.

### **I. Problématique :**

Les monuments historiques sont soumis à une dégradation constante due à des facteurs naturels et humains, menaçant leurs éléments et posant un défi majeur à leur préservation. Afin d'assurer la pérennité de ces trésors pour les générations futures, ce mémorandum se concentre sur la problématique centrale : comment restaurer efficacement les parties endommagées des monuments historiques, tout en préservant leur authenticité et leur intégrité structurelle ? Ce problème exige la recherche de solutions innovantes allant au-delà des méthodes traditionnelles afin d'assurer la pérennité de ces trésors pour les générations futures.

### **II. Hypothèses : La lasergrammétrie, une solution innovante**

Pour relever ce défi complexe, cette étude adopte une hypothèse centrale : la restauration efficace des parties endommagées des monuments historiques peut être réalisée grâce aux techniques de numérisation laser 3D (lasergrammétrie), utilisant des scanners 3D de pointe. Cette technologie, capable de capturer les détails les plus fins et de créer des modèles 3D haute

résolution, permet une compréhension complète de l'état du monument et de localiser les dommages avec une extrême précision, ouvrant la voie à des interventions de restauration éclairées et durables.

Pour approfondir cette problématique, cette étude présente une méthodologie de recherche intégrée, composée de trois parties expliquées comme suit :

- **Première partie** : Cadre théorique et état de l'art

Elle relate des notions à commencer par une introduction complète à la lasergrammétrie, passant en revue ses principes de base ainsi que les technologies et capteurs avancés sur lesquels elle s'appuie. Tout en mettant en évidence l'énorme potentiel de cette technologie dans le domaine de la conservation du patrimoine, en soulignant ses avantages uniques, tout en abordant les défis et les limites que son application peut rencontrer.

- **Deuxième partie** : Matériel, méthodologie et acquisition des données

Ce chapitre fournit un aperçu détaillé du site d'étude, le « Palais de Melouka », avec sa description historique et architecturale. L'article détaille ensuite l'équipement utilisé lors des relevés et la manière dont les données brutes ont été acquises avec une grande précision.

- **Troisième partie** : Traitement, analyse et résultats

Grâce à cette méthodologie rigoureuse, cette étude, appliquée au palais de Melouka, vise à démontrer la faisabilité pratique de la lasergrammétrie pour préserver l'identité architecturale ancienne de l'Algérie et permettre des méthodes de conservation proactives garantissant la pérennité de ce précieux patrimoine pour les générations futures. des opérations de restauration précises en fournissant des analyses sans précédent. Ce mémorandum vise à appliquer cette méthodologie avancée à une sélection de sites patrimoniaux algériens afin de démontrer sa faisabilité pratique pour préserver l'identité architecturale du pays et promouvoir des méthodes de conservation proactives.

---

*CHAPITRE I :*  
***CADRE THEORIQUE***  
***ET ETAT DE L'ART***

---

### **1. Introduction**

Le monde a connu une révolution technologique remarquable ces dernières années, contribuant significativement à différentes époques de la vie. La plus importante de ces innovations est la technologie de numérisation 3D. Les scanners laser (scanners laser 3D) jouent un rôle crucial dans cette transformation, permettant la capture rapide et précise de données spatiales. Les lasers sont en « 3D » et permettent la création de représentations numériques détaillées des structures et des environnements.

Le physicien américain Theodore Maiman est reconnu pour avoir posé les bases de cette révolution, en commençant par le premier laser en 1960. Depuis son apparition à Williston, notamment à Highland et Albury, cette technologie a servi des secteurs tels que l'exploration spatiale et la cartographie de l'assèchement des eaux. Cette recherche vise à explorer la technologie de numérisation laser 3D, en commençant par sa définition et ses principes de base, en passant par les types d'indicateurs et de techniques utilisés, et en arrivant à ses diverses applications dans des domaines tels que la cartographie de lecture, les technologies techniques, la science de l'impact et l'électronique, en se concentrant sur l'assèchement des eaux.

### **2. Définition :**

Le balayage laser, aussi appelée scannage laser 3D, est une technologie permettant d'acquérir des données 3D rapidement et avec une grande précision. Utilisant la lumière laser pour mesurer directement, sans contact avec l'objet et selon une trame régulière. À l'aide de ces mesures, Grâce à ces mesures, un nuage de points est généré, représentant la surface de l'objet ou de l'environnement en trois dimensions.

Ce processus permet d'obtenir une précision millimétrique, les préparant ainsi à des modèles numériques avancés qui capturent avec précision les détails géométriques et structurels les plus fins du monde, s'avérant efficaces et non destructeurs pour le patrimoine culturel. Cette technologie peut également être utilisée pour suivre l'évolution de l'état des biens patrimoniaux au fil du temps, fournissant ainsi des données importantes pour la restauration et l'entretien.

### 3. Origines et évolution de la technologie :

Cette révolution est née de la prouesse du physicien américain Théodore Maiman, qui réussit pour la première fois une émission laser en 1960 (Fuchs, A. 2006).

La lasergrammétrie, aussi appelée relevé par capteur laser, ou encore LiDAR (Light Detection and Ranging), est apparue sous sa forme aéroportée et terrestre dans les années 70. Initialement dédiée à l'exploration spatiale, elle fut notamment utilisée lors de la mission Apollo 15 pour cartographier la Lune (Abshire, J. 2010). Cette technologie a rapidement démontré une performance et une rapidité indéniables. En 1991, la société MENSIS présentait le relevé du Pont Neuf à Paris à la DAPA (Maumont, M, 2010). L'avènement de cette méthode, comme la plus adaptée pour la création de modèles numériques de terrain, dans diverses applications terrestres, était ainsi lancé.

Malgré ses nombreux atouts, la technologie LiDAR n'a été intégrée dans la recherche archéologique que tardivement, les premières expériences datant de la fin des années 90, financées par l'Agence de l'Environnement du gouvernement britannique (Motkin 2001, Holden N. 2002 cité par Nuninge & al. 2008). Ces premières tentatives visaient principalement à démontrer le potentiel du laser pour la découverte de sites archéologiques (remparts, enclos, fossés). La recherche de sites inédits et la cartographie précise de sites majeurs et emblématiques ont ensuite fait l'objet de plusieurs études en Europe (Shell and Roughley 2004, Bewley 2003, Devereux & al. 2005, Doneus and Briese 2006). D'autres approches ont également vu le jour pour révéler d'anciennes structures agricoles dissimulées sous couvert forestier (Sittler 2004, Sittler and Schellberg 2006, Sittler & al. 2007). Enfin, plus récemment, cette nouvelle technologie a radicalement modifié les méthodes de relevé. Elle s'appuie sur une nouvelle génération d'instruments de mesure, les scanners 3D, capables d'enregistrer des millions de points en trois dimensions en quelques minutes, avec une précision de quelques millimètres et une portée pouvant dépasser plusieurs centaines de mètres. Ceci a contribué à démocratiser l'utilisation de cette technologie, rendant possible l'acquisition de données archéologiques pour un public plus large, et pas uniquement pour les chercheurs.

### 4. La lasergrammétrie

#### 4.1.Principes de base :

Le fonctionnement de la lasergrammétrie repose sur l'émission d'impulsions laser par un capteur vers une surface cible. Lorsque ces impulsions touchent une surface, elles sont réfléchies vers le capteur qui calcule alors la distance exacte en fonction du temps que l'impulsion a mis pour revenir. Ce processus est répété des milliers, voir des millions de fois par seconde, créant un nuage de points dense et précis.

#### 4.2.Rôle du LiDAR dans la lasergrammétrie :

Le LiDAR est la technologie sous-jacente de la plupart des systèmes de lasergrammétrie modernes. Il permet de capturer des données sur de vastes zones rapidement et efficacement. Le LiDAR est particulièrement utilisé pour des relevés topographiques, des études environnementales, ou encore pour la cartographie aérienne.

### 4.3. Types et les techniques des capteurs laser utilisés :

#### 4.3.1. Les types :

Il existe plusieurs types de capteurs laser pour la lasergrammétrie, adaptés à différents besoins :

- **Capteurs stationnaires** : fixés sur un trépied, ils sont utilisés pour des relevés détaillés d'objets ou de structures fixes.



*Figure 1 : Capteurs stationnaires*

- **Capteurs mobiles** : montés sur des véhicules ou des drones, ils permettent de scanner de grandes surfaces rapidement.



*Figure 2: Capteurs mobiles*

- **Capteurs aériens** : utilisés principalement pour la cartographie aérienne, ces capteurs peuvent couvrir des zones étendues.



Figure 3: Capteurs aériens

### 4.3.2. Les techniques :

La technique de numérisation diffère selon les capteurs. On distingue deux grandes familles :

#### ❖ Mesure par triangulation :

Elle projette des points ou des lignes laser visibles sur l'objet à numériser et enregistre sur un capteur CCD l'image de ces points ou de ces lignes. Un calcul mathématique transforme l'information en une série discrète de coordonnées 3D. Cette technique permet d'obtenir des mesures très précises, de l'ordre du dixième de millimètre. En revanche, la portée du capteur est limitée à quelques mètres et le mode opératoire demande une luminosité faible, obligeant souvent à intervenir de nuit.

#### Laser Triangulation Measurement Method

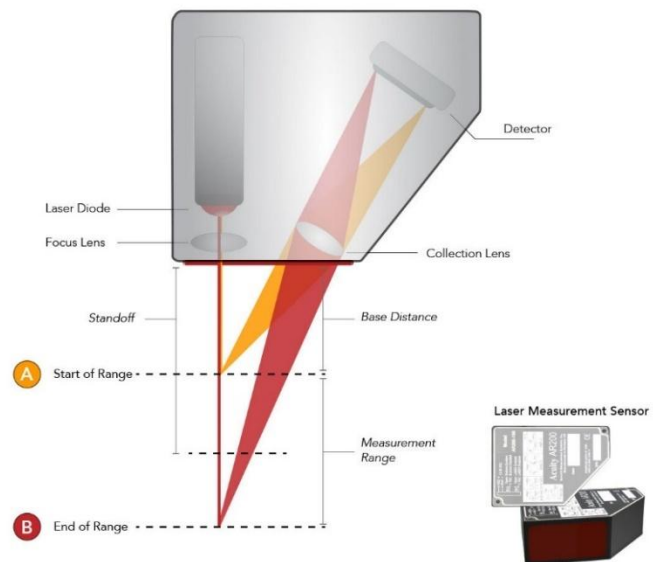


Figure 4 : Mesure par triangulation

### ❖ Mesure par temps de vol :

Elle envoie une impulsion laser et enregistre le temps mis par cette impulsion pour atteindre l'objet à numériser et revenir au capteur.

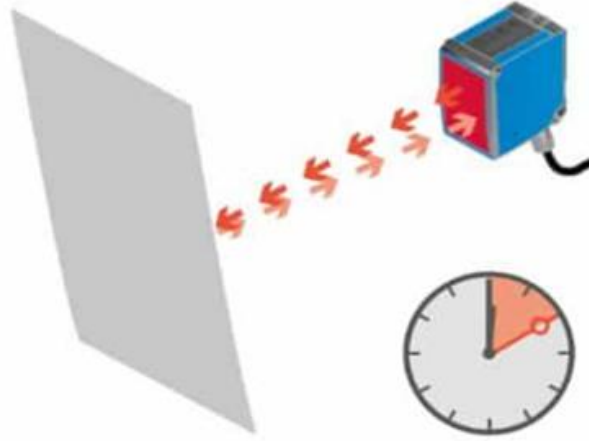


Figure 5 : Mesure par temps de vol

## 4.4. Applications principales de la lasergrammétrie

### 4.4.1. Cartographie et modélisation 3D :

La lasergrammétrie est largement utilisée dans le domaine de la cartographie et de la modélisation 3D. En capturant des données précises sur le terrain ou sur des structures, elle permet de créer des modèles numériques détaillés qui peuvent être utilisés pour la planification urbaine, la gestion des ressources naturelles, et même pour la conception de jeux vidéo.



Figure 6 : Classification LiDAR multispectrale pour la cartographie urbaine - [Source LIDAR Mag](#)

### 4.4.2. Architecture & génie civil :

Dans le secteur de l'architecture et du génie civil, la lasergrammétrie est un outil essentiel pour la restauration de bâtiments, le suivi de la déformation des structures et la construction. Elle permet aux ingénieurs et aux architectes de disposer de données précises pour concevoir et surveiller des projets avec une exactitude sans précédent.

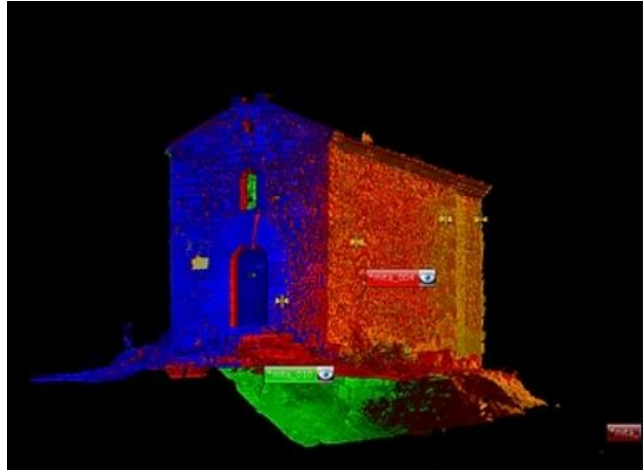


Figure 7 : Acquisition dynamique

### 4.4.3. Géologie et études environnementales :

La géologie et les études environnementales utilisent également la lasergrammétrie pour cartographier des zones difficiles d'accès, surveiller les changements de terrain ou étudier les écosystèmes avec une grande précision.

### 4.4.4. Utilisation dans la sécurité et la défense :

Dans le secteur de la sécurité et de la défense, la lasergrammétrie permet de réaliser des relevés rapides et précis, notamment pour les planifications stratégiques ou l'analyse des scènes de crime.

## 4.5. Contribution de la lasergrammétrie à la conservation des monuments :

Les monuments sont des rappels vivants de l'histoire des civilisations humaines et font partie intégrante de l'identité culturelle d'une nation. C'est donc le devoir de toute la communauté internationale de les protéger et de les préserver pour les générations à venir. En ce sens, la technologie de numérisation 3D, également connue sous le nom de lasergrammétrie, est apparue comme un outil révolutionnaire qui change radicalement les stratégies de conservation du patrimoine culturel. Cette technologie ne se restreint plus à la documentation des monuments. De nos jours, il est essentiel de comprendre leur composition, d'évaluer leur état et de planifier soigneusement les projets de restauration. Il facilite également leur accessibilité en ligne, ce qui renforce notre compréhension de ces monuments et sensibilise le public à leur importance. Cette recherche vise à fournir une étude complète et approfondie de la contribution

de la technologie laser à divers aspects de la préservation archéologique, tout en passant en revue ses applications avancées et ses défis futurs.

### 4.5.1. Documentation complète du monde archéologique :

La première étape, et la plus importante, de toute stratégie de conservation réussie est la documentation précise et exhaustive des monuments archéologiques à l'aide de la technologie laser. En termes de précision et de détail, cette méthode surpasse les contraintes imposées par les techniques de documentation conventionnelles (comme les mesures manuelles et la photographie 2D). La capacité de mesurer avec précision la distance entre chacun des millions de points laser dirigés vers la surface d'un site archéologique est la base de la technologie laser.

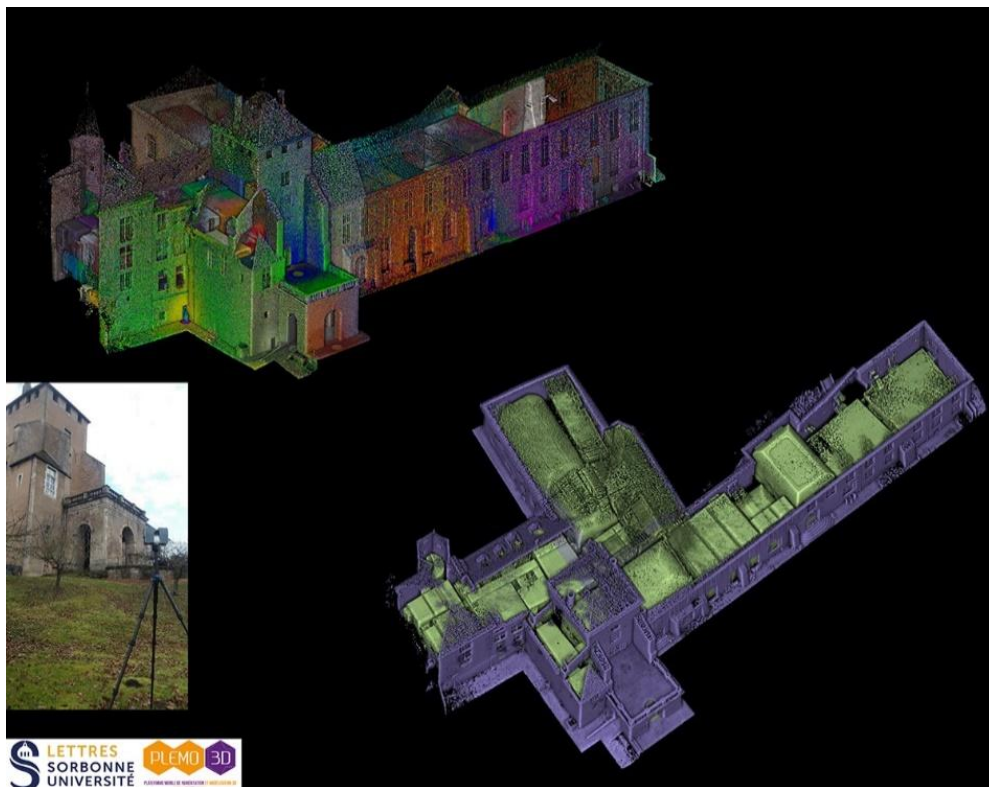


Figure 8 : Modèle 3D en nuage de points obtenu par lasergrammétrie, évêché d'Autun (Saône-et-Loire) (Numérisation et traitements, Camilla Cannoni, 2017).

À la fin de ce processus, une représentation précise des caractéristiques de surface et des mesures géométriques d'une structure ou d'un site archéologique, y compris les plus petits détails architecturaux et décoratifs qui peuvent être difficiles, voire impossibles, à mesurer ou à enregistrer à l'aide de techniques conventionnelles, est produite sous la forme d'un « nuage de points » tridimensionnel. Cet enregistrement numérique complet comprend :

- Enregistrement permanent et actuel : Offrant une base de référence précise et toujours actualisable de l'état d'impact, ce qui permet de surveiller les changements au fil du temps.
- Les modèles 3D qui en résultent sont un outil essentiel pour l'analyse architecturale et historique car ils permettent aux chercheurs, architectes et historiens d'examiner la structure architecturale complexe du monument, de comprendre ses différentes phases de construction, et d'analyser précisément les relations spatiales entre ses

différents éléments, qui permettent de comprendre la conception originale et son évolution dans le temps.

- Un outil visuel puissant pour évaluer les dommages et la dégradation : des modèles 3D détaillés fournissent une représentation visuelle claire des différents dommages et dégradations du monument (tels que les fissures, les pièces manquantes et la corrosion) et estiment leur étendue et leur profondeur, et aidant les experts à prendre des décisions éclairées sur les mesures correctives.
- Un moyen efficace de documenter dans des conditions difficiles : la technologie laser est un excellent moyen de documenter les sites archéologiques dans des environnements dangereux ou difficiles d'accès. Les scanners laser peuvent fonctionner à distance sans contact direct avec la surface, garantissant ainsi la sécurité des travailleurs et préservant l'intégrité du site.

### **4.5.2. Analyse structurelle & construction avancée de modèles 3D :**

Le rôle des modèles 3D générés par la numérisation laser va au-delà de la simple visualisation, devenant un outil puissant pour l'analyse structurelle et constructive avancée des monuments archéologiques :

- Précision de la modélisation des éléments structurels : les modèles 3D permettent de produire des représentations numériques précises de divers composants structurels, notamment les murs, les colonnes, les arches et les dômes. Ces modèles peuvent ensuite être importés dans des logiciels d'analyse technique spécialisés pour évaluer la capacité portante des structures, détecter les faiblesses structurelles et modéliser les effets des forces externes telles que les vents et les tremblements de terre.
- Analyse des déformations et courbures structurelles : toute déformation ou courbure de la structure peut être détectée, ses causes examinées et son risque pour la stabilité du bâtiment évalué en comparant les modèles 3D avec des plans originaux ou des modèles antérieurs.
- Les modèles 3D peuvent servir à évaluer le succès des interventions de restauration antérieures, leur impact sur la structure constitutionnelle et les besoins de renforcement ou d'actions correctives. L'utilisation de modèles 3D pour la planification et la conception d'interventions visant à augmenter la stabilité du bâtiment permet de planifier et de concevoir les interventions nécessaires pour éviter son effondrement. Il est possible de simuler l'impact de ces interventions avant de les mettre en œuvre, afin de garantir leur efficacité et de réduire les risques.

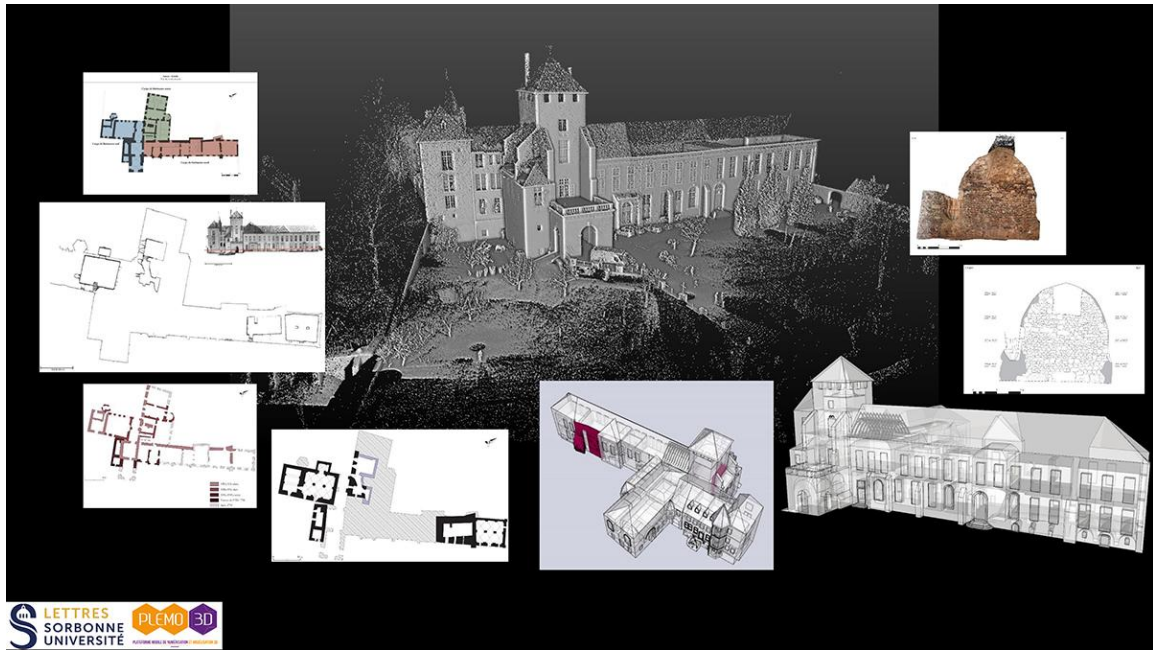


Figure 9 : Numérisation et traitements, Camilla Cannoni, 2017-2019

### 4.5.3. Intégration à d'autres techniques de conservation

La technologie laser est très efficace lorsqu'elle est intégrée à une variété d'autres techniques pour fournir des outils de conservation complets, notamment :

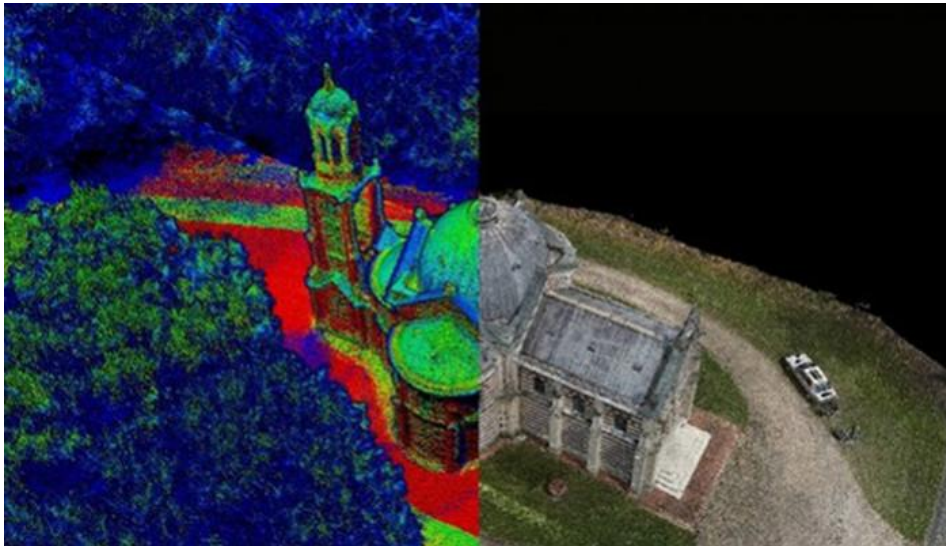


Figure 10 : Intégration de la photographie haute résolution, de la modélisation 3D et des données géophysiques pour la documentation patrimoniale.

- Photographie haute résolution et imagerie numérique : des photographies haute résolution peuvent être superposées sur des modèles 3D pour incorporer des informations de couleur et de texture de manière graphique et réaliste, créant ainsi une documentation visuelle complète pour compléter l'interprétation des détails de surface et de matériau. Un contexte archéologique plus complet pour un élément peut être

obtenu en combinant les résultats d'études géophysiques révélant des structures souterraines enfouies avec des données laser fournissant des informations sur les dimensions visuelles (par exemple, la résistivité électrique et le radar de pénétration du sol).

- Systèmes d'information géographique (SIG) : La gestion et la visualisation des données spatiales relatives à un site archéologique et à ses environs, grâce à l'intégration de modèles 3D dans les SIG, peuvent faciliter la planification d'une gestion et d'une protection efficaces.
- Combinées au balayage laser, les méthodes de spectroscopie non destructive (comme la LIBS et le balayage multispectral) peuvent révéler des informations essentielles sur la composition chimique des matériaux archéologiques et identifier les causes de détérioration sans nécessiter d'échantillons physiques.

### **4.5.4. Restauration virtuelle & reconstruction numérique :**

La technologie laser offre un potentiel énorme dans le domaine de la restauration virtuelle et de la reconstruction numérique de monuments endommagés, partiellement ou totalement détruits par :

- Simulation des changements et de l'évolution au fil du temps, en utilisant des modèles 3D, l'histoire d'un site archéologique, le développement architectural et l'évolution sociale peuvent être simulés visuellement, offrant ainsi des perspectives importantes sur l'évolution du site.
- Reconstruction virtuelle des pièces manquantes des modèles 3D des pièces manquantes peuvent être réalisés et intégrés virtuellement dans les pièces existantes à l'aide de données laser provenant des pièces restantes, d'informations historiques fiables et de dessins originaux.
- Offrir au public des expériences immersives et interactives : des modèles 3D virtuellement recréés peuvent être utilisés pour développer des applications interactives de réalité virtuelle et de réalité augmentée permettant aux visiteurs d'explorer le monument dans sa configuration d'origine et d'interagir avec ses nombreux composants de manière créative et captivante, renforçant ainsi son lien avec le patrimoine culturel.
- Encourager des recherches historiques et scientifiques plus pointues : les reconstitutions numériques offrent aux chercheurs des ressources importantes pour examiner les caractéristiques historiques, artistiques et architecturales des monuments détruits ou gravement endommagés, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives d'apprentissage.

## **5. Les avantages de la numérisation laser :**

- ❖ **Plus grande précision et une meilleure qualité** : le niveau élevé de précision des scanners laser permet de détecter la position exacte des points qui constituent un site et d'obtenir ainsi des résultats de grande qualité : l'équipe de travail peut s'appuyer sur des informations précises qui permettent d'obtenir une image complète de l'ouvrage et de gérer et de planifier au mieux la conception future ;
- ❖ **Temps réduit** : le scan laser permet d'enregistrer une grande quantité de données (position exacte des points) par seconde, en recueillant des informations sur les

structures dans des temps beaucoup plus courts que les méthodes traditionnelles et sans dépense de ressources supplémentaires (imaginons les méthodes de relevé traditionnelles et le personnel technique et toutes les opérations nécessaires pour lever le bâti) ;

- ❖ **Informations rapides** : les informations obtenues à la suite d'un scan sont immédiatement accessibles, ce qui permet d'optimiser les méthodes de travail et la productivité ;
- ❖ **Intégration logicielle** : après le traitement et la transformation des nuages de points, en les nettoyant d'éventuels bruits numériques, ils peuvent être transformés avec des logiciels appropriés en modèles BIM 3D. Le scan-to-BIM fait précisément référence à ce flux de travail : du relevé 3D par scanner laser, en passant ensuite par le traitement des nombreuses données, à la modélisation BIM. Ce processus est très utile pour travailler sur des bâtiments classés, pour des interventions de récupération ou de rénovation, mais aussi pour le relevé de l'environnement nécessaire en cas de nouvelle construction ;
- ❖ **Collaboration efficace** : le modèle 3D généré par la conversion du nuage de points peut être utilisé par les différents professionnels impliqués dans un projet, qui peuvent également travailler à distance tout au long des différentes phases de conception, réduisant ainsi le nombre de visites coûteuses sur place ;
- ❖ **Meilleure coordination** : la génération d'un modèle tridimensionnel de l'ouvrage numérisé améliore les activités de planification du projet en permettant de détecter au préalable d'éventuelles erreurs de coordination qui, découvertes au cours de la phase exécutive, entraîneraient des retards et une augmentation des coûts ;
- ❖ **Amélioration de la sécurité des travailleurs** : l'acquisition de données au moyen de relevés traditionnels à l'aide d'une roue métrique et d'un télémètre laser est souvent peu sûre, en particulier lorsqu'il s'agit de sites difficiles à atteindre, raides ou escarpés. L'utilisation du scanner laser permet aux professionnels de travailler pour protéger leur santé et leur sécurité et l'exposition dans les zones à risque est réduite au minimum car la collecte des données est très rapide et précise ;
- ❖ **Réduction des coûts** : la réduction des temps de relevé permet donc une réduction des coûts, mais pas seulement ! Si la technique permet d'obtenir une meilleure précision dans la mesure, les coûts supplémentaires liés à la location ultérieure de l'équipement, au transport et aux heures de travail sont réduits ;
- ❖ **Scan sans contact** : le scan 3D par scanner laser est l'une des techniques les moins invasives, le faisceau laser émis détecte les informations même des endroits délicats sans le moindre contact ;
- ❖ **Réduction de la main-d'œuvre humaine** : les opérations de laser scanning réduisent considérablement l'utilisation des ressources humaines : un seul opérateur pourra gérer de manière autonome l'ensemble de l'opération d'importance.

### 6. Les limites de la numérisation laser 3D dans la construction :

Si personne n'est parfait, même le scanner laser 3D, dans certaines situations, présente des limites. La déviation de l'exactitude d'un scan peut être :

- ❖ L'humidité ou la lumière excessive d'un environnement ;

- ❖ Le relevé des espaces exposés au mouvement des choses ou des personnes ;
- ❖ Le relevé d'objets particulièrement complexes et riches en géométries cachées ;
- ❖ Le relevé de structures hautement réfléchissantes

Malgré de petits défauts, on peut facilement comprendre que le balayage laser est en constante amélioration et présente un potentiel d'application élevé qui permet de l'utiliser de différentes manières.

### **7. Conclusion :**

La lasergrammétrie n'est plus seulement une technologie topographique ; elle est devenue un système de mesure cognitif qui fournit des outils précis pour visualiser l'espace et le temps selon des normes géométriques strictes. Investir dans la précision et la fiabilité reste la pierre angulaire de tout projet s'appuyant sur des données spatiales, non seulement pour obtenir des résultats immédiats, mais aussi pour prendre des décisions futures fondées sur des connaissances précises et concrètes.

---

*CHAPITRE II :*  
***MATERIEL,***  
***METHODOLOGIE***  
***& ACQUISITION***  
***DES DONNEES***

---

## **1. INTRODUCTION**

Dans le cadre de notre projet de fin d'études, nous avons choisi d'étudier le monument historique de « Melouka ». Ce palais historique est situé dans la commune d'Ouled Ahmed Timmi, à l'ouest du centre-ville d'Adrar, en Algérie. Il a été construit en 1601 par la tribu Belbali comme forteresse défensive. Classé site et monument historiques par décret du 3 novembre 1999, le palais est un exemple remarquable d'architecture "KSOURienne", conçue pour résister aux conditions difficiles du désert. Il abrite un palais de justice et une bibliothèque abritant plus de 300 manuscrits. Ce document examinera l'application de la technologie de numérisation laser à la documentation de ce patrimoine, en présentant les équipements utilisés, tels que le scanner laser FARO FOCUS 3D X130 et son logiciel de traitement, ainsi que les méthodologies de collecte et de traitement des données. Il souligne l'importance de la précision et de la fiabilité de la numérisation 3D pour la préservation et la valorisation du patrimoine.

## **2. Présentation du site:**

### **2.1.Situation géographiques:**

Dans le cadre d'un projet fin d'étude « LASERGRAMMETRIE POUR UN MONUMENT », nous avons choisis le monument historique de 'MELOUKA'.

La wilaya d'ADRAR est située au sud-ouest d'Algérie, à 1431 Km d'Alger, sa position géographiques est de 27°55'45" N & 0°25'22" W, la commune de Ouled Ahmed Timmi est située à l'ouest du centre-ville d'ADRAR.

### **2.2.Localisation :**

Ce monument se trouve à la commune de Ouled Ahmed Timmi, dont sa position géographique est 27°52'22.5" N & 0°20'30.2"W. Il est situé à :

- 1431 km loin de la capitale Alger
- 6.5 Km près de centre-ville d'Adrar
- 16.9 Km près de l'aéroport de Sidi Mohamed Belkbir ADRAR.

### **2.3. Historique :**

Le Ksar de Melouka a été construit en 1601 Miladi / 1010 Hidjri par la tribu de Belbaliyine comme une forteresse contre les envahisseurs, il a été nommé en référence au mode de propriété, qui était antérieur à cette époque par l'achat en espèces.

Ce Ksar est composé d'un palais de justice ainsi que d'une bibliothèque de manuscrits (+ de 300 manuscrites)

La surface foncière du KSAR est de 10 Hectares, pour un périmètre de 400 m, et sa surface bâtie est de 2050 m<sup>2</sup>, pour une hauteur de 6m.

Le style architectural de ce monument est appelé « KSOURIENNE », est un héritage des sociétés saharienne depuis plusieurs siècles, elle est conçue pour résister aux conditions extrêmes du désert.

#### **2.4. Classification nationale :**

Ce site est classé parmi les sites et monuments historiques par arrêté du 03/11/1999, après avis favorable de la commission nationale des monuments historiques émis lors de ses réunions du 18/04/1987, du 7/03/1988, du 17/06/1990, du 30/12/1991, du 19/01/1995, du 05/03/1996, du 13/05/1997, du 24/12/1997, du 24/12/1997, et du 26/07/1998.

Publiée au journal officiel sous le N° 87 du 08/12/1999

#### **2.5. Principaux matériaux de constructions :**

Sa forme géométrique est rectangulaire mesurant 50m x 41m, il est construit par des matériaux locaux, économiques et thermorégulateurs dont les matériaux principaux sont :

**1/ Béton de terre :** Il y a trois types :

- Briques de terre crue moulée (mélange d'argile, sable, paille et eau), séchées au soleil.
- Terre compactée dans des coffrages en bois (murs massifs).
- Mélange d'argile et de fibres végétales (pour les enduits).
- Ce matériau a l'avantage d'une isolation thermique, disponible & à faible coût.

**2/ Pierre :** elle est utilisée dans les fondations pour éviter l'humidité et dans les éléments structuraux comme les angles de murs et les voûtes.

**3/ Bois des palmiers :** il a deux fonctions :

- Poutres pour les plafonds et terrasses,
- Portes et volets.

Ce matériau présente une forte résistance aux termites.

**4 / Chaux & Plâtres :** ils sont utilisés comme enduit : un mélange entre la chaux locale et le sable pour la protection contre l'érosion et pour les décors géométriques sur les façades.

# LA CASBAH DE MELOUKA

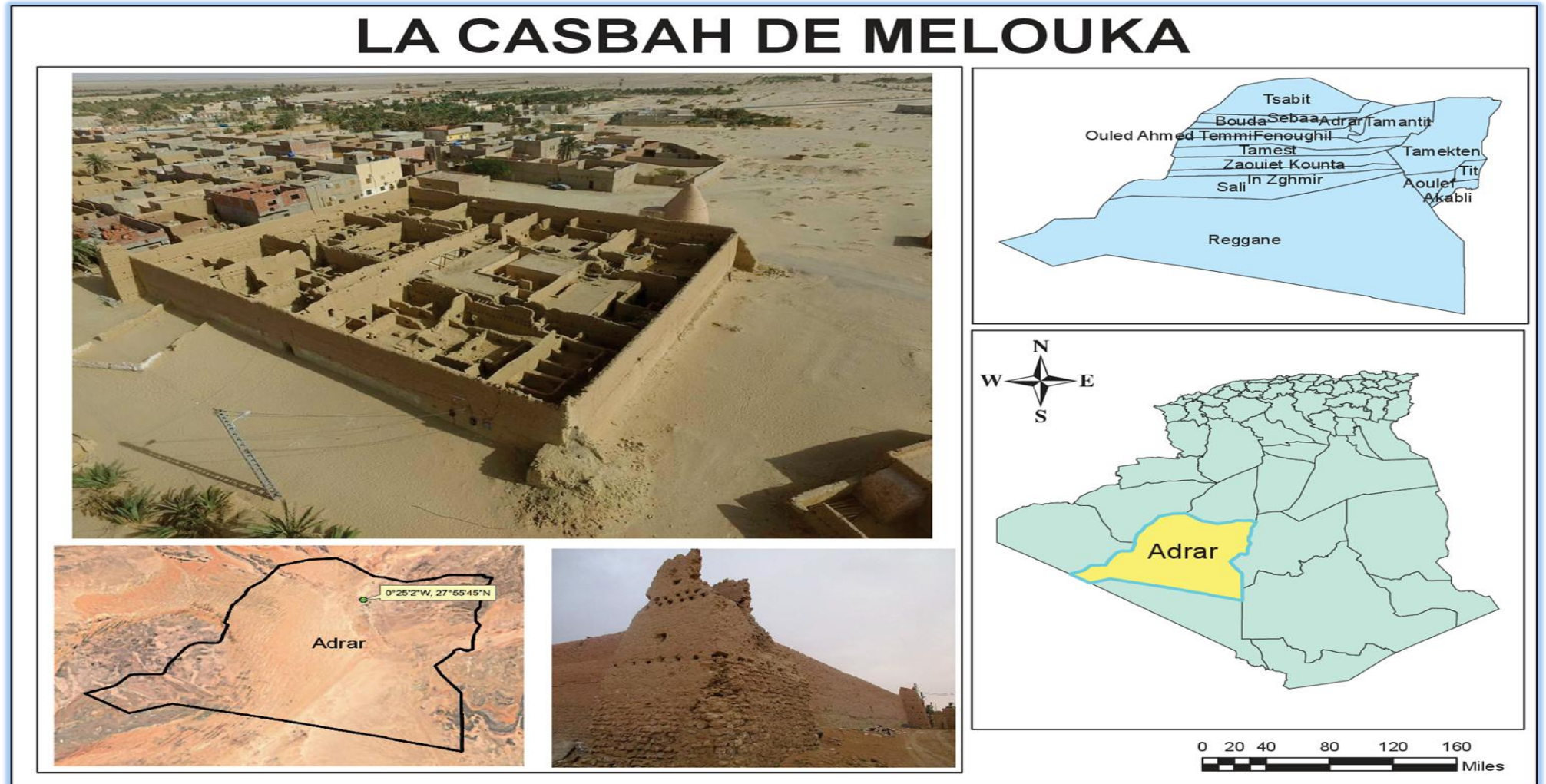


Figure 11 : Localisation de la Casbah de Melouka

### **3. Matériel utilisé:**

#### **3.1. Scanner laser terrestre :**

##### **3.1.1. Modèle :**

Dans ce projet, on a utilisé le scanner **FARO FOCUS 3D X130**, c'est un scanner laser terrestre de moyenne portée puissant et abordable pour les applications de documentations 3D, il est fabriqué par le constructeur Allemand FARO.



*Figure 12 : Scanner laser terrestre FARO FOCUS 3D X130*

##### **3.1.2. Spécification technique :**

Le FARO FOCUS X130 est un scanner 3D à moyenne portée, compact et léger, adapté aux relevés sur terrain, équipé d'un GPS intégré pour la géolocalisation et une caméra HDR pour la prise des photographier, facile à manipuler ainsi que la rapidité d'acquisition des données.

## CHAPITRE II : MATERIEL, METHODOLOGIE & ACQUISITION DES DONNEES

Le tableau qui suit représente les caractéristiques techniques du Scanner :

Tableau 1 Caractéristiques techniques de Scanner 3D FARO FOCUS X130

<u>Paramètres</u>	<u>Valeurs</u>
<b>Technologies</b>	Laser à phase (Phase-Shift)
<b>Portée maximale</b>	130 m (sur surface à 90 % de réflectivité)
<b>Précision</b>	±1 mm à 10 m / ±2 mm à 25 m
<b>Résolution</b>	0,6 mm à 10 m (mode haute résolution)
<b>Vitesse de scan</b>	976 000 pts/sec
<b>Temps de scan</b>	1 min (moyenne résolution) / 4 min (haute résolution)
<b>Vitesse max de rotation de miroir</b>	5820 rpm ou 97 Hz
<b>Champ de vision</b>	360° horizontal × 300° vertical
<b>Stockage</b>	Carte SD (max 32 Go) doit être (80mb/s), Max 32Gb
<b>Connectivité</b>	Wifi, Ethernet, USB
<b>Caméra HDR intégré</b>	165 MP (pour la coloration des nuages de points)
<b>Capteur</b>	Compensateur bi-axial, Baromètre, Boussole, GPS
<b>Classe laser</b>	Classe 1 (sans danger pour les yeux)
<b>Longueur d'onde</b>	1550 nm (infrarouge).
<b>Autonomie de batterie</b>	4.5 heures (batterie lithium-ion amovible) 4900 mAh
<b>Alimentation</b>	19 v (alimentation externe) / 14,4 v (batterie interne)
<b>Température</b>	5° - 40° C
<b>Poids</b>	5,2 kg
<b>Dimensions</b>	240*200*100 mm
<b>Indice de protection</b>	IP54 (résistant à la poussière et aux éclaboussures)

### **3.1.3. Justification de choix :**

Le scanner 3D FARO X130 est conçu pour la capture précise de données 3D, il est idéal pour la lasergrammétrie des monuments, Il offre une portée de scan allant jusqu'à 130 mètres, une précision exceptionnelle et une résolution élevée, et une fréquence d'acquisition de 976 000 points par seconde, permettant de capturer des détails complexes tout en garantissant une efficacité dans le processus de numérisation.

Ainsi que sa légèreté et sa portabilité facilitent son utilisation sur le terrain, tandis que ses fonctionnalités avancées, comme le traitement en temps réel des données, en fait un outil polyvalent pour la documentation et la préservation du patrimoine.

### **3.2. Equipements complémentaires :**

#### **3.2.1. Sphères & Cible :**

Les sphères et les cibles sont des éléments essentiels dans le processus de **numérisation 3D** (scan 3D), notamment pour l'alignement des scans, la calibration et l'amélioration de la précision.



*Figure 13 : Sphère d'alignement*



*Figure 14 : Cible d'alignement*

### 3.2.2. Trépied :

Est un support qui porte le scanner et qui assure la stabilité et la précision lors de scan 3D, il est conçu pour s'adapter parfaitement aux modèles FARO, ce trépied comporte 3 pieds coulissants et un support ajustable pour régler la hauteur du scanner à la demande.

Tableau 2 Caractéristiques techniques de Trépied

Paramètre	Détails
<b>Matériau</b>	Aluminium renforcé (léger et résistant aux vibrations).
<b>Hauteur max/min</b>	2 m (extensions complètes) / 0,8 m (réduit).
<b>Charge max</b>	8 kg (soutient parfaitement le FARO X130 : 5,2 kg).
<b>Tête</b>	Rotule à griffes (serrage rapide) + niveau à bulle intégré.
<b>Pieds</b>	Pointes en acier (sol dur) + embouts caoutchouc (sol lisse).
<b>Poids</b>	2,5 kg (portable).



Figure 15 : Trépied BENRO

### 3.3. Configuration informatique :

#### 3.3.1. Configuration matérielle :

La configuration de l'ordinateur doit être professionnelle (station de travail) pour manipuler de manière efficace les nuages de points, voici dans le tableau 3 les spécifications techniques recommandées :



Tableau 3 : Configuration matérielle.

Composant	Niveau moyen (Petit projet)	Niveau professionnel (grand projet)
<b>CPU (Processeur)</b>	Intel i7 / AMD Ryzen 7	Intel i9 / AMD Ryzen 9
<b>GPU (Carte graphique)</b>	NVIDIA RTX 3060/ RX 6700 XT	NVIDIA RTX 4080 / NVIDIA RTX 4090
<b>RAM</b>	32 Go DDR4	64 Go DDR4
<b>Stockage</b>	1 To NVMe SSD + 2 To HDD	2 To NVMe SSD + 4 To HDD
<b>Ecran</b>	27'' , 4K, 60 Hz, (IPS / OLED)	32'' , 4K, +120 Hz, IPS

#### 3.3.2. Les logiciels de Traitement :

##### 3.3.2.1. Logiciel de prétraitement :

FARO SCENE est un logiciel de la société Allemande FARO pour le traitement et la gestion efficace des données numérisées issues d'un scanner laser FARO (Série Focus, S-série)

En utilisant le logiciel FARO SCENE pour faire le prétraitement des nuages de points :

- Alignement des scans à l'aide des cibles (fusion des nuages de points),
- Nettoyage des points (suppressions de bruit),
- Intégration des photos haute résolution pour la texture,
- Export multi format (FLS, E57, LAS, PLY, PTX).



Figure 16 : Logiciel FARO SCENE

### 3.3.2.2. Logiciel de modélisation :

REVIT, le logiciel de modélisation 3D développé par Autodesk, offre aux architectes un outil puissant pour concevoir, documenter et gérer des projets de construction de manière innovatrice. Grâce à sa technologie BIM, le programme permet de créer des modèles numériques extrêmement détaillés des bâtiments, en intégrant à chaque élément conçu en 3D des informations techniques et fonctionnelles précises.

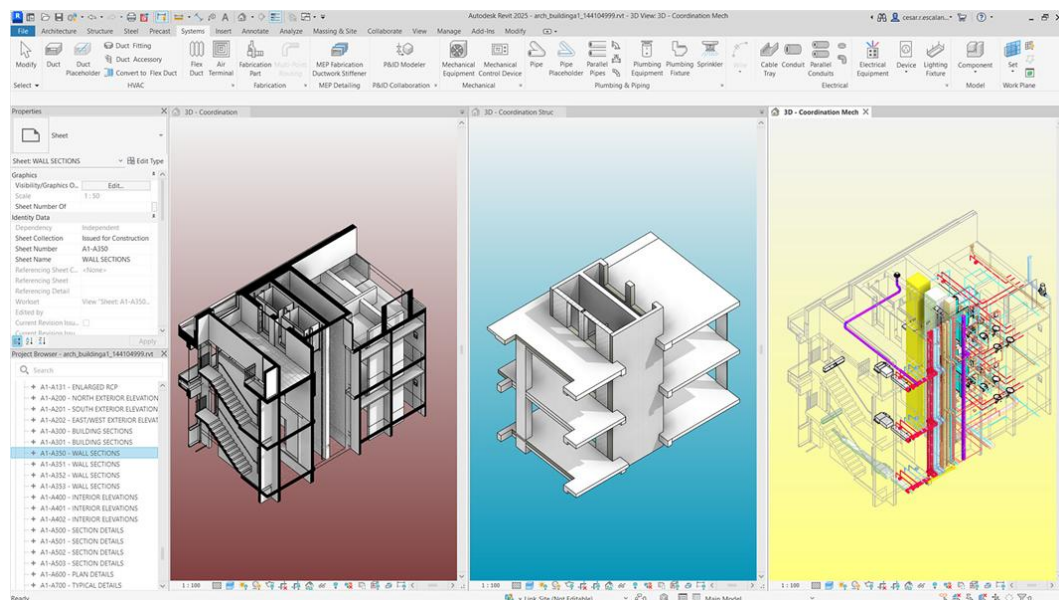


Figure 17 : Logiciel AUTODESK REVIT

## 4. Acquisition des données:

L'acquisition des données est une étape importante dans la réalisation d'un projet de lasergrammétrie d'un monument.

### 4.1. Objectifs de l'acquisition des données :

L'acquisition des données lasergramétriques vise à collecter des informations tridimensionnelles précises sur le site du monument historique dans l'objectif de créer un modèle numérique 3D détaillé qui aide à l'analyse, la préservation, la restauration et la documentation.

A l'aide d'un scanner LiDAR qui émet des impulsions laser pour mesurer la distance entre le scanner et la surface du monument, basées sur la mesure de temps de vol du rayon laser entre l'instrument et le point observé, les données sont ensuite transformées en un nuage de points 3D.

### 4.2. Planification de relevé lasergrammétrique :

Pour assurer une bonne couverture précise du monument, il faut prendre en considération plusieurs facteurs :

- La position de scanner :** Le scanner doit être placé dans des points stratégiques autour du monument de manière à capturer tous les détails et éviter les zones d'ombres.
- Le nombre de positions du scan :** La précision et la densité des points dépendent des nombreuses positions des scans, plus il y a de positions, plus la couverture est complète, dans ce cas il faut équilibrer le nombre de positions avec le temps de scan pour éviter la redondance.
- Paramétrage du scanner :** Suivant la taille du monument et les détails à capturer l'opérateur doit paramétrer la résolution, la qualité et la portée.

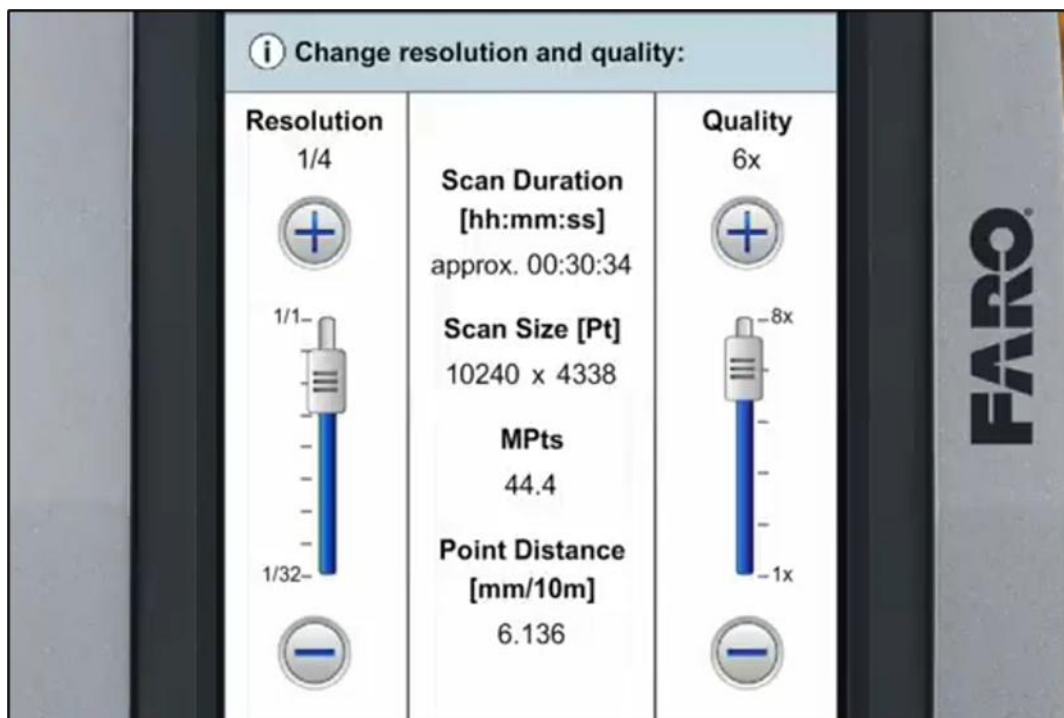


Figure 18 : Paramètres du scan

### 4.3. Processus d'acquisition des données sur site :

#### 4.3.1. Installation du matériel :

Pour bien circonscrire toute opération du levé lasergrammétrique, l'opérateur est sommé de préparer un croquis du site en question, révélant les points exacts des stations à ancrer.

Étant donné que les relevés des monuments se font en grande partie diurne, l'avantage de l'ensoleillement est bénéfique, or, l'inconvénient se situe dans les zones "ombrés" que l'opérateur doit prendre en compte afin d'éviter toute forme de macules.

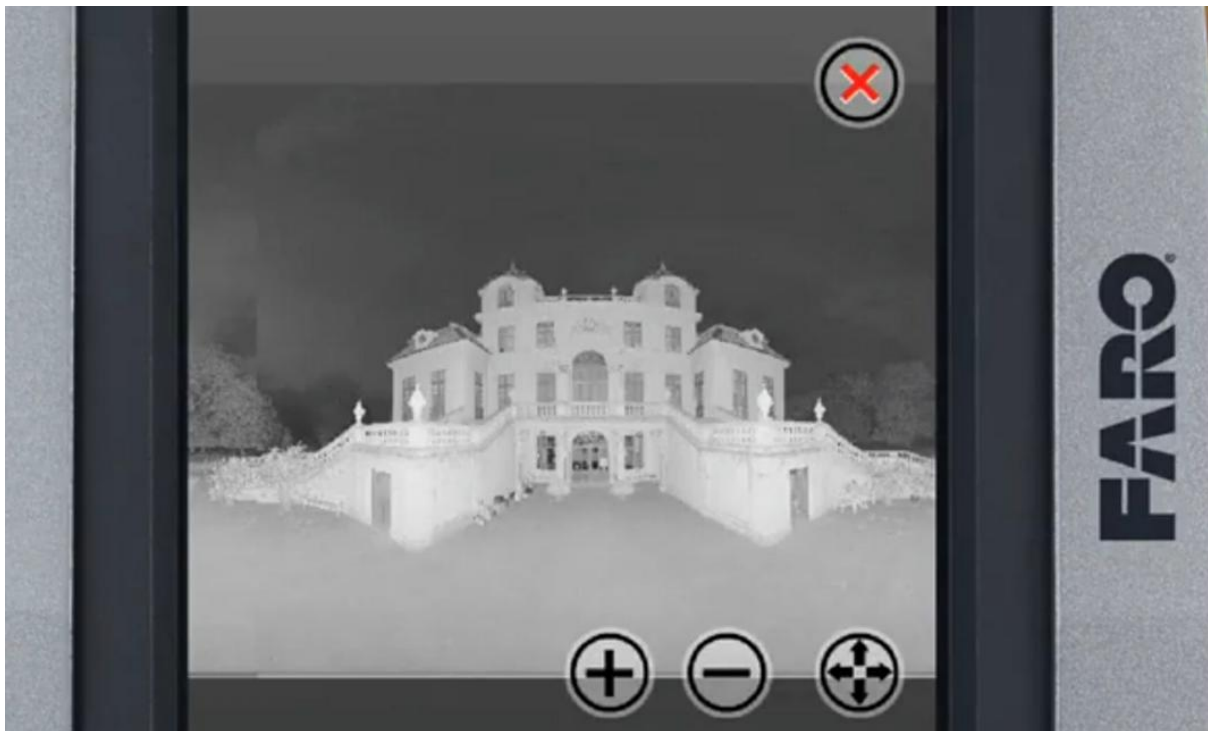
L'installation du Scanner sur le site nécessite un support stable (trépied), l'insertion des paramètres utiles à l'opération va permettre le lancement du Scan, ce dernier a pour mission

d'enregistrer systématiquement les impulsions laser sous forme de nuages de point, il suffit de répéter successivement et de la même façon pour chaque station installée sur le site.

### **4.3.2. Contrôle du relevé :**

La vérification de la couverture du site est conseillée par l'opérateur, une visualisation sur écran (Scanner 3D) qui achève l'acquisition sur le terrain.

En outre, le check permet aussi à informer l'opérateur de certaines carences des zones échappées au Scan primaire.



*Figure 19 : Visualisation de scan*

### **4.3.3. Enregistrement des données brutes :**

Les données brutes sont enregistrées dans la carte mémoire SD du scanner FARO, il faut les insérer sur l'ordinateur, puis ouvrir le logiciel FARO SCENE qui reconnaîtra automatiquement la carte SD et demandera d'importer les données, pour que les scans soient copiés dans un dossier du projet sur logiciel afin de commencer le traitement.

### 4.4. Précision et Fiabilité des Relevés Lasergammétriques : Fondements et Enjeux Scientifiques

La laser gammamétrie est une technologie de numérisation 3D sans contact devenue un outil puissant dans de nombreuses disciplines. Idéale pour l'ingénierie, la topographie et l'observation naturelle, elle est également idéale pour le suivi et la recherche de bâtiments et monuments anciens. Parce qu'elle garantit la qualité et l'exactitude des données obtenues, la précision et la fiabilité de cette méthode de mesure sont primordiales. Cette section explore les concepts de précision et de fiabilité en numérisation laser, en examinant les facteurs qui les influencent, leur évaluation et les défis scientifiques qu'ils posent.

### 4.5. Définitions Fondamentales : Précision & Fiabilité

Il est essentiel de distinguer clairement les concepts de précision et de fiabilité dans le cadre des relevés lasergammétriques :

- **Précision (Accuracy) :** La précision fait référence à la **proximité d'une mesure à la valeur réelle ou acceptée** de la quantité mesurée. Dans le contexte d'un relevé lasergammétrique, la précision indique dans quelle mesure les coordonnées des points acquis dans le nuage de points correspondent aux coordonnées réelles des points sur l'objet ou la surface scannée. Une haute précision signifie que les erreurs systématiques et aléatoires sont minimales.
- **Fiabilité (Reliability) :** La fiabilité, quant à elle, concerne la **cohérence et la reproductibilité des résultats** obtenus lors de relevés multiples effectués dans des conditions similaires. Un relevé est considéré comme fiable si des scans répétés du même objet ou de la même scène produisent des nuages de points similaires avec un faible niveau de variabilité. La fiabilité est étroitement liée à la stabilité du système de mesure et à la minimisation des erreurs aléatoires.

Bien que distinctes, la précision et la fiabilité sont interdépendantes. Un relevé peut être très précis (proche de la valeur réelle) mais peu fiable (des mesures répétées donnent des résultats très différents), ou inversement. L'objectif idéal est d'obtenir des relevés à la fois précis et fiables.

### 4.6. Facteurs Influent sur la Précision des Relevés Lasergammétriques

La précision d'un relevé lasergammétrique est influencée par une multitude de facteurs inhérents à l'instrument, à l'environnement de numérisation et aux procédures de collecte de données :

#### a) Caractéristiques Intrinsèques du Scanner Laser :

- ❖ **Précision de la mesure de distance :** La précision avec laquelle le scanner mesure la distance à un point est un facteur primordial. Elle dépend de la technologie utilisée (temps de vol, déphasage, triangulation) et des spécifications du fabricant.

- ❖ **Précision angulaire** : La précision des encodeurs angulaires qui déterminent l'orientation du faisceau laser affecte la précision du positionnement des points dans l'espace.
- ❖ **Résolution spatiale** : La densité des points acquis et la taille du spot laser influencent la capacité à résoudre les détails fins et donc la précision globale de la représentation.
- ❖ **Calibrage de l'instrument** : Un scanner mal calibré introduira des erreurs systématiques qui affecteront la précision de tous les relevés.

### **b) Conditions environnementales & propriétés de la surface cible :**

Dans la mission de scan 3D, la qualité et la précision dépendent fortement des conditions environnementales et des propriétés de la surface, pour optimiser les résultats il faut prendre en compte ces facteurs :

- ❖ **Distance et angle d'incidence** : La précision de la mesure de distance peut diminuer avec l'augmentation de la distance. De même, l'angle d'incidence du faisceau laser sur la surface affecte la qualité de la réflexion et donc la précision du point mesuré.
- ❖ **Propriétés de la surface** : La couleur, la texture, la réflectivité et la rugosité de la surface scannée ont un impact significatif sur la qualité du signal de retour et donc sur la précision de la mesure. Les surfaces sombres, brillantes ou transparentes peuvent poser des défis.
- ❖ **Conditions atmosphériques** : La présence de poussière, de brouillard, de pluie ou de fortes variations de température peut perturber la propagation du faisceau laser et réduire la précision des relevés.

### **c) Procédures de Collecte de Données :**

Dans une opération de scan 3D, la collecte de données suit une procédure rigoureuse pour garantir des résultats fiables:

- ❖ **Positionnement et stabilité du scanner** : Un positionnement stable du scanner est crucial pour éviter les flous de mouvement et les distorsions dans le nuage de points. L'utilisation de trépieds stables et de systèmes de fixation appropriés est essentielle.
- ❖ **Planification du relevé** : Une planification adéquate, incluant le choix des stations de scan, le recouvrement entre les scans et l'utilisation de cibles de référence, est essentielle pour garantir une couverture complète et une précision optimale lors de l'alignement des différents scans.
- ❖ **Utilisation de cibles de référence** : L'emploi de cibles de référence calibrées avec précision permet de géoréférencer les scans et d'améliorer la précision globale du modèle 3D final. La précision du positionnement de ces cibles est donc un facteur critique.

### **4.7. Facteurs Influent sur la Fiabilité des Relevés Lasergammétriques**

La fiabilité des relevés lasergammétriques est principalement affectée par la consistance des performances de l'instrument et la rigueur des procédures de collecte et de traitement grâce à :

#### **a) Stabilité des instruments :**

- ❖ **Répétabilité des mesures** : Un scanner fiable doit produire des mesures de distance et d'angle cohérentes lors de scans répétés dans des conditions identiques.
- ❖ **Robustesse de l'instrument** : La résistance du scanner aux variations environnementales (température, vibrations) et sa capacité à maintenir ses performances au fil du temps sont des aspects importants de la fiabilité.

#### **b) Consistance des Procédures :**

- ❖ **Protocole de numérisation standardisé** : L'utilisation de protocoles de numérisation clairs et reproductibles pour différents projets contribue à la fiabilité des résultats.
- ❖ **Compétence de l'opérateur** : La formation et l'expérience de l'opérateur dans la manipulation de l'équipement et l'application des procédures de collecte de données sont essentielles pour garantir la fiabilité des relevés.
- ❖ **Méthodes d'alignement et de recalage** : L'utilisation de méthodes d'alignement robustes et la validation de la qualité de l'alignement entre les différents scans sont cruciales pour obtenir un nuage de points final fiable.

#### **c) Logiciels de Traitement :**

Le choix du logiciel de traitement dépendra de vos besoins spécifiques et de la complexité de vos projets :

- ❖ **Stabilité et robustesse des algorithmes** : La fiabilité des résultats dépend également de la stabilité et de la robustesse des algorithmes utilisés pour le traitement des données, notamment pour l'alignement, le filtrage et la création du modèle 3D.
- ❖ **Paramètres de traitement cohérents** : L'application de paramètres de traitement cohérents pour des projets similaires contribue à la fiabilité des résultats comparatifs.

### **4.8. Évaluation de la Précision & de la Fiabilité**

L'évaluation de la précision et de la fiabilité des relevés lasergammétriques est une étape cruciale pour garantir la qualité des données. Plusieurs méthodes sont utilisées :

- ❖ **Utilisation de cibles de contrôle (Check Targets) :** Des cibles dont les coordonnées sont connues avec une haute précision (mesurées par des méthodes géodésiques traditionnelles) sont placées dans la zone de scan. La comparaison des coordonnées de ces cibles extraites du nuage de points avec leurs coordonnées réelles permet d'évaluer la précision du relevé.
- ❖ **Analyse des erreurs de fermeture (Closure Errors) :** Lors de l'alignement de plusieurs scans, l'analyse des erreurs de fermeture entre les boucles de scans fournit une indication de la précision relative et de la cohérence interne du nuage de points.
- ❖ **Comparaison avec des données de référence :** Si des données de référence précises et fiables existent (par exemple, des plans architecturaux validés ou des relevés topographiques antérieurs), la comparaison du nuage de points avec ces données permet d'évaluer la précision du relevé lasergammétrique.
- ❖ **Analyse statistique du nuage de points :** Des outils statistiques peuvent être utilisés pour évaluer la dispersion des points, le bruit et les erreurs potentielles dans le nuage de points.
- ❖ **Réalisation de scans répétés :** Effectuer plusieurs scans du même objet ou de la même scène et comparer les nuages de points résultants permet d'évaluer la fiabilité du processus de numérisation. L'analyse des différences entre les scans fournit une mesure de la variabilité et donc de la fiabilité.

### **4.9. Enjeux Scientifiques de la Précision & de la Fiabilité**

La précision et la fiabilité des relevés lasergammétriques ont des implications scientifiques majeures dans de nombreux domaines :

- ❖ **Sciences du patrimoine :** Dans l'étude des monuments historiques et des sites archéologiques, une haute précision est essentielle pour la documentation détaillée, l'analyse des techniques de construction, la détection des déformations et la planification des interventions de conservation. Une fiabilité élevée garantit que les comparaisons entre des relevés effectués à différentes époques sont significatives.
- ❖ **Ingénierie et métrologie :** Dans le domaine de l'ingénierie, la précision des relevés est cruciale pour le contrôle qualité, l'inspection des structures et la rétro-ingénierie. La fiabilité assure la reproductibilité des mesures et la validité des analyses.
- ❖ **Surveillance environnementale :** Pour le suivi des changements topographiques, de l'érosion côtière ou des mouvements de terrain, des relevés précis et fiables sont indispensables pour détecter des variations subtiles et tirer des conclusions scientifiques valides.
- ❖ **Développement de méthodologies :** L'étude de la précision et de la fiabilité des relevés lasergammétriques contribue au développement de meilleures pratiques, de protocoles standardisés et d'algorithmes de traitement plus robustes.
- ❖ **Interopérabilité des données :** Comprendre et quantifier la précision et la fiabilité des données lasergammétriques est essentiel pour assurer leur interopérabilité et leur intégration avec d'autres sources de données spatiales.

## **5. Conclusion**

En définitive, la lasergrammétrie représente une avancée significative dans la documentation et la préservation du patrimoine historique. Elle utilise des outils et des logiciels pour créer des modèles numériques 3D d'une précision et d'une fiabilité inégalées, capturant des détails invisibles à l'œil nu.

C'est un atout essentiel pour l'analyse, la restauration et la surveillance continue des antiquités. Elle garantit non seulement une documentation exhaustive, mais contribue également à réduire les coûts à long terme de préservation et de restauration du patrimoine. Compte tenu du développement rapide de l'intelligence artificielle, elle aura un impact significatif en améliorant radicalement leur efficacité et en accélérant ces processus, promettant ainsi d'assurer la pérennité de ces trésors culturels pour les générations futures.

---

*CHAPITRE III :*

***TRAITEMENT,***

***ANALYSE &***

***RESULTATS***

---

### 1. INTRODUCTION

Les relevés 3D du patrimoine architectural représentent un changement de paradigme dans la documentation et la préservation numérique des détails les plus fins. Cependant, les données brutes obtenues nécessitent un traitement avancé pour être converties en modèles exploitables.

Ce travail se déroule en deux phases principales : la première consiste à fusionner plusieurs scans laser grâce à un alignement précis (à l'aide de cibles ou de l'algorithme ICP) et à éliminer les distorsions par la gestion des interférences et l'application de techniques de filtrage statistique et morphologique. La seconde phase se concentre sur l'extraction des composants architecturaux par segmentation intelligente (comme DBSCAN et les algorithmes de forêt aléatoire) et l'analyse des propriétés géométriques telles que la courbure et la détection des fissures. Ce cadre méthodologique vise à construire une représentation 3D précise qui facilite le diagnostic structurel et appuie les décisions de restauration.

### 2. Fusion & optimisation des données ponctuelles

Suite à une opération de scan 3D, les données 3D brutes générées sur le terrain nécessitent un travail de post-traitements pour être unifiées et exploitées par la suite.

Cette phase de post-traitement contient notamment des étapes de calcul et d'assemblage des nuages de points unitaires, puis le nettoyage et l'optimisation des nuages de points unifiés.

#### 2.1. Fusion des données (Multi Scans)

La fusion des nuages de points (LiDAR) capturés par plusieurs scans est une étape cruciale pour obtenir un modèle 3D d'un objet scanné, cette opération consiste à regrouper automatiquement les points communs entre deux nuages ou plus pour obtenir une représentation globale d'un monument.

Cette opération a été réalisée à l'aide d'un logiciel qui offre des outils pour aligner, combiner et traiter ces données. Le processus est basé sur deux méthodes d'alignements précises :

##### 2.1.1. Alignement par cibles :

C'est une méthode de haute précision qui utilise l'emplacement des cibles sphériques de manière stratégiques pour fusionner des nuages de points issus de multiples stations de scan offrant une précision submillimétrique ( $\leq 1$  mm) et une reproductibilité élevée grâce au logiciel FARO SCENE.

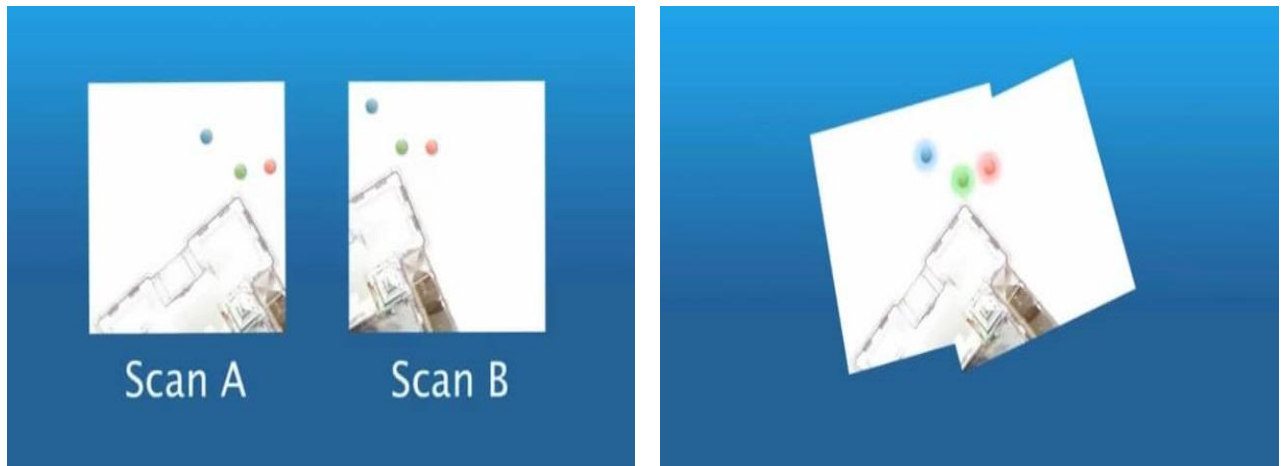


Figure 20 : Alignement par cibles

### 2.1.2. Alignement de nuage à nuage (ICP – Iterative closest point) :

C'est un algorithme mathématique qui utilise les caractéristiques géométriques (rotation / translation) afin d'aligner les points communs de deux scans successifs sans utiliser les cibles, sachant que la distance maximale de correspondance est de 5mm et le nombre d'itération entre 100 -200.

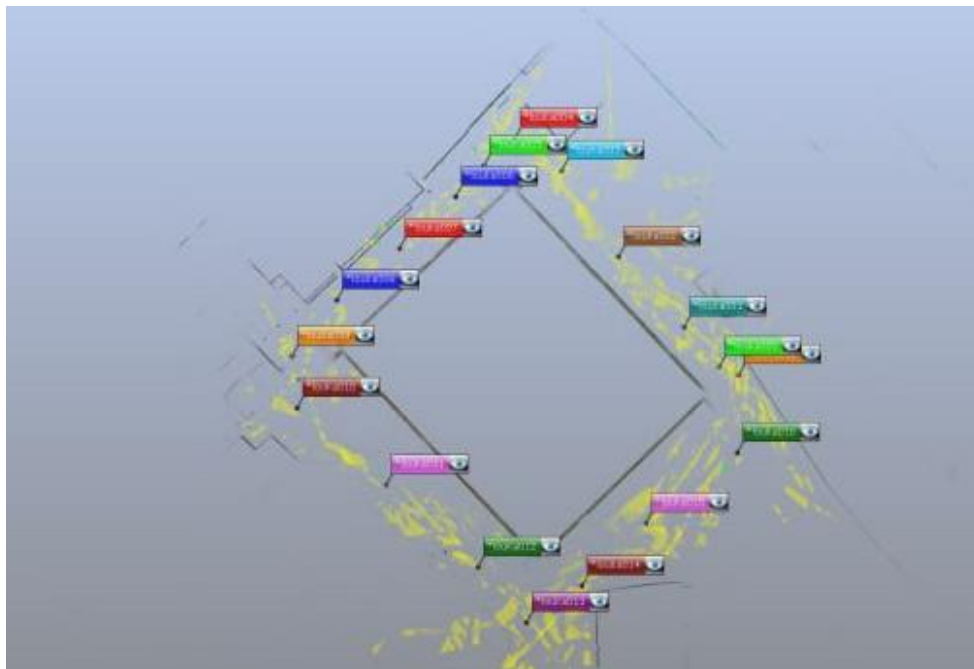


Figure 21 : Alignement nuage à nuage

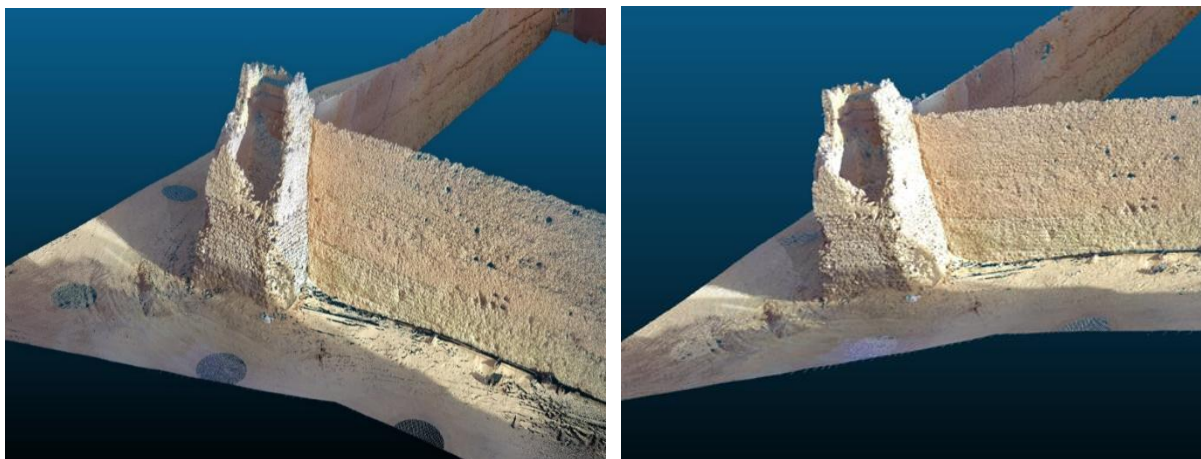
## **2.2. Stratégies de gestion des recouvrements :**

La stratégie de gestion des recouvrements désigne l'ensemble des méthodes et outils utilisés pour traiter plusieurs nuages de points se superposent dans plusieurs scans successifs.

Une gestion optimale des recouvrements combine lissage adaptatif, nettoyage des doublons et réduction de données ciblée.

### **2.2.1. Lissage adaptatif :**

Le lissage adaptatif est une technique de post-traitement des nuages de points dans le but d'homogénéiser les zones de recouvrement entre plusieurs scans, cette technique utilise la moyenne pondérée qui attribue des poids variables aux données en fonction de leur fiabilité ou de leur similarité avec le point central.



*Avant lissage*

*Après lissage*

*Figure 22 : Lissage adaptif*

### **2.2.2. Élimination des doublons :**

Cette étape est indispensable dans le traitement, consiste à éliminer les redondances lors de l'acquisition par scanner 3D, la fusion des nuages de points ou la reconstruction algorithmiques des nuages.

En appliquant des seuils de distance précis (ex. : 1 mm) pour éviter les artefacts lors de la modélisation ou de l'analyse.

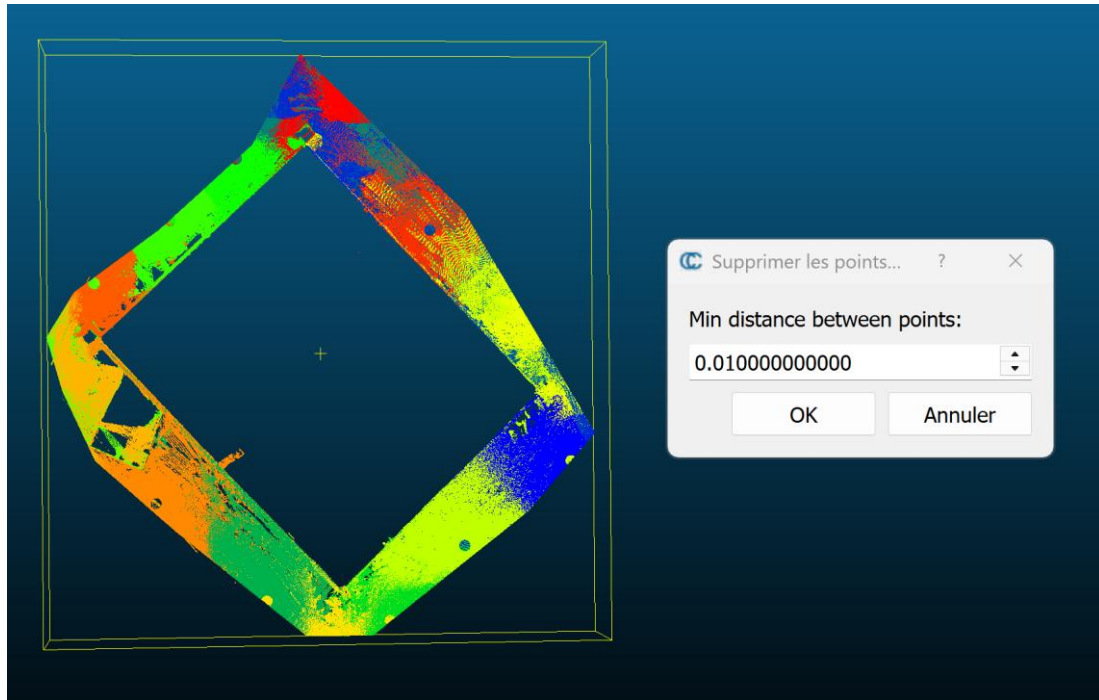


Figure 23 : Elimination des doublons avec un seuil de 1 cm

### 2.2.3. Outils utilisés :

Le logiciel Cloud Compare est open source (gratuit) idéale pour la lasergrammetrie, destiné à l'édition et le traitement des nuages de points 3D ainsi que le maillage surfacique triangulaire.

Il a été initialement créé pour effectuer des comparaisons entre deux nuages de points 3D denses obtenus par le scanner 3D.

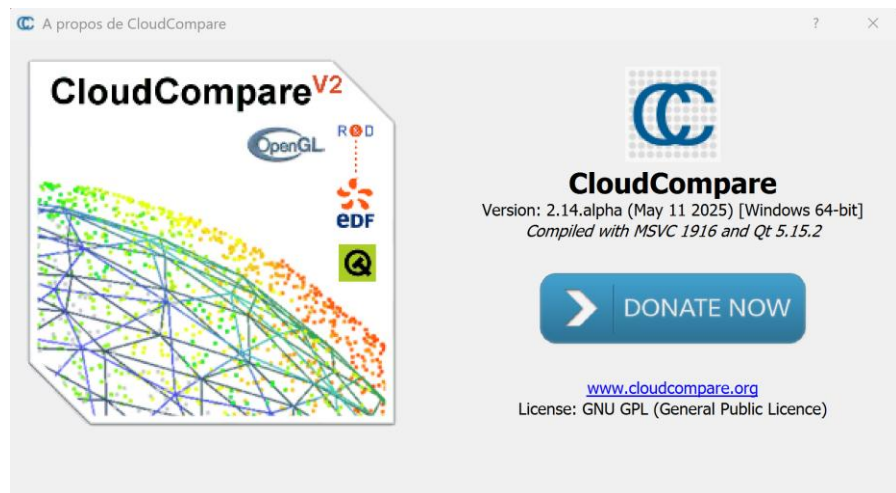


Figure 24 : Logiciel Cloud Compare V2.14

### 2.3. Optimisation de la qualité de nuages de points :

Cette étape est réalisée pour garantir des données 3D précis et exploitables dans les applications de modélisation 3D.

Cette étape a pour un objectif de réduire le bruit, homogénéiser la densité des points et préserver les détails géométriques en utilisant deux méthodes :

#### 2.3.1. Les techniques de filtrages :

Ce sont des techniques utilisées pour éliminer les bruits et optimiser la qualité d'un nuage de points,

Il y a deux types de filtrages :



Figure 25 : Image brute de la casbah de Melouka

#### a) Filtrages statistiques :

Il vise à éliminer les aberrant (bruits) en analysant la distribution des distances entre deux points voisins et uniformiser la densité du nuage de point. Le seuil de  $1.5$  à  $2.0 \sigma$  dans un filtrage statistique des nuages de points signifie qu'on élimine les points qui s'écartent trop fortement sont considérés comme un bruit.

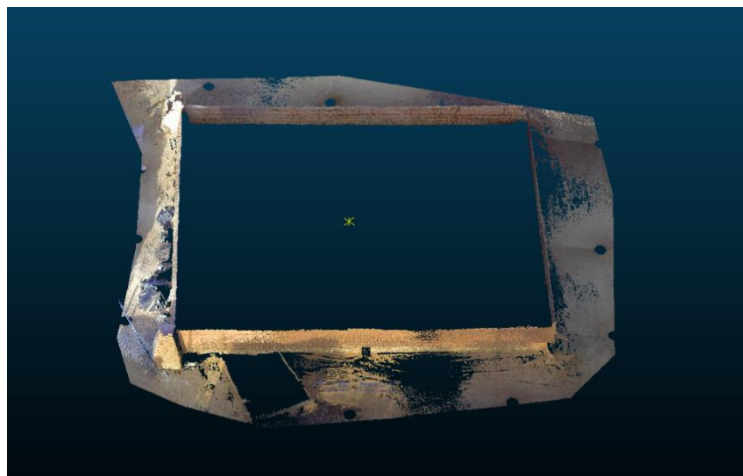


Figure 26 : Filtrage statistique sur l'image de la Casbah de Melouka

**b) Filtrages morphologiques :**

C'est une technique utilisée pour optimiser la qualité des nuages de points en éliminant les parasites en préservant les structures géométriques importante en utilisant les opérations de morphologies mathématique repose sur l'analyse de la forme locale des objets.

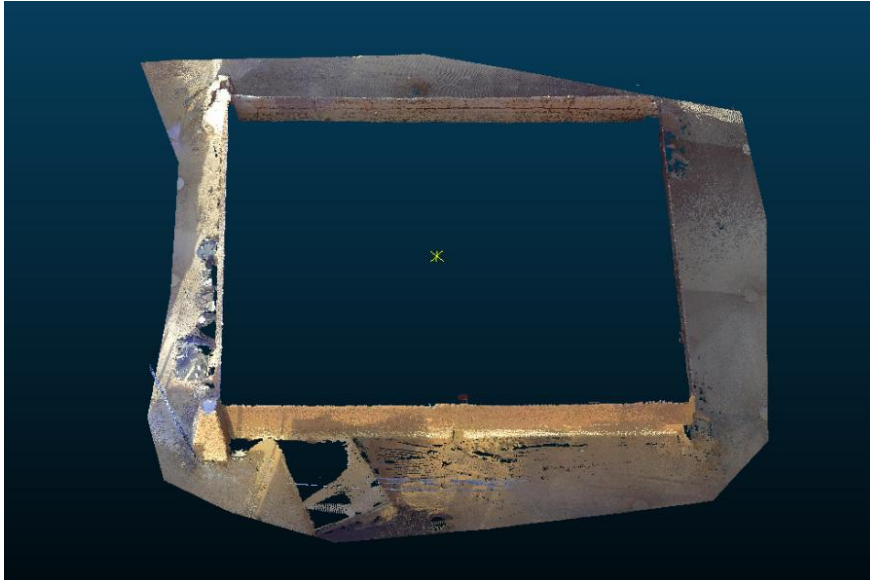


Figure 27 : Filtrage morphologique de l'image de la casbah de Melouka

**2.3.2. Réduction de densité :**

C'est une technique qui permet de réduire la taille des données toutes en maintenant la précision géométrique et préservant les caractéristiques topologiques.

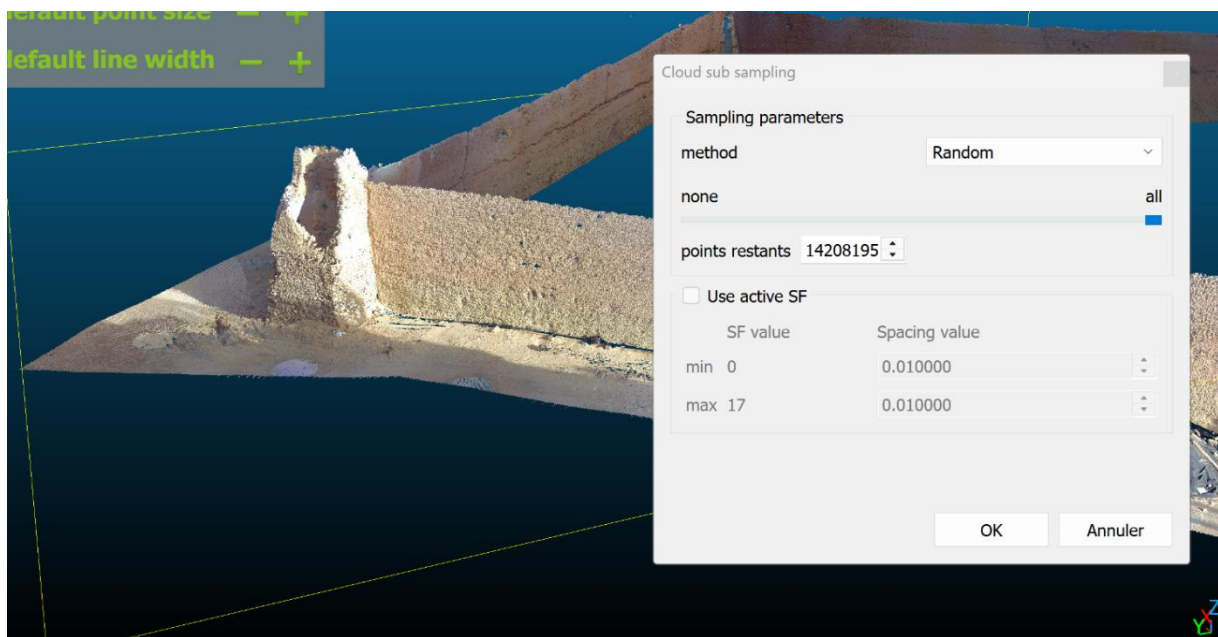


Figure 28 : Réduction de densité

## 2.4.Segmentation et extraction des détails architecturaux

Les nouvelles techniques LiDAR permettent d'acquérir rapidement un volume important de données 3D. Actuellement, les phases de post traitement restent très chronophages, allongeant le délai effectif entre l'acquisition et l'extraction des produits dérivés. Une partie importante de la recherche en lasergrammétrie porte sur l'optimisation et l'amélioration des processus d'analyse et de production 3D. Parmi ceux-ci, la segmentation est une étape essentielle dans la chaîne de traitement de nuage de points.

Son but est d'extraire d'un large volume de données 3D différents groupes qui partagent un lien logique pour les considérer comme une même entité.

## 2.5.Techniques avancées de segmentation :

La segmentation des nuages de points permet d'isoler les murs, les colonnes, les arcs, ou encore les ornements décoratifs. Elle est indispensable pour une analyse détaillée ou une modélisation fine, elle repose sur deux méthodes :

### 2.5.1. Méthodes automatiques : il y a deux méthodes

#### a) DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise):

C'est un Algorithme de clustering basé sur la densité locale qui regroupe les points voisins selon un rayon critique et identifie les points isolés comme bruit, son avantage est de détecter automatiquement le nombre de clusters sans paramétrage préalable.

Cette méthode est parfaite dans des environnements bruités où les structures présentent des continuités géométriques.

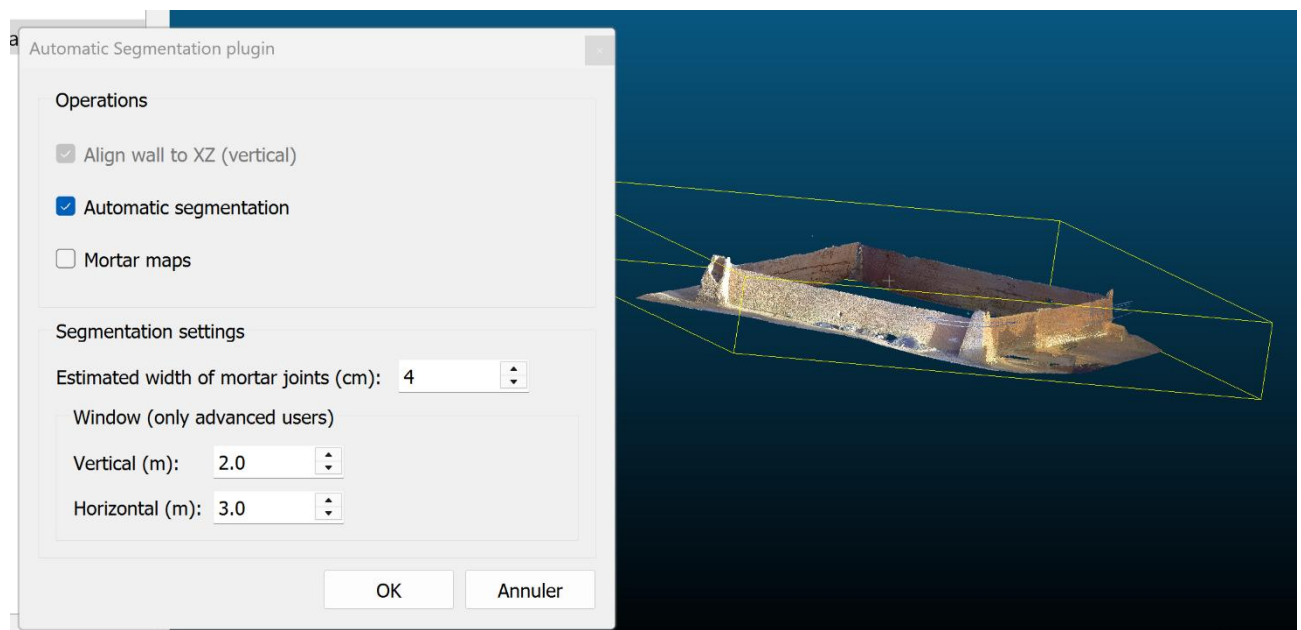


Figure 29 : Segmentation automatique

b) **Random Forest (Forêt aléatoire) :**

C'est un algorithme d'apprentissage supervisé permettant de classifier les points en fonction de caractéristiques locales (normales, courbures, intensité du signal).

Cette méthode nécessite un entraînement préalable sur des bases de données annotées spécifiquement aux structures architecturales.

**2.5.2. Méthodes manuelles :**

a) **Segmentation par plans RANSAC :**

C'est une méthode robuste qui permet d'extraire des formes (plans, cylindres, sphères) en sélectionnant aléatoirement des groupes de points et en construisant la géométrie primitive correspondante.

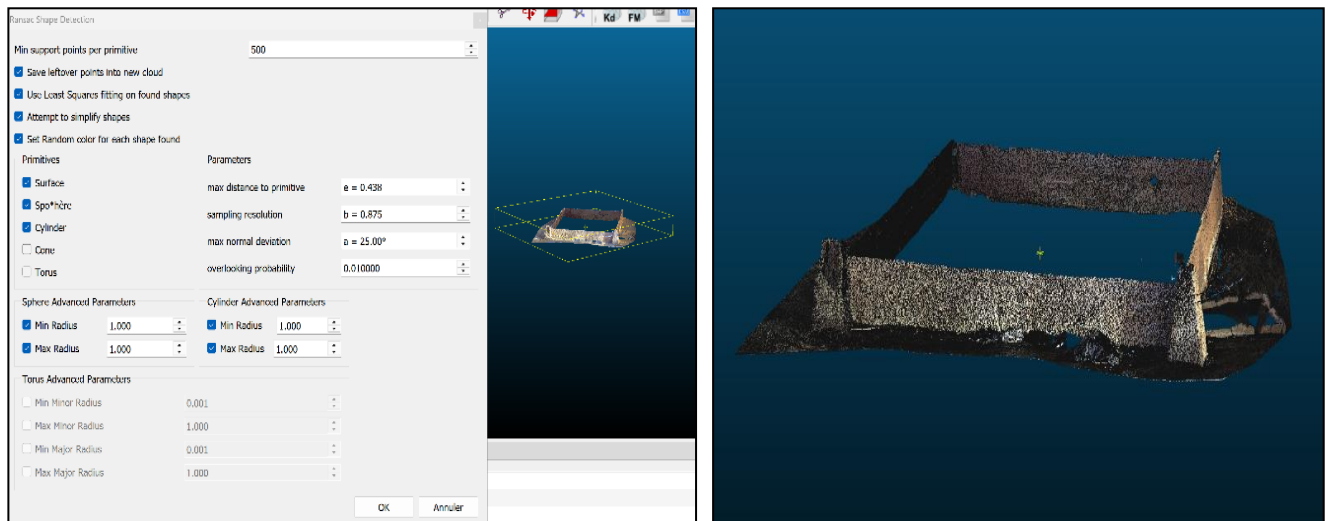


Figure 30 : Segmentation par plan RANSAC

**2.6.Extraction des détails architecturaux**

La technologie lasergrammétrique permet de capturer les détails architecturaux fines avec une grande précision par des mesures directes en 3D, ce qui est praticable pour numériser des anciens monuments même s'ils sont endommagés.

**2.6.1. Analyse de la courbure locale :**

C'est une technique qui permet de localiser les éléments comme moulures, sculptures ou usures en utilisant la méthode statistique ACP (l'analyse de composantes principales) qui permet d'étudier la structure locale d'un nuage de point dans un espace multidimensionnel en identifiant les directions principales de variation.

Dans un projet de numérisation par scanner 3D l'ACP est utilisé pour :

- ❖ Estimer les normales locales aux surfaces,
- ❖ Détecter des bords, des arêtes ou des zones planes,
- ❖ Calculer des courbures locales.

### **2.6.2. Cartographie des dégradations :**

C'est une représentation graphique géoréférencée d'un monument, dans le but de diagnostiquer son état et planifier des interventions, elle est essentielle dans la gestion, restauration et la conservation du patrimoine.

#### **a) Détection de fissures**

La détection de fissures est une étape cruciale dans le diagnostic d'un patrimoine, à l'aide d'un relevé lasergrammétrique. Il est possible de localiser et d'identifier les désordres structurels et évaluer la gravité tout en suivant leur évolution avec le temps.

L'application de filtres sur les dérivées géométriques constitue une méthode avancée pour la détection des microfissurations souvent invisibles à l'œil nu lors d'une inspection visuelle classique. Ces microfissures peuvent être mises en évidence grâce à une analyse fine des variations locales de géométrie dans les nuages de points de haute densité.

À l'avenir, l'intégration croissante de l'intelligence artificielle et du Deep Learning dans les chaînes de traitements lasergrammétriques ouvre de nouvelles perspectives pour automatiser l'analyse, détecter les altérations précoces, et améliorer la conservation préventive.

## **3. Modélisation 3D & visualisation**

La lasergrammétrie est une méthode qui emploie des scanners laser pour enregistrer précisément la forme d'objets, structures ou environnements en 3D et en effectuer la modélisation. En conjonction avec la modélisation en trois dimensions et la visualisation, cela permet d'élaborer des représentations numériques précises employées dans plusieurs domaines tels que l'architecture, l'archéologie, l'industrie et la topographie.

### **3.1. Modélisation 3D**

La modélisation 3D est un processus créatif qui transforme une idée ou un concept en un objet virtuel en trois dimensions. C'est une compétence clé dans de nombreux domaines tels que l'animation, le jeu vidéo, l'architecture, le design industriel, la publicité, et bien d'autres.

Voici les étapes principales de la modélisation 3D :

#### **3.1.1. Acquisition des données**

Il s'agit d'une étape cruciale dans tout processus d'analyse, de modélisation ou de prise de décision. Il s'agit de la collecte d'informations pertinentes provenant de différentes sources pour atteindre un objectif spécifique. Il permet de combiner des nuages de points bruts (en utilisant différentes méthodes) et de créer un nuage unique, s'il peut être géolocalisé.

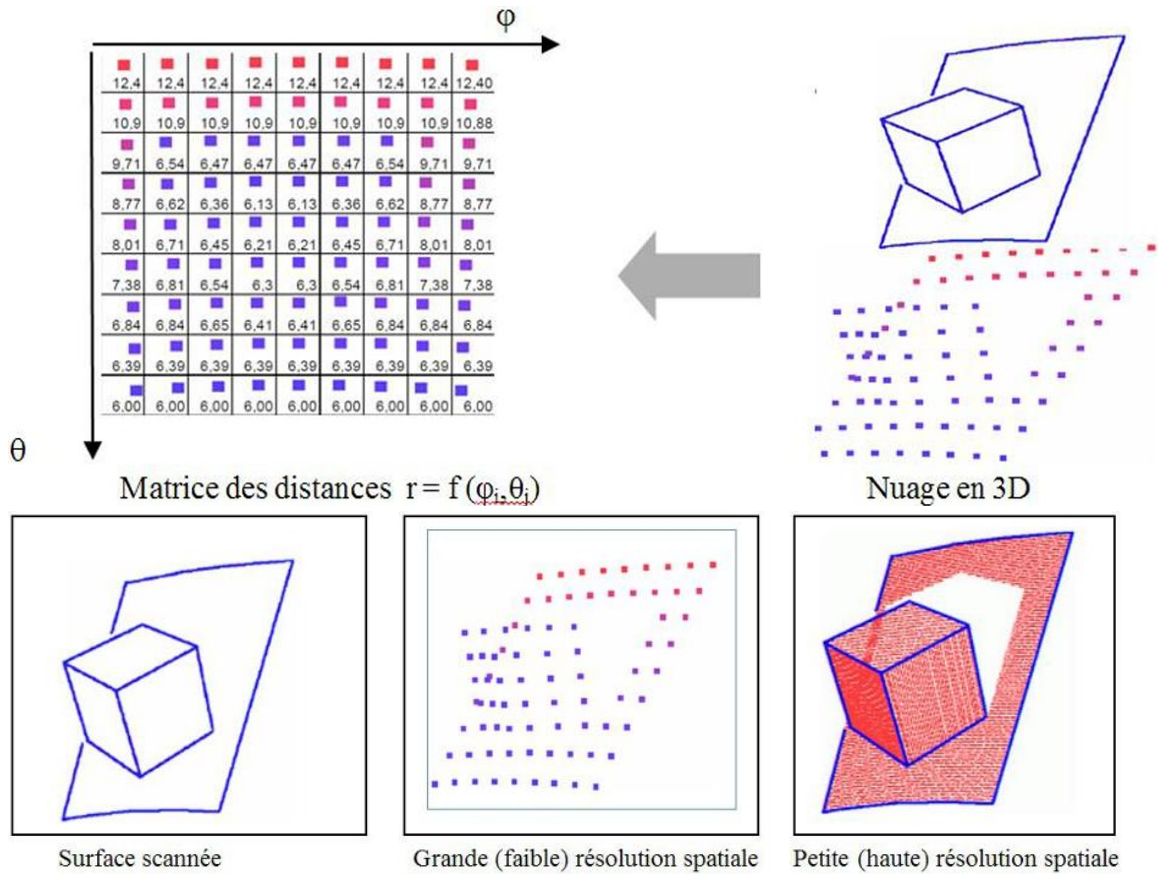


Figure 31 : Enregistrement des coordonnées sphériques et nuage associé (Pfeifer, 2007 modifié)

Sources courantes : LiDAR, scanners 3D, ou données CAD existantes.

Format brut : Souvent des fichiers. .Las ; .laz ; .xyz ; .ply ; où .pcd ;

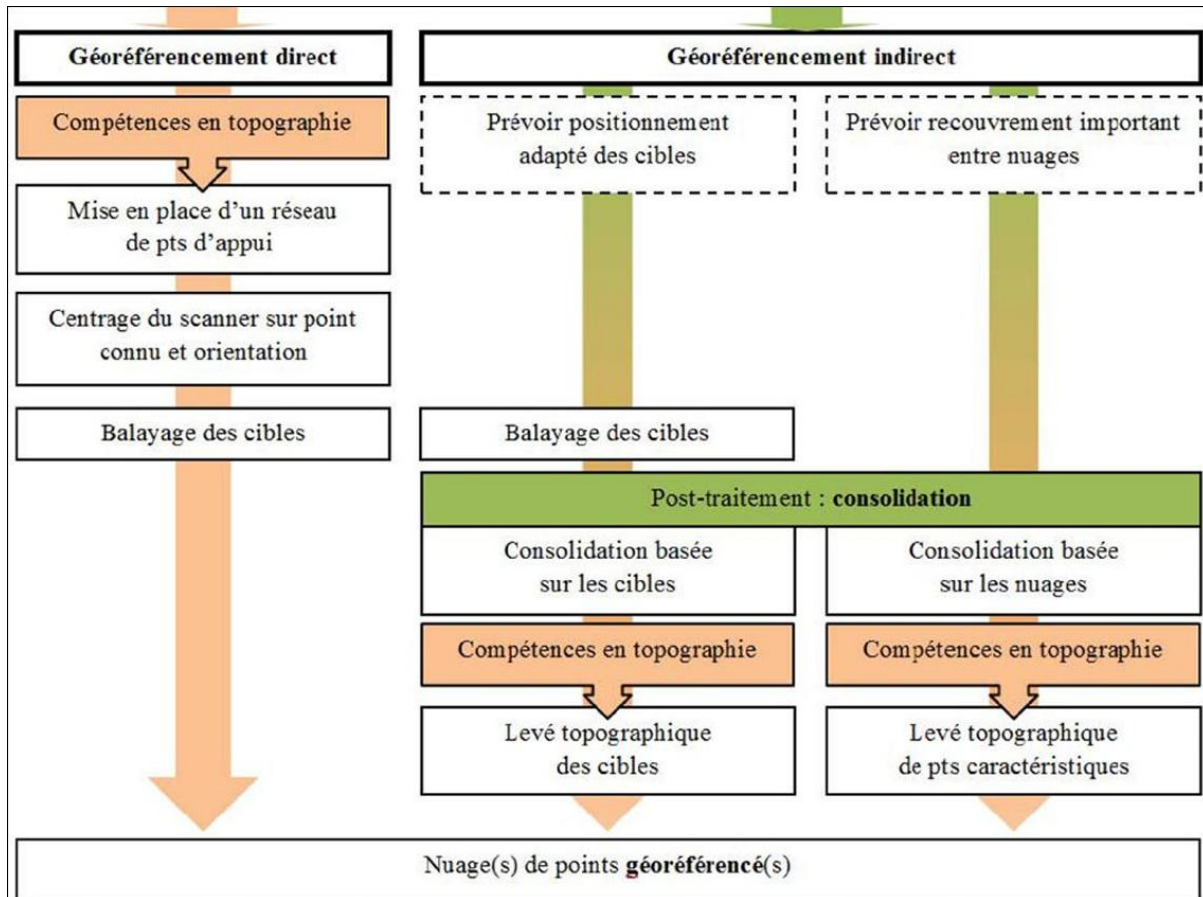


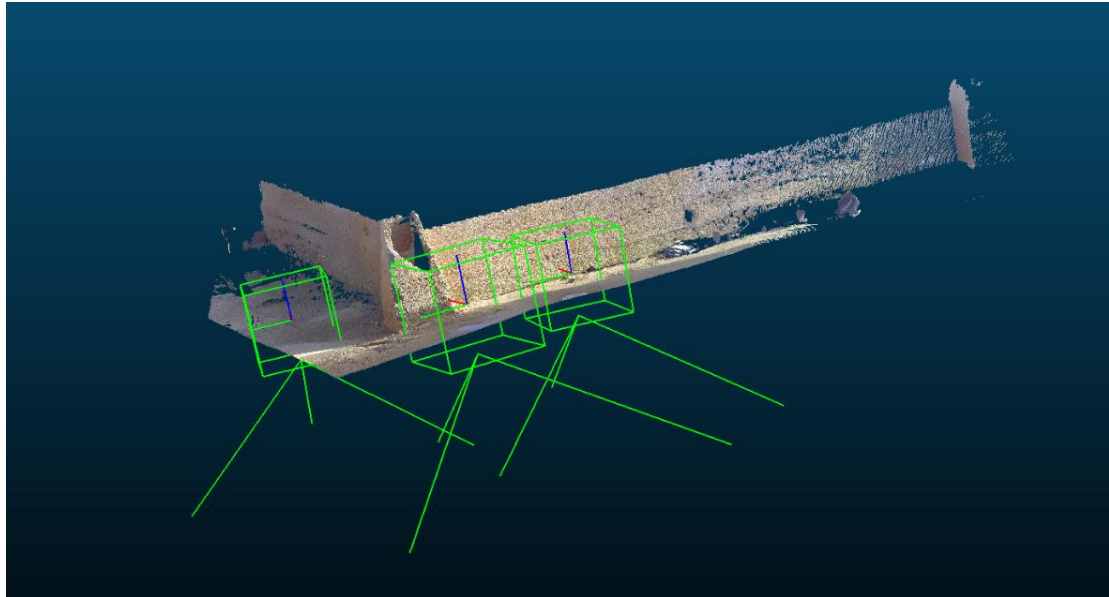
Figure 32 : Organigramme de la méthodologie du géoréférencement

### 3.1.2. CONSOLIDATION

Pour appréhender la notion de consolidation, il convient de revenir sur quelques points importants lors de l'acquisition des données :

Il est souvent nécessaire de faire plusieurs levés selon des positions différentes pour :

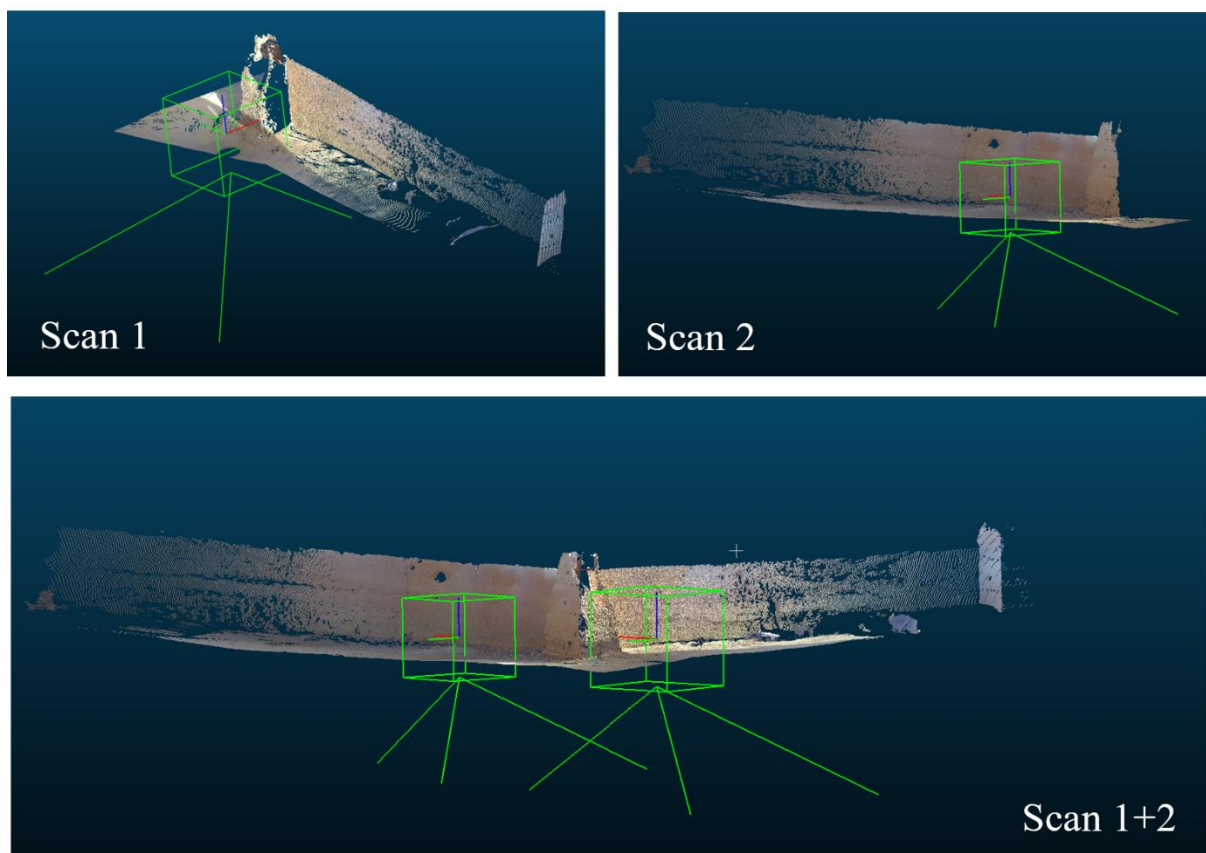
- ❖ Couvrir l'intégralité de l'objet. Objets de grande taille – objet 3D
- ❖ Compléter les zones masquées liées au mode d'acquisition



*Figure 33 : Consolidation de plusieurs scans*

On obtient des nuages de points pris selon différents points de vue et donc autant de systèmes de références propres et n'ayant pas de relation entre eux pour le moment.

La mise en correspondance des nuages de points dans un référentiel unique est illustrée dans les figures suivantes :



*Figure 34 : Fusion des scans 1 et 2.*

### **Principes de consolidation**

Trouver automatiquement un certain nombre de points homologues dans les nuages de points que l'on envisage de consolider selon la méthode ICP.

D'une part, cette méthode cherche à minimiser la distance entre deux nuages, par itérations successives. Elle essaye de trouver les points homologues dans les nuages lesquels seront utilisés pour la consolidation.

Par ailleurs, l'utilisateur doit simplement sélectionner au moins trois points homologues dans les nuages pour obtenir une transformation initiale à partir de laquelle les itérations peuvent démarrer.

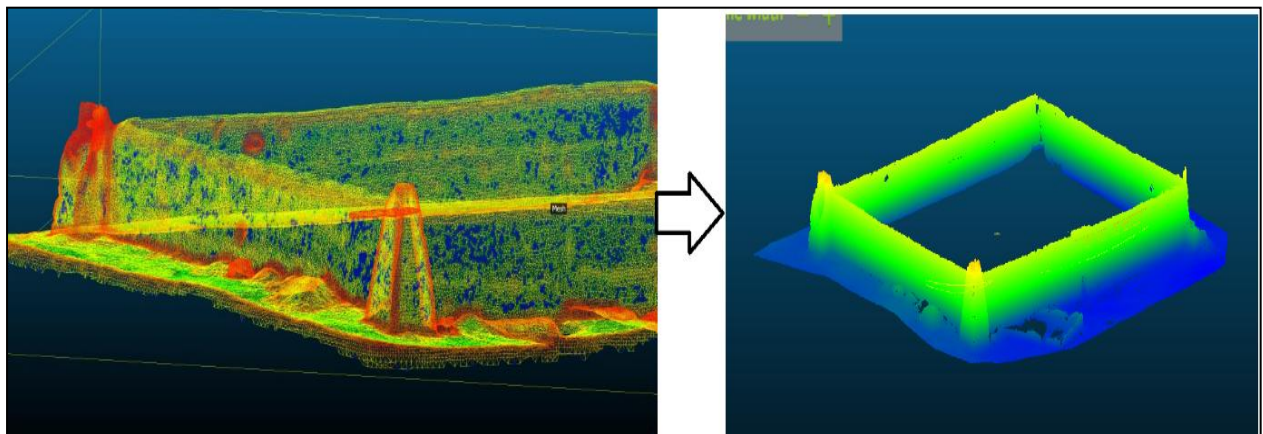
### **3.1.3. MAILLAGE**

Un maillage est une représentation 3D composée de sommets, arêtes et faces (triangles ou polygones) d'une surface qui passe par l'ensemble des points d'un nuage pour :

- Révéler l'information invisible ou peu visible sur un nuage
- Calculer l'aire, le volume – Texture

Les paramètres à prendre en compte dans la réalisation d'un maillage sont :

- ❖ La dimension de l'objet (2D ou 3D),
- ❖ La finesse du nuage de points (résolution du nuage de point, bruit...),
- ❖ La problématique finale,
- ❖ La dimension de l'objet (2D ou 3D).



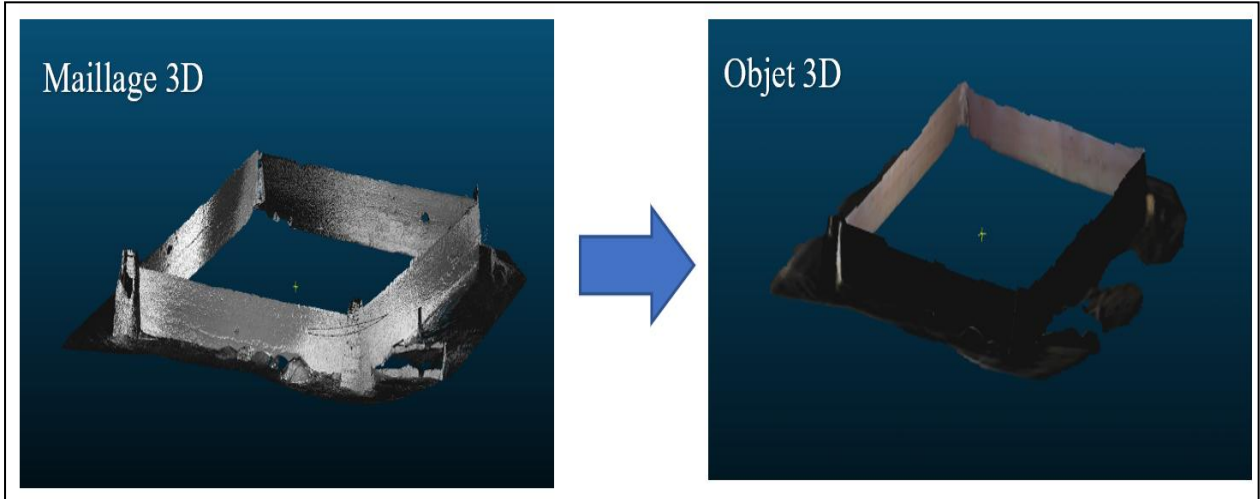


Figure 35: Du Maillage 3D vers le Modèle 3D

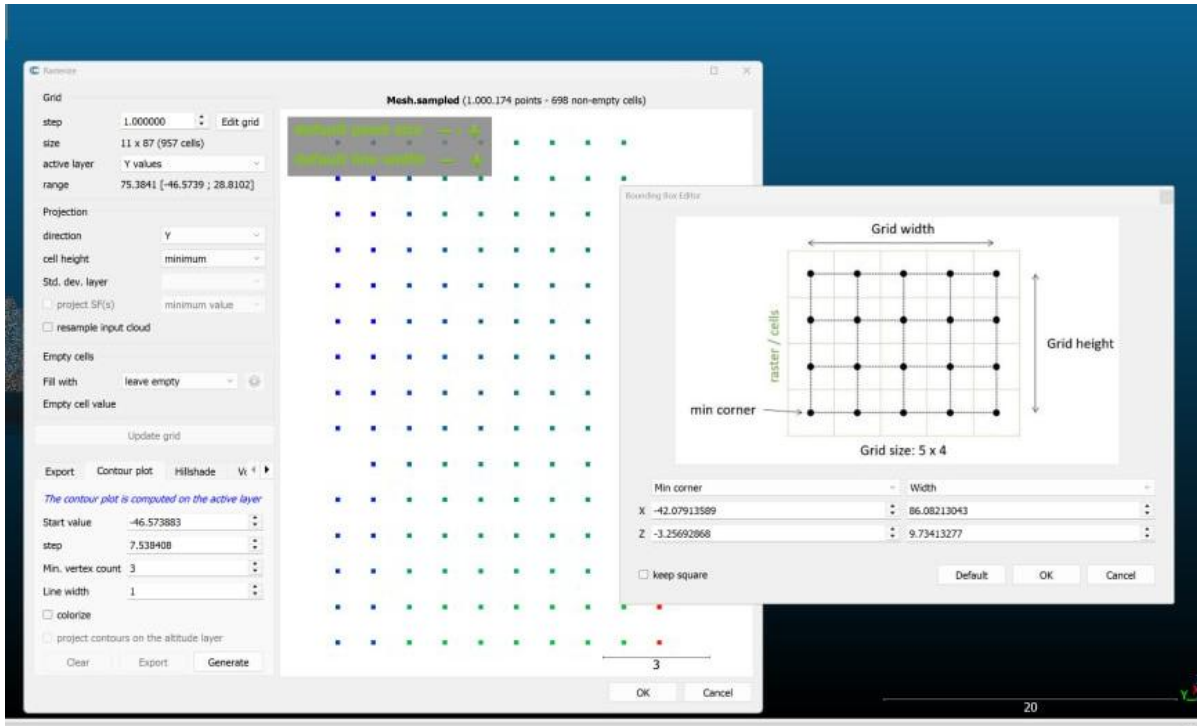


Figure 36 : Maillage

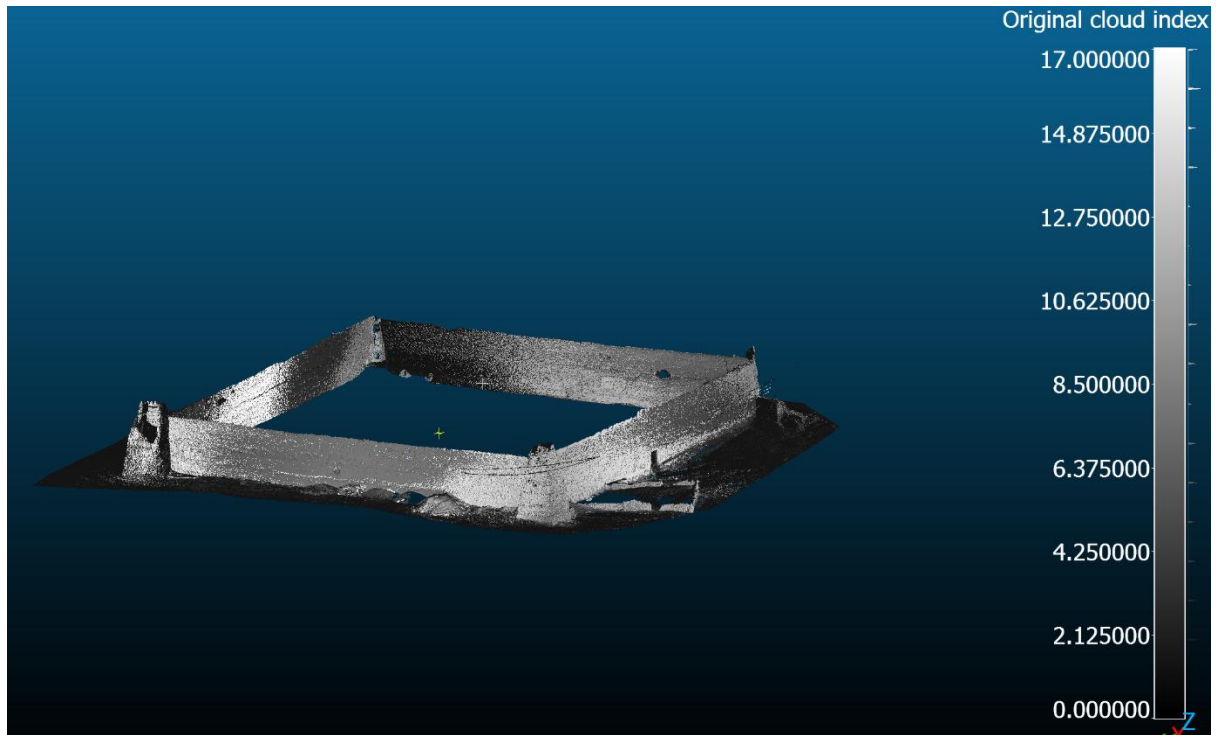


Figure 37: Qualité du maillage

### 3.1.4. INSPECTION

L'inspection permet d'étudier le modèle et d'extraire les informations et les réponses aux questions qui ont été émises au départ.

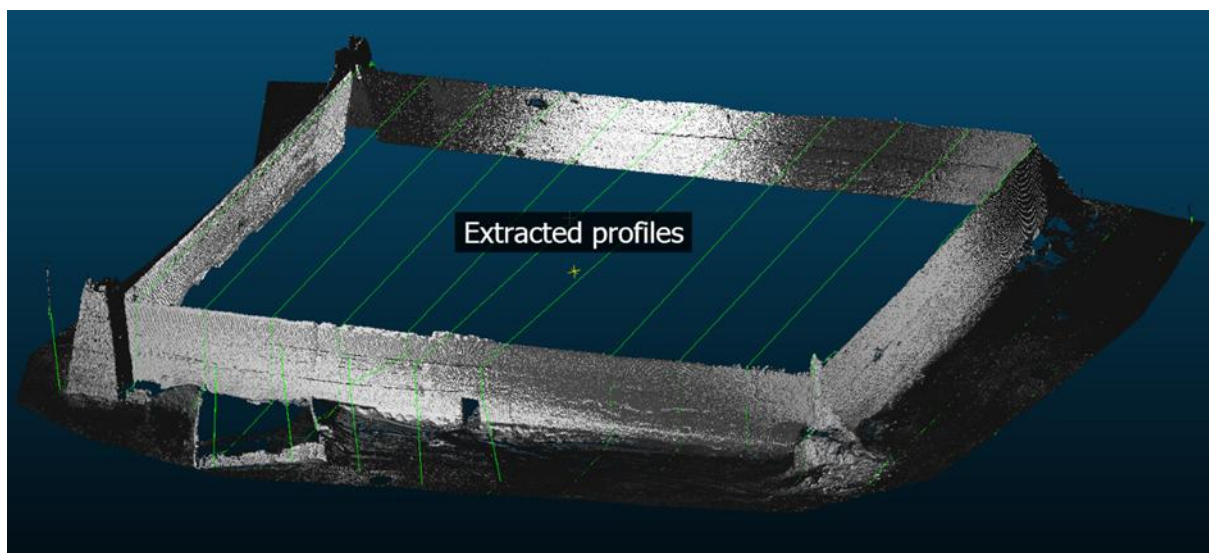


Figure 38 : Extraction des profils sur le maillage 3D

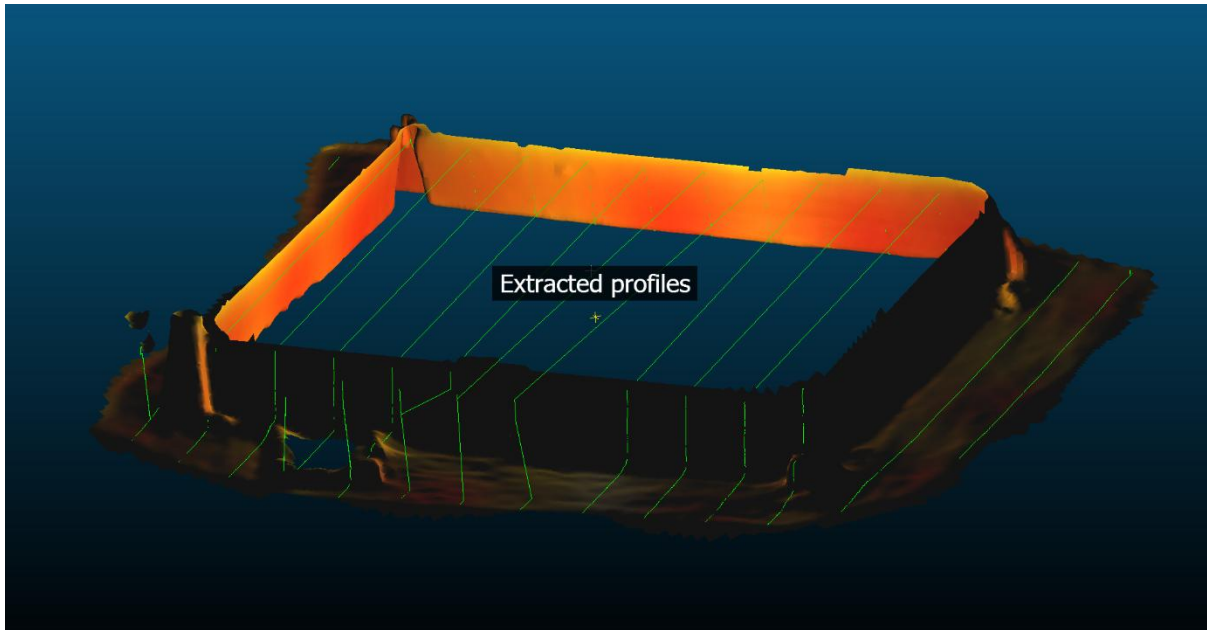


Figure 39 : Extraction des profils sur le modèle 3D

#### Avantages à long terme du relevé et de la modélisation 3D

Les bénéfices ne se limitent pas à une meilleure connaissance de l'état des citernes. À long terme, ce processus:

- **Réduit les coûts de maintenance** grâce à une meilleure anticipation.
- **Améliore la sécurité des installations** et du personnel.
- **Facilite la conformité réglementaire.**
- **Augmente la valeur des actifs industriels** grâce à une documentation complète et fiable.

#### 4. Lasergrammétrie & conservation du patrimoine :

La conservation d'un patrimoine est une opération nécessite des informations précise sur l'état sanitaire du monument, pour cette raison on utilise la lasergrammetrie, grâce à sa précision millimétrique et sa capture des formes complexes, on obtient des données tridimensionnelles détaillées qui aide au diagnostic, la surveillance et la planification des interventions de conservation.

##### 4.1.Documentation précise et archivage numérique

Aujourd'hui la laserammeterie est un outil qui permet la documentation précise d'un patrimoine historique comme c'est le cas de l'étude "LA CASBAH DE MELOUKA", en produisant des relevés de millions des points LiDAR, ce qui génère des nuages de points 3D précis (jusqu'au 1 mm). Cette technique capture en temps réel la géométrie complète d'un monument qui sert à modéliser un 3D qui sera par la suite un support aux études de restauration.

Ce modèle numérique offre une base fiable garantissant également une mémoire digitale pérenne, essentielle pour les sites menacés par le temps, les catastrophes naturelles...etc.



*Figure 40 Modèle 3D de la Casbah de Melouka*

## **4.2. Analyse et diagnostic des structures**

La lasergrammétrie permet de détecter les moindres altérations structurels (fissures, déformations) après des comparaisons des scans de différentes époques, cette analyse est considérée comme étant une base solide pour diagnostiquer le degré d'interventions.

### **4.2.1. Détection des déformations structurelles**

Elle consiste à identifier, mesurer et analyser les altérations géométriques d'un monument (fissures, tassement, déplacement) par rapport à sa forme antérieure.



*Figure 41 : Fissure au niveau des murs*

#### **4.2.2. Identification des pathologies superficielles**

C'est une méthode de diagnostic des altérations affectant les surfaces des patrimoines, elle permet de cartographier les fissures, les zones d'érosion...etc.

A l'aide d'un scanner équipé d'une caméra HDR de haute résolution, on obtient un nuage texturé qui facilite l'analyse visuelle des matériaux et évaluer ainsi l'état des éléments architecturaux qui va orienter vers le bon choix d'intervention pour une conservation adaptée.

#### **4.2.3. Suivi temporel et monitoring**

Les relevés lasergrammétrique à intervalles réguliers permettant de faire une comparaison précise, pour observer les variations morphologiques et évaluer les interventions de restauration dans le but d'anticiper les risques ou documentation scientifique.

##### **a) Les méthodes utilisées :**

1. **Superposition de nuages de points multi-temporels** : grâce au calcul des écarts de position entre deux relevés.
2. **Cartes de distance ou de déviation colorées** : Permettant de visualiser immédiatement les zones de changement.
3. **Analyse vectorielle des déplacements** : afin de comprendre les directions et l'amplitude des mouvements.

#### **4.3.Support technique à la restauration**

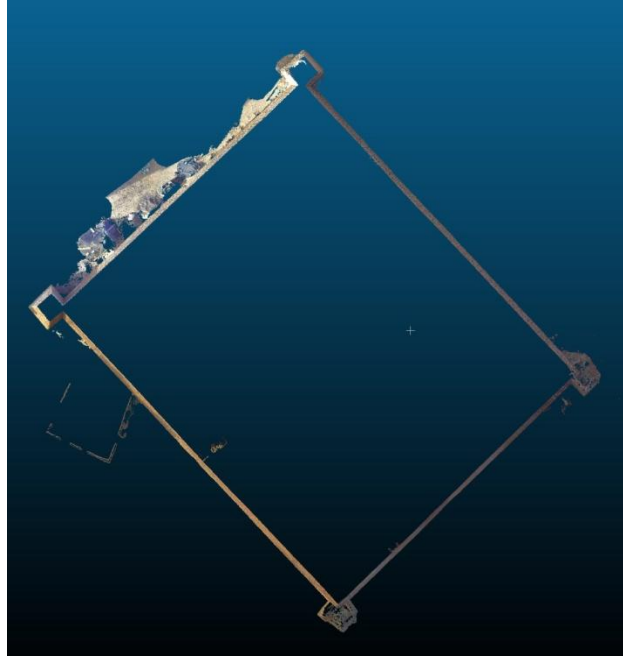
La numérisation 3D constitue une base fiable et détaillée pour la restauration d'un patrimoine, en fournissant des documentations exhaustives de l'état initial :

### **4.3.1. Production de documents techniques**

L'ensemble des nuages de points peuvent être transformés en :

- Plan d'élévation détaillé.
- Coupes horizontales et verticales.
- Modèle 3D surfacique ou maillé.

Ces documents sont indispensables pour l'élaboration des diagnostics techniques qui aide au lancement d'un projet de restauration d'un patrimoine.



*Figure 42 : Coupe horizontale du monument*



*Figure 43 : Coupe verticale du mur*

### **4.3.2. Fabrication de pièces sur mesure**

Grâce au modèle 3D obtenus par le traitement des nuages de points, il est possible de produire des pièces parfaitement adaptées à la géométrie réelle de monument en utilisant des logiciels de fabrication assisté par ordinateur (FUSION 360, RHINO)

### **4.4.Documentation pérenne & archivage numérique :**

L'apport de la lasergrammetrie dans la conservation du patrimoine est de créer une mémoire durable conservée à long terme qui assure une traçabilité et une exploitation continue des données pour les générations actuelles et futures.

#### **4.4.1. Préservation en cas de sinistre**

Les monuments historiques sont exposés à plusieurs risques naturels (inondation, effondrement, séisme ou dégradation climatique), pour cette raison l'archive numérique de référence est compté comme un outil de conservation de l'état exact d'un monument à une date donnée (géométrie complexe, propriété) qui peut servir d'une base pour une reconstruction fidèle.

#### **4.4.2. Base pour la recherche scientifique**

La lasergrammetrie offre une documentation précise qui constitue une véritable base de données scientifique interdisciplinaire exploitable dans des analyses morphologiques, historiques ou architecturales par des historiens, ingénieurs et des architectes.

### **4.5.Valorisation, sensibilisation et transmission**

La numérisation 3D s'inscrit aujourd'hui au cœur des stratégies de la valorisation culturelle et la médiation du patrimoine en transformant des relevés techniques en support pédagogiques et accessibles au grand public via plusieurs méthodes comme :

#### **4.5.1. Reconstitution virtuelle**

La reconstitution virtuelle est une technologie innovante permet de modéliser, simuler et restituer numériquement l'état originel ou hypothétique d'un monument à partir de trois sources complémentaires :

- Les scans actuels
- Les connaissances archéologiques.
- Les documents d'archives.

Les modèles immersifs créés destinés à des dispositifs de visite virtuelle via la réalité virtuelle (VR) ou la réalité augmentée (AR), ces dispositifs permettent au public de se déplacer dans des environnements patrimoniaux fidèlement reconstitués, favorisant une expérience sensorielle enrichie et une meilleure compréhension historique.



Figure 44 : Réalité virtuelle d'un patrimoine

#### 4.5.2. Support à la médiation culturelle

La vulgarisation et la valorisation du patrimoine assistées par lasergrammétrie facilite la transmission culturelle grâce à l'outil numérique innovant qui joue aujourd'hui un rôle centrale dans la médiation culturelle en rendant le patrimoine plus accessible.

Il est possible d'intégrer des reconstitutions fidèles de monuments dans des musées virtuels ou des expositions numériques, permettant aux visiteurs de les explorer comme s'ils y étaient.

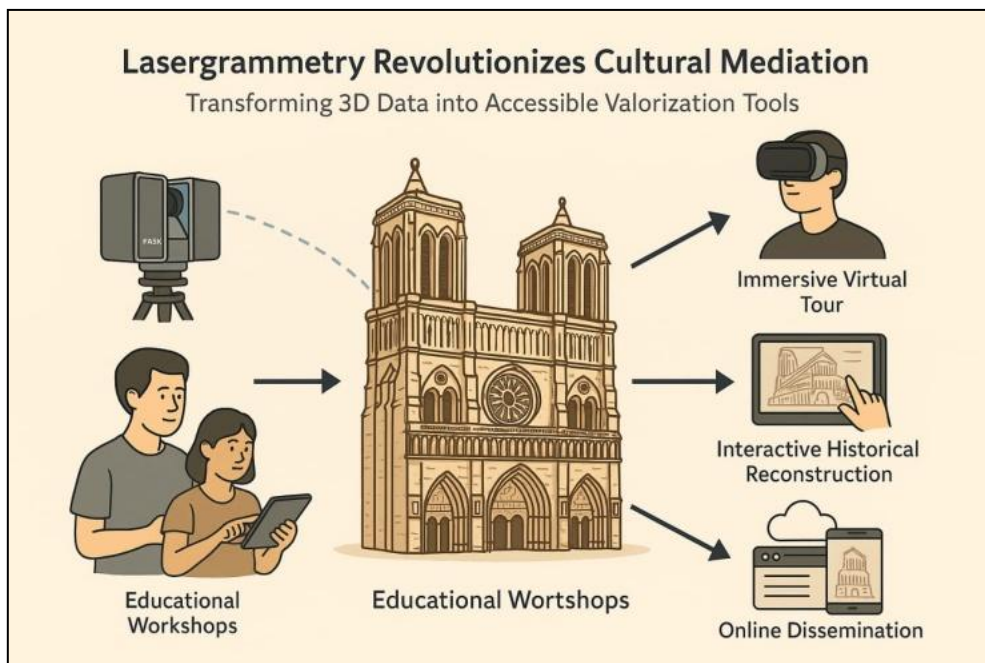


Figure 45 : Médiation culturelle

### 4.5.3. Transmission aux générations futures

Les données relevées assurent une mémoire fidèle de l'état d'un monument à un instant donné, elles peuvent être mis à jour régulièrement afin de maintenir un dossier de vie numérique du patrimoine, ces données permettent de constituer un patrimoine numérique pérenne transmissibles aux futures générations

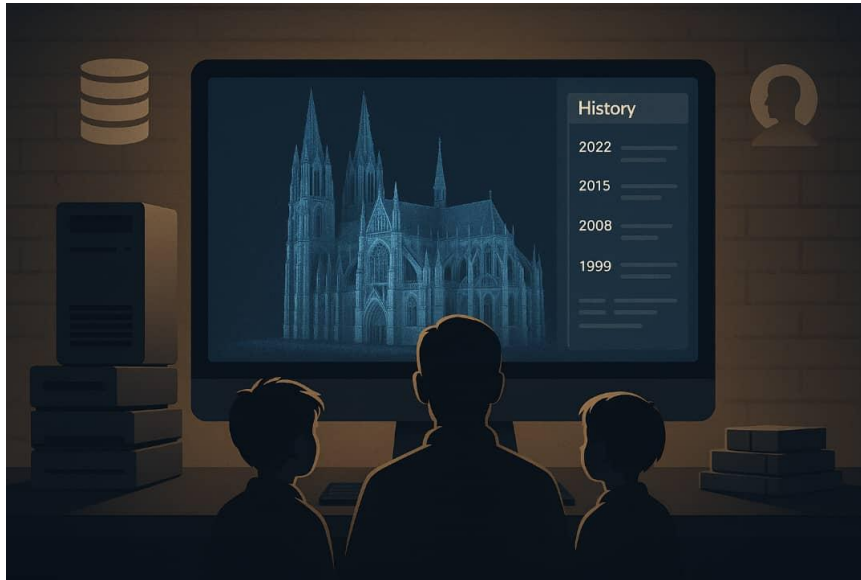


Figure 46 : Dossier de vie numérique d'un patrimoine

## 5. Conclusion

La préservation de notre patrimoine, qu'il s'agisse d'une ancienne forteresse du désert algérien ou d'une cathédrale européenne, s'inscrit dans une ère de précision sans précédent. Grâce à des technologies comme la photographie laser, nous ne nous contentons plus de documenter l'existant. Nous utiliserons désormais la précision numérique pour scanner l'objet, révélant des détails architecturaux révélateurs de l'histoire du bâtiment, ainsi que des microfissures invisibles à l'œil nu.

Cette capacité à voir l'invisible est essentielle car elle permet d'agir en amont, de réduire les coûts de conservation à long terme et d'assurer la préservation de ces témoins historiques. L'efficacité de la préservation du patrimoine mondial est sur le point de connaître une profonde transformation, passant d'une simple réaction à une véritable anticipation, à mesure que l'intelligence artificielle commence à s'intégrer à ces processus.

## **CONCLUSION GENERALE**

Cette étude a exploré le potentiel considérable de la technologie de graphométrie laser pour la documentation et la préservation du patrimoine historique en l'appliquant à la Kasbah de Mlouka, située à 1 400 km au sud d'Alger, au cœur de la province d'Adrar. Cette forteresse historique rare s'étend sur une superficie de 2 040 mètres carrés et est confrontée à d'importantes menaces liées aux facteurs climatiques et au passage du temps, rendant une intervention urgente et nécessaire, combinant restauration, analyse scientifique méticuleuse et conservation durable. Les méthodes non destructives utilisées dans cette étude, notamment la graphométrie laser, ont démontré leur remarquable potentiel pour révolutionner la préservation du patrimoine numérique. Le scanner FARO FOCUS 3D X130 a généré des nuages de points précis qui ont permis de créer un modèle numérique réaliste de la kasbah, révélant ses caractéristiques architecturales uniques, ses matériaux de construction, ses zones de détérioration et ses fissures structurelles. Ces données ont fourni une base scientifique solide pour diagnostiquer avec précision l'état du site historique et élaborer des plans de restauration précis et efficaces. L'étude a obtenu des résultats prometteurs et remarquables, notamment une préservation numérique précise garantissant la préservation exacte des informations patrimoniales, une aide à la restauration grâce à une base de données complète et une sensibilisation au patrimoine grâce à des applications pédagogiques et des visites virtuelles. Elle offre également des perspectives d'intégration de l'intelligence artificielle pour améliorer la précision des diagnostics et l'efficacité des processus de restauration. L'étude a produit des résultats très satisfaisants, documentant avec précision le patrimoine architectural, établissant les bases scientifiques d'une conservation durable et ouvrant de nouvelles perspectives pour l'approche patrimoniale. Cette approche technologique avancée pose des bases solides pour une protection efficace des sites historiques, la transmission du patrimoine culturel aux générations futures et la promotion du tourisme culturel et de la recherche scientifique. Ainsi, l'étude a atteint son objectif principal : la préservation numérique précise de ce patrimoine historique, tout en ouvrant de nouvelles perspectives pour relever scientifiquement les défis auxquels sont confrontés les sites archéologiques en Algérie

### Références bibliographiques

- Grussenmeyer, P. (2018). *Lasergrammétrie : Principes et Applications*. Presses des Ponts.
- الخ العمراني، (2021). دار النهضة العربية. التوثيق الرقمي للآثار. (Traduction française disponible)
- Norme internationale : ISO 17123-8 (2020). *Optique et instruments optiques*.
- Vosselman, G. & Maas, H. (2018). *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles.
- UNESCO (2022): *Digital Preservation of Heritage*. Rapport
- Alby, E. et al. (2020). *Limitations du scanning laser*. *Revue XYZ*, 162.
- Ministère de la Culture Algérien (2019). *Fiche Monument : Melouka*.
- Manuel technique : *FARO Focus Premium - Guide Utilisateur*.
- Kadri, A. et al. (2022). *Acquisition laser pour ksars sahariens*. *Revue SIG & Télédétection*, 45(3).
- *CloudCompare: Tutorials*. Documentation du logiciel
- Lari, Z. (2021). *Fusion de nuages de points multiscanneurs*. *Revue Française de Photogrammétrie*, p 212.
- Boukhemis, K. (2023). *Analyse 3D des ornements architecturaux algériens*. *Revue Méditerranéenne du Patrimoine*, 7(1).
- Guide Autodesk : *BIM pour le patrimoine*.
- Lichti, D. (2020). *Métriologie des scanners 3D*. *Revue Internationale de Géomatique*, 30(4).
- ICOMOS-ISPRS (2021). *Relevé laser pour la restauration*.
- Moussa, W. (2023). *IA et lasergrammétrie*. *Journal of Digital Heritage*, 7(1).
- *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Wiley-Blackwell.
- Grussenmeyer, P. et al. (2018)
- *Lasergrammétrie : Principes et Applications*. Presses des Ponts. Lichti, D. (2020)
- Bouti, M., & Benhamamouch, D. (2017) : *Patrimoine Architectural en Algérie : Menaces et Stratégies de Sauvegarde*.
- Chennafi, A. et al. (2020) : "L'état de conservation des sites romains en Algérie : Cas de Timgad et Djemila". *Revue des Sciences Humaines*,

## WEBOGRAPHIE

1. <https://www.culture-nouvelle-aquitaine.fr/numerique-culturel/le-numerique-peut-il-contribuer-a-reconstruire-un-patrimoine-invisible-ou-disparu/>
2. <https://rebatirnotredamedeparis.fr/>
3. <https://journals.openedition.org/cel/20064>
4. <https://concept-plan.net/patrimoine/sauvegarde-et-restauration-du-patrimoine-grace-au-scan-3d/>
5. <https://3dynamique.fr/agp-faro-operation-de-numerisation-3d-durgence-avec-nos-lasers-scanners-faro-notredame-de-paris/>
6. <https://www.arar.mom.fr/plateformes-technologiques/plateforme-archeologie-et-3D>
7. <https://journals.openedition.org/cel/20064?lang=en>
8. <https://flypix.ai/es/blog/top-5-LiDAR-applications/>
9. <https://journals.openedition.org/nda/3821>
10. <https://numerisation3d.construction/LiDAR-et-scanner-laser-3d/?v=fa3c7f2b5dae>
11. <https://www.abot.fr/blog/-photogrammetrie-ou-lasergrammetrie-que-choisir--n684>
12. <https://www.s3engineering.net/blog/qu-est-ce-que-la-lasergrammetrie/>
13. <https://www.linkedin.com/pulse/lasergramm%C3%A9trie-et-photogramm%C3%A9trie-comparaison-des-technologies--bzcze/>
14. [https://www.academia.edu/29129967/Vers\\_de\\_nouvelles\\_perspectives\\_lasergramm%C3%A9triques\\_optimisation\\_et\\_automatisation\\_de\\_la\\_cha%C3%A9ne\\_de\\_production\\_de\\_mod%C3%A8les\\_3D](https://www.academia.edu/29129967/Vers_de_nouvelles_perspectives_lasergramm%C3%A9triques_optimisation_et_automatisation_de_la_cha%C3%A9ne_de_production_de_mod%C3%A8les_3D)
15. <https://3g-topographie.fr/projets-lasergrammetrie/>
16. <https://www.numen.fr/quest-ce-que-la-numerisation-patrimoniale-definition>
17. <https://www.artec3d.com/learning-center/laser-3d-scanning#:~:text=3D%20laser%20scanning%20is%20a,measure%20precise%20locations%20and%20distances.>
18. <https://books.openedition.org/artehis/27110>
19. [https://www.researchgate.net/publication/380880400 Static Terrestrial Laser Scanning TLS as an effective tool for cultural heritage survey the case of Ahmed Bey's Ottoman Palace in Constantine Algeria](https://www.researchgate.net/publication/380880400_Static_Terrestrial_Laser_Scanning_TLS_as_an_effective_tool_for_cultural_heritage_survey_the_case_of_Ahmed_Bey's_Ottoman_Palace_in_Constantine_Algeria)
20. <https://www.capture-solutions.fr/blog/points-techniques-3/le-scanner-laser-3d-6>

21. <https://biblus.accasoftware.com/fr/scanners-laser-drones-et-photogrammetrie-numerique-les-nouvelles-technologies-pour-la-construction/>
22. <https://www.abot.fr/blog/-photogrammetrie-ou-lasergrammetrie-que-choisir--n684>