



HAL
open science

De l'utilité aux usages de la numérisation 3D pour le patrimoine archéologique

Antoine Laurent

► **To cite this version:**

Antoine Laurent. De l'utilité aux usages de la numérisation 3D pour le patrimoine archéologique. Autre [cs.OH]. Université de Toulouse, 2024. Français. NNT : 2024TLSEP139 . tel-04879718

HAL Id: tel-04879718

<https://theses.hal.science/tel-04879718v1>

Submitted on 10 Jan 2025

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

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

Doctorat de l'Université de Toulouse

préparé à Toulouse INP

De l'utilité aux usages de la numérisation 3D pour le
patrimoine archéologique

Thèse présentée et soutenue, le 5 décembre 2024 par

Antoine LAURENT

École doctorale

EDMITT - École Doctorale Mathématiques, Informatique et Télécommunications de Toulouse

Spécialité

Informatique et Télécommunications

Unité de recherche

IRIT - Institut de Recherche en Informatique de Toulouse

Thèse dirigée par

Jean-Denis DUROU et Carole FRITZ

Composition du jury

M. Vincent CHARVILLAT, Président, Institut Mines-Télécom

M. Xavier GRANIER, Rapporteur, Université de Bordeaux

Mme Olivia RIVERO, Rapporteuse, Universidad de Salamanca

M. Yvain QUÉAU, Examineur, CNRS Paris-Normandie

M. Vincent ARD, Examineur, CNRS Occitanie Ouest

M. Philippe WALTER, Examineur, CNRS Paris-Centre

M. Jean-Denis DUROU, Directeur de thèse, Université Toulouse III - Paul Sabatier

Mme Carole FRITZ, Co-directrice de thèse, CNRS Paris-Centre

Membres invités

M. Jean MÉLOU, Toulouse INP

M. Thomas SAGORY, Musée d'Archéologie nationale

Table des matières

Remerciements	1
Introduction	3
1 La place des outils de reconstruction 3D pour le patrimoine	13
1.1 Représenter la troisième dimension	13
1.1.1 Historique des méthodes de relevé de surfaces	14
1.1.2 Visualisation de l'information 3D	21
1.2 Caractérisation des outils de relevé 3D	24
1.2.1 Critères de numérisation	25
1.2.2 Outils non photographiques	27
1.2.3 Outils photographiques	33
1.3 Définir une utilité et des usages	37
1.3.1 La chaîne patrimoniale	38
1.3.2 La recherche	39
1.3.3 La conservation	43
1.4 ArchaeoRoom	46
2 La reconstruction 3D dans la pratique archéologique	51
2.1 Photogrammétrie : reconstruction 3D géométrique	52
2.1.1 Modèle de caméra perspective	52
2.1.2 <i>Structure-from-motion</i>	54
2.1.3 Stéréoscopie multivue	56
2.2 Mise en œuvre de la photogrammétrie	59
2.2.1 Protocoles d'acquisition	60
2.2.2 Comparaison entre photogrammétrie et scanner	65
2.3 Limites de la photogrammétrie	70
2.3.1 Problèmes liés à la texture	70
2.3.2 Perte de résolution	72
2.4 Création d'un corpus multimodal	73
3 Une autre méthode de reconstruction 3D pertinente pour l'archéologie	79
3.1 Stéréophotométrie : reconstruction 3D photométrique	79
3.1.1 Principe de la stéréophotométrie	79
3.1.2 Estimation de l'albédo et des normales	81
3.1.3 Intégration des normales	83
3.2 Mise en œuvre de la stéréophotométrie	84
3.2.1 Protocoles d'acquisition	84

TABLE DES MATIÈRES

3.2.2	Aide à la lecture	88
3.2.3	Influence de la couleur	95
3.2.4	Comparaison entre stéréophotométrie et scanner	99
3.3	Limites de la stéréophotométrie	101
3.3.1	Surfaces non lambertiennes	101
3.3.2	Influence de l'éclairage sur les résultats	110
4	Vers une nouvelle chaîne opératoire de numérisation 3D	115
4.1	Fusion des approches géométrique et photométrique	115
4.1.1	Comparaison entre photogrammétrie et stéréophotométrie	115
4.1.2	Combinaison des deux approches	118
4.2	Une méthode originale d'estimation locale de l'éclairage	120
4.2.1	Une nouvelle méthode de stéréophotométrie	120
4.2.2	Comparaison multimodale	121
4.2.3	Un nouveau protocole d'acquisition adapté aux grottes	128
4.3	Intégration de normales multivue	132
4.3.1	Études de cas	132
4.3.2	Méthodologie	133
4.3.3	Résultats et discussion	136
4.3.4	Un outil en devenir	141
	Conclusion et perspectives	143
	Annexes	151
	Bibliographie	159
	Production scientifique directement liée à la thèse	179

Remerciements

Chère lectrice, cher lecteur, je m'adresse à vous en espérant que vous trouverez dans ce travail matière à réflexion. La thèse de doctorat, par définition, marque l'aboutissement d'un parcours académique. Dans mon cas, elle symbolise bien plus qu'une réussite individuelle : elle est le fruit de collaborations et d'opportunités uniques réunies au cours de ces trois années.

Mes premiers remerciements s'adressent au jury, qui a accepté de franchir les frontières disciplinaires entre l'informatique et l'archéologie. Olivia Rivero et Xavier Granier ont apporté des regards complémentaires qui enrichissent cette recherche. Leurs remarques précieuses guideront mes futurs travaux. Je suis profondément reconnaissant envers tous les membres du jury pour leur bienveillance et la qualité des échanges. Nul doute que les aventures scientifiques se poursuivront.

J'ai eu la grande chance d'être encadré par deux directeurs de thèse exceptionnels. Jean-Denis Durou, d'une grande sérénité, a su garder une vision globale du projet tout en me laissant une grande liberté de recherche. Quant à Carole Fritz, elle m'a constamment poussé à atteindre l'excellence, me rappelant l'importance de respecter les témoignages de la Préhistoire. Travailler dans des sites comme la grotte Chauvet est un privilège, mais aussi un engagement.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Jean Mélou pour son encadrement et son soutien tout au long de ces trois années, toujours avec bonne humeur et pédagogie. Je remercie également Thomas Sagory, il est bien plus qu'un collaborateur. Nous formons avec plaisir un binôme efficace et complice. Je n'oublie pas ceux qui m'ont donné le goût de la recherche et qui ont leur part dans cette réussite : Vivien Mathé, Frédéric Pouget, François Baleux, Pierre Moret et Vincent Ard.

Je suis reconnaissant aux deux laboratoires d'avoir accueilli une thèse interdisciplinaire. J'espère que cette réussite encouragera de futures collaborations entre ces deux domaines. Je remercie la direction du laboratoire IRIT et de l'équipe REVA ainsi que celle du laboratoire TRACES et de l'équipe PSH. De plus, le travail essentiel des gestionnaires a permis la réalisation des nombreuses missions. Cette thèse a bénéficié de l'appui technique et humain d'ArchéoScience. Je tiens à remercier également les financeurs, la Région Occitanie et l'Université Fédérale de Toulouse, ainsi que l'école doctorale MITT.

La recherche actuelle s'effectue avec de nombreux partenaires académiques et scientifiques que je tiens à honorer ici. Ces collaborations sont nécessaires et permettent d'ouvrir la réflexion et les pistes de recherche. Parmi les nombreuses rencontres, je mets en avant le formidable consortium 3D SHS (devenu Humanités Numériques), un moteur central du

REMERCIEMENTS

réseau interdisciplinaire autour du patrimoine et de la 3D. Chacune des journées est l'occasion de discuter avec des personnes passionnées, malheureusement trop nombreuses pour les citer toutes ici.

Ma gratitude va à l'ensemble des équipes de recherche que j'ai pu intégrer. Des grottes préhistoriques aux statues-menhirs, des édifices religieux aux carrières néolithiques, de monnaies en bronze à des tesselles de mosaïque ou encore d'os gravé paléolithique à une plaque-boucle, chaque mission est un enrichissement. Découvrir des gravures avec Gilles Tosello, parcourir les sites à stèles phalliques d'Éthiopie avec Anne-Lise Goujon, déconstruire la symbolique des statues-menhirs avec Aurélien Pierre, entendre un inventeur parler de sa découverte... il s'agit avant tout d'une aventure humaine.

À chaque site visité, à chaque objet étudié d'une collection je mesure la chance de découvrir notre patrimoine. Je tiens à exprimer ma reconnaissance aux agents garants de cet héritage qu'ils soient du Ministère de la Culture, des services de la DRAC, des SRA ou encore du CNP. Pour l'accompagnement dans les missions de recherche au sein des collections, j'admire le dévouement des équipes des musées visités lors de ces trois années. Aussi je tiens à souligner le soutien des Départements de l'Ariège et de l'Aveyron dans le cadre de mission de numérisation.

Je salue la dévotion des bénévoles des associations qui œuvrent autour du patrimoine, leurs actions sont primordiales pour sa connaissance et sa valorisation. J'ai moi-même profité de leurs bienfaits avec les associations : CERAC, Mégané, Archéologies, CDAT ainsi que Grotte et Archéologies. Je suis également reconnaissant aux propriétaires de sites, souvent les premiers acteurs de la sauvegarde du patrimoine.

Mes remerciements vont à l'ensemble des partenaires du monde de l'entreprise qui ont contribué à ce projet de thèse. Puisqu'il faut débiter quelque part, je remercie Fabien Castan et Benoît Maujean de soutenir AliceVision/Meshroom et d'apporter une expertise essentielle en développement logiciel, souvent sous-estimée en archéologie. Je salue la société Mercurio en la personne d'Éloi Gattet pour l'accompagnement dans le développement du dôme de RTI dans un court laps de temps. La société Polymny accomplit des prouesses dans le développement d'un scanner ouvert à tous.

Je me souviendrai toujours de ce moment hors du temps que représente la soutenance de thèse. La Société Archéologique du Midi de la France y aura fortement contribué en nous accueillant à l'hôtel d'Assézat.

Enfin, je tiens à remercier mes amis aux quatre coins de la France avec qui je partage toutes ces aventures. À ma famille qui m'a vu grandir et mes parents pour leur éducation et la chance d'avoir pu réaliser des études supérieures et ce, malgré leurs doutes légitimes en me voyant faire des trous dans la terre bénévolement. À la famille que nous construisons jour après jour avec Soizic et Yann, pour leur soutien indéfectible.

Introduction

Cette thèse se situe à la confluence de l'archéologie et de la vision par ordinateur, sur le terrain de la numérisation 3D du patrimoine archéologique. C'est un espace de dialogue qu'il a fallu construire et développer entre plusieurs acteurs et équipes de recherche.

Du point de vue archéologique, la finalité est d'approcher au mieux la diversité des faciès du patrimoine. Le vaste corpus initial est à la fois une opportunité et un atout. L'axe directeur de ce travail vise à fournir à la communauté scientifique de nouvelles pratiques et des outils innovants. Pour cela, il est nécessaire de changer les mentalités face à l'outil photographique, souvent perçu comme une solution peu coûteuse, et donc « bas de gamme ». Nous souhaitons montrer que, dans certaines configurations, la photographie peut surpasser les performances des outils spécialisés tels que les scanners (à laser ou portables).

En ce qui concerne la vision par ordinateur, nos objectifs sont multiples. La diversité des cas d'usage sélectionnés dans cette thèse vise à illustrer les défis rencontrés, tant dans les modes d'acquisition sur site que dans l'exploitation des données brutes, car celles-ci ne sont pas des données de synthèse. Nous souhaitons dépasser les limites actuelles, notamment sur la restitution des détails du relief et l'estimation de l'albédo.

Contexte général

Vestiges et patrimoine

Le patrimoine culturel matériel est avant tout une définition juridique et administrative permettant de préserver des vestiges pour lesquels une valeur historique, artistique ou archéologique, est reconnue. La définition du patrimoine archéologique est donnée dans le livre V du Code du patrimoine, dans les articles L510-1 à L546-7. Dans l'article L510-1 du 7 juillet 2016, la dernière définition en date après les lois de l'archéologie préventive de 2001 dit que « *constituent des éléments du patrimoine archéologique tous les vestiges, biens et autres traces de l'existence de l'humanité, y compris le contexte dans lequel ils s'inscrivent, dont la sauvegarde et l'étude, notamment par des fouilles ou des découvertes, permettent de retracer le développement de l'histoire de l'humanité et de sa relation avec l'environnement naturel* ». Cette définition englobe les différents types de vestiges, à savoir les biens culturels mobiliers, immobiliers et environnementaux, une place particulière étant donnée aux restes humains.

Les vestiges sont le reflet de l'activité des sociétés passées. Cela implique que l'archéologie aborde toutes les productions dans tous les domaines techniques et culturels. Les artefacts sont par nature protéiformes, de dimensions et de matériaux variés et peuvent être, par leur conservation, fragiles, partiels ou encore difficiles d'accès. Ils sont désormais vus comme une ressource limitée et vulnérable [17].

La définition du relevé architectural par Jean-Paul Saint-Aubin [215] est « *de dresser, par l'intermédiaire de la représentation, le constat daté de la forme effective du bâti, avec comme référence constante, l'objet* ». Violette Abergel propose les trois actions consistant

à « décrire, figurer et représenter » [18]. Ce travail interprétatif [81] s'appuie de plus en plus sur des supports numériques produits à partir d'acquisitions tridimensionnelles.

La numérisation 3D du patrimoine

La numérisation 3D du patrimoine est devenue un axe de recherche au sein des humanités numériques. Cette thématique est au cœur de nombreux projets et de groupes de réflexion (Europeana, Time Machine au niveau européen, Consortium 3D HN ou EquipEx+ Espadon en France, etc.). Son usage est de plus en plus régulier dans les pratiques de terrain. L'appropriation des technologies de reconstruction 3D par les archéologues est forte, avec la lasergrammétrie ou la photogrammétrie, mais s'ils adoptent et adaptent des outils à leur pratique, il est plus rare qu'ils soient à l'origine de leur développement. Il convient de repositionner la proposition d'une nouvelle méthode de reconstruction 3D pour le patrimoine archéologique.

Le choix de l'outil de numérisation résulte des besoins des archéologues, en fonction de la finesse du détail qui permettra de répondre à leurs questions. Le travail effectué sur le site pariétal du Roc-aux-Sorciers [44, 196] distingue les notions de *visibilité* (distance à laquelle nous voyons quelque chose) et de *lisibilité* (distance à partir de laquelle nous lisons l'information). Ces deux notions peuvent être étendues aux modèles 3D, puisqu'elles déterminent le moment à partir duquel nous voyons un détail et celui à partir duquel il est possible de le mesurer et de le caractériser.

Les travaux sur la vision humaine [249, 253] ont déterminé que la résolution de l'œil humain était de 0,1 mm à une distance de 25 cm. Cette résolution est souvent recherchée dans la production des supports numériques de l'art pariétal. Cependant, il est important de faire la différence entre ce que l'on représente et le besoin du chercheur. Ainsi, pour la production graphique sur du mobilier paléolithique, la lecture de la chronologie relative des tracés s'effectue en deçà de cette valeur [81]. Il est important de développer les outils 3D en fonction des questionnements de la recherche.

La photographie est un support communément utilisé dans les sciences du patrimoine pour l'enregistrer, l'illustrer et le documenter. Elle fournit une image d'un lieu ou d'un objet sur un support en deux dimensions. La troisième dimension est perdue lors de l'impression de la pellicule ou du capteur électronique. Cependant, sa capacité à figer un espace en fait un outil incontournable.

Un modèle 3D doit rendre compte de l'objet réel. La caractérisation des propriétés optiques des matériaux entre en compte dans la restitution d'une œuvre. La perception d'un vestige peut être faussée si les couleurs ne sont pas fidèles à l'original, comme pour la reproduction d'un tableau tel que celui de Gauguin « D'où venons-nous ? Que sommes-nous ? Où allons-nous ? » [239], dans lequel Étienne Trouvers et Laurence Tardy ont reconstruit le processus de réalisation afin de rendre la couleur juste et l'intention de l'artiste.

L'importance de la perception se retrouve lors de la restitution. Elle peut être virtuelle, comme avec le buste d'Akhénaton [141], ou physique comme pour la grotte de Marsoulas [238]. Dans les deux cas, la qualité de la numérisation 3D joue un rôle important pour la construction des hypothèses ou le façonnage des panneaux. L'outil utilisé lors de la captation 3D doit donc pouvoir restituer au mieux la matérialité de l'objet d'étude.

Objectifs

Le principal objectif de cette thèse est d'entretenir un dialogue constant entre l'archéologie et la vision par ordinateur. Autrement dit, nous cherchons à développer des méthodes de reconstruction 3D au plus près de l'état de l'art, afin de pouvoir les diffuser au sein de la communauté scientifique. Ces nouveaux outils de numérisation 3D doivent répondre aux besoins des experts en patrimoine culturel. Les principaux critères retenus sont :

- L'acquisition du 3D surfacique des vestiges analysés : nous n'abordons ni la caractérisation physico-chimique des matériaux, ni leur composition interne.
- La restitution des détails : selon les objets étudiés, cela peut aller du centimétrique pour un dolmen, au sub-millimétrique pour l'art pariétal.
- L'estimation de l'information de couleur.
- La reproductibilité de la méthode de numérisation 3D : utiliser du matériel connu des acteurs du patrimoine, facilement manipulable après une formation rapide, et des protocoles dont le fonctionnement doit être compréhensible par tous.
- L'adaptation de la méthode de numérisation 3D au terrain : en s'appuyant sur des techniques photographiques.
- La réalisation d'outils informatiques performants et intuitifs.

Cas d'étude

Depuis le début de ce projet de thèse, l'ambition a été de couvrir un ensemble assez large du corpus archéologique. La multiplication des cas d'étude est à entrevoir comme l'illustration de la polyvalence de la méthode proposée, et non comme un catalogue de sites juxtaposés. La grande diversité des objets numérisés permet d'illustrer le propos en choisissant de manière raisonnée tel ou tel artefact, et ce sans se borner à une chronologie, à une typologie ou à une thématique. La richesse et la variété constituent une des originalités de ce travail.

La sélection des données à intégrer dans le corpus comprend plusieurs critères pour atteindre un large éventail des cas d'étude :

- Les différentes échelles de numérisation : de l'objet jusqu'au site archéologique.
- La grande couverture chronologique : de la naissance de l'art préhistorique jusqu'aux artefacts contemporains.
- La complexité des volumes : cela va des formes irrégulières d'une paroi de grotte à la finesse des décors d'une fibule.
- Les contraintes de l'acquisition des données : que ce soit l'accessibilité, le choix du matériel, la difficulté physique.
- La composition des acquisitions : capteurs, acteurs, multimodalité temporelle ou scalaire.
- L'accessibilité et la connaissance de la constitution des données : le fait de pouvoir produire nos propres données.

Étude des grottes ornées

L'univers souterrain est complexe à numériser en 3D. Les contraintes sont à la fois liées à l'environnement (obscurité, accessibilité, humidité, taux de CO₂), aux instruments utilisés (matériel en adéquation avec la fragilité du site, méthode non destructrice, travail sur batterie, précision et résolution des outils de mesure), au facteur humain (conditions de travail exigeantes) et enfin au sujet d'étude lui-même. L'art pariétal demande de fournir des supports pour le relevé très résolu pour révéler les gravures fines et l'utilisation des couleurs. D'autre part, les représentations s'inscrivent dans une cavité avec des volumes variés et complexes, des spéléothèmes, des calcites ou des sols archéologiques préservés... Les sites étudiés sont les grottes de Marsoulas (Haute-Garonne), Chauvet Pont-d'Arc (Ardèche), du Mas d'Azil (Ariège), de Bèdeilhac (Ariège), de Foissac (Aveyron) et du Pech Merle (Lot). L'intérêt principal de la multiplication des cavités réside dans la nécessité de s'adapter à la singularité de chacune d'entre elles (cf. figure I.1, p. 7). Les cadres d'intervention varient, ce qui module l'importance de l'usage de la numérisation 3D.

Phénomène mégalithique

Le second corpus se compose des expressions mégalithiques au travers du dolmen de Pech Laglaire (Lot), des 158 statues-menhirs rouergates (Aveyron, Hérault, Tarn) et du mégalithisme dans le sud de l'Éthiopie. Le premier item permet d'aborder la numérisation multiscalaire d'une opération archéologique de l'environnement, depuis le cairn et le dolmen jusqu'aux restes osseux. L'étude des stèles anthropomorphes entre dans le cadre de la Route des statues-menhirs d'Occitanie. Lors de la deuxième phase de numérisation 3D en 2023, nous avons pu standardiser les relevés, tant pour la valorisation et la conservation que pour la recherche. Les choix des conditions de conservation, qui n'ont pas toujours été les mêmes, se ressentent encore aujourd'hui. Ainsi dans le Tarn, les mégalithes sont exposés et érigés près de leur lieu de découverte, ce qui les livre aux éléments extérieurs (météorologiques, fongiques et humains). À l'inverse, les monuments aveyronnais sont principalement exposés dans des structures culturelles, à l'image du musée Fenaille qui en regroupe une vingtaine [192]. Ces décisions ont un impact sur l'état sanitaire et sur la visibilité des gravures des blocs [226, 152, 227]. Le problème de la conservation des œuvres en extérieur nous a imposé d'évaluer nos protocoles pour le suivi temporel, notamment sur les stèles phalliques du pays Gédéo, en Éthiopie.

Mobilier des musées

Le troisième corpus concerne les œuvres conservées dans les musées, principalement du mobilier archéologique. Nous avons eu l'opportunité d'accéder aux réserves du musée d'Archéologie nationale à Saint-Germain-en-Laye, du musée Saint-Raymond à Toulouse, du centre de Préhistoire du Pech Merle à Cabrerets, du Musée et sites archéologiques de Saint-Romain-en-Gal et du Centre national et musée Jean Jaurès à Castres. Ces riches collections nous ont permis de nous confronter à la notion de « vérité terrain ». De nombreux mobiliers ont été testés, soit pour leur représentativité en archéologie, soit pour la

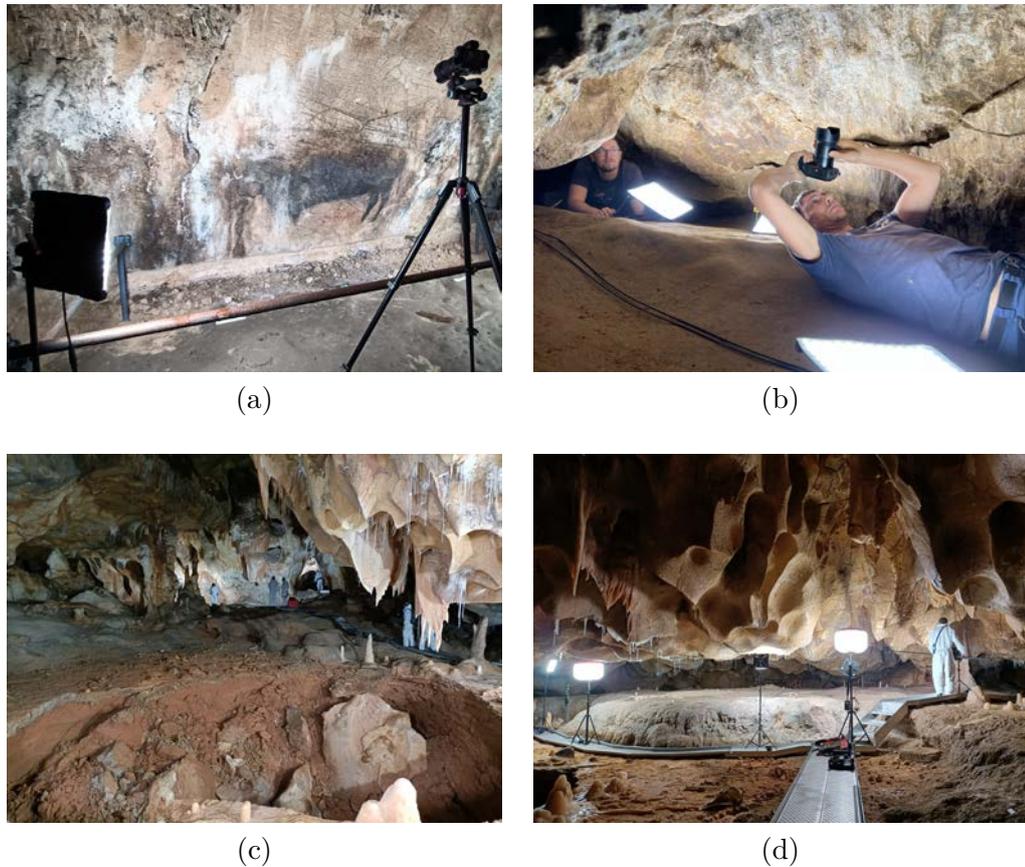


FIGURE I.1 – Illustration de certaines difficultés rencontrées dans les grottes : (a) nécessité d'éclairer (grotte de Bèdeilhac); (b) espace restreint (grotte de Marsoulas); (c) volume important (grotte Chauvet); (d) cheminement contraint (grotte Chauvet).

complexité des matériaux, soit pour la richesse du décor, parfois en nous greffant sur des projets de recherche en cours.

Archéologie du bâti

Initialement prévus dans le corpus, certains sites fortifiés médiévaux et modernes du Tarn n'ont pas été traités dans ce manuscrit, pour des raisons de temps et d'autorisation. De plus, le fait de s'orienter vers une méthode de reconstruction 3D multiéclairage soulève des limites d'utilisation sur des élévations de plusieurs mètres de haut ou liées au travail en extérieur. Du point de vue archéologique, une résolution sub-centimétrique, voire millimétrique, n'est pas utile. Cependant, les travaux réalisés autour de certaines parois de grottes sont similaires au travail sur une élévation de bâti.

Nous avons répertorié l'intégralité des sites visités sur la figure I.2 (p. 8) et l'ensemble des opérations dans l'annexe 1 (p. 151).

INTRODUCTION

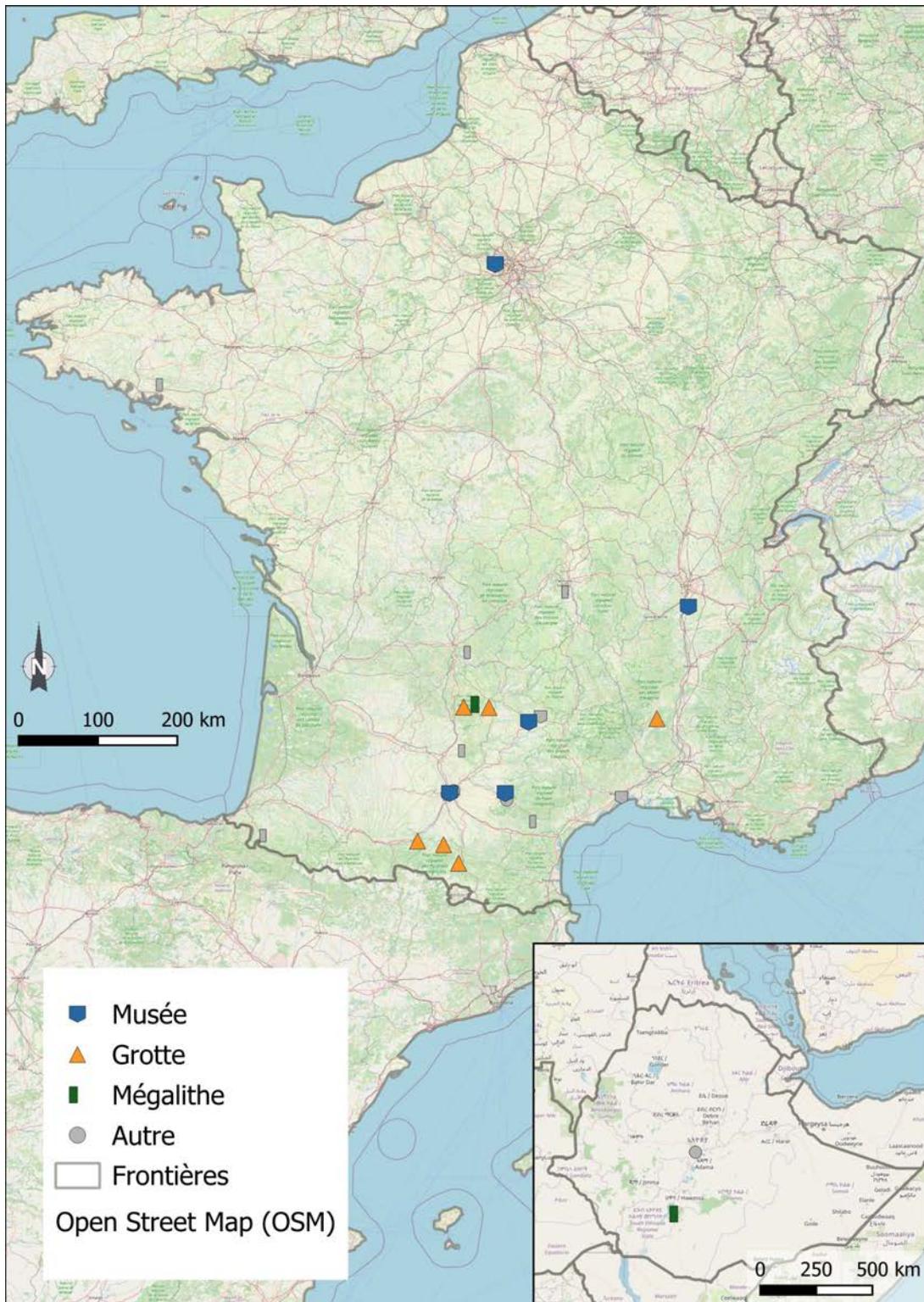


FIGURE I.2 – Carte des sites étudiés au cours de cette thèse. Les sites non mentionnés dans ce manuscrit sont grisés.

Apports et contributions de la thèse

Les principaux apports de ce travail sont d'ordres méthodologique et technique pour la numérisation 3D du patrimoine archéologique. Ce manuscrit entend non seulement proposer une nouvelle méthode de numérisation 3D pertinente pour les sciences du patrimoine, mais aborder certains questionnements plus largement. Les motivations premières découlent de problèmes archéologiques et visent à dépasser trois verrous. Le premier concerne la lecture fine du relief à partir d'une méthode facile à mettre en œuvre. Le deuxième consiste à proposer un outil de reconstruction 3D et le dernier caractérisera les matériaux.

Notre objectif majeur pour la recherche est d'enrichir la chaîne opératoire de numérisation 3D par de nouveaux protocoles d'acquisition, une chaîne de traitement *open source* et une interface optimisée. Pour la conservation et la préservation du patrimoine, c'est l'ouverture de portes vers une documentation dynamique du suivi temporel des œuvres.

Intégration des résultats pour la science ouverte

Nos contributions entendent participer à la science ouverte, et ce à plusieurs titres :

- *Open access* : nos publications ont été majoritairement proposées à des revues scientifiques favorisant l'accès gratuit en ligne, en plus des dépôts sur la plateforme HAL.
- *Open data* : nous partageons les données de nos recherches à la communauté, dans une perspective de reproductibilité de la méthode. Cela comprend les données sources, dans la limite du cadre législatif des opérations archéologiques ou des collections des musées.
- *Open source software* : l'une des opportunités de cette thèse est de nous adosser au développement du logiciel AliceVision/Meshroom, qui s'est déjà fait une place dans la communauté de la vision par ordinateur, et dont les nombreux atouts seront développés plus loin. Il s'agit surtout d'un logiciel libre, ce qui évite le côté « boîte noire » des logiciels propriétaires. L'ergonomie de l'interface est bénéfique à la formation des étudiants et des acteurs du patrimoine.

Participer au développement d'un logiciel *open source*

Pour la mise au point des protocoles de numérisation 3D proposés dans ce manuscrit, nous nous appuyons sur la solution logicielle AliceVision/Meshroom [102], qui combine des outils et des bibliothèques *open source* à une interface fonctionnelle, flexible et ergonomique. Ce support est un atout pédagogique pour la formation, toutes les étapes du processus étant décrites. Plus généralement, ce logiciel bénéficie de deux qualités majeures : il est gratuit et sa maintenance est assurée par une communauté dynamique.

Un point important dans la concrétisation de cette thèse concerne la diffusion des résultats, et surtout la possibilité offerte à tous de les reproduire. Nous profitons de l'historique et des partenariats en cours entre les membres de l'IRIT et les multiples autres acteurs qui contribuent au développement de cette suite logicielle. Les améliorations sont intégrées au fur et à mesure dans le logiciel, qui est constitué de la suite logicielle AliceVision et de son interface Meshroom.

Suite logicielle AliceVision

L’aventure AliceVision a débuté avec deux projets de thèse menés entre 2009 et 2013 : tout d’abord, la thèse de Michal Jancosek, dirigée par Tomas Pajdla, portant sur le développement d’un processus de stéréoscopie multivue (MVS) appelé CMPMVS [131], puis celle de Pierre Moulon, dirigée par Renaud Marlet et Pascal Monasse, autour d’une amélioration d’un pipeline *open source* de *structure-from-motion* (SfM) appelé openMVG [182]. Ces collaborations ont mis en relation des acteurs de la recherche publique européenne (IRIT à Toulouse, INRIA Grenoble, École des Ponts ParisTech, laboratoire Simula à Oslo, laboratoire CTU à Prague) et des partenaires industriels (sociétés Duran Duboi, puis Mikros Image).

Cette synergie s’est concrétisée par deux projets européens : le projet POPART (2015-2016) a traité les questions de la prévisualisation 3D et du suivi de caméra propres aux besoins des effets spéciaux (VFX), tandis que le projet LADIO (2017-2018) a abordé le traitement spécifique des données 3D autour d’une plateforme de données entre les équipes de tournage et celles de post-production. Ces projets ont abouti à la première publication du logiciel en août 2018 (cf. figure I.3, p. 10). En parallèle, la thèse de Jean Mélou [170], dirigée par Jean-Denis Durou et Yvain Quéau, s’est appliquée à conjuguer les approches géométrique et photométrique de la reconstruction 3D photographique.

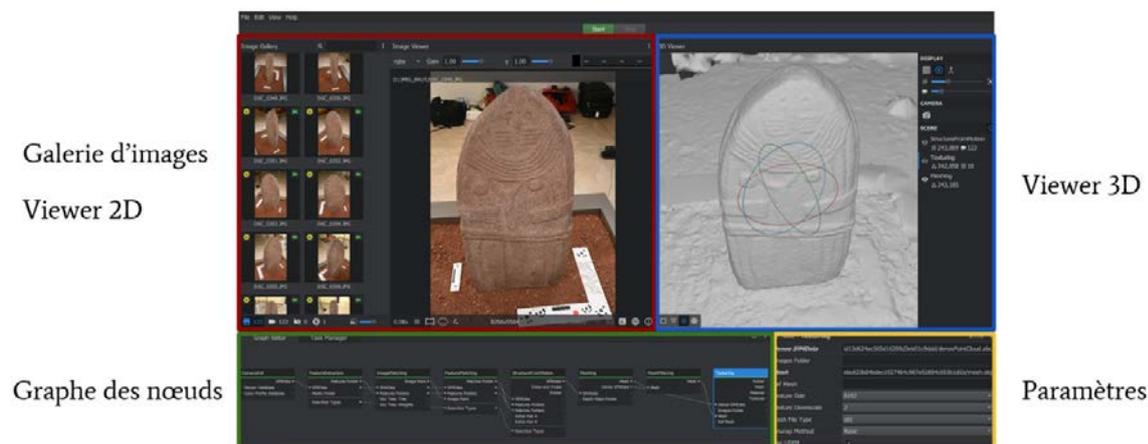


FIGURE I.3 – Présentation des principaux panneaux de l’interface Meshroom.

La dernière étape en date est un projet de type « laboratoire commun » financé par l’ANR, dénommé ALICIA-Vision¹, qui aura lié de mai 2020 à octobre 2024 l’IRIT et la société Mikros Image autour de quatre axes : l’amélioration de la performance et de la robustesse des processus de reconstruction 3D ; le suivi de caméra et la localisation d’objets en mouvement ; l’extraction des caractéristiques géométriques et photométriques dans un cadre multivue ; enfin, la détermination des matériaux à partir de données multivue.

1. <https://alicevision.org/labcom-alicia/>

Interface Meshroom

L'interface Meshroom de la suite logicielle AliceVision est de type nodal [102] : chaque étape de traitement, exécutée indépendamment, possède ses propres données d'entrée et ses propres résultats. L'espace du graphe de nœuds permet de visualiser et d'éditer l'ensemble de la chaîne de traitement. Des chaînes de traitement pré-enregistrées sont livrées avec le logiciel, mais l'utilisateur a la possibilité de créer, importer et partager ses propres graphes. Chaque nœud est une commande Python paramétrable dans l'espace dédié. La modularité de traitement offerte par l'interface donne la possibilité de créer de nouveaux nœuds, ce qui permet de lancer n'importe quel code Python. Cette fonctionnalité est à l'origine du développement d'une interface commune avec MicMac, logiciel libre développé par l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) [193].

Plan du manuscrit

Ce manuscrit est organisé en quatre chapitres. Le premier chapitre (p. 13) interroge la place des outils de numérisation 3D dans la pratique de terrain des sciences du patrimoine et de l'archéologie. Le rôle des modèles 3D est de plus en plus important pour l'enregistrement, l'analyse et la conservation des vestiges. L'expertise accompagnant ce processus est elle aussi croissante. L'intégration de ces compétences et du matériel par les différents acteurs implique des choix structurels ayant *de facto* des conséquences sur la création de la donnée numérique 3D.

Le chapitre 2 (p. 51) aborde la mise en pratique actuelle par le prisme de la photogrammétrie, qui est aujourd'hui la méthode de numérisation 3D du patrimoine la plus répandue. Cette technique photographique présente de nombreux avantages, notamment son adaptabilité à des cas d'usage très variés.

Le chapitre 3 (p. 79) présente une autre méthode pertinente de numérisation 3D. Cette technique photométrique, encore peu utilisée, exploite des photographies prises sous différents éclairages. Nous allons examiner son potentiel pour l'aide à la lecture du relief de surface ou l'estimation de l'albédo.

Enfin, le chapitre 4 (p. 115) a pour ambition d'ouvrir la voie à un renouveau de la chaîne opératoire de numérisation 3D. Les développements effectués au cours de la thèse tendent vers la création d'une séquence de traitement complète et performante de reconstruction 3D, fondée sur les pratiques décrites dans les premiers chapitres et pensée pour les acteurs du patrimoine.

La majorité des illustrations ont été réalisées par l'auteur lui-même, sous la supervision de ses encadrants. Dans le cas contraire, une mention adaptée précise les contributions.

INTRODUCTION

La place des outils de reconstruction 3D pour le patrimoine

Les définitions autour de la numérisation 3D couvrent de nombreuses réalités, tant par les usages et les compétences que par les métiers concernés. Les pratiques en SHS se déroulent en trois axes principaux [98]. Le premier axe regroupe les étapes allant de l'existant au numérique, soit la traduction du réel vers le virtuel. Le second est la construction et la recherche des hypothèses autour des modèles 3D. Le troisième aborde les questions de la visualisation de ces données. Le travail de numérisation 3D est au cœur de ce manuscrit avec principalement les aspects de l'acquisition instrumentale et les traitements associés jusqu'à la livraison des données. Ce premier chapitre aborde les questionnements SHS qui déterminent les besoins de la numérisation 3D.

1.1 Représenter la troisième dimension

En archéologie, tous les vestiges, depuis l'objet jusqu'à la paroi ornée, recèlent des informations spatiales. Elles peuvent être abordées en plan (cartographie) ou en volume avec une troisième dimension. Certains questionnements nécessitent l'obtention de cette dernière. Dès lors, nous devons tendre jusqu'au niveau de précision et de résolution permettant d'y répondre. Nous nous sommes toujours appuyés pour la captation du volume sur les derniers développements et opportunités technologiques accessibles.

Sans faire un catalogue exhaustif des méthodes mises en œuvre, nous orientons notre propos vers les outils déployés sur le terrain pour l'enregistrement des surfaces. Nous nous intéressons aux méthodes mobilisables sur le terrain, ce qui exclut les méthodes volumiques (IRM, tomographie, CTscan, MEB, radiographie) et les appareils de microscopie.

La recherche de la troisième dimension s'inscrit dans la continuité de la pratique archéologique pour la création des supports afin de documenter, analyser et diffuser des vestiges. Le tableau 1.1 (p. 14) propose un classement incluant à la fois des outils classiques et des techniques de numérisation 3D, d'après [159, 129, 18]. Les méthodes se répartissent en deux catégories : directes et indirectes. Cette dualité détermine la présence ou non de contact avec l'objet. Pour les méthodes indirectes, certains capteurs, dits actifs, émettent un rayonnement pour déterminer la distance à l'objet et effectuer les mesures. La notion de méthode destructrice n'est pas indiquée dans le tableau. Cependant, la présence de contact entraîne une altération de surface. Des rayonnements, tels que les UV, peuvent modifier

CHAPITRE 1. LA PLACE DES OUTILS DE RECONSTRUCTION 3D
POUR LE PATRIMOINE

Méthodes directes	Méthodes indirectes	
	Actives	Passives
Moulage	Scanner laser (TLS)	Copie à vue
Estampage	Scanner laser (ALS)	Croquis
Frottage	Scanner laser à triangulation	Dessin au point
Calque	Scanner lumière structurée	Calque à distance
Palpeur	Photographie multiéclairage	Photographie
Distance manuelle	Ultraviolet	Multispectral

TABLE 1.1 – Tableau simplifié de la répartition des méthodes d’enregistrement de la 3D employées sur le terrain en archéologie. Les méthodes enregistrant nativement en 3D sont indiquées en bleu. [Adapté de [159, 129, 18]].

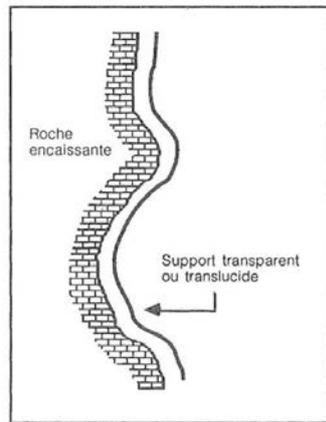
les propriétés de certains matériaux (phénomène de décoloration), mais une faible exposition peut être considérée comme négligeable [23]. Enfin, selon les méthodes employées, l’information obtenue possède deux ou trois dimensions spatiales.

Dans ce qui suit, nous présentons brièvement les outils méthodologiques employés en archéologie et leur typologie. En parallèle, nous nous interrogeons sur la caractérisation de ces outils et la visualisation des données produites.

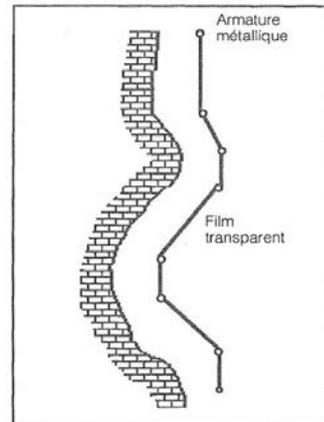
1.1.1 Historique des méthodes de relevé de surfaces

Dans la pratique quotidienne d’un archéologue, l’enregistrement et la diffusion des résultats d’une étude nécessitent de projeter un objet physique en 3D vers un plan en 2D. « *Le passage de la surface originale, de configuration aléatoire, à la surface plane du document final ne s’effectue pas sans quelques difficultés et, en fonction des moyens disponibles, sans une certaine approximation* » [25]. À l’image des indicatrices de Tissot pour la projection cartographique¹, Norbert Aujoulat identifie quatre projections pour les parois ornées présentées sur la figure 1.1 (p. 15) et aborde leurs difficultés liées aux déformations induites. La projection sur une surface développable correspond aux méthodes directes par apposition d’un matériau sur la paroi, y compris un moulage. La projection polyédrique divise la surface en plusieurs plans afin de suivre la paroi, ce qui impose souvent des compromis au moment de l’assemblage. La projection orthographique est le fait d’amener sur un plan les informations sélectionnées. La dernière projection, dite conique, correspond à la projection photographique sur un plan, avec comme centre de projection le centre optique. Bien que longue à mettre en place sans outil de calcul numérique, la projection orthographique est l’une des plus utilisées en archéologie actuellement, notamment avec l’usage des orthophotographies. Ces dernières permettent d’accélérer, avec une meilleure résolution, le levé en plan ou en élévation des vestiges [244]. La projection conique, assimilée à l’utilisation de l’appareil photographique, sera développée plus longuement par la suite.

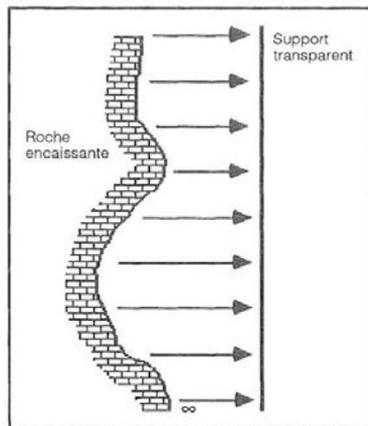
1. Les indicatrices de Tissot, utilisées en cartographie, sont un concept géométrique permettant de visualiser et mesurer l’impact des projections cartographiques. Les déformations sont de trois types : déformation angulaire, déformation des distances et déformation des surfaces.



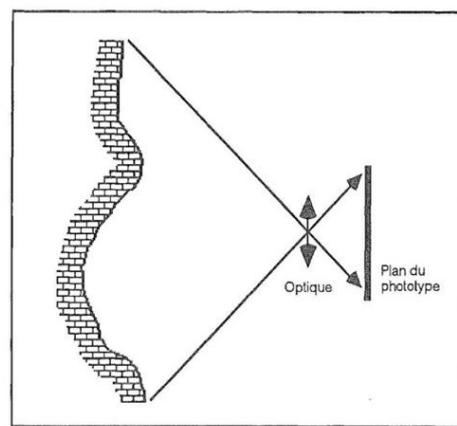
Projection sur une surface développable.



Projection polyédrique.



Projection orthographique.



Projection conique.

FIGURE 1.1 – Les quatre projections identifiées par Norbert Aujoulat. [Reproduit de [25]].

1.1.1.1 Méthodes directes

L'intérêt des méthodes directes est d'être au plus près de l'œuvre et d'en suivre la surface de support. Cela limite les déformations obtenues par la projection, avec comme principal avantage d'obtenir une reproduction à l'échelle 1. L'information recherchée et enregistrée est la géométrie. Certaines méthodes permettent la sélection et l'extraction de l'information archéologique, alors que d'autres s'apparentent à une empreinte. Elles s'approchent d'une copie exhaustive de la matérialité d'un objet, mais ne constituent pas une étape de l'analyse de celui-ci.

Les premiers relevés d'art pariétal, à la fin du XIX^e siècle, s'approchent d'une reproduction de la paroi afin de rendre compte du phénomène de l'art en grotte [26]. Ainsi, l'estampage est utilisé pour la première fois en 1878 par Léopold Chiron dans la grotte Chabot (Gard) [60, 210]. Cette prise d'empreinte fonctionne avec des feuilles de buvard

humidifiées et appliquées sur la paroi. Après séchage, cela permet d’obtenir un négatif de la paroi contenant simultanément les informations géologiques et anthropiques [25]. Cette méthode est aussi déployée pour l’étude épigraphique [51].

Les moulages avec du plâtre ou de l’argile sont employés notamment à la Mouthe par Émile Rivière à la même période [209]. Cette pratique est encore utilisée sur d’autres patrimoines, comme sur un corpus de neuf exemplaires de statues-menhirs exposées au musée de Saint-Pons (Hérault). Ces méthodes directes sont fortement destructrices et modifient les informations de surface, notamment par « *desquamation et [par] la mise en solution de constituants argileux* » [227].

Afin de rester fidèle à la réalité physique, le frottage à l’aide d’une feuille plaquée sur la surface est encore pratiqué avec les mégalithes [212, 213]. Le résultat reste à l’échelle 1, avec une faible déformation pour les statues-menhirs, puisque celles-ci ont des faces quasi-planes. Cet outil est caractérisé par une faible part d’interprétation. Toutefois, les variations de pression ou de qualité du crayon entraînent un marquage différentiel du relief [164].

L’utilisation du calque (papier de fleuriste), appliqué à même la paroi pour le relevé de l’art pariétal, a été couramment employé et notamment par l’abbé Breuil [195].

L’usage des méthodes directes est dorénavant réduit au strict minimum, afin d’éviter toute détérioration des surfaces ornées. Le développement des procédés indirects, non invasifs, est aujourd’hui indispensable.

1.1.1.2 Méthodes indirectes

Les trois approches décrites ci-dessous reflètent des choix de représentation en fonction du point de vue de l’observateur. Les archéologues se sont appliqués à restituer le relief en utilisant toute la palette des techniques artistiques liées au dessin (ombres, perspectives, etc.). Les premières représentations de l’art pariétal en 1880 dans la grotte d’Altamira [69] sont des copies à vue [26]. Elles rendent compte à la fois de l’environnement, des lieux et des dessins. Elles constituent des reproductions nécessitant des compétences en dessin et en peinture (cf. figure 1.2, p. 17).

La méthode du croquis associé à des observations *in situ* est opérée pour toutes les périodes, comme avec les travaux de l’abbé Hermet sur les statues-menhirs présentés sur la figure 1.3 (p. 17). Elle offre des résultats satisfaisants pour dessiner en plan les contours des principaux décors présents à la surface des stèles. Malgré toutes les précautions, ces relevés obéissent à une grande part d’interprétation. Ils nécessitent d’opérer des choix, en privilégiant par exemple les contours des décors en relief ou, à l’inverse, les parties réservées en creux. Selon les matériaux ou les techniques de mise en forme utilisés, la restitution de la profondeur des sillons ou de l’épaisseur des reliefs reste difficile à traduire par le dessin, même si cela dépend de la qualité du dessinateur.

Une autre méthode, plus lourde en termes de temps d’acquisition (de l’ordre de plusieurs jours) et nécessitant une maîtrise de la technique, est le dessin point par point. L’archéologue représente, sous forme de dessin avec différentes densités de points, le relief et les motifs présents sur la surface du bloc. Cette méthode présente l’avantage de souligner les détails fins, mais comme elle repose sur une interprétation du relief, elle comporte une part de subjectivité [133, 134].

1.1. REPRÉSENTER LA TROISIÈME DIMENSION



FIGURE 1.2 – Relevé du plafond polychrome d'Altamira publié par Sanz de Sautuola en 1880. [Reproduit de [124]].

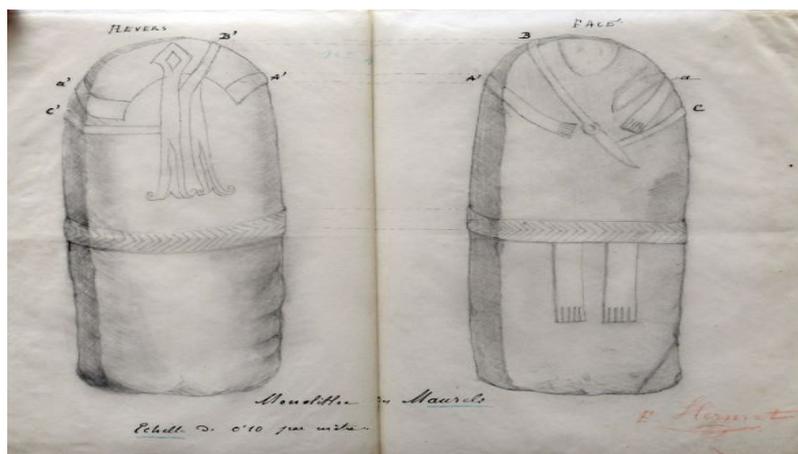


FIGURE 1.3 – Croquis de la statue-menhir des Maurels réalisé par Frédéric Hermet, c. 1890, mine de plomb, encre de chine et pastel sur papier calque. [Reproduit du fonds de la Société des lettres, sciences et arts de l'Aveyron].

Le calque, tenu par une structure, permet de s'approcher de la paroi en évitant tout contact avec celle-ci. Cette méthode, utilisée dès les années 1920 par l'abbé Lemozi à la grotte du Pech-Merle [153], est encore d'actualité à la fin du XX^e siècle, comme dans la grotte de Bèdeilhac [173]. L'abbé Lemozi couple également cette méthode avec le relevé par carroyage utilisé par les copistes [189].

À partir des années 1960, en parallèle des techniques évoquées, la photographie est devenue un support privilégié, sur lequel nous allons revenir.

Aujourd'hui, les techniques de relevé des œuvres pariétales s'appuient sur des données 3D. Néanmoins, les moyens de restitution empruntent deux voies possibles. La première consiste à travailler sur des supports 2D, mais ce choix impose de surmonter la transposition

entre les supports 2D et 3D [88], y compris de données anciennes numérisées. La seconde voie aspire aux relevés exécutés directement sur les modèles 3D [101, 87, 90, 216].

1.1.1.3 La photographie

La photographie occupe une place particulière dans la documentation archéologique [142]. Elle offre à lire les surfaces, les reliefs... tout en fournissant une information de couleur (RVB ou niveau de gris), et ce sans comporter une interprétation par sélection des objets qui composent la scène. Elle est un instantané figé dans un cadrage déterminé par l'archéologue.

Une photographie est à la fois une composition, un discours et un outil technique. Elle rend compte de l'activité de recherche. Le développement de la photographie scientifique en archéologie a permis une certaine standardisation de la prise de vue, par l'insertion d'éléments informatifs tels que des règles, une plaque d'information, une flèche indiquant le nord et, éventuellement, une charte colorimétrique.

Une photographie est la combinaison de plusieurs éléments. La « métaphore de l'atelier » (cf. figure 1.4, p. 18) montre trois configurations produisant la même image, obtenues en ajustant convenablement la couleur de la scène, sa géométrie et l'éclairage. La réalité est bien souvent une composition de ces trois éléments. Le volume et la couleur étant fixés initialement par le vestige, l'archéologue ajuste l'éclairage pour accentuer un relief et en optimiser la perception.

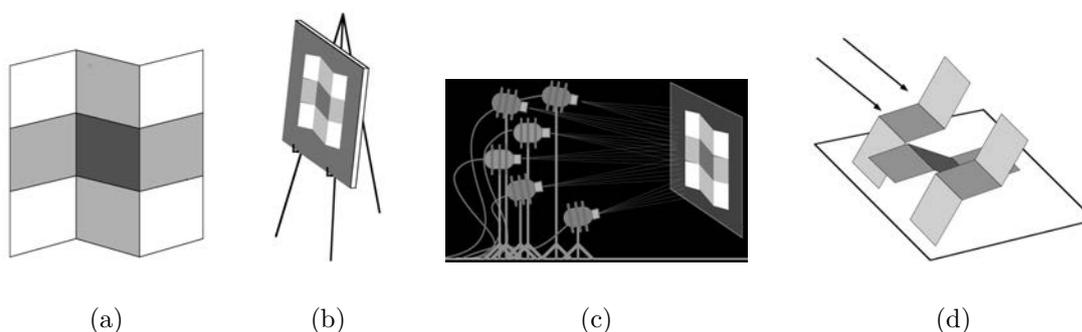


FIGURE 1.4 – « Métaphore de l'atelier ». L'image (a) peut être obtenue : (b) par la réalisation d'un trompe l'œil ; (c) par un jeu de lumières de différentes intensités ; (c) enfin, par un relief blanc éclairé par une source lumineuse uniforme. [Reproduit de [20]].

Le procédé le plus employé est la photographie avec un éclairage rasant, et ce depuis le début du XX^e siècle jusqu'aux travaux actuels [55, 140]. Un éclairage naturel ou artificiel peut accentuer le relief, notamment les gravures, pour en améliorer la lecture. Ainsi, des fonds photographiques sur plaques de verre documentent la découverte des statues-menhirs en Aveyron, avec un usage astucieux de la lumière du Soleil.

L'ombre générée par la mise en lumière modifie la lecture des gravures. Lors des observations *in situ*, il est facile de faire varier l'origine de la lumière pour étudier, par exemple, la chronologie des incisions. Les gravures perpendiculaires à la source de lumière sont particulièrement mises en valeur, ce qui explique la nécessité de faire varier l'angle et l'origine

de cette source pour une meilleure lecture des détails. Pour la statue-menhir de Balaguier (cf. figure 1.5, p. 19), le motif central passe du poignard à la pendeloque, en fonction de la source lumineuse placée soit en haut à droite, soit en haut à gauche [164]. Sur ce monolithe en ronde-bosse, l'ombre propre accentue le traitement de surface du bloc, tandis que les ombres portées révèlent les principaux motifs sculptés.



Éclairage situé en haut à droite.



Éclairage situé en haut à gauche.

FIGURE 1.5 – Statue-menhir de Balaguier sous deux éclairages différents.

De plus, la projection conique d'une scène sur un plan en deux dimensions ouvre la voie à la possibilité de mesures géométriques à partir de ce point de vue perspectif. Nous pouvons citer l'exemple de la « métrophotographie » développée par Aimée Laussedat aux Invalides [150]. La multiplication des angles représente un intérêt pour la mesure des façades de bâtiments, et par suite pour la topographie.

Notons le développement du travail sur mosaïque de photographies depuis les années 1980 [33], comme le montre le photomontage du panneau des Chevaux de la grotte Chauvet (cf. figure 1.6, p. 20). L'accès démocratisé à la photographie numérique de haute définition permet de multiplier les prises de vue, avec des capteurs toujours plus performants associés à des objectifs haut de gamme. De plus, il devient possible de conserver davantage d'informations dans les images grâce aux métadonnées (EXIF), qui n'existent pas pour les plaques de verre ou les négatifs argentiques. La photographie est une archive importante pour parcourir l'histoire d'un site archéologique ou d'un objet. La recherche des paramètres et des conditions de prise de vue est essentielle pour repositionner et interpréter correctement l'information contenue dans ce support.



FIGURE 1.6 – Panneau des Chevaux de la grotte Chauvet (Ardèche). À gauche : photomontage de plusieurs photographies argentiques prises sous éclairage rasant pour accentuer les gravures et la matière de la paroi. Au centre : relevé graphique du cheval numéro 4. À droite : vue agrandie des gravures et de la mise en forme de la tête du cheval. [Reproduit de [82, 86]].

L'un des principaux atouts de la photographie numérique réside dans la possibilité de développer les fichiers bruts (RAW) provenant des capteurs, à l'instar des négatifs argentiques. En plus de pouvoir corriger des paramètres tels que l'exposition, la balance des blancs ou le contraste, chaque chercheur a la liberté de modifier l'espace colorimétrique d'une photographie, offrant ainsi une flexibilité accrue dans l'analyse des images. Cela inclut notamment la possibilité de décorréler les différents canaux RVB (rouge, vert, bleu) qui composent une image, permettant ainsi une analyse plus fine des nuances chromatiques et la mise en évidence de détails difficiles à voir à l'œil nu. Cela permet de mettre en exergue certaines couleurs, comme des motifs au pigment rouge sur une paroi.

Un outil régulièrement utilisé pour la détection et l'amélioration des couleurs est le logiciel DStretch, qui est particulièrement efficace pour révéler des détails chromatiques souvent subtils à observer [111, 151]. Ce procédé se conjugue par la suite avec la segmentation de l'image pour accélérer le relevé [178]. Son efficacité est fortement liée à la photographie initiale et aux conditions d'éclairage lors de la prise de vue. Toutes les techniques d'imagerie (UV, IR, rayons X, etc.) [45] ne sont pas développées dans ce mémoire, car nous nous concentrons sur les fréquences situées dans le champ du visible.

De manière générale, toutes les données issues des méthodes présentées constituent une ressource précieuse, pouvant être réutilisées une fois numérisées. Elles pourront ainsi être traitées ultérieurement avec de nouveaux protocoles et outils, offrant des perspectives d'analyse et d'interprétation constamment renouvelées. Cela fonctionne par exemple avec les données statistiques converties d'un listing manuscrit vers un tableur [76], mais aussi avec les données iconographiques scannées [71]. Ainsi, les estampages épigraphiques numérisés, une fois mis en ligne avec des outils de visualisation 3D, offrent un nouvel accès interactif à la donnée source [51]. Enfin, la quête de la troisième dimension s'est en partie concrétisée avec la démocratisation de l'informatique et l'accès à des ordinateurs capables de traiter des volumes de données importants [243].

1.1.2 Visualisation de l'information 3D

Un site ou un vestige archéologique constituent une scène 3D. Celle-ci est composée de plusieurs éléments de différentes natures : géométrique (forme et disposition spatiale des éléments), photométrique (couleurs et propriétés des matériaux), caractéristiques de l'éclairage (position et intensité des sources lumineuses), enfin interaction des objets de la scène avec ce dernier.

Le numérique rend accessible la visualisation directement dans un espace 3D de la donnée. Les modes de représentation sont dépendants de la méthode d'acquisition utilisée. Toutefois, il convient de définir la notion de modèle 3D, afin de pouvoir sélectionner par la suite l'outil en fonction des buts de l'étude. Il s'agit d'une représentation numérique d'un objet « *suivant un référentiel isométrique qui soit, en outre, mesurable suivant ses trois axes* » [167].

Définition de l'information 3D

Depuis quelques décennies, la représentation 3D pour le patrimoine utilise essentiellement des surfaces explicites que sont les nuages de points et les maillages polygonaux [235]. Ils renseignent sur les caractéristiques de surface d'un artefact. Cependant, ce ne sont pas les seules possibilités (cf. figure 1.7, p. 21). L'usage des voxels (CTscan) et de l'imagerie par absorbance (radiographie, tomographie) est présent dans les sciences du patrimoine, bien que leur déploiement reste limité sur le terrain à cause de l'encombrement des appareils de mesure. Enfin, les outils de reconstruction 3D par apprentissage utilisent une représentation des objets sous la forme de surfaces implicites [174].

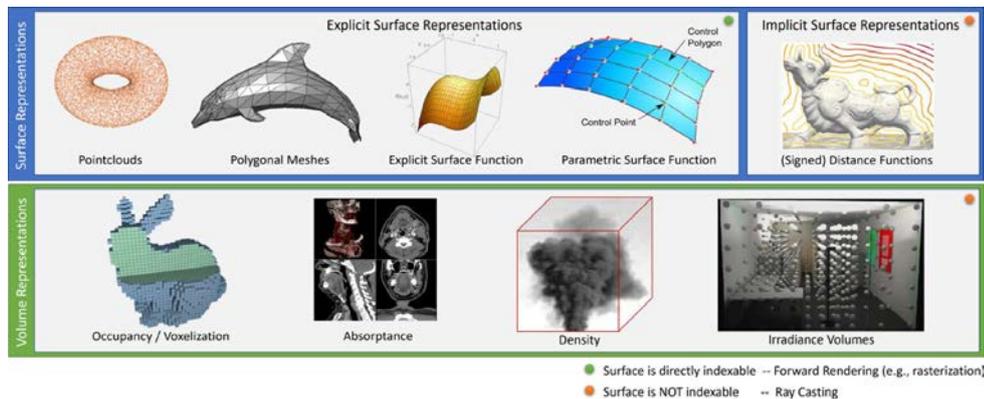


FIGURE 1.7 – Modes de visualisation de l'information 3D. [Reproduit de [235]].

Selon la méthode de numérisation 3D employée, différentes formes existent pour visualiser un double numérique. La représentation la plus simple est ponctuelle : un point 3D dans un volume possède trois coordonnées (X, Y, Z). Celui-ci peut posséder des attributs comme une couleur (rouge, vert, bleu), une normale (orientation locale de la surface), une classe (exemple d'un point décrivant le « sol » ou le « sur-sol »), une intensité du signal reçu, une date d'acquisition, etc.

Ensuite, le maillage est composé d'une liste de faces polygonales comportant des sommets (ensemble de points 3D) et des arêtes les reliant. Plusieurs types de maillages existent, dont les faces sont principalement triangulaires ou quadrangulaires. Pour aboutir à un maillage à partir de points, plusieurs méthodes d'interpolation peuvent être employées. Ainsi, un même nuage de points peut aboutir à différentes surfaces polygonales. Un maillage peut avoir une texture qui correspond à une image 2D plaquée sur la surface. Différentes informations complémentaires peuvent être affichées, comme la couleur, les normales, les propriétés de surface ou encore une exagération de l'ombrage caractéristique du *radiance scaling* [242]. Ces informations sont nécessaires pour obtenir des rendus réalistes. Les modèles peuvent être augmentés par des données multispectrales et par l'imagerie UV, afin de sortir du spectre visible.

Pour un utilisateur, le maillage donne à voir une surface continue sur laquelle peut être plaquée une texture, alors qu'il est plus rapide et précis d'afficher des points [98]. Pour aller plus loin, les modèles 3D seront complétés par des annotations et par les observations de chaque spécialiste gravitant autour d'une œuvre [234]. Ce dernier point questionne sur les modes de représentation de la diversité des informations [68]. Il est souvent nécessaire de faire des choix lors de l'affichage des données. Par exemple, les données « douces » de l'archéologue [137] sont difficiles à faire coexister avec les données « dures » recueillies à la sortie des capteurs.

La visualisation du relief ne nécessite pas le passage par la troisième dimension. Selon la technique de numérisation employée, il est possible d'utiliser une information « 2,5D », en particulier avec certaines méthodes photographiques. Sur une image 2D, l'information contenue par chaque pixel peut représenter la profondeur, c'est-à-dire la distance entre le capteur et la surface pour obtenir une « carte de profondeur ». Autre possibilité : le pixel indique l'orientation de la surface pour créer un « champ de normales ». En fausses couleurs RVB, ce dernier se traduit par une couleur qui désigne une direction, comme cela est illustré sur la figure 1.8 (p. 22) par une sphère et le « lapin de Stanford ». Cette visualisation autorise une lecture fine du relief de surface. Les angles déterminant les normales s'expriment soit relativement à un point de vue (par exemple une photographie), soit relativement à la scène 3D.



FIGURE 1.8 – Champs de normales en fausses couleurs RVB d'une sphère et du « lapin de Stanford ».

Perception de la donnée 3D

Un apport majeur de la numérisation 3D est de fournir différentes visualisations d'une scène, depuis n'importe quel point de vue. Cependant, si ces rendus sont des supports qui faciliteront le travail des professionnels, le système visuel humain n'est pas le meilleur outil pour analyser l'information, comme cela est illustré par le procédé du trompe-l'œil ou par l'illusion de l'ombre du damier (cf. figure 1.9, p. 23). Dans ce dernier exemple, l'œil humain éprouve une grande difficulté à évaluer les niveaux de gris des cases A et B qui, contrairement aux apparences, sont identiques.

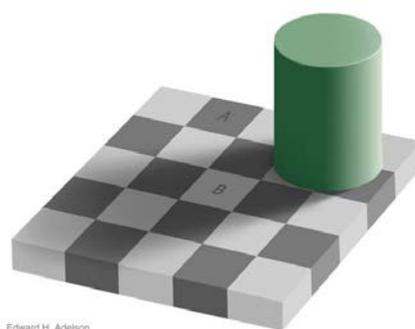


FIGURE 1.9 – Illusion de l'ombre du damier. [Visuel réalisé par Edward Adelson].

Une autre difficulté réside dans le choix effectué lors de la composition des visuels. En effet, certains choix peuvent tromper l'utilisateur, comme la confusion liée à l'ambiguïté concave/convexe, conséquence du positionnement des ombres. La perception du relief d'un même modèle numérique d'élévation (MNE) du château de Salses change, selon l'orientation de la source lumineuse (cf. figure 1.10, p. 23). Des règles de sémiologie graphique existent en cartographie pour éviter ces erreurs [38], volontaires ou non [177].



Éclairage provenant du nord-ouest.



Éclairage provenant du sud-est.

FIGURE 1.10 – Mise en évidence de l'ambiguïté concave/convexe à l'aide de deux éclairages opposés, sur le relevé Lidar HD de la forteresse de Salses-le-Château (Pyrénées-Orientales). [Données provenant du Lidar HD de l'IGN].

La manipulation des données a une grande importance pour la perception de l'information 3D. Une photographie, une carte ou la visualisation d'un modèle 3D sont tout autant un discours qu'un élément de langage graphique, puisque des choix sont opérés pour mettre en image une réalité (cadrage, données sélectionnées, échelle de visualisation, rampe de couleurs, etc.) [241]. Par nature, toute représentation d'une réalité est une construction et il est important de déterminer ou de signaler le moment où une donnée brute issue d'un capteur devient une donnée interprétée pour la rendre compréhensible par un utilisateur.

Revenons à l'exemple de la forteresse de Salses-le-Château. Nous pouvons comparer plusieurs visualisations de la même information (cf. figure 1.11, p. 25). Le nuage de points Lidar (a), qui a été classifié pour faciliter la lecture, avec une couleur pour le sol, une pour le bâti et une pour la végétation, est une mesure *a priori* objective sortie d'un capteur (si l'on met de côté le traitement algorithmique de la classification). Par une interpolation spatiale, le nuage de points Lidar est converti en une surface continue, en conservant les classes du sol et du bâti. De cette surface est produite une grille « raster » contenant l'information d'altitude de chaque pixel, ce qui donne un MNE. Dans un format texte (ASCII), ce dernier est lisible par un logiciel dédié, mais est difficilement compréhensible par un humain (b). Un affichage sous la forme d'une image en niveaux de gris (c), où la valeur de chaque pixel représente l'altitude, est la version graphique la plus neutre puisqu'elle est la définition d'un MNE. Toutefois, le fait d'ajouter une rampe de couleurs selon l'altitude et de superposer un ombrage par transparence (d) le rend plus lisible à l'œil, mais au détriment de l'objectivité, puisque les valeurs affichées sont choisies par l'utilisateur.

Pour conclure, un modèle 3D est une représentation en volume approchant une réalité physique. Il est indispensable de sélectionner l'information utile aux objectifs fixés. La donnée enregistrée est accessible à différentes étapes du processus de traitement, y compris lors de son exploitation scientifique. Il convient de renseigner toute manipulation ou tout traitement, depuis les données brutes extraites du capteur jusqu'aux données interprétées livrées (para-donnée, méta-donnée et protocole de traitement). Cela évite toute incompréhension dans les résultats et autorise une reproductibilité de la méthode et de l'information.

1.2 Caractérisation des outils de relevé 3D

La création de doubles numériques s'inscrit dans la continuité de la pratique archéologique de terrain et assure une autre visualisation de la donnée pour atteindre une meilleure compréhension et un enregistrement le plus complet possible. Les objectifs de la numérisation 3D dépendent des outils et des méthodes retenues. Inversement, selon les outils retenus, il ne sera possible de répondre qu'à des problèmes spécifiques. Les techniques de reconstruction 3D apportent une information quantitative, là où l'apport du spécialiste est principalement qualitatif.

Il convient de s'interroger sur le « quoi » numériser avant de déterminer le « comment », afin d'employer les outils méthodologiques qui répondent à l'objectif fixé. L'intérêt de la numérisation porte-t-il sur la géométrie, sur le relief général ou celui des détails, sur la lecture chronologique de surface et la métrique des œuvres, sur la couleur, sur la caractérisation de l'apparence des matériaux, ou encore l'interaction avec la lumière ? Il faut

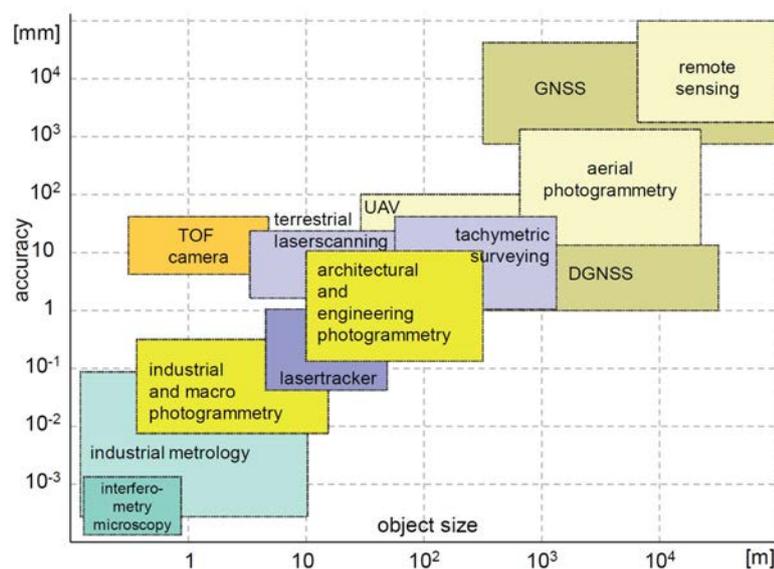


FIGURE 1.12 – Rapport entre l'échelle de l'objet à numériser et la précision souhaitée. [Reproduit de [161]].

Les facteurs affectant la qualité d'une acquisition 3D sont de quatre ordres [57] :

- le facteur humain (choix des protocoles d'acquisition et des chaînes de traitement) ;
- les conditions environnementales (pluie, vent, vibrations, etc.) ;
- les propriétés de l'objet (taille, morphologie, matériaux, etc.) ;
- les limites instrumentales inhérentes à l'outil.

La fiabilité souhaitée des données doit être prise en compte en amont d'un projet et contrôlée à la livraison, en portant attention à différents aspects [15]. Il existe un vocabulaire normalisé pour décrire la précision d'une mesure [16] et des méthodes d'évaluation d'un modèle 3D.

Une « mesure » est le calcul de la distance entre un capteur et une surface selon une direction donnée, aboutissant à un point 3D. La « résolution » correspond à l'espace entre deux mesures. En anglais, *precision* se distingue du terme *accuracy*, alors qu'en français, seul le mot précision est conservé. Nous retenons que la « précision » équivaut à la dispersion des résultats des mesures de l'échantillon autour de la surface probable, ce qui équivaut à l'épaisseur du nuage de points [143]. Il s'agit de la capacité de répétabilité de la mesure. *Accuracy* peut se traduire par « justesse ou exactitude », ou encore dispersion des écarts à la surface réelle (cf. figure 1.13, p. 27). Transposées à l'étude d'un vestige, une bonne précision décrira bien la morphologie et une bonne justesse se rapprochera au mieux de la vérité terrain [28].

Selon les objectifs, la qualité d'une acquisition comprend sa complétude, ainsi que la densité de points [12]. De plus, le traitement des données aberrantes, des données non pertinentes et des données redondantes doit être pris en compte [98].

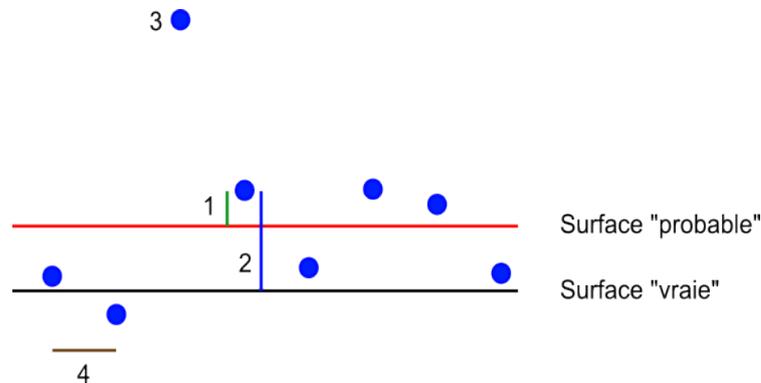


FIGURE 1.13 – Définitions autour de la qualité des données d'un nuage de points (mesures) : 1- écart à la valeur de la surface probable constituant la précision ; 2- écart à la valeur de la surface vraie constituant la justesse ; 3- donnée aberrante ; 4- résolution ou espacement entre deux mesures. [Adapté de [143]].

Avec ces éléments, nous allons présenter les outils actuels permettant la numérisation 3D surfacique habituellement utilisée en archéologie [15], et en voir les limites sur le terrain.

1.2.2 Outils non photographiques

Topographie

Les méthodes de topographie sur le terrain permettent l'acquisition de points dans un système de coordonnées global ou local. Ces points peuvent soit décrire le relief ou un vestige, soit servir au géoréférencement d'autres méthodes. Ces procédés apportent les informations liées à l'échelle, à l'orientation et au positionnement du modèle 3D. Dans le premier cas, les outils topographiques enregistrent les coordonnées de points remarquables comme des altitudes, du mobilier ou les contours d'une structure. Afin d'obtenir le relief, l'arpentage classique s'effectue par un levé de points, suivant la loi de Pareto, qui décrit au mieux le relief, comme cela est montré dans l'annexe 2 (p. 154) sur un tumulus néolithique situé près de Thouars (Deux-Sèvres). Il faut enregistrer les 20% de points qui caractérisent au mieux 80% de la géométrie. L'objectif est de réduire le temps de présence sur le terrain, en acceptant de perdre une partie de l'information afin de limiter les coûts. Dans le deuxième cas, la topographie sert au positionnement des autres types d'acquisition, soit dans un repère orthonormé en coordonnées locales, soit dans un repère Monde. En France, le géoréférencement utilise la projection du Réseau géodésique français (RGF), établi en 1993 comme référence géographique légale. Lui sont associées deux projections (Lambert93 et « coniques conformes 9 zones »). Le choix d'un système géodésique de référence et d'une projection associée dépend de la localisation sur la planète. L'objectif est d'éviter les distorsions liées à la projection.

Historiquement, les équipements de mesure, théodolite, puis tachéomètre, et enfin station totale, fonctionnent avec les mesures d'une distance et des angles horizontal et vertical. Ces informations fournissent un point 3D. L'évolution des instruments autorise le calcul

du point par des moyens numériques et une génération rapide du plan d'un site, avec une précision de l'ordre du millimètre. Par la multiplication des mesures et en respectant des règles comme un cheminement polygonal, la limitation de l'erreur de collimation, la fermeture des polygones, le topographe est capable de fournir une cartographie possédant des points de contrôle ou de référence pour de futurs levés ou acquisitions. L'établissement de ce canevas topographique est l'une des premières étapes de la numérisation d'un site archéologique.

Depuis les années 1980, avec le développement des systèmes de positionnement global (GPS), puis le système de géolocalisation par satellites (GNSS) composé de plusieurs constellations, les mesures sont directement effectuées dans le repère Monde. Selon la localisation du site, il est possible de corriger la mesure en utilisant une base fixe ou une station pérenne. La correction s'effectue soit *a posteriori*, après retour à l'étude, soit en direct par la réception des données de correction (RTK). Cette étape, selon les conditions d'acquisition, peut offrir une précision subcentimétrique.

Les outils de topographie fournissent une grande précision sur des points sélectionnés par un œil expert. Leur principale faiblesse est la densité de points acquis, qui se limite à quelques centaines par jour. Pour pallier ce manque de résolution de l'information, d'autres approches sont utilisées de manière complémentaire.

Lasergrammétrie

La lasergrammétrie utilise un faisceau de lumière pour déterminer la distance entre le scanner et une surface à numériser. Trois modes d'acquisition existent :

- statique au sol (TLS, pour *terrestrial laser scan*) ;
- dynamique en aérien (ALS, pour *aerial laser scan*) ;
- mobile au sol (SLAM, pour *simultaneous locating and mapping*).

Nous allons développer principalement les méthodes terrestres.

Le principe de fonctionnement de la lasergrammétrie se rapproche d'une station totale (le scanner mesure une distance et les angles horizontal et vertical), mais contrairement à cette dernière, l'appareil effectue un balayage laser de plusieurs milliers à plusieurs millions de points par seconde, dans toutes les directions [144]. Il enregistre pour chacun d'entre eux les coordonnées, l'intensité du signal reçu et la couleur, s'il est associé à un appareil photographique. Le scanner numérise un environnement par la projection d'une trame régulière depuis sa position, ou « station ». Les mesures de l'opérateur ne concernent plus simplement les points caractéristiques d'une scène mais toutes les directions. Cela réduit le temps sur le terrain, mais augmente le temps de traitement.

Trois types de scanners terrestres existent [144, 98]. Premièrement, les scanners à temps de vol, dits « à impulsions », mesurent le temps que met le faisceau laser à parcourir la distance aller-retour entre le capteur et la surface. Ces scanners sont adaptés à la longue portée, jusqu'à plusieurs centaines de mètres, voire de kilomètres. La résolution en distance d'un point est de 3 à 4 mm, ce qui correspond à l'intervalle de temps minimal que peut mesurer l'horloge interne. Deuxièmement, les scanners à différence ou décalage de phase, dont le principe repose sur l'envoi d'une onde sinusoïdale constante, mesurent un écart sur

l'onde du signal de retour, pour attribuer une distance au point. La portée est plus courte, généralement comprise entre 100 m et 300 m. Les limitations proviennent de la nécessité de garder une certaine intensité du signal, et des ambiguïtés qui apparaissent au-delà d'une période complète. En revanche, le temps d'acquisition est moindre que celui des scanners à temps de vol. Pour finir, les scanners par triangulation s'appuient sur le triangle formé par l'émetteur, la surface et le récepteur, en supposant connus la distance entre émetteur et récepteur et les angles d'émission et de réception du laser (« laser à bras »).

Les scanners aériens sont embarqués sur un vecteur mobile [30] (avion, drone) et couvrent de grandes surfaces de façon zénithale. Le scanner réalise un balayage ou une fauchée de points qui sont repositionnés à l'aide de la centrale inertielle et du système GNSS embarqué. Très utilisée en cartographie, la technologie Lidar est adaptée pour de grandes surfaces, avec une précision et une résolution allant du centimètre au décimètre, selon l'altitude de vol.

Les scanners à laser de type SLAM ont des caractéristiques similaires. Toutefois, le positionnement est assuré par la reconnaissance des formes de la scène 3D couplé à la centrale inertielle. Son usage est intéressant dans des milieux archéologiques complexes, comme des grottes ou des bâtiments, mais les bruits de mesure centimétriques empêchent une lecture fine du relief [73, 240].

Les scanners terrestres sont donc adaptés à la numérisation à distance de scènes complexes et aux édifices architecturaux, tout en conservant une précision et une résolution millimétriques [98]. La mise en œuvre est facilitée par l'automatisation du processus de captation. L'opérateur est souvent invité à ne choisir que la résolution angulaire du levé (qui équivaut au pas entre deux mesures), la vitesse de mesure (pour améliorer la précision) et la prise de vue. Le scanner enregistrant l'information 3D depuis sa position, il est nécessaire d'effectuer plusieurs stations pour couvrir la surface totale d'un site. Dans le cas de la grotte de Foissac (Aveyron), le lieu profite d'une couverture Lidar HD pour l'environnement général, densifié par un survol par drone équipé d'un Lidar pour la cartographie plus fine de l'extérieur. Enfin, une topographie classique est couplée à un relevé laser, depuis l'entrée artificielle actuelle jusqu'à l'ouverture protohistorique (cf. figure 1.14, p. 30).

Le traitement des données nécessite en premier lieu de recalcr les différentes stations les unes par rapport aux autres [145]. C'est l'étape de consolidation (*registration*). Tous les nuages de points sont positionnés dans le même repère spatial. Différentes solutions existent, en fonction des scénarios et du matériel employé. La première solution requiert trois points communs entre deux positions du scanner (cibles ou sphères). Une autre méthode est le recalage à partir des nuages de points, par la technique appelée ICP [39] ou par reconnaissance d'entités géométriques. Une autre voie consiste à s'appuyer sur une méthode topographique, à l'aide du système GNSS embarqué, ou de positionner les stations à l'aplomb des repères d'un cheminement polygonal. Les procédés de consolidation peuvent être combinés, ce qui permet d'optimiser et de limiter le bruit entre les différentes stations.

Les sources d'erreur surviennent à différentes étapes de la numérisation [41]. Tout d'abord, certaines limites sont liées à l'appareil lui-même. L'instrument a une résolution angulaire maximale correspondant à l'angle entre deux mesures successives. Cet angle, combiné à la distance, détermine la résolution spatiale du nuage de points, c'est-à-dire l'espacement entre deux points. À cela s'ajoute le *spot* du faisceau, qui s'élargit avec la



FIGURE 1.14 – Grotte de Foissac : numérisation multiscalaire et multicateur. Il s’agit de l’assemblage des relevés Lidar HD de l’IGN, par un drone, et par un scanner terrestre avec un cheminement allant de l’extérieur jusqu’à l’entrée protohistorique. En haut : vue oblique montrant les emprises des acquisitions. En bas : vue de côté montrant le puits d’accès actuel et le déroulé de la grotte. [Données provenant de la société 3DSI].

distance. Le point 3D mesuré se situe dans cette zone, sans possibilité pour l’utilisateur de déterminer exactement sa position. La taille du *spot* dépend également de l’angle d’incidence sous lequel il arrive sur la surface : la précision est réduite si cet angle est important. La zone de mesure est influencée par la portée maximale, mais également par la portée minimale. Le scanner n’enregistre pas de points proches du capteur, car son chronomètre n’est pas suffisamment précis pour déterminer le temps écoulé. La dernière limitation intrinsèque est liée à son champ de vision. La majorité des scanners terrestres, qui sont dits « panoramiques à champ vertical limité », ne numérisent pas au niveau de leur base.

D'autres limites viennent de l'objet d'étude. Sa complexité morphologique et sa taille imposent de multiplier les stations pour effectuer l'intégralité du relevé. Toutefois, certains espaces ne seront jamais numérisés pour des raisons de manque d'accessibilité. Certaines caractéristiques du vestige affectent la précision de la mesure, par exemple les propriétés absorbantes de matières telles que le marbre ou la calcite, ou encore la nature spéculaire des surfaces vitrées ou des miroirs, voire la « teinte » (sombre/clair) [41]. Enfin, des effets de bord touchent un faisceau partiellement renvoyé par une arête saillante de l'objet, créant ainsi la présence de « fantômes ».

La troisième source contraignante provient de l'environnement et des conditions opératoires. Les objets mouvants, comme les arbres, les voitures ou les humains, ont un effet sur la consolidation par ICP et introduisent du bruit. Les conditions lumineuses influencent la précision de la mesure laser et provoquent des problèmes d'éclairage des photographies lors des acquisitions en extérieur. L'encombrement du matériel ou les cheminements difficiles imposent des stations ne permettant pas une couverture optimale du site. Avec l'exemple de la grotte Chauvet décrit dans l'annexe 3 (p. 155), la position des scanners depuis les passerelles réduit la résolution spatiale du nuage de points, ce qui limite la lecture des sols et des parois éloignés des passerelles.

Le scanner terrestre est devenu un outil quasiment indispensable lors d'un projet de numérisation 3D, notamment sur du bâti ou dans des milieux complexes. La garantie de la précision apportée par le constructeur et l'utilisation simplifiée sur le terrain (interface de type application de téléphone, acquisition de quelques minutes par station, pré-alignement et visualisation sur un écran) garantissent un résultat exploitable et, en outre, rassurent les utilisateurs.

Scanner stéréoscopique à lumière structurée

Les scanners stéréoscopiques à lumière structurée sont des scanners à main répandus en archéologie, notamment pour la numérisation du mobilier [98, 54, 94]. Ils offrent généralement une précision et une résolution de l'ordre du dixième de millimètre, jusqu'à quelques dizaines de microns selon les modèles employés. Ils sont peu ou pas utilisés sur le terrain, à cause de la lumière ambiante en extérieur ou de la nécessité, pour la majorité des scanners, d'être connectés à un ordinateur afin de visualiser le résultat [95]. Le scanner doit être positionné à 30 cm environ de la paroi tout en maintenant une batterie pour l'alimenter. L'ordinateur sert au suivi en continu de l'acquisition. Nous avons employé un scanner à main sur le panneau des Chevaux ponctués de la grotte du Pech Merle (Lot), dans une démarche de comparaison des méthodes (cf. figure 1.15, p. 32), mais celui-ci n'a pas été en mesure d'enregistrer les zones de calcite, y compris les moins épaisses.

Ces scanners combinent la projection de motifs lumineux connus sur la surface de l'objet, avec un système de vision stéréoscopique qui permet d'observer la déformation de ce motif et d'en déduire le relief. Les scanners à main acquièrent plusieurs cartes de profondeur par seconde qui, une fois assemblées, renseignent sur la surface de l'objet. Un capteur RVB récupère les informations de couleur. L'acquisition est réalisée de manière dynamique, avec un suivi en temps réel. L'assemblage se fait directement à partir de la géométrie et de la couleur. La numérisation d'un artefact s'effectue en plusieurs sessions d'acquisition, afin



FIGURE 1.15 – Numérisation d’une main négative du panneau des Chevaux ponctués de la grotte du Pech Merle, à l’aide d’un scanner à main Artec Spider. [Photographie de Jean-François Fabriol].

de couvrir toutes les faces (dessus/dessous). Certains scanners fonctionnent par stations, souvent conjointement avec un plateau tournant, comme dans l’exemple de la numérisation des tablettes zodiacales de Grand (cf. figure 1.16 [66], p. 33).

Le traitement des données est réalisé par des logiciels propriétaires, qui sont spécifiques soit à un constructeur, soit même à un modèle de scanner. Ils proposent de manière intuitive de nettoyer et filtrer les acquisitions, puis de les aligner grâce aux points homologues, de manière à les positionner dans un repère commun, et enfin de les fusionner pour créer le modèle final en haute qualité [54]. Des outils numériques permettent de nettoyer, filtrer, lisser ou encore combler les trous du modèle 3D.

La principale limite du scanner à main est son champ d’action relativement réduit. L’instrument, situé à trente centimètres environ de la surface, ne peut numériser qu’un volume dont les trois dimensions ne doivent pas excéder quelques dizaines de centimètres. Son usage est donc peu adapté à certains milieux complexes comme les grottes. La capacité de numérisation du scanner est restreinte sur les surfaces observées sous une forte incidence, ou au niveau des trous. Le capteur photographique donnant la couleur est souvent de faible résolution pour les modèles à main, ce qui aboutit à une texture grossière appliquée sur le modèle 3D. Selon l’équipement du scanner, l’utilisateur pourra numériser des objets clairs avec une lumière bleue ou des objets noirs avec une lumière IR.

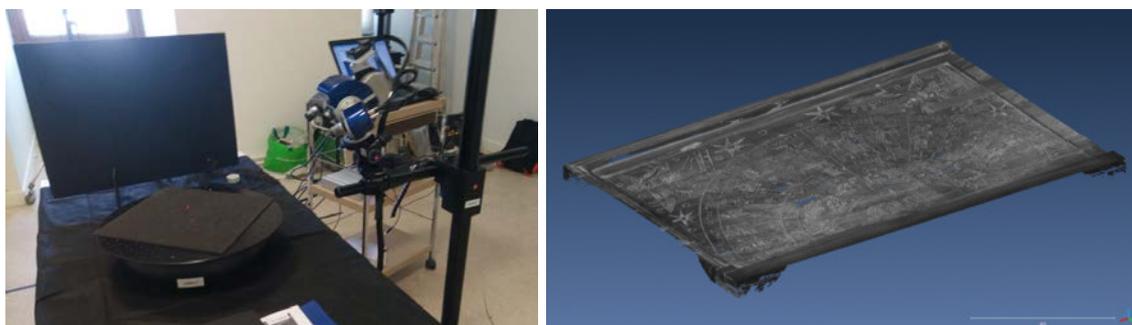


FIGURE 1.16 – Numérisation d’une tablette zodiacale de Grand à l’aide d’un scanner Smartcan d’Hexagon, effectuée en 2019 par Michel Dabas et Jean-Baptiste Houal. La précision et la résolution annoncées se situent autour des 30 microns. La numérisation a nécessité 82 stations par tablette, pour un maillage final pesant 2,3 GB. [Photographie et visuel réalisés par Michel Dabas et Jean-Baptiste Houal].

Cela amène aux limitations de la numérisation dues à certains objets, généralement ceux qui combinent couleur unie, brillance, finesse (notamment les tranches) et symétrie. L’utilisation de cibles ou d’un plateau tournant du fabricant permet parfois de dépasser ces limites, mais les vestiges rendent régulièrement leur usage impossible. Certains matériaux rencontrés en archéologie, comme la glaçure des céramiques, le verre, l’obsidienne ou la calcite, ne peuvent pas être numérisés avec cet outil. Les objets de grande taille, à partir d’un mètre, sont longs à numériser et nécessitent de fragmenter le travail en plusieurs sessions de quelques centaines d’images, qui doivent ensuite être recalées. Ceci conduit à une autre limitation, qui concerne la capacité de l’ordinateur à traiter de grandes surfaces avec une résolution élevée. À partir du logiciel, des photographies prises en complément du scanner peuvent être appliquées en texture pour pallier la faiblesse du capteur RVB. Comme pour le scanner terrestre, les scanners à lumière structurée sont appréciés pour la qualité du modèle 3D obtenu en quelques minutes. De plus, la prise en main s’effectue de manière plutôt rapide, tant sur le fonctionnement que sur le traitement des données. La résolution des modèles 3D produits a permis, par exemple, de mettre en évidence la « respiration de la Dame de Brassempouy » [224] : cet objet en ivoire possède une fissure dont l’écartement varie en fonction des conditions climatiques, écartement qui a été mesuré à l’aide de comparaisons volumétriques et morphologiques effectuées à différentes saisons.

1.2.3 Outils photographiques

Reflectance Transformation Imaging

L’imagerie computationnelle par transformation de la réflectance (RTI, pour *reflectance transformation imaging*) fonctionne à partir d’un ensemble de photographies prises sous la même pose, mais avec des sources lumineuses différentes. Elle permet une lecture dynamique du relief de surface, à l’aide d’un éclairage obtenu par extrapolation [165, 166]. Elle n’est pas considérée comme une méthode de numérisation 3D, mais s’approche d’une lec-

ture 2,5D du relief et apporte donc une information qualitative. La visualisation interactive des résultats laisse le choix de simuler un éclairage rasant, ce qui explique les nombreuses publications sur cette technique d'imagerie dans le monde du patrimoine [188, 74, 122].

Le protocole d'acquisition de la RTI prévoit deux scénarios. Le premier de ces scénarios, qui a recours à un « dôme de RTI », suppose que les positions des sources lumineuses sont connues [184]. Les prises de vue sont automatisées, reproductibles avec une distribution spatiale des éclairages optimisée. En effet ceux-ci sont généralement disposés sur trois rangées à 15°, 40° et 65° d'inclinaison par rapport à l'axe optique, avec un minimum de huit sources lumineuses par rangée.

Le deuxième scénario est appelé H-RTI (H pour *Highlight*) [183, 185] : la position des éclairages est libre et déterminée par l'opérateur. L'appareil photographique est positionné en visée orthogonale à la surface, et le parcours des positions de la source lumineuse dessine la forme d'un parapluie. Une ficelle ou un télémètre permet de contrôler la distance à l'objet, qui doit rester constante pour que l'intensité soit constante au niveau du point moyen de la scène. La direction de l'éclairage est indiquée par la position du point brillant sur une sphère réfléchissante disposée dans le champ de la prise de vue. Pour des utilisations en extérieur, la lumière continue d'un projecteur peut être remplacée par un flash, afin de neutraliser l'éclairage ambiant. La répliquabilité d'une acquisition H-RTI nécessite de suivre des protocoles connus et bien décrits, par exemple, par le CHI (*cultural heritage imaging*).

La RTI s'est appuyée sur des solutions logicielles *open source* permettant une appropriation facile par les acteurs du patrimoine. Historiquement, deux logiciels pionniers, proposés par le CHI, permettent de tout réaliser, du traitement des données avec RTI Builder jusqu'à la visualisation avec RTI Viewer. De nouveaux logiciels sont apparus depuis, par exemple Relight qui repose notamment sur des technologies web [199]. Leur utilisation est accessible en peu de temps de formation. L'utilisateur importe ses images, choisit un algorithme de traitement et visualise ses résultats en quelques minutes, comme avec le « Masque » de la grotte du Mas d'Azil (Ariège), pour lequel 105 images ont été prises avec un dôme de RTI (cf. figure 1.17, p. 35). Peu de temps après la mise au point de la RTI, la visualisation et la combinaison multivue ont été envisagées, avec un système de passage d'un point de vue de RTI à un autre [183].

Plusieurs algorithmes sont utilisés, selon les difficultés de la géométrie, de la couleur, de l'apparence des matériaux ou du poids de l'archive [199]. Un même jeu de données peut fournir différents résultats, sans que ceux-ci soient forcément conformes aux photographies d'origine lors du ré-éclairage [198]. En chaque pixel, une information de « couleur apparente » est enregistrée par direction d'éclairage, pour ensuite simuler n'importe quelle direction d'éclairage par interpolation/extrapolation. Cela met en lumière une première limite de la RTI, qui suppose les éclairages directionnels. Pour atteindre un résultat optimal, l'intensité de l'éclairage doit être indépendant de la direction. Dans le scénario de la H-RTI, la source lumineuse doit rester à une distance constante de la surface étudiée. Avec un dôme de RTI, le champ de vision optimal est restreint à une zone dont la dimension est comprise entre le quart et le cinquième du diamètre du dôme, afin de limiter les conséquences de l'atténuation de l'intensité d'une source ponctuelle telle qu'une LED, atténuation caractérisée par son « diagramme de rayonnement » [245].

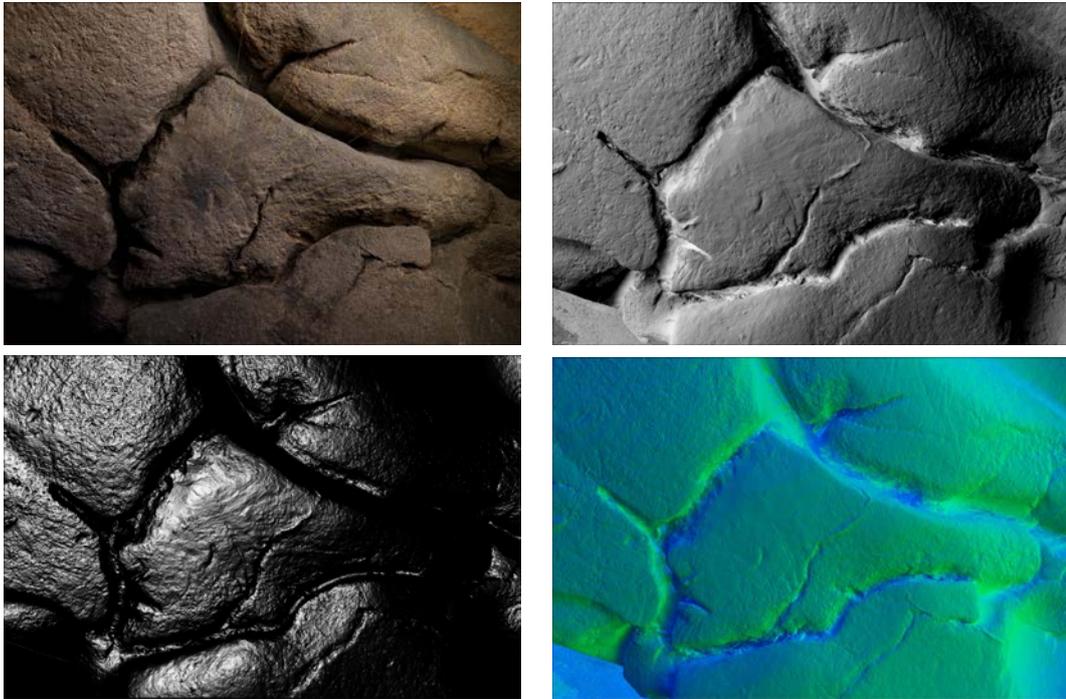


FIGURE 1.17 – Tête humaine gravée et sculptée de profil, dit le « Masque » du Mas d’Azil, visualisé avec le module Openlime associé à Relight. En haut à gauche : éclairage interactif avec une source lumineuse indiquée par les lignes jaunes. En haut à droite : version diffuse du relief en niveaux de gris. En bas à gauche : version spéculaire du relief. En bas à droite : représentation des normales en fausses couleurs.

La mise en œuvre de la RTI nécessite parfois de disposer d’un espace de circulation important. En effet, un grand nombre de photographies doivent être prises sous des éclairages qui couvrent au mieux l’hémisphère des directions incidentes possibles. Cette exigence est donc difficile à satisfaire dans certaines situations ou sous certains angles, en raison de la morphologie du site. Pour dépasser ce problème d’encombrement, la V-RTI, pour « RTI virtuelle », utilise un maillage issu d’une autre méthode de numérisation 3D et génère les images utiles au traitement RTI [72]. Le résultat est fortement dépendant du modèle de base.

Afin de tendre vers la 3D, de nombreuses solutions ont été proposées, soit par plaquage des normales obtenues par RTI sur un maillage fourni par une autre modalité, de manière de plus en plus automatisée [175, 180], soit par l’assemblage d’acquisitions de RTI sur une surface orthoprojetée [14], soit encore par intégration des normales en une carte de profondeur [78].

La RTI est une méthode souvent employée en archéologie, lors de l’inspection de surface ou pour la détection de détails fins. La simplicité apparente du procédé, qui se rapproche des habitudes de travail en lumière rasante, le faible coût initial de l’équipement et la rapidité de calcul en font une méthode intéressante pour l’étude du patrimoine.

Photogrammétrie

La photogrammétrie est une technique de reconstruction 3D qui s'appuie sur l'utilisation de photographies. Cette technique est la plus répandue dans les projets de numérisation 3D du patrimoine [15]. Pour rappel, dès les débuts de la photographie, les propriétés géométriques de la projection perspective ont amorcé des travaux de relevé architectural de façades. La théorie repose sur la possibilité de positionner dans l'espace un point 3D visible sur deux photographies prises sous deux angles différents. Les principes de base impliquent le déplacement de l'appareil photographique entre deux prises de vue, ainsi qu'un recouvrement oscillant entre 60% et 80% [161]. Le développement de la photogrammétrie analytique, depuis les années 1950, puis l'accroissement des capacités de calcul des ordinateurs, autour des années 2000, ont permis aux archéologues de se saisir de la méthode [243]. Depuis les premières réalisations par l'IGN, dès les années 1960 dans la grotte de Lascaux [115], les exemples et publications ont été nombreux.

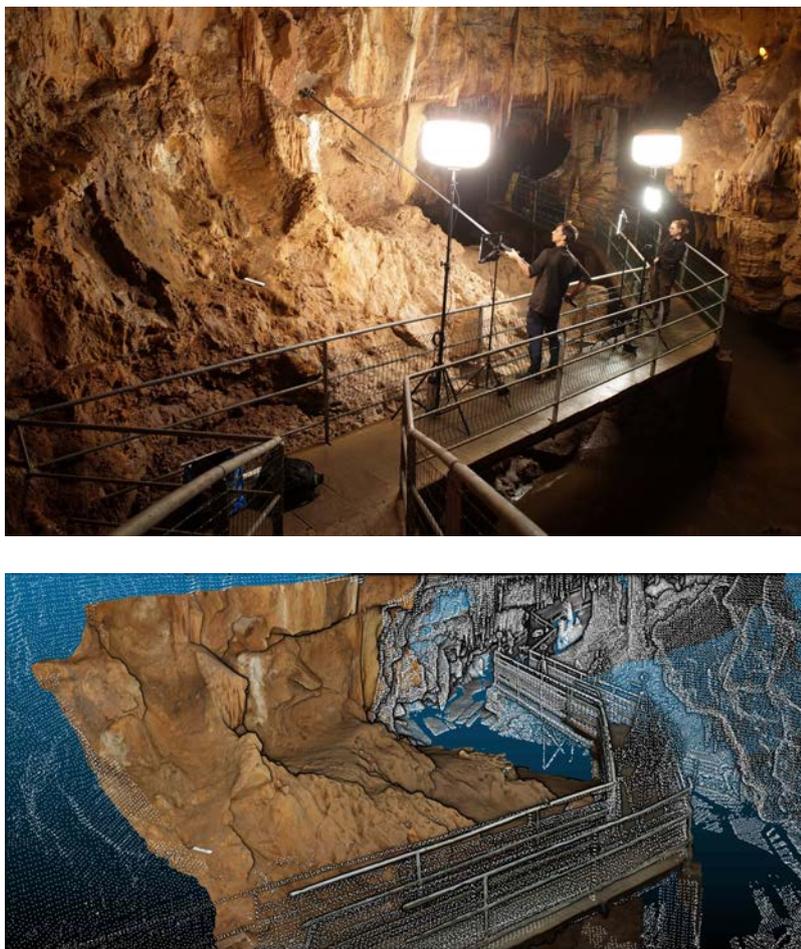


FIGURE 1.18 – Grotte de Foissac : photogrammétrie des secteurs de sépultures avant les prélèvements d'ADN. [Données provenant de la société 3DSI].

La photogrammétrie est polyvalente et adaptable à de nombreux cas d'étude, comme dans la grotte de Foissac (cf. figure 1.18, p. 36). L'équipement se réduit à un appareil photographique. Elle peut s'utiliser au sol, appareil photographique en main ou sur un trépied, pour numériser des objets ou des coupes stratigraphiques. La photogrammétrie aérienne ouvre la voie à la numérisation de plus grandes surfaces grâce aux drones, à un cerf-volant ou encore à une perche [98]. De nombreux protocoles d'acquisition ont été abondamment décrits [121, 161, 244].

Le processus de photogrammétrie est constitué de trois étapes principales. La première est l'alignement dans une scène 3D des photographies, afin de retrouver les poses de la caméra ainsi que ses paramètres. La deuxième phase est le géoréférencement, qui permet de passer vers un repère métrique orienté ou vers un repère cartographique. La dernière phase est la densification du modèle 3D, avec une plus haute résolution spatiale. Les résultats se composent d'un nuage de points plus ou moins dense, d'un maillage avec une texture extraite des photographies, et des projections orthographiques des images ou des cartes de profondeur. Dans la pratique, le facteur humain est prépondérant, puisque celui-ci détermine la qualité des images de la prise de vue. De plus, l'impact de la chaîne de traitement, qui comporte de nombreux paramètres, influence le résultat final. La photogrammétrie sera développée plus en détail dans le chapitre 2.

La multitude des méthodes qui sont à la disposition des acteurs du patrimoine autorise la numérisation 3D de nombreux vestiges. Si aucune méthode ne peut se prévaloir d'être meilleure qu'une autre, le choix des outils doit être conditionné par les objectifs. De manière générale, la numérisation 3D fonctionne de façon multimodale. En effet, les aspects multicapteur, multiscalaire, multispectral, multitemporel et multiacteur sont régulièrement mobilisés [190]. Toutefois, la réalité et la configuration des projets imposent d'adapter les solutions au contexte global de la numérisation.

1.3 Définir une utilité et des usages

La numérisation 3D est la poursuite de la pratique archéologique. Cependant, quelle utilité peut-elle avoir au sein des différentes étapes de la chaîne patrimoniale? Elle est devenue une pratique courante en archéologie et pour les sciences du patrimoine, mais il existe encore des décalages, voire des incompréhensions, entre les possibilités de l'opérateur et les souhaits du commanditaire. Il faut intégrer, dans le recours à la numérisation 3D d'un objet ou d'un site, qu'elle peut donner lieu à une gradation dans les résultats possibles ou attendus : cela va du résultat idéal, à savoir un modèle 3D de l'objet très précis, très résolu avec sa réflectance et de nombreuses informations associées comme un véritable double numérique, à un résultat plus modeste qui peut quand même répondre aux besoins concernant l'étude, la conservation, le suivi temporel, la restauration, la visite virtuelle, la synthèse de nouvelles vues, etc. Toutefois, la numérisation 3D ne répond pas à toutes les interrogations. Elle est un outil parmi d'autres, à intégrer dans le processus de réalisation d'un projet. Dans sa construction, il faut prendre en compte les questionnements avec les objectifs et les contraintes d'utilisation, de création et de visualisation du futur modèle 3D.

CHAPITRE 1. LA PLACE DES OUTILS DE RECONSTRUCTION 3D POUR LE PATRIMOINE

Au travers d'une sélection de projets intégrés dans la thèse, nous présenterons l'utilité ou non des outils 3D et leurs apports dans un contexte plus global que la simple acquisition des données. Dans les projets présentés dans cette section, nous aborderons rarement les possibilités d'utilisation des modèles numériques pour la médiation, même si les données 3D produites dans le cadre de cette thèse ont été utilisées pour des communications de vulgarisation, des expositions, des impressions 3D, des documentaires, des visites virtuelles et des illustrations d'ouvrages.

1.3.1 La chaîne patrimoniale

La création de doubles numériques 3D du patrimoine culturel répond à des besoins essentiels dans la chaîne patrimoniale : la recherche, la conservation et la médiation. Les étapes clés incluent d'abord l'étude, menée dans le cadre de travaux de recherche, afin d'approfondir la connaissance. Des mesures conservatoires adéquates sont ensuite mises en œuvre pour garantir la pérennité du vestige. Enfin, la médiation autour de ces travaux s'organise, prenant des formes variées en fonction du public cible et des moyens disponibles.

Un projet de territoire : la Route des statues-menhirs d'Occitanie

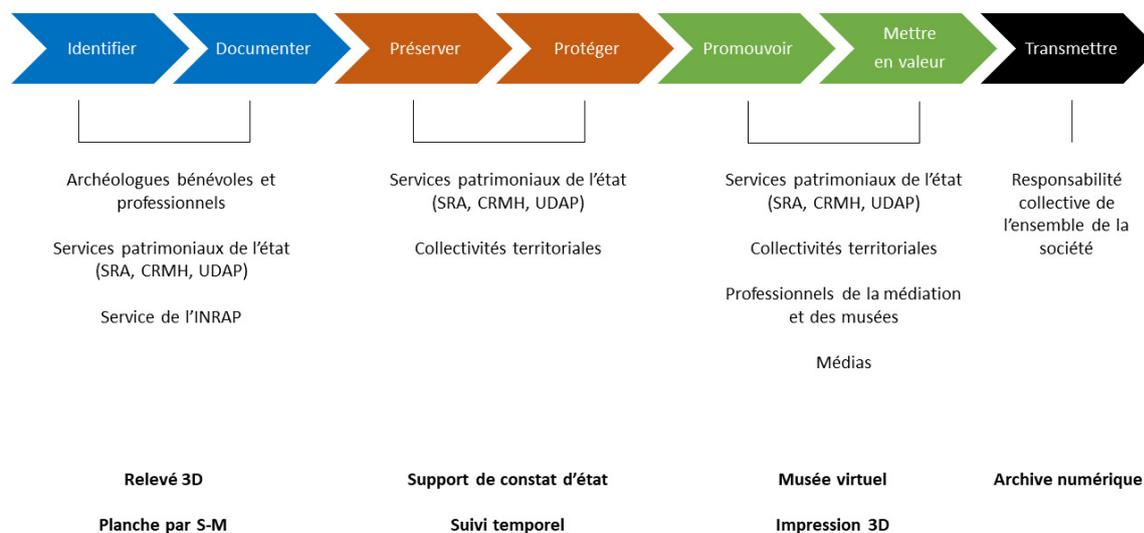


FIGURE 1.19 – Chaîne patrimoniale développée par la Route des statues-menhirs d'Occitanie. Les besoins de la recherche, de la conservation et de la valorisation sont exprimés. Par leur réussite, ils ouvrent sur la transmission du patrimoine reposant sur une responsabilité collective. Le graphique présente les différents acteurs identifiés lors de ce projet. Pour chacune des étapes, nous découvrons les usages de la numérisation et des données 3D. [Adapté de la présentation du projet].

L'exemple de la Route des statues-menhirs d'Occitanie illustre l'une des possibilités d'intégration de la numérisation 3D dans la chaîne patrimoniale. S'inscrivant dans la continuité d'inventaires suivis par le Service régional de l'archéologie, les étapes de numérisation des statues-menhirs rouergates ont eu comme principal objectif la valorisation de ce patrimoine, grâce à la promotion et à la mise en valeur *in situ* dans les musées ou sur Internet, par le biais de visites virtuelles permettant de manipuler les objets 3D.

Dans la perspective de la chaîne patrimoniale définie pour ce projet (cf. figure 1.19, p. 38), il est apparu que les modèles 3D interviendraient à différents niveaux : recherche par l'identification, documentation, aide à la protection, promotion par le biais de différents supports, transmission ou encore acquisition d'une valeur patrimoniale dans le cas où l'original continue de se dégrader. Ces usages, pourtant cruciaux, sont secondaires dans la commande initiale, puisque la ligne de financement de cette action est liée à de la valorisation. En effet, la numérisation 3D n'implique pas les mêmes démarches administratives qu'une activité de recherche archéologique (autorisations du Service régional de l'archéologie et des propriétaires, qualification des données produites, rapport d'activité).

Pour déterminer l'utilité de la 3D, il est essentiel d'analyser le rôle qui lui est attribué. Lorsque le modèle 3D intervient après l'analyse ou l'évaluation des besoins par un expert, son rôle est d'appuyer les propos de ce dernier. Les caractéristiques de la numérisation sont alors ajustées en fonction de la demande (échelle et zone de travail, résolution, précision, format, rendu, etc.). À l'inverse, lorsqu'il intervient en amont des expertises, il fournit des supports pour l'analyse. Néanmoins, la numérisation n'est pas nécessairement rationalisée ou en adéquation avec les attendus de la recherche, de la conservation ou de la médiation.

1.3.2 La recherche

Les principaux objectifs pour la recherche sont de comprendre les vestiges et leur contexte. La 3D vient en appui à l'activité sur le terrain grâce à sa capacité d'enregistrement des interventions archéologiques. Elle offre une grande rapidité de mesure et une précision adaptée à la production des supports d'aide au relevé des vestiges. La spatialisat-ion de l'information procure une aide à la lecture des sites en plan ou en volume. Les modèles 3D servent de base à la construction des hypothèses, et ce dans un repère métrique. De plus, elle ouvre la voie au chantier virtuel permettant de revenir *a posteriori* sur les lieux ou de préparer les futures interventions.

Lecture du relief de surface

La numérisation 3D vise à enregistrer le relief de surface. Ce double numérique peut être manipulé afin d'en extraire des informations utiles pour l'interprétation des états de surface. Les modèles 3D offrent une meilleure lisibilité du relief, améliorant ainsi son intelligibilité, notamment dans les zones où le système visuel peine à le percevoir. Dans le cadre de l'étude des statues-menhirs, l'outil met ce corpus en série et de façon harmonisée.

Les disparités relatives à la situation des monolithes, à leur localisation, aux conditions d'accessibilité, au type de propriétaire et à l'historique des recherches ont nui à l'obtention d'une vision d'ensemble du corpus. Malgré les travaux de synthèse d'Octobon [187],

CHAPITRE 1. LA PLACE DES OUTILS DE RECONSTRUCTION 3D POUR LE PATRIMOINE

d’Arnal [24], de D’Anna [67], de Serres [225], de Rodriguez [211], de Maillé [164], il a fallu attendre les travaux de la Direction régionale des affaires culturelles (DRAC) pour que soit publiée, en 2022, une compilation des études précédentes [93]. Les recherches actuelles sur ces productions taillées dans la pierre sont en plein bouleversement, grâce à l’utilisation des techniques d’imagerie 3D.

Afin de servir de support à de futures analyses des statues-menhirs, nous avons produit, pour chacune des deux faces principales, un MNS (modèle numérique de surface) et une orthophotographie projetée sur celui-ci. Pour améliorer la mise en évidence du relief, les MNS sont exploités avec différents indicateurs aidant la lecture [254, 139]. Face à la diversité des conditions d’acquisition, la photogrammétrie offre la possibilité d’utiliser un référentiel commun pour traduire en images les figurations dans toute leur complexité. Les planches pourront servir de support de relevé lors de prochaines études pour la recherche ou la conservation (cf. annexe 4.3.4, p. 156).

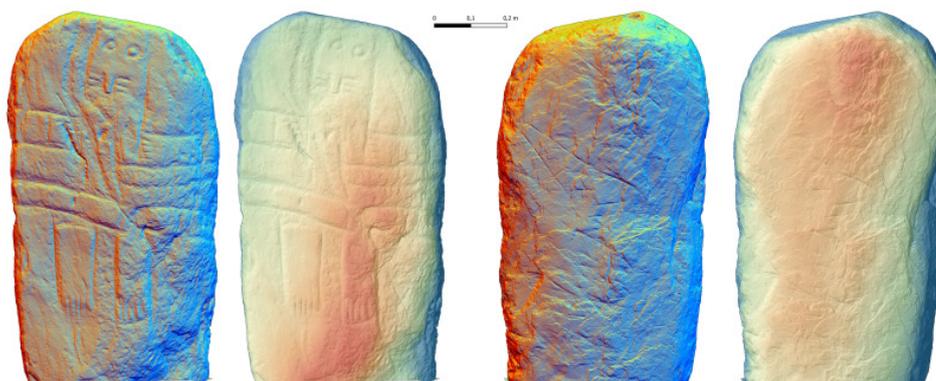


FIGURE 1.20 – Planche des relevés de la statue-menhir de Nicoules.

À titre d’exemple, la figure 1.20 (p. 40) illustre le gain en lisibilité de la statue-menhir de Nicoules [29]. Cette dernière offre la particularité d’être façonnée dans une dalle de schiste vert, sur une seule face. L’utilisation du modèle 3D et des différents traitements graphiques facilite la lecture de cette stèle, dont le décor a été tracé en creux. À l’image de nombreux monuments, sa surface présente des stigmates liés aux conditions de sa découverte, mais aussi des traces d’accidents plus anciens, d’états successifs ou de reprises. La photogrammétrie vient ici aider à déterminer la chronologie de la mise en forme.

Une autre voie pour illustrer le relief consiste à utiliser, pour les normes de présentation archéologique, des chaînes de traitement spécialisées, afin de générer des planches que sont PETRA [99, 100] ou Artifact3-D [103]. PETRA propose, parmi ses visualisations, la carte des écarts entre le volume 3D reconstruit et un modèle simplifié de l’objet obtenu par décimation du maillage 3D, afin de mettre en évidence les hautes fréquences contenues dans le maillage, sur le principe de la méthode *Morphological Residual Model* [197]. Pour la Dame de Saint-Sernin (cf. figure 1.21, p. 41), cette représentation souligne le travail de dégagement de la matière pour la mise en place de l’iconographie, principalement avec la technique de la ronde-bosse.

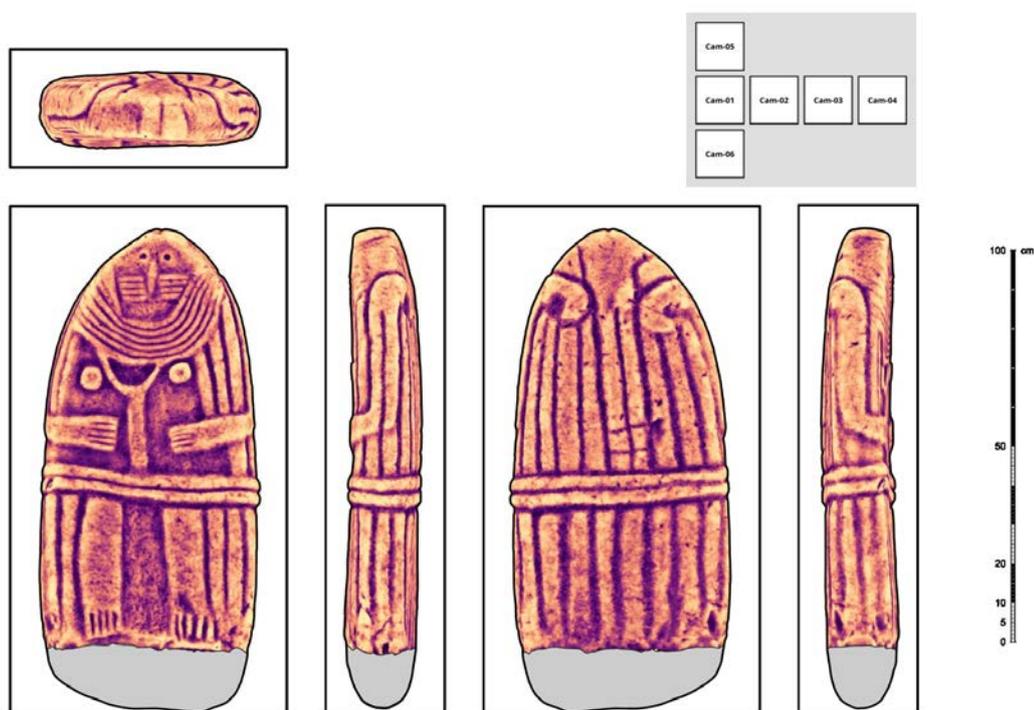


FIGURE 1.21 – Exemple de carte des écarts fournie par le logiciel PETRA. [Traitements par Valentin Grimaud].

Création des supports de relevé pour l'art pariétal

Le monde des grottes est un espace particulier, complexe et pluriel, qui nécessite une adaptation constante des méthodes de relevé 3D. Chaque cavité, chaque salle, chaque panneau et même chaque figure comporte ses spécificités. L'emploi de plusieurs méthodes est nécessaire pour atteindre les objectifs scientifiques. Selon l'historique d'un site et les équipes de recherche, les compétences et les outils 3D ne sont pas employés de la même manière. Ce phénomène, manifeste parmi les grottes ornées étudiées dans notre corpus, est transposable à d'autres situations.

Dans le cadre de la grotte Chauvet, l'équipe de recherche, dirigée depuis 2018 par Carole Fritz, a intégré un pôle des humanités numériques afin de subvenir aux besoins de la recherche. L'objectif est de pouvoir produire des outils et des données adaptées à toutes les disciplines travaillant dans la grotte. Ce pôle regroupe des compétences en bases de données, cartographie, analyse de données, statistiques, imagerie scientifique, topographie, outils partagés en ligne, infographie et numérisation 3D. Cet effort important d'intégration de savoir-faire techniques a nécessité d'adapter les outils aux méthodes de travail de l'équipe déjà en place, mais également de les proposer et de former les chercheurs à de nouvelles solutions.

CHAPITRE 1. LA PLACE DES OUTILS DE RECONSTRUCTION 3D POUR LE PATRIMOINE

Afin d'accompagner le travail du relevé d'art pariétal, nous avons commencé par un audit [85]. Nous constatons que la documentation 3D présente un intérêt limité pour l'activité de relevé pariétal. Tout d'abord, la majorité du relevé par lasergrammétrie de 2016 a été réalisée sans apport de lumière. Aucune information de couleur RVB n'est associée, et l'intensité du signal est inutilisable sur certains panneaux, car la longueur d'onde du laser (environ 1550 nm) est absorbée par le dépôt de calcite recouvrant l'œuvre [43], comme le montrent les « grands panneaux » (cf. figure 1.22, p. 42). De plus, les photographies associées à cette campagne de numérisation ont été prises avec une lumière diffuse ou frontale, ce qui ne permet pas une étude détaillée des peintures ou des gravures sur les parois.



FIGURE 1.22 – Nuage de points 3D des « grands panneaux » de la salle du fond, obtenu avec un scanner TLS. Les niveaux de gris de l'intensité du signal ne sont pas corrélés avec la couleur RVB de la paroi. [Données provenant de Perazio Engineering, ministère de la Culture].

Le travail actuel consiste principalement en une acquisition multiscalaire et multicapteur. L'intérêt pour la recherche est de fournir des supports communs aux différentes spécialités. Le « modèle 3D » comporte de multiples informations, et différentes façons de les utiliser. Afin de nous adapter aux exigences et aux compétences, nous proposons de nombreux supports générés à partir de la donnée 3D, notamment des nuages de points, des maillages 3D texturés, des MNS et des orthophotographies. Cette intégration dans une équipe de recherche active depuis des années demande de la patience. En effet, la période d'activité de recherche dans la grotte se limite à un mois par an pour l'ensemble des spécialités. Cette restriction d'accès implique un décalage entre les sessions d'acquisition de la donnée, du traitement de celle-ci et de fourniture des supports.

L'étude archéologique et pariétale de la grotte de Marsoulas, engagée depuis 1998 autour de Carole Fritz et Gilles Tosello, a exploité au mieux l'évolution des techniques. Débutée avec un support 2D photographique, l'analyse des parois se poursuit avec des orthopho-

tographies extraites d'enregistrements photogrammétriques [88]. Effectuées panneau après panneau, ces acquisitions ont été complétées par une numérisation intégrale de la cavité, en une seule session d'une semaine en 2023. L'intérêt n'est pas de reprendre une nouvelle étude à chaque évolution des techniques 3D, mais d'harmoniser le modèle afin de visualiser la quantité de relevés effectués. Au-delà de l'aspect conservatoire, cette nouvelle visualisation participe à la publication des résultats (cf. figure 1.23, p. 43).

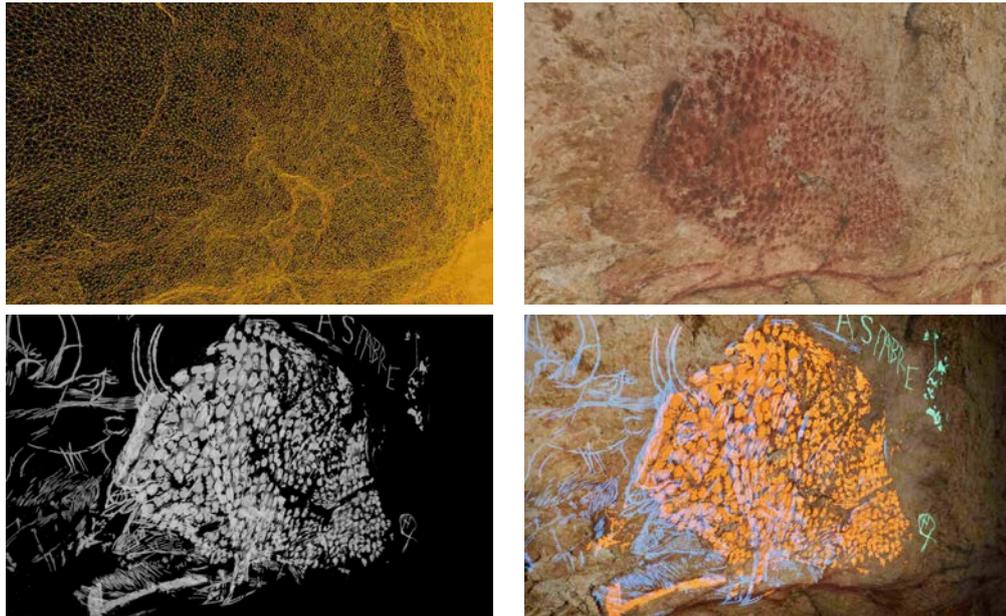


FIGURE 1.23 – Travail de repositionnement des relevés réalisés depuis 1998 sur le maillage de 2023, en vue de la publication et de la réalisation de visites virtuelles. [Traitements et visuel réalisés par Mathieu Mondou].

Pour les galeries ornées de la grotte du Mas d'Azil, l'étude globale débutée en 2022 sous la direction de Carole Fritz permettra une mise en lumière de l'art pariétal. Pour ce projet, les outils des humanités numériques sont à la base du travail pour les pariétalistes. L'équipe se compose ainsi de spécialistes en topographie, en bases de données, en géomatique, en numérisation 3D, en infographie 3D et en vision par ordinateur. La plus grande difficulté dans une telle équipe interdisciplinaire est la validation du protocole de numérisation et la mise en production des supports pour l'étude de l'art. L'avantage principal de la création d'analyses sur des supports, à partir de données 3D, est la célérité à laquelle les résultats de la recherche pourront servir à la conservation et à la médiation.

1.3.3 La conservation

La conservation-restauration se définit comme « *l'ensemble des mesures et actions ayant pour objectif la sauvegarde du patrimoine culturel matériel, tout en garantissant son accessibilité aux générations présentes et futures. La conservation-restauration comprend la*

CHAPITRE 1. LA PLACE DES OUTILS DE RECONSTRUCTION 3D POUR LE PATRIMOINE

conservation préventive, la conservation curative et la restauration. Toutes ces mesures et actions doivent respecter la signification et les propriétés physiques des biens culturels » [11].

Les leviers de la conservation préventive sont de plusieurs ordres : dispositifs légaux (protections juridiques), formation et sensibilisation des acteurs, contrôle environnemental (lumière, humidité, pollution, infestation) ou encore sécurisation lors du stockage et des manipulations. La conservation curative a pour objectif d'arrêter ou d'atténuer un processus actif ou d'effectuer un renforcement structurel. L'intervention de restauration permet d'améliorer l'appréciation, la compréhension ou l'usage d'un bien culturel. L'ensemble de ces actions ou interventions résulte d'une chaîne de décision et d'une expertise interdisciplinaire. L'apport principal des outils de numérisation est d'offrir une nouvelle documentation et une archive pour l'historique d'un bien culturel.

Conserver les vestiges

La conservation s'effectue aussi bien sur des vestiges conservés dans un musée, chez un particulier ou en extérieur. L'intérêt principal des méthodes de numérisation 3D est de disposer d'une empreinte en volume à un moment de l'histoire d'un objet. Cette archive est complémentaire des autres données le renseignant. Elle constitue une nouvelle documentation numérique pour retracer cet historique. Les modèles 3D générés à deux instants distincts permettent de mesurer et quantifier un phénomène survenu entretemps. Ils constituent donc une aide à la prise de décision et un préalable à une intervention. Le calcul de la cinétique d'érosion de la matière, de développement microbien ou de changements de couleur sert d'appui à la conservation curative à mettre en place. Ce travail de suivi est rendu possible par la résolution méthodologique du repositionnement des différentes acquisitions dans un même espace [190].

Pour les statues-menhirs, cette archive à un instant t ouvre donc la voie au suivi 3D temporel, comme pour les exemplaires encore en position primaire en extérieur. Contrairement aux statues conservées dans un musée, elles subissent davantage de contraintes dues aux intempéries, aux agents microbiens, aux risques mécaniques (chocs avec un véhicule, frottements d'animaux) ainsi qu'aux dégradations volontaires. La résolution spatiale des modèles 3D obtenus pour la Route des statues-menhirs d'Occitanie apporte une information millimétrique pour le début des années 2020. Ce travail de suivi est à poursuivre pour confirmer les observations à l'œil de cette perte de matière [227]. Au-delà de l'intérêt conservatoire, cela interroge sur le temps d'usage des statues-menhirs et de leurs modes d'exposition au Néolithique.

Pour le travail des restaurateurs, les méthodes de relevé 3D occupent une place marginale dans la qualification des désordres observés et dans leurs pratiques. Lors de la restauration de la statue-menhir de Puech-Réal, conservée au musée d'Archéologie nationale, et pour la rédaction des constats d'état, de simples prises de vue ont suffi car cette documentation n'est que visuelle. C'est au restaurateur d'évaluer la qualité, l'état des matériaux, l'environnement d'exposition, etc. Les résultats sont apportés par les analyses, et non par le support de relevé. Une archive 3D fine pourrait être utile lors d'une intervention ou d'une modification importante de l'aspect de l'objet.

Documenter les sites et les activités

Les modèles 3D sont une des formes possibles de la documentation d'un bien patrimonial. Ils rendent compte de l'état sanitaire et ils retracent aussi les interventions. Il est désormais courant que les prescriptions d'opération archéologique demandent de fournir une archive avant, pendant et après toute investigation. Celle-ci n'est pas forcément en 3D. L'intérêt est d'offrir aux générations futures une vision la plus complète possible des recherches et des désordres observés. Selon les sites, les données de la recherche viennent appuyer cette documentation.

Prenons l'exemple de la grotte de Bédeilhac (Ariège), qui est connue pour son art pariétal et mobilier. Une partie de cet art se concentre dans la galerie Vidal. Sur une centaine de mètres de long, elle présente plusieurs faciès morphologiques et archéologiques. Une section conserve des sols d'un habitat paléolithique [31, 32] et une autre présente des œuvres pariétales [173, 219]. Dans son ensemble, la grotte a connu diverses interventions au cours du XX^e siècle : aménagement des 400 premiers mètres de la cavité pour installer des ateliers de réparation d'avions lors de la Seconde Guerre mondiale, ouverture de la grotte au public, relevé de l'art pariétal et fouilles archéologiques.

L'intervention de numérisation 3D fait partie des opérations archéologiques de Michel Barbaza en 2023, à la demande du Service régional de l'archéologie et avec le soutien du département de l'Ariège. Outre le suivi des fouilles de cette intervention, la numérisation 3D sert à dresser le plan des fouilles de 1993 à 1997. Elle illustre la relation entre l'habitat et le secteur orné. L'autre point est le repositionnement des relevés effectués par l'abbé Breuil en 1925, et surtout le relevé exhaustif des parois de Georges Sauvet de 1987 à 1989, puis en 1991.

Cet enregistrement sert ainsi de documentation afin de retracer l'activité humaine depuis le Paléolithique, l'historique récent de la galerie. Il établit une connexion avec le contexte général géomorphologique de la galerie. L'acquisition correspond à 7500 photographies prises en une semaine pour numériser 50 mètres de long et en faire la topographie (cf. figure 1.24, p. 46).

Conclusion

La numérisation 3D est un support utile à chaque étape de la chaîne patrimoniale. Elle permet de croiser les regards de tous les spécialistes et de tous les acteurs qui gravitent autour du patrimoine. À partir d'un même objet numérique, les usages sont multiples. Les données acquises étant limitées par la résolution des capteurs utilisés, il convient d'anticiper les usages dans le cahier des charges. La 3D constitue une archive dans l'histoire d'un site ou d'un objet, mais ne le remplace en aucun cas, n'étant que sa représentation à un instant précis [62]. Les chercheurs ont besoin de confronter leurs analyses issues des données numériques à la réalité du vestige. Dans le cas d'une altération ou d'une destruction du site ou de l'objet archéologique, le modèle 3D acquiert une véritable valeur patrimoniale, comme les nuages de points acquis au scanner de la charpente de Notre-Dame de Paris. Enfin, la création de doubles numériques par différents acteurs interroge sur la valeur juridique et administrative des données et leur impact vers de nouveaux usages [42].

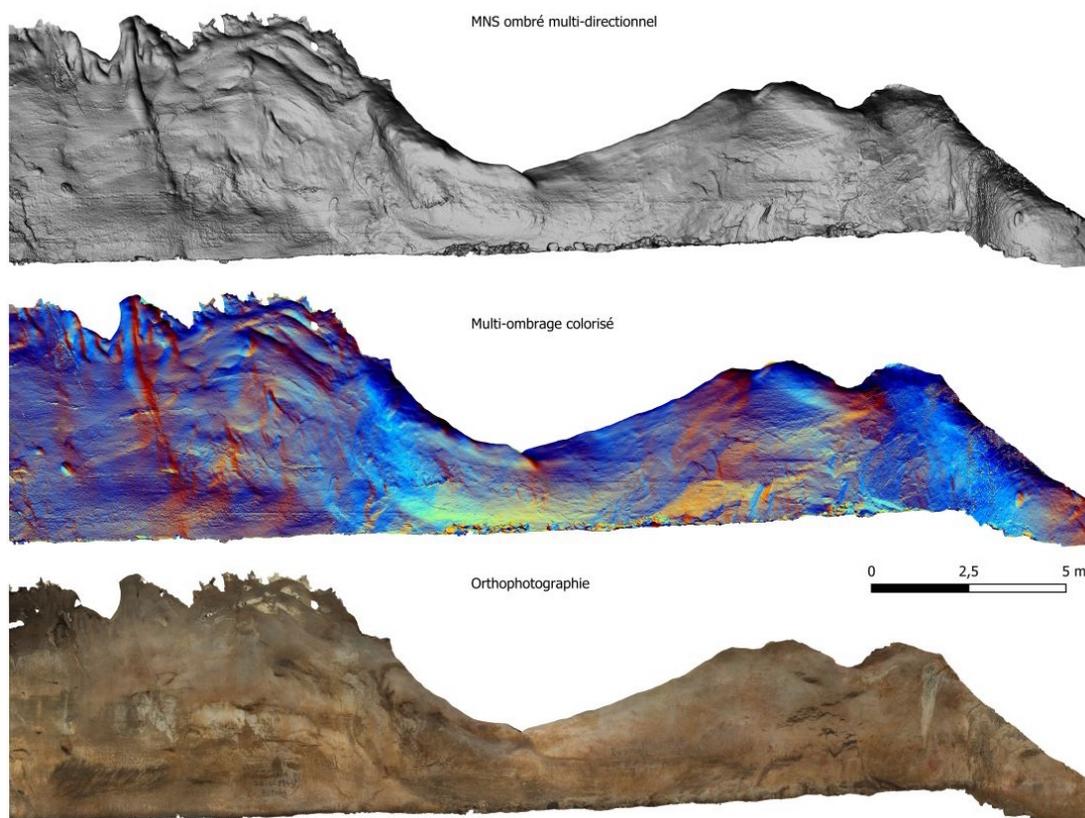


FIGURE 1.24 – Paroi de gauche de la grotte de Bédeilhac dans la galerie Vidal.

1.4 ArchaeoRoom

Le projet de thèse Archaeoroom arrive après cet état des lieux de la pratique de la numérisation 3D en archéologie de terrain. Dans ce tour d’horizon des outils d’acquisition 3D, nous avons pu constater que les archéologues s’appuient à la fois sur des instruments de mesure de précision certifiés par un constructeur et sur des méthodes photographiques. L’utilisation d’un scanner, quelque soit sa technologie, apporte la garantie du constructeur sur la qualité relative du modèle 3D final. Toutefois, son usage est contraint par l’environnement matériel et logiciel, généralement non conçu pour des applications archéologiques.

A contrario, les méthodes photographiques semblent plus modulables, puisque la partie matérielle se résume à un appareil photographique. Vu le faible coût initial pour débiter des acquisitions, ces méthodes sont parfois qualifiées de « *low-cost* ». De nombreuses solutions logicielles existent pour le traitement des données, qui peuvent être plus facilement personnalisées. La qualité des modèles 3D est fortement liée au choix d’un protocole d’acquisition et d’une chaîne de traitement. Le facteur humain constitue une limite importante pour assurer la reproductibilité des numérisations. Tous ces arguments rendent les méthodes photographiques *a priori* moins performantes que les scanners.

En ce qui concerne les scanners, la gamme de prix de l’investissement initial (cf. tableau 1.2, p. 47) se situe autour de plusieurs dizaines de milliers d’euros (ces prix sont indicatifs et ne prennent pas en compte les remises de type « éducation » ou « recherche »). À cela s’ajoutent généralement la maintenance, et surtout la partie logicielle. Cette dernière coûte quelques milliers d’euros, avec des licences qui peuvent être annualisées ou mensualisées, bien que certaines initiatives aient développé des modèles à moindre coût.

Constructeur	Modèle	Prix (logiciel)	Type
Faro	Focus S+	40 à 55 k€ (4 k€)	Terrestre
Leica Geosystems	BLK 360 G2	Dès 22 k€ (4 k€)	Terrestre
Leica Geosystems	RTC 360 LT	Dès 60 k€ (4 k€)	Terrestre
Leica Geosystems	P50	Dès 110 k€ (4 k€)	Terrestre
Zoller+Frölich	Imager 5016	50 k€ à 70 k€ (inclus)	Terrestre
Artec 3D	Leo	35 k€ (2 k€)	Portable
Artec 3D	Spider II	27 k€ (2 k€)	Portable
Creaform	Handyscan	35 k€ (7 k€)	Portable
Creaform	Metrascan	73 k€ (7 k€)	Portable
Hexagon	Smartscan	Dès 50 k€ (10 k€)	Portable
Revopoint	POP 3 Plus	600 € (inclus)	Portable

TABLE 1.2 – Sélection représentative des solutions de scanners.

Du côté des logiciels de photogrammétrie, le tableau 1.3 (p. 47) montre une dichotomie plus marquée entre logiciels propriétaires et logiciels *open source*. Les premiers possèdent des interfaces ergonomiques et attractives, mais le côté « boîte noire » des algorithmes limite l’évaluation des résultats. Le constat est souvent inversé pour les logiciels du deuxième type, qui comportent des interfaces parfois rudimentaires. Ceci s’explique par le temps de développement, les ressources et les compétences nécessaires pour les rendre compétitifs. Cet investissement est généralement mobilisé pour améliorer les performances et mettre à jour les algorithmes. Cela montre les difficultés de financement des solutions libres, et d’un point de vue déontologique, sur la tentation de certains chercheurs d’utiliser des solutions propriétaires payantes plus rapides, au lieu de soutenir des solutions ouvertes pour tous.

Logiciel	Éditeur	Licence	Prix	Spécificités
Itwin Capture [6]	Bentley	Propriétaire	6200 €	Scènes urbaines
Metashape [2]	Agisoft	Propriétaire	3500 €	Généraliste / Archéologie
Pix4D Matic [7]	Pix4D	Propriétaire	7000 €	Acquisitions par drone
RealityCapture [8]	Epic Games	Propriétaire	<i>Freemium</i>	Généraliste / Effets spéciaux
3DF Zephyr [1]	3DFlow	Propriétaire	4.200 €	Généraliste
Colmap [220, 221]	ETH Zurich	<i>Open source</i>	Gratuit	Généraliste (référence dans l’ <i>open source</i>)
Meshroom [102]	AliceVision	<i>Open source</i>	Gratuit	Généraliste / Effets spéciaux
MicMac [193]	IGN	<i>Open source</i>	Gratuit	Généraliste / Cartographie
Open Drone Map [10]	ODM Authors	<i>Open source</i>	Gratuit	Acquisitions par drone (interface payante)

TABLE 1.3 – Sélection représentative des logiciels de photogrammétrie.

CHAPITRE 1. LA PLACE DES OUTILS DE RECONSTRUCTION 3D POUR LE PATRIMOINE

Ceci nous amène à recentrer la discussion autour des pratiques et des besoins des archéologues. Les méthodes présentées répondent-elles à leurs attentes ? Puisqu'ils se sont adaptés aux outils pour coller à leurs usages, alors la réponse doit être considérée comme positive. Cependant, n'ont-ils pas fait évoluer leurs questionnements, et surtout leurs techniques en fonction des outils disponibles ? Depuis l'utilisation de lumières rasantes pour faire ressortir le relief dans les photographies, les archéologues détournent et s'approprient des méthodes qui ne leur étaient pas destinées *a priori*.

En effet, le coût de développement et les ressources financières de la discipline ne permettent pas souvent d'entrevoir la création d'outils spécifiques. Il n'est pas rare que des logiciels comportent énormément de fonctionnalités non utilisées, car inutiles ou impossibles à mettre en œuvre. Ce décalage se ressent dans la gestion de la numérisation 3D. Selon [243], l'archéologie est pour certains industriels un moyen de communiquer sur leur matériel ou sur une nouvelle solution logicielle, dont les résultats peuvent être inappropriés ou inexploitable par les archéologues. Cela a entraîné un ralentissement de l'appropriation de la numérisation 3D au début des années 2000, avant l'arrivée de la photogrammétrie. La création de logiciels *ex nihilo*, ou d'outils pour l'archéologie et par les archéologues, reste marginale.

L'intégration de matériel ou de compétences en archéologie s'effectue soit au prix d'un effort important pour le développement en interne, soit en ayant recours à une prestation extérieure. Sur ce point, la création d'un cahier des charges impose la définition de la donnée utile. De nombreux problèmes liés à la rédaction d'un tel document sont récurrents dans les projets patrimoniaux. Les destinations et les utilisations sont connues, mais les aspects techniques sont souvent délaissés et apportés par les prestataires. Le livre blanc du Consortium 3D pour les SHS expose les thématiques, qui vont de l'acquisition des données brutes au transfert de ces dernières, en passant par les différentes étapes du traitement, de la production ou encore de la modélisation [98].

En parallèle, la communauté de recherche en vision par ordinateur développe des solutions avec des applications en laboratoire, difficiles à déployer face aux réalités du terrain. Archaeoroom propose une nouvelle passerelle avec la communauté archéologique. Sans être la première ou l'unique tentative, elle profite d'un environnement favorable. D'une part, la prédominance de la conservation préventive insiste sur les aspects fini et fragile du patrimoine [17], qui imposent le développement de solutions non invasives pour l'étude des sites. Cela implique une documentation des sites et des activités entreprises, bien souvent numérique et en 3D, et ce dès la prescription de l'opération archéologique. D'autre part, la communauté des humanités numériques et de la 3D pour les SHS s'est structurée au plan national (consortium 3D-SHS, puis 3D-HN) et international (Europeana, Time Machine Europe), et se trouve aujourd'hui en mesure de s'impliquer dans le développement et le financement de projets 3D. Un point important est le développement d'un environnement de logiciels libres, du terrain jusqu'à l'archivage.

Archeaoroom propose de créer des liens entre des équipes de recherche en archéologie et l'expérience d'une équipe spécialisée dans la reconstruction 3D photographique. Le point de départ est le souhait de développer un système automatisé de prise de vue pour la photogrammétrie. Finalement, la concrétisation s'axe sur une solution de numérisation 3D innovante adaptée aux spécificités du patrimoine. Le premier enjeu est d'atteindre une

précision et une fidélité qui respectent pleinement l'apparence des vestiges numérisés. Le deuxième enjeu est de proposer une solution accessible, en termes de coût et de complexité de mise en œuvre. L'objectif du projet est de doter le milieu culturel d'un outil *open source* de numérisation 3D modulable, interopérable et à faible coût.

Cette proposition repose sur la suite logicielle AliceVision/Meshroom, développée entre autres par l'équipe REVA de l'IRIT. Cette collaboration présente plusieurs avantages, dont la possibilité de répondre aux archéologues quant aux besoins des sciences humaines de disposer d'un logiciel libre, avec une interface graphique complètement fonctionnelle pour la reconstruction 3D. Surtout, ce sont des questions archéologiques qui ont guidé certains des développements de cette thèse. Pour l'autre partie, l'intérêt est de s'ouvrir à de nouveaux questionnements applicatifs issus du terrain, puis de confronter les solutions développées à des données imparfaites, souvent éloignées des conditions optimales de réalisation de jeux de données disponibles en ligne [230]. Dans ce cadre de l'amélioration des solutions *open source* proposées, nous avons participé au rapprochement de communautés et d'outils existants (Meshroom × MicMac). La synergie des solutions évite la création de solutions logicielles redondantes et une double dépense d'argent public, et surtout, elle vise à atteindre l'interopérabilité sur toute la chaîne de traitement.

Du point de vue des protocoles proposés, l'expérience en grotte, en musée et sur les chantiers archéologiques a guidé les objectifs à atteindre, en termes de temps sur le terrain, de coût du matériel, de formation des opérateurs, de gestion de la donnée (dont les méta- et para-données) ou encore d'habitudes de travail. Cette partie de l'étude est en cours de concrétisation, dans le cadre d'un projet interdisciplinaire de la MITI (mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires) du CNRS, appelé NéNuFar (Nécessité de Numériser un Fonds Archéologique pour le Réunifier). Centré autour de la numérisation de l'art pariétal et mobilier de la grotte du Mas d'Azil, en Ariège, il tire parti des éléments fonctionnels de ce travail. Pour remonter ce cheminement, il nous faut décortiquer les outils et les pratiques actuelles des méthodes de reconstruction 3D photographique, afin de lever les verrous évoqués plus haut.

La reconstruction 3D dans la pratique archéologique

Ce chapitre aborde la mise en œuvre des outils de reconstruction 3D utilisés actuellement dans la pratique archéologique. Nous verrons que la photogrammétrie, qui est une des méthodes les plus répandues en archéologie de terrain, nécessite d'être déployée à différentes échelles et d'être combinée à d'autres méthodes pour une acquisition plus fidèle à la réalité. Nous verrons également qu'il est souvent difficile de déterminer la « vérité terrain » d'un objet archéologique, et donc de comparer différents résultats de reconstruction 3D.

Le principal objectif de la reconstruction 3D à partir de photographies est d'utiliser l'appareil photographique comme instrument de mesure, afin de reconstituer un volume. Il existe plusieurs méthodes, regroupées sous le terme générique de *shape-from-X*, dont les principales sont compilées dans le tableau 2.1 (p. 51). La photogrammétrie combine deux techniques géométriques utilisant plusieurs photographies prises sous différentes poses : *structure-from-motion* et stéréoscopie.

	Techniques géométriques	Techniques photométriques
Techniques à une seule pose et $N = 1$ éclairage	<i>Shape-from-template</i> [34] <i>Shape-from-shadows</i> [228] <i>Shape-from-contour</i> [47] <i>Shape-from-texture</i> [250]	<i>Shape-from-shading</i> [123]
Techniques à une seule pose et $N \geq 2$ éclairages	<i>Shape-from-focus</i> [186] Projection de lumière structurée [96]	Stéréophotométrie [200] <i>Shape-from-polarization</i> [179]
Techniques à plusieurs poses et $N \geq 2$ éclairages	<i>Structure-from-motion</i> [181] Stéréoscopie multivue [91] <i>Shape-from-silhouettes</i> [117]	Stéréophotométrie multivue [118]

TABLE 2.1 – Principales techniques de *shape-from-X*. [Adapté de [170]].

2.1 Photogrammétrie : reconstruction 3D géométrique

Nous présentons dans cette section le processus classique de reconstruction 3D qui, à partir de photographies d'une scène prises depuis différentes poses de l'appareil photographique, fournit un modèle 3D. La mise en place de cette technique nécessite de comprendre de quelle manière la scène 3D est projetée sur le plan image de la caméra (nous utiliserons indifféremment l'anglicisme *caméra* pour désigner l'appareil photographique).

2.1.1 Modèle de caméra perspective

L'appareil photographique est constitué de deux éléments essentiels : l'objectif, qui comporte plusieurs lentilles, projette l'objet photographié sur un plan appelé *plan image* ; après mise au point, ce plan coïncide avec le *récepteur photosensible*, qui recueille les photons pour former une image. Selon le *modèle de caméra perspective*, dont [112] donne une description détaillée, la création d'une image photographique se ramène à une projection centrale, dont le centre de projection est le *centre optique*.

Afin de modéliser géométriquement cette projection, nous devons définir différents repères (cf. figure 2.1, p. 52). Un premier repère 3D associé à l'appareil photographique, appelé *repère caméra*, a pour origine le centre optique \mathbf{C} . Ses axes X et Y sont parallèles aux bords de l'image, l'axe Z étant porté par l'*axe optique*.

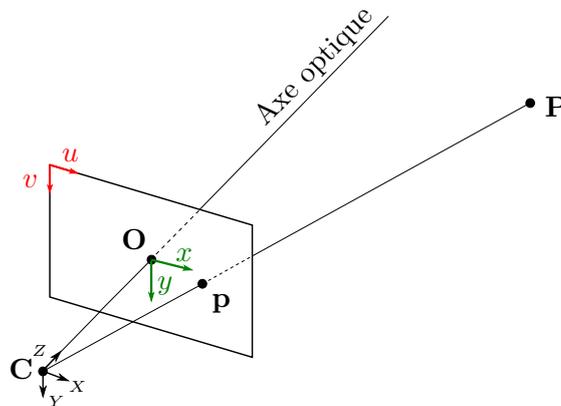


FIGURE 2.1 – Modèle de caméra perspective. L'axe optique coupe le plan image en un point \mathbf{O} appelé *point principal*. Un point 3D \mathbf{P} se projette, par projection centrale de centre \mathbf{C} sur le plan image, en un point \mathbf{p} qui peut être repéré soit par ses coordonnées $[x, y]^T$ dans le repère image (en vert), soit par ses coordonnées $[u, v]^T$ dans le repère pixels (en rouge).

La projection perspective met en relation chaque point visible $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^3$ de la scène avec un point image $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^2$. Les coordonnées de \mathbf{p} peuvent être exprimées dans deux repères 2D. Le *repère image* a pour origine le *point principal* \mathbf{O} , qui se situe à l'intersection de l'axe optique et du plan image, ses axes x et y étant parallèles aux axes X et Y du repère

caméra et de mêmes sens. D'autre part, comme une image numérique est composée d'un réseau régulier de pixels, celui-ci semble constituer un repère naturel pour les points de l'image. En considérant les pixels carrés, et en choisissant le côté du carré comme unité de longueur, nous pouvons définir un deuxième repère 2D, appelé *repère pixels*, dont les axes u et v sont parallèles aux axes x et y du repère image et de mêmes sens, mais dont l'origine est positionnée dans le coin supérieur gauche de l'image (cf. figure 2.1, p. 52).

Un point 3D $\mathbf{P} = [X, Y, Z]^T$ se projette en un point image \mathbf{p} . En utilisant les notations de la figure 2.2 (p. 53), le théorème de Thalès nous permet d'exprimer les coordonnées de sa projection $\mathbf{p} = [x, y]^T$ dans le repère image :

$$\begin{cases} \frac{x}{f} = \frac{X}{Z} \\ \frac{y}{f} = \frac{Y}{Z} \end{cases} \quad (2.1)$$

où f peut être assimilée à la *distance focale*, généralement exprimée en millimètres, qui est la principale caractéristique d'un objectif photographique.

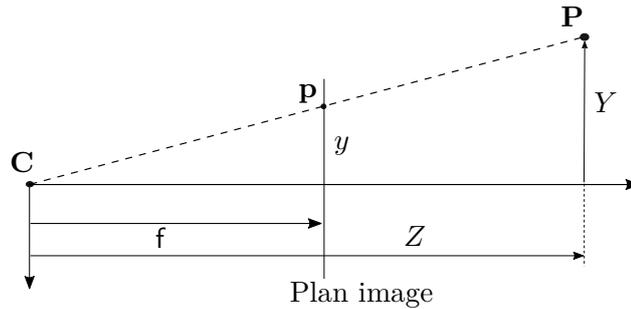


FIGURE 2.2 – Projection centrale, de centre \mathbf{C} , d'un point 3D \mathbf{P} en un point image \mathbf{p} .

Les deux repères 2D précédemment définis utilisent deux unités différentes : l'unité du repère image est la même que celle de la scène 3D, à savoir le mètre, tandis que celle du repère pixels est la dimension du pixel, supposé carré. Les coordonnées $[u, v]^T$ de \mathbf{p} dans le repère pixels s'écrivent donc :

$$\begin{cases} u = kx + u_0 \\ v = ky + v_0 \end{cases} \quad (2.2)$$

où k désigne le nombre de pixels par mètre, et $[u_0, v_0]^T$ les coordonnées du point principal \mathbf{O} , exprimées dans le repère pixels.

La *matrice de calibrage* est définie comme suit :

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} kf & 0 & u_0 \\ 0 & kf & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & u_0 \\ 0 & f & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Dans cette expression, $f = kf$ désigne la distance focale, exprimée en pixels. La matrice \mathbf{K} dépend donc de trois paramètres intrinsèques (ou paramètres internes) de l'appareil photographique, à savoir u_0 , v_0 et f , qui sont tous trois exprimés en pixels.

CHAPITRE 2. LA RECONSTRUCTION 3D DANS LA PRATIQUE ARCHÉOLOGIQUE

En utilisant les *coordonnées homogènes* de \mathbf{p} , c'est-à-dire en lui adjoignant une troisième coordonnée égale à 1, nous tirons de (2.1), (2.2) et (2.3) l'égalité matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z} \mathbf{K} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Cette relation décrit la projection d'un point 3D sur le plan image, qui associe à chaque point visible $\mathbf{P} = [X, Y, Z]^\top$ de la surface, un point image \mathbf{p} de coordonnées $[u, v]^\top$ dans le repère pixels. La surface \mathcal{S} à reconstruire peut donc être paramétrée par le domaine de reconstruction $\Omega \subset \mathbb{R}^2$, défini comme la projection de \mathcal{S} dans l'image :

$$\mathcal{S} = \left\{ \mathbf{P}(u, v), [u, v]^\top \in \Omega \right\} \quad (2.5)$$

La fonction z , dite « carte de profondeur » (*depth map*), associe à chaque point image \mathbf{p} , de coordonnées $[u, v]^\top$ dans le repère pixels, la troisième coordonnée $Z = z(u, v)$ du point 3D conjugué. En inversant la matrice \mathbf{K} , la relation (2.4) donne :

$$\mathbf{P}(u, v) = Z \mathbf{K}^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = z(u, v) \begin{bmatrix} \frac{u - u_0}{f} \\ \frac{v - v_0}{f} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

La fonction z constitue donc l'inconnue du problème de reconstruction 3D. En effet, d'après l'égalité (2.6), la connaissance de $z(u, v)$ permet de déterminer sans ambiguïté le point 3D $\mathbf{P}(u, v)$ recherché, pour peu que les paramètres intrinsèques (f, u_0, v_0) de l'appareil photographique soient connus (caméra calibrée).

2.1.2 Structure-from-motion

La première étape du traitement classique de photogrammétrie vise à estimer le déplacement de la caméra. Elle permet d'obtenir conjointement une description « parcimonieuse » de la surface observée, sous la forme d'un nuage de points 3D non dense, ainsi que les différentes poses de la caméra. Elle procure donc la structure de la scène à partir du mouvement de l'appareil photographique. C'est pourquoi elle s'appelle *structure-from-motion* (SfM). Nous décrivons dans ce paragraphe l'approche classique du SfM. Notons que cette méthode est en constante évolution et que de nombreuses approches par apprentissage ont vu le jour récemment.

La prise en compte de plusieurs poses nécessite l'utilisation de plusieurs repères caméra. Dans ce contexte, et pour éviter toute ambiguïté, nous devons indexer la pose de la caméra. Nous notons \mathbf{C}_i l'origine du repère caméra \mathcal{R}_i associé à la $i^{\text{ème}}$ pose. Le repère caméra \mathcal{R}_{i+1} est lié à \mathcal{R}_i par une transformation rigide caractérisée par une matrice de rotation $\mathbf{R}_{i+1/i}$ et un vecteur de translation $\mathbf{t}_{i+1/i}$, tous deux exprimés dans le repère \mathcal{R}_i , de sorte que, pour un point 3D de coordonnées $\mathbf{P}_i = [X_i, Y_i, Z_i]^\top$ dans \mathcal{R}_i et $\mathbf{P}_{i+1} = [X_{i+1}, Y_{i+1}, Z_{i+1}]^\top$ dans \mathcal{R}_{i+1} , la formule de changement de repère s'écrit :

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{R}_{i+1/i} \mathbf{P}_{i+1} + \mathbf{t}_{i+1/i} \quad (2.7)$$

La *mise en correspondance* consiste à trouver des *points homologues* entre deux images. Ce processus peut être scindé en trois étapes : détection de points remarquables, dits *points d'intérêt*, dans chaque image ; description de ces points ; appariement, c'est-à-dire formation de paires de points d'intérêt issus des deux images.

La première étape extrait les points d'intérêt de chaque image grâce à un détecteur. Depuis les premiers détecteurs de coins, de nombreuses améliorations portant sur la robustesse et la répétabilité ont été proposées, jusqu'à l'apparition des détecteurs multiscales tels que le détecteur de points SIFT proposé par Lowe [160].

L'étape de description assigne ensuite une signature à chaque point d'intérêt, de manière à pouvoir repérer les projections d'un même point 3D dans une séquence d'images. La robustesse aux transformations géométriques et photométriques est la principale qualité d'un descripteur. Il est notable que les étapes de détection et de description sont généralement effectuées par le même agent. Nous pouvons de nouveau citer le descripteur SIFT [160], qui fait figure de référence.

Le processus d'appariement consiste enfin à identifier les points présentant une forte similarité entre les deux images. Trois éléments sont requis pour cette dernière étape : la recherche des plus proches voisins, qui fournit les correspondances possibles entre images ; la métrique, qui mesure la similarité entre deux points potentiellement homologues et doit être choisie en fonction du détecteur utilisé ; une politique de rejet, qui valide les correspondances grâce à un seuil ou à un ratio utilisant le deuxième plus proche voisin [160].

La mise en correspondance entre deux images peut être décrite sous forme compacte par une matrice appelée *matrice essentielle*, qui permet d'estimer le mouvement de la caméra entre deux poses i et $i + 1$, défini par une matrice de rotation $\mathbf{R}_{i+1/i}$ et un vecteur de translation $\mathbf{t}_{i+1/i}$ (translation du centre optique). Les méthodes d'estimation de la pose à partir de la matrice essentielle, telles qu'elles sont décrites dans [112], mettent en évidence une ambiguïté sur le vecteur $\mathbf{t}_{i+1/i}$, qui ne peut être estimé qu'à un facteur d'échelle près. Un premier nuage de points 3D parcimonieux (non dense) est obtenu par *triangulation*, la position de chaque point 3D étant estimée à partir de ses projections dans les deux images (cf. figure 2.3, p. 55).

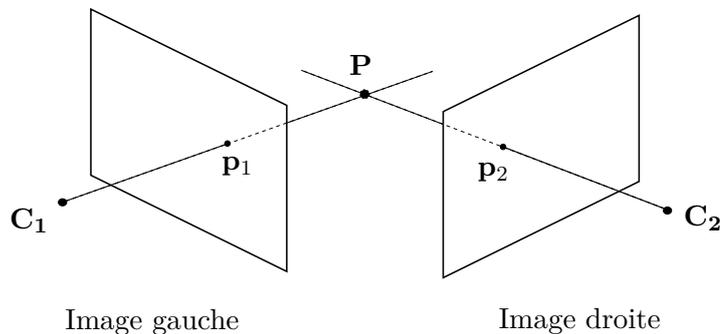


FIGURE 2.3 – L'utilisation de deux poses permet de déterminer la position du point 3D P par *triangulation*, à condition que l'on connaisse la paire de points homologues $\{p_1, p_2\}$.

En étendant cette méthode au cas où l'on dispose de $M > 2$ images de la scène 3D, il est possible d'obtenir des modèles 3D à grande échelle. Supposons que nous disposions d'une première reconstruction 3D partielle de la scène obtenue à partir des deux premières poses de la caméra, le repère de référence étant le repère caméra de la première pose. L'image droite, correspondant à la pose numéro 2, devient alors l'image gauche, tandis que la troisième image devient l'image droite. Nous pouvons à nouveau estimer un couple $(\mathbf{R}_{3/2}, \mathbf{t}_{3/2})$ décrivant le déplacement de la caméra entre les poses 2 et 3, et reconstruire un nuage de points 3D parcimonieux caractéristique de la scène. Un simple changement de repère permet ensuite de retrouver le couple $(\mathbf{R}_{3/1}, \mathbf{t}_{3/1})$ décrivant le déplacement de la caméra entre les poses 1 et 3. Ainsi, de proche en proche, la totalité des poses peuvent être estimées dans un repère commun, et la reconstruction 3D de la scène est densifiée.

Ce procédé de reconstruction 3D, qui semble très naturel, est particulièrement pertinent si l'on dispose d'une séquence ordonnée d'images, comme cela est le cas dans le cadre de l'odométrie visuelle ou du SLAM [233]. Néanmoins, chaque nuage de points 3D est reconstruit à une échelle différente (rappelons que le vecteur $\mathbf{t}_{i+1/i}$ est estimé à un facteur d'échelle près). Or, si les échelles ne sont pas cohérentes entre elles, il en ira forcément de même pour les nuages de points 3D. Un ajustement de l'échelle doit donc être effectué.

La figure 2.4 (p. 56) montre un exemple de résultat de l'étape de SfM.

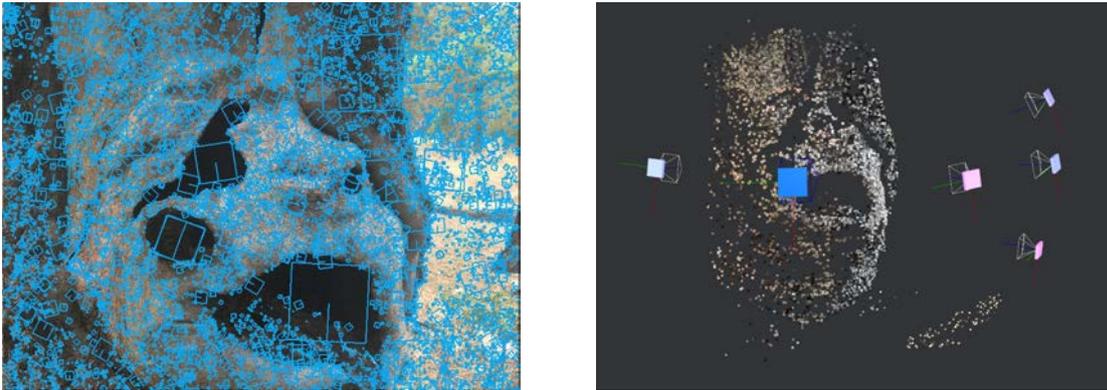


FIGURE 2.4 – Exemple de reconstruction 3D obtenue par SfM. À gauche : points d'intérêt et descripteurs extraits de l'une des images d'entrée. À droite : poses de la caméra et nuage parcimonieux de points 3D. [Données provenant de AliceVision].

En archéologie, il est particulièrement important de connaître l'échelle, mais il est également d'usage de procéder à une étape de géoréférencement. À partir des coordonnées des points de la scène dans un repère cartographique, la reconstruction 3D obtenue par SfM doit être alignée sur ce repère, et son échelle ajustée en conséquence.

2.1.3 Stéréoscopie multivue

Plus connue sous la dénomination anglaise de *multi-view stereo* (MVS), la *stéréoscopie multivue* est une technique de reconstruction 3D complémentaire du SfM. À partir des

poses de la caméra estimées par SfM, le MVS fournit une reconstruction 3D dense pour chaque pose, sous la forme d'une carte de profondeur exprimée dans le repère caméra. Cette méthode utilise l'information fondamentale contenue dans les images, à savoir le niveau de gris (ou les niveaux de couleur, le cas échéant). Une vue d'ensemble des pratiques liées au MVS est présentée dans [91].

Une surface est dite *lambertienne* (surface mate ou « parfaitement diffusante ») si sa *luminance* est indépendante de la direction d'observation. Une proportion non négligeable de matériaux présente un comportement « presque lambertien ». Sous l'hypothèse lambertienne, le niveau de gris de l'image d'un point 3D de la scène est donc indépendant de la pose de l'appareil photographique. Alors que l'étape de SfM du processus de reconstruction 3D fait cette hypothèse seulement pour les points d'intérêt, le MVS la fait pour tous les points de la surface, raison pour laquelle il faut effectivement s'attendre à obtenir une reconstruction 3D dense.

Soit \mathbf{P} un point 3D situé sur une surface lambertienne \mathcal{S} , qui se projette en un point image \mathbf{p} . La projection centrale π , définie par $\mathbf{p} = \pi(\mathbf{P})$, est inversible si l'on connaît la carte de profondeur z . Dans ce cas, il existe une relation biunivoque entre les points 3D visibles de la scène et leurs images, qui se traduit par les relations (2.4) et (2.6), sous couvert que la profondeur soit connue. Sous cette hypothèse, (2.6) peut être réécrite :

$$\mathbf{P} = \pi_z^{-1}(\mathbf{p}) \quad (2.8)$$

où l'indice z indique que, sans la connaissance de z , cette écriture serait ambiguë.

Si nous disposons de $M + 1$ images de la même scène 3D et des $M + 1$ poses correspondantes de la caméra, la première pose peut être choisie comme référence. Pour un point 3D \mathbf{P} visible dans toutes les images, nous notons $\mathbf{p} = \pi(\mathbf{P})$ la projection de ce point dans l'image de référence, et $\mathbf{p}_i = \pi_i(\mathbf{P})$, $i \in \{1, \dots, M\}$, ses projections dans les M autres images, appelées « images témoins ». L'hypothèse lambertienne nous permet d'écrire :

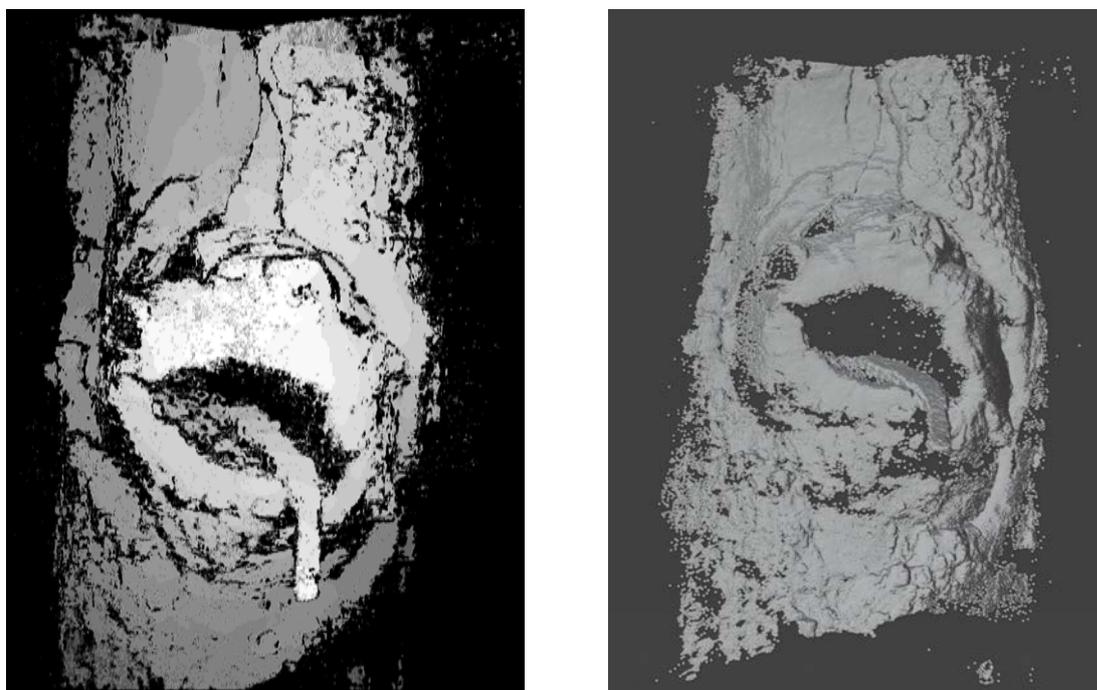
$$I_i(\mathbf{p}_i) = I(\mathbf{p}), \quad i \in \{1, \dots, M\} \quad (2.9)$$

où I_i et I désignent, respectivement, les fonctions de niveau de gris de l'image i et de l'image de référence. Pour un point \mathbf{p} de l'ensemble Ω , qui regroupe les points de l'image de référence visibles dans toutes les images témoins :

$$I_i \circ \pi_i \circ \pi_z^{-1}(\mathbf{p}) = I(\mathbf{p}), \quad i \in \{1, \dots, M\}, \quad \mathbf{p} \in \Omega \quad (2.10)$$

La stéréoscopie multivue recherche la carte de profondeur z correspondant à la pose de référence qui maximise la *cohérence photométrique* de l'image de référence avec les M images témoins. Les équations (2.10) ne sont jamais vérifiées exactement, entre autres parce que les surfaces réelles ne sont jamais parfaitement lambertiennes. En considérant z comme une fonction inconnue, nous pouvons reformuler les équations (2.10) en un problème en moindres carrés. Par ailleurs, nous connaissons les fonctions de niveau de gris sous forme discrète, c'est-à-dire seulement en chaque pixel. Le problème de minimisation doit donc être écrit sous forme discrète, sa résolution pouvant être effectuée pixel par pixel ($z_{\mathbf{p}}$ désigne la valeur de la profondeur associée au pixel $\mathbf{p} \in \Omega$) :

$$\hat{z}(\mathbf{p}) = \underset{z_{\mathbf{p}} \in \mathbb{R}}{\operatorname{argmin}} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left[I_i \circ \pi_i \circ \pi_{z_{\mathbf{p}}}^{-1}(\mathbf{p}) - I(\mathbf{p}) \right]^2 \quad (2.11)$$



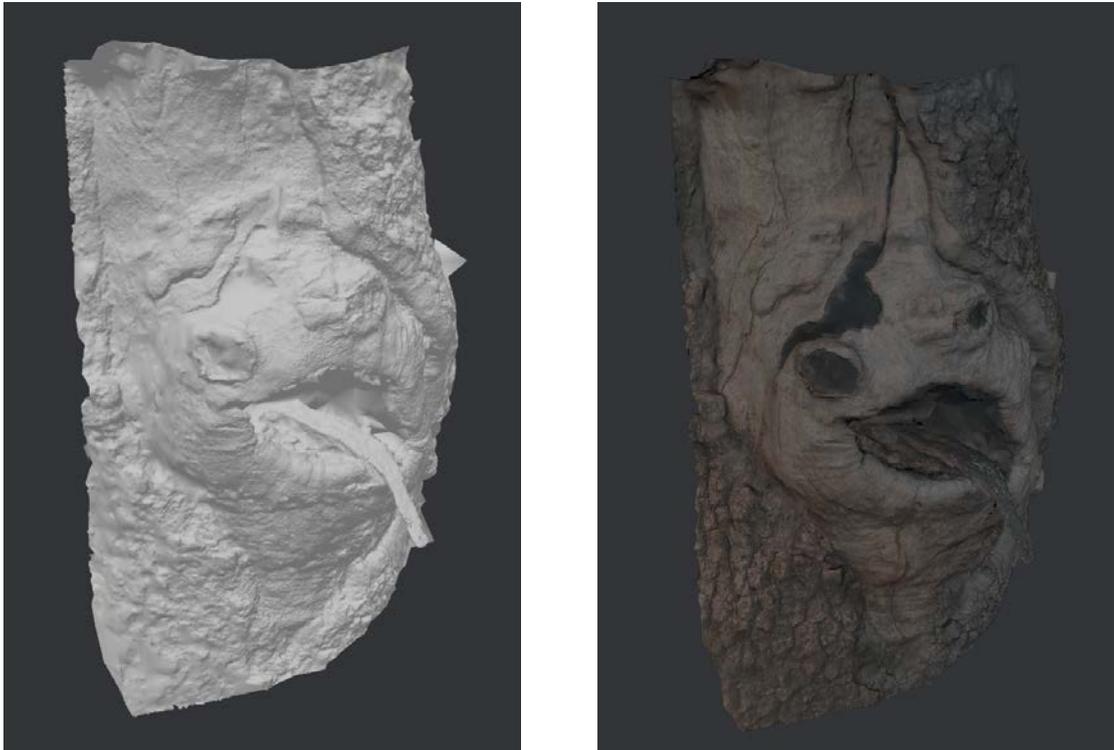
Profondeur en niveaux de gris.

Nuage dense de points 3D.

FIGURE 2.5 – Exemple de reconstruction 3D obtenue par MVS : carte de profondeur et nuage dense de points 3D.

Dans (2.11), la cohérence photométrique se résume à la comparaison en moindres carrés de deux niveaux de gris. En pratique, tant dans les éléments qu'elle vise à comparer que dans sa formulation, une version plus complexe de la cohérence photométrique doit être utilisée (cf. le panorama complet présenté dans [91, chapitre 2]). Notons seulement que l'argument à minimiser peut se révéler non linéaire, non dérivable et/ou non convexe, ce qui rend l'optimisation potentiellement difficile. C'est pourquoi la minimisation est généralement effectuée par une recherche exhaustive (*brute-force*), parmi un ensemble de valeurs prédéfinies de la profondeur. Cette stratégie, introduite initialement dans [116], peut paraître simpliste, mais s'avère efficace pour l'estimation de cartes de profondeur de scènes 3D fortement texturées [97]. La figure 2.5 (p. 58) en atteste : l'optimisation de la seule cohérence photométrique permet d'estimer une carte de profondeur dont la forme globale semble qualitativement fidèle à l'original. Des détails géométriques très fins sont même retrouvés, malgré la présence d'artefacts qui pourraient être facilement éliminés par une étape de post-traitement [92, 120].

Une fois estimée une carte de profondeur par pose de la caméra, le processus se poursuit par l'étape de fusion des différentes cartes de profondeur, qui prend la forme d'un maillage 3D [46, 132], puis par le plaquage d'une texture sur le maillage [154]. Cela permet d'obtenir un modèle 3D complet de la scène (cf. figure 2.6, p. 59). La qualité d'une telle reconstruction 3D témoigne de la maturité des chaînes de traitement photogrammétrique.



Maillage triangulaire.

Maillage texturé.

FIGURE 2.6 – Exemple de reconstruction 3D obtenue par photogrammétrie : maillage avant et après plaquage d’une texture.

La chaîne de traitement qui vient d’être détaillée est représentative du fonctionnement de la plupart des logiciels de photogrammétrie. Ces outils ayant été développés dès le début des années 2000, la méthode a atteint une certaine maturité [206], bien que des variantes mobilisant des algorithmes spécifiques aient été proposées pour chacune de ses étapes. La richesse de l’état de l’art est telle qu’il n’est pas envisageable de présenter toutes ces variantes ici.

2.2 Mise en œuvre de la photogrammétrie

Il existe différents protocoles d’acquisition des données pour la mise en œuvre de la photogrammétrie. Comme nous l’avons vu dans la section 2.1 (p. 52), cette technique reconstitue une scène en 3D à partir de photographies prises sous différents angles. Ses deux principes de base sont le changement de pose de l’appareil photographique et le recouvrement entre clichés. Le changement de pose étant connu, un même point 3D identifié dans deux images peut être positionné dans l’espace.

Pour qu’une numérisation par photogrammétrie soit réussie, il faut que l’opérateur fournisse des données exploitables et de bonne qualité. Des protocoles d’acquisition déjà

éprouvés permettent de limiter l'influence du facteur humain sur la qualité des modèles 3D. Cependant, chaque projet est unique par ses composantes. Dans cette section, nous présentons plusieurs projets réalisés au cours de la thèse, qui illustrent la diversité des protocoles qui ont été adaptés et adoptés.

2.2.1 Protocoles d'acquisition

Acquisition circulaire

Le premier protocole d'acquisition est conçu pour s'adapter aux objets de manière générale. Le photographe se déplace autour de l'artefact en orientant l'appareil photo vers le centre de l'objet. Dans la mesure du possible, la visée est orthogonale à la surface du sujet. Il s'agit d'une *acquisition circulaire*, ou convergente, qui se réalise en anneau et à distance constante. Le choix du pas angulaire entre clichés successifs a un impact, à la fois sur le nombre d'images et sur le recouvrement théorique. Par exemple, une acquisition circulaire comportant 20 photographies régulièrement réparties autour d'un objet correspond à un pas angulaire de 18°, avec un taux de recouvrement théorique de 90% [40].

Généralement, l'acquisition circulaire se fait à trois niveaux différents, c'est-à-dire en trois anneaux. L'intérêt est de maximiser non seulement le recouvrement intra-anneau, mais également le recouvrement inter-anneaux. Dans le cas d'un sujet pouvant être déplacé, la numérisation s'effectue face par face (dessus/dessous, et éventuellement les côtés pour faire la liaison) [121]. Pour les petits objets, il est commode d'utiliser un plateau tournant. La rotation de l'objet simule le déplacement de la caméra, si l'on prend la précaution de masquer l'arrière-plan qui, lui, reste fixe.

Pour les *statues-menhirs* du Rouergue, l'acquisition consiste à prendre une photographie tous les 10° d'angle, à plusieurs niveaux espacés de 15 cm à 25 cm, soit un total de 200 à 500 photographies, selon la taille de la statue-menhir. Sur la figure 2.7 (p. 61), les poses de la caméra estimées par SfM ont été représentées autour du maillage texturé d'une statue-menhir. Une telle densité de photographies documente avec une forte redondance la surface de la statue. Cette adaptation du protocole permet de garantir une reconstruction 3D complète, et surtout l'enregistrement d'un maximum d'informations, sachant que le déploiement d'une telle campagne demande des moyens et des autorisations d'intervention difficiles à répéter régulièrement.

La majorité des photographies ont été prises avec un appareil photographique de type Nikon Z7 II équipé d'un objectif 35 mm, placé sur un trépied. L'utilisation d'un trépied permet d'augmenter le temps de pose, et donc d'améliorer la profondeur de champ en diminuant l'ouverture. Les parties les plus hautes de certaines statues-menhirs (au-dessus de deux mètres) ont été photographiées avec un appareil photographique compact Ricoh GR II équipé d'un objectif 28 mm, fixé au bout d'une perche (les paramètres de prise de vue sont spécifiés dans le rapport [148]). Pour les statues-menhirs situées dans un lieu ne présentant pas un dégagement suffisant pour qu'il soit possible d'en faire le tour, des photographies ont été prises appareil photographique en main. Enfin, pour pouvoir réaliser la totalité des prises de vue (dessus/dessous), il a été nécessaire de faire manipuler certains monolithes par une équipe de restaurateurs.

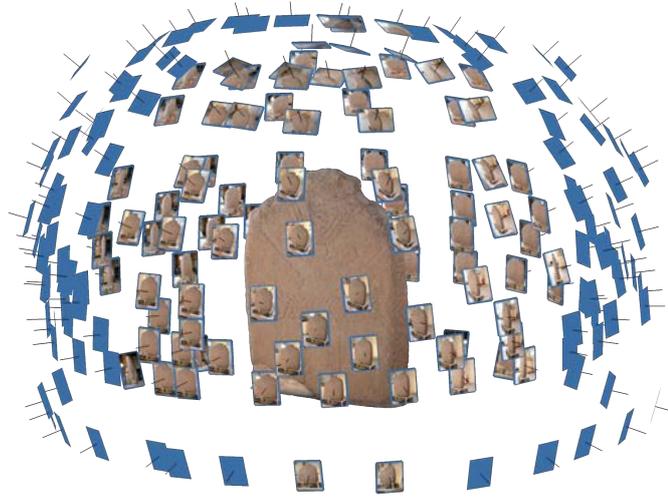


FIGURE 2.7 – Visualisation des poses de l’appareil photographique autour du maillage texturé d’une statue-menhir.

Pour les statues-menhirs conservées en intérieur (musée, dépôt, maison, etc.) ou dans des abris, des panneaux LED à lumière blanche (5600 K) ont servi à améliorer les conditions d’éclairage et à limiter les variations d’intensité de l’éclairage naturel. Un protocole de contrôle de la colorimétrie fondé sur l’utilisation d’une charte colorimétrique permet notamment d’étalonner la température des éclairages. Présente à chaque série d’acquisitions, elle sert à corriger les couleurs lors du développement des images au format RAW.

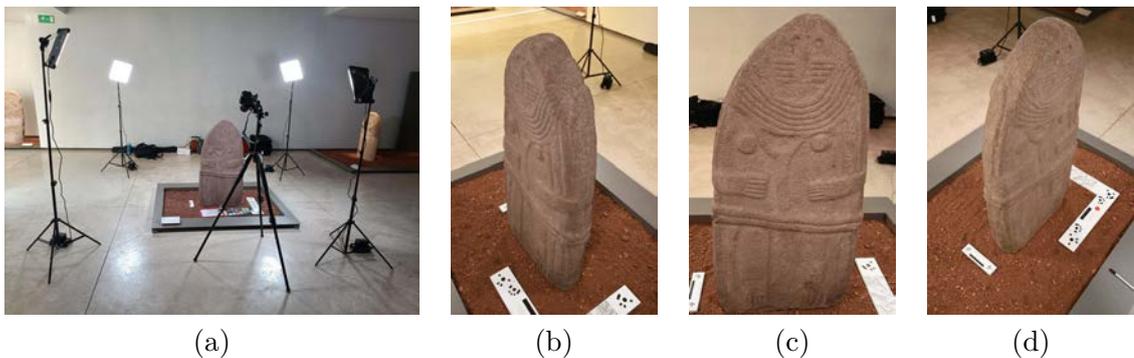


FIGURE 2.8 – (a) Vue générale de l’installation de photogrammétrie utilisée pour numériser en 3D une « statue-menhir ». (b-c-d) Trois photographies prises depuis différents points de vue, sous un éclairage produit par des panneaux LED fixes.

La question de la mise à l’échelle des modèles 3D s’est rapidement posée. Pour cela, il fallait un outil léger, peu encombrant et facile à manipuler par un opérateur travaillant seul. La création de règles et d’équerres s’est imposée. Les cibles circulaires qu’elles portent sont

CHAPITRE 2. LA RECONSTRUCTION 3D DANS LA PRATIQUE ARCHÉOLOGIQUE

reconnues automatiquement par le logiciel de photogrammétrie, ce qui est suffisant pour effectuer la mise à l'échelle. L'équerre, équipée de trois cibles, définit un plan permettant d'orienter le modèle 3D lorsque, par exemple, la statue-menhir est posée sur un socle. Grâce à ces règles, il est possible d'atteindre une précision de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre au niveau des cibles. La figure 2.8 (p. 61) montre le dispositif d'acquisition déployé, qui comporte des panneaux LED visant à rendre l'éclairage le plus homogène possible, les règles photogrammétriques disposées autour de la base du monolithe et la charte colorimétrique, avec une plaque contenant des informations telles que la date, le lieu, le nom de la statue et son numéro d'inventaire.



FIGURE 2.9 – Visualisation d'une sélection de modèles 3D de statues-menhirs obtenus par photogrammétrie, lors de la seconde campagne de numérisation.

Au total, 142 statues-menhirs ont été numérisées en deux campagnes, une première en 2020 et une seconde sur la période 2022-2023 (cf. figure 2.9, p. 62). Cela représente six semaines de travail sur le terrain (sans compter le temps nécessaire à la manipulation de certains blocs), auxquelles s'ajoutent trois mois de traitement et de compilation des données. Il aura fallu 43000 photographies pour la création des modèles 3D. Avec les quatre modalités de représentation de l'information de surface décrites dans la section 1.3 (p. 37), ce travail approche les mille planches produites [147, 148].

Acquisition aérienne

La fouille du dolmen du Pech Laglaire, sur la commune de Gréalou (Lot), s'est déroulée sur une autorisation triennale de campagne archéologique dirigée par Vincent Ard (2021-2023). L'intervention a débuté suite à la chute de la dalle de couverture. Après cet événement, un suivi archéologique par la fouille a été programmé, ainsi qu'un projet de restauration du monument. Pour ce vestige, nous avons mis en place un suivi temporel des interventions, année après année, mais également un enregistrement journalier de la fouille. Cette fréquence de numérisation est motivée par le dégagement des niveaux archéologiques contenant des restes humains. La fourniture de supports orthophotographiques est essen-

2.2. MISE EN ŒUVRE DE LA PHOTOGRAMMÉTRIE

tielle pour le relevé des phases de démontage des vestiges osseux. L'utilisation du nuage de points permet d'effectuer les mesures ostéologiques nécessaires à l'étude anthropologique.

L'approche souhaitée est donc multiscalaire, avec cinq niveaux d'acquisition. À l'échelle du territoire, nous nous sommes appuyés sur le Lidar de l'IGN (cf. annexe 5, p. 157). Nous avons ensuite travaillé sur l'implantation du dolmen avec un drone multiréacteur (DJI Mavic 2 pro), dans un premier temps pour connaître le contexte de la colline, avec un vol à 70 m pour une emprise carrée de 300 m de côté, puis pour connaître le contexte proche afin de repositionner les acquisitions géophysiques, avec un vol à 20 m sur une emprise carrée de 50 m de côté. La phase suivante a été réalisée à l'aide d'une perche, au niveau du dolmen et de son cairn, afin de documenter les différentes étapes de la fouille, secteur par secteur. Enfin, le niveau de résolution le plus élevé a été obtenu au plus près des vestiges, appareil photographique en main.

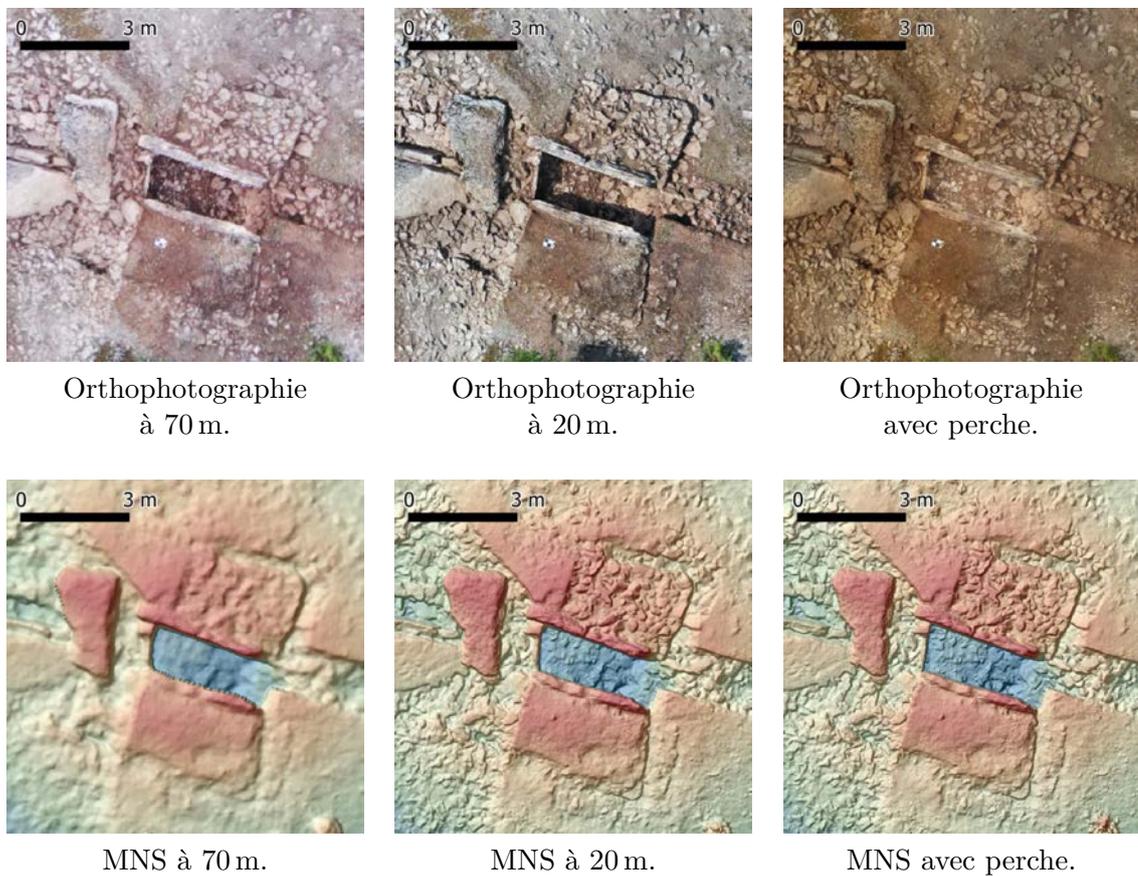


FIGURE 2.10 – Dolmen de Gréalou : visualisation des orthophotographies et des MNS produits par drone à 70 m de hauteur, à 20 m de hauteur et avec une perche. La résolution spatiale croît lorsque la distance de prise de vue décroît.

L'avantage de cette approche est d'optimiser la résolution des données à l'échelle de travail, tout en mettant à jour, à intervalles réguliers, la vue en plan des vestiges. La

dimension projetée théorique du pixel central d'une photographie, appelée *ground sample distance* (GSD), est obtenue en connaissant la dimension d'un photosite du capteur, la distance focale de l'objectif et la hauteur de vol (ou la distance à l'objet). À partir de cette estimation, le télépilote ajuste la hauteur de prise de vue. Cela a également un impact sur la résolution spatiale de la reconstruction 3D (cf. figure 2.10, p. 63).

Toutes les acquisitions ont été repositionnées dans le même référentiel cartographique, grâce aux repères et aux cibles disposés lors de chaque numérisation. La qualité du modèle 3D est fortement liée à la hauteur de vol, au recouvrement, à l'inclinaison du capteur (au nadir ou oblique) ainsi qu'à la qualité, la quantité et la distribution des *ground control points* (GCP) [157]. Parmi les nombreux travaux disponibles sur ces questions, retenons que la précision du géoréférencement et du modèle 3D est optimale pour une distribution régulière des GCP sur la totalité de l'emprise [246], et en utilisant entre huit et dix GCP [21]. Pour les emprises de plusieurs hectares, l'impact de la quantité de GCP est quantifié en nombre de centaines d'images [218].

Acquisition en grotte

Les grottes sont des environnements complexes qui ont été occupés par les groupes humains du Paléolithique récent. Leur numérisation nécessite une vision globale de l'espace, car c'est la totalité de la cavité qui est incluse dans le système symbolique [83]. En effet, les espaces dépourvus de représentations pariétales renferment des informations essentielles pour comprendre les activités humaines dans ces lieux si particuliers.

Pour la grotte Chauvet (Ardèche), reprenons l'historique des couvertures afin de repositionner notre intervention. Le relevé topographique des 9000 mètres carrés de la cavité a été réalisé de 1998 à 2005 de manière traditionnelle, car à l'époque, les technologies numériques étaient jugées trop coûteuses. Depuis, plusieurs couvertures ont été réalisées par lasergrammétrie. Celles de 2006 et de 2010 ont servi à l'anamorphose de la réplique de la grotte, appelée Chauvet 2 [70]. Une nouvelle acquisition de 823 stations a été entreprise à la demande du ministère de la Culture (DRAC Auvergne-Rhône-Alpes) en 2016. Elle s'accompagne de plus de 80000 photographies qui portent essentiellement sur les parois visibles depuis les cheminements. Seules quelques séries d'images utilisant une girafe permettent de déporter le regard, notamment pour certaines parties des sols [84]. Comme nous l'avons mentionné dans la section 1.3 (p. 37), ces acquisitions ne répondent pas à certains des besoins spécifiques de la recherche.

Nous avons donc proposé depuis 2018 une acquisition photographique multiscalair et multicapteur, comme cela est effectué dans d'autres cavités [104, 58]. Outre les contraintes inhérentes au milieu des grottes, la principale difficulté réside dans la limitation des déplacements imposée par les cheminements. Pour la deuxième partie de la grotte Chauvet, visée par la recherche en cours, seuls 81 mètres carrés sont accessibles depuis les passerelles, sur un total de 2600 mètres carrés. Le matériel de nos interventions est conditionné par la validation de la Conservation. L'usage de drones est impossible, malgré des résultats prometteurs et attendus sur d'autres sites [130]. L'usage de perches est autorisé, ce qui permet d'accéder à de nouveaux points de vue, qui donnent une réelle plus-value aux acquisitions de 2016 [85], notamment pour les sols.

Nos acquisitions se traduisent par une numérisation générale des salles profondes (sols, parois, voûtes) dans les limites de ce qui est accessible, réalisée avec un appareil photographique compact expert (Ricoh GR11) orientable au bout d'une perche. La grotte est parcourue par tronçons de quelques mètres de long, sous un éclairage diffus et constant provenant de panneaux LED. Des contrôles géométriques (règles photogrammétriques) et photométriques (charte colorimétrique) sont ajoutés *in situ*. Ce modèle général est complété par des acquisitions localisées, de plus haute résolution, effectuées avec de meilleurs capteurs. La figure 2.11 (p. 65) montre les poses de la caméra devant les « grands panneaux » de la grotte Chauvet. Le modèle 3D est texturé avec des photographies prises en lumière rasante. Les chercheurs produisent également leurs propres relevés 3D, qui sont intégrés par la suite dans le modèle général. La couverture avec des éclairages spécifiques ou rasants est réalisée par chaque spécialité, afin d'être ajoutée à l'acquisition globale. L'intérêt est d'atteindre des résolutions proches de quelques centaines de microns, ce qui est utile notamment pour le relevé pariétal.

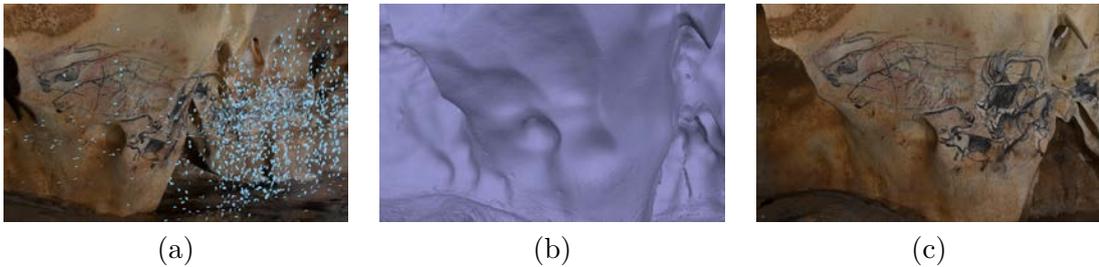


FIGURE 2.11 – « Grands panneaux » de la grotte Chauvet (Ardèche). (a) Positionnement des caméras (carrés bleus). (b) Modèle 3D général. (c) Texture en lumière rasante.

La figure 2.12 (p. 66) illustre un des supports proposés par l'équipe de recherche. À partir du modèle 3D, nous définissons une projection adaptée à un panneau. L'orthophotographie est réalisée en utilisant les images produites par les pariétalistes, qui effectuent les relevés des figurations pariétales et de l'ensemble des tracés. Ce travail est ensuite reprojété sur le modèle 3D.

2.2.2 Comparaison entre photogrammétrie et scanner

Même si la photogrammétrie constitue aujourd'hui la technique la plus répandue dans les sciences du patrimoine, il convient de comparer ses performances à son principal concurrent, à savoir le scanner, en testant de front quatre des logiciels de photogrammétrie parmi les plus utilisés.

Principaux logiciels de photogrammétrie

La tablette zodiacale du musée d'Archéologie nationale (MAN) de Saint-Germain-en-Laye a bénéficié de deux campagnes de numérisation, selon deux modalités différentes. La première a été effectuée en 2019 avec un scanner à lumière structurée. La deuxième

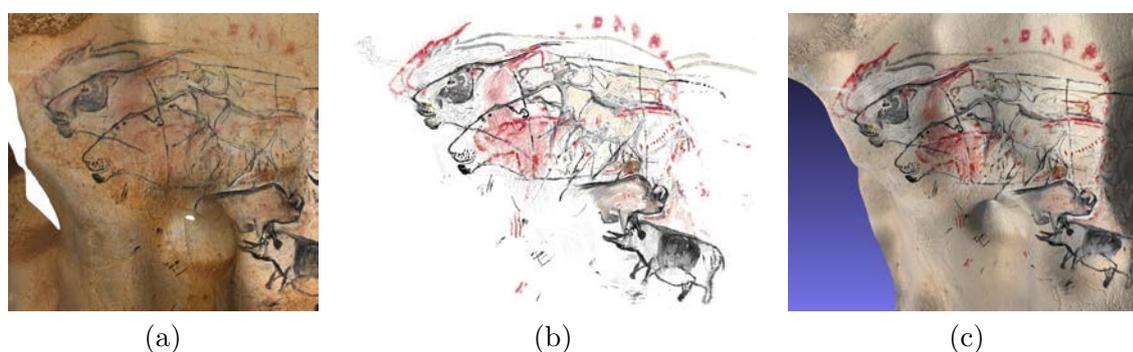


FIGURE 2.12 – (a) Orthophotographie. (b) Relevé de paroi. (c) Plaquage du relevé sur le modèle 3D.

campagne, réalisée en 2022 par l'équipe de photographes du MAN [214], a récolté un total de 2588 photographies de la partie droite de la tablette (MAN63676).

Parmi ces données, qui présentent une forte redondance, nous avons sélectionné une cinquantaine de clichés de la face gravée, sur lesquels nous avons testé quatre logiciels de photogrammétrie parmi les plus utilisés : les logiciels à licence Metashape (société Agisoft) [2] et RealityCapture (société Epic Games) [8], et les logiciels libres Meshroom (association AliceVision) [102] et Colmap [220, 221]. Ces logiciels comportent des chaînes de traitement similaires. Chacun d'eux a été utilisé avec ses paramètres par défaut et la résolution la plus élevée possible, l'objectif n'étant pas d'obtenir la meilleure reconstruction 3D, mais de mettre en évidence les principales différences. Enfin, les résultats de la photogrammétrie ont été confrontés à celui du scanner à lumière structurée.

Une fois les maillages produits par les quatre logiciels de photogrammétrie, il a fallu les recaler entre eux et avec le maillage du scanner, ce qui a été fait en utilisant une dizaine de points de calage perceptibles sur toutes les acquisitions. Comme les logiciels de photogrammétrie opèrent à des résolutions différentes, nous avons généré des MNS à une résolution commune de 30 microns, qui est la résolution théorique du scanner à lumière structurée.

Évaluation des performances

Un premier indice de comparaison porte sur les pentes de ces MNS. Les résultats de la figure 2.13 (p. 67) suggèrent que les gravures sont plus profondes et leurs bords plus marqués avec le scanner, là où les reliefs des modèles 3D obtenus par photogrammétrie semblent lissés. Le scanner et le logiciel RealityCapture donnent des résultats similaires, alors que Metashape semble sous-estimer la profondeur des gravures. Les résultats obtenus avec les deux logiciels libres (Meshroom et Colmap) sont plus bruités que les autres, ce qui met en évidence le côté « boîte noire » des logiciels à licence, qui fait aussi leur force.

Cette première étude comparative montre que les logiciels de photogrammétrie sont désormais suffisamment matures pour produire des résultats comparables à ceux des scan-



FIGURE 2.13 – Tablette zodiacale du MAN. Images de pente en fausses couleurs obtenues avec les quatre principaux logiciels de photogrammétrie, et avec un scanner à lumière structurée.

ners, et qu'ils sont également exploitables à différentes échelles, une conviction qui était déjà partagée par la plupart des archéologues au début de cette thèse.

Nous avons ensuite calculé l'écart de profondeur entre les MNS du scanner et du logiciel RealityCapture. Si une telle comparaison ne donne pas d'information à l'échelle des détails du relief, elle permet au moins d'évaluer l'aptitude des méthodes de reconstruction 3D à restituer la forme globale de l'objet. Or, le résultat de la figure 2.14 (p. 68) montre que les deux MNS sont proches, avec une zone de « battement » de deux millimètres environ.



FIGURE 2.14 – Tablette zodiacale du MAN. Carte des écarts de profondeur entre les MNS du scanner et du logiciel de photogrammétrie RealityCapture.

Pour les archéologues, ces MNS sont intéressants car ils mettent en évidence le mouvement qui s’est opéré au niveau d’un remontage entre deux fragments. Comme nous voulions également retrouver les informations de relief à l’échelle des gravures, qui constituent une zone de hautes fréquences de la profondeur, nous avons sélectionné trois profils, qui sont numérotés et matérialisés par des segments rouges sur la figure 2.15 (p. 69), et qui coupent : (1) à la fois des lettres et les segments circulaires ; (2) un motif complexe ; (3) l’intersection entre un segment radial et un segment circulaire.

Ces profils montrent que le scanner restitue les bords supérieurs des gravures de façon très marquée et a tendance à accentuer leur profondeur (cf. figure 2.15, p. 69), des observations qui semblent indiquer que le scanner fournit la meilleure reconstruction 3D. Néanmoins, les deux campagnes de numérisation ayant été effectuées à trois ans d’intervalle par des opérateurs différents, nous avons été amenés à définir un autre protocole de comparaison entre les différentes techniques de reconstruction 3D, qui nécessite de disposer d’une « vérité terrain » (*ground truth*), c’est-à-dire d’un modèle 3D de référence. Or, dans la plupart des cas, une telle référence n’existe pas.

Vérité terrain

Le moyen le plus naturel pour disposer d’une vérité terrain consiste à créer des données synthétiques, ce qui permet de parfaitement contrôler les caractéristiques de la scène 3D. Les méthodes d’apprentissage profond (*deep learning*) nécessitent une immense quantité de données annotées. Leur essor explique que beaucoup de jeux de données synthétiques aient suivi l’exemple de ShapeNet [56], qui propose un grand nombre d’objets 3D. Les outils de rendu physiquement réaliste ont ensuite permis de multiplier les caractéristiques des objets et de l’éclairage [125, 126]. Enfin, il est notable que certaines bases de données utilisent des objets réels numérisés, afin d’améliorer le réalisme des données [205].

2.2. MISE EN ŒUVRE DE LA PHOTOGRAMMÉTRIE

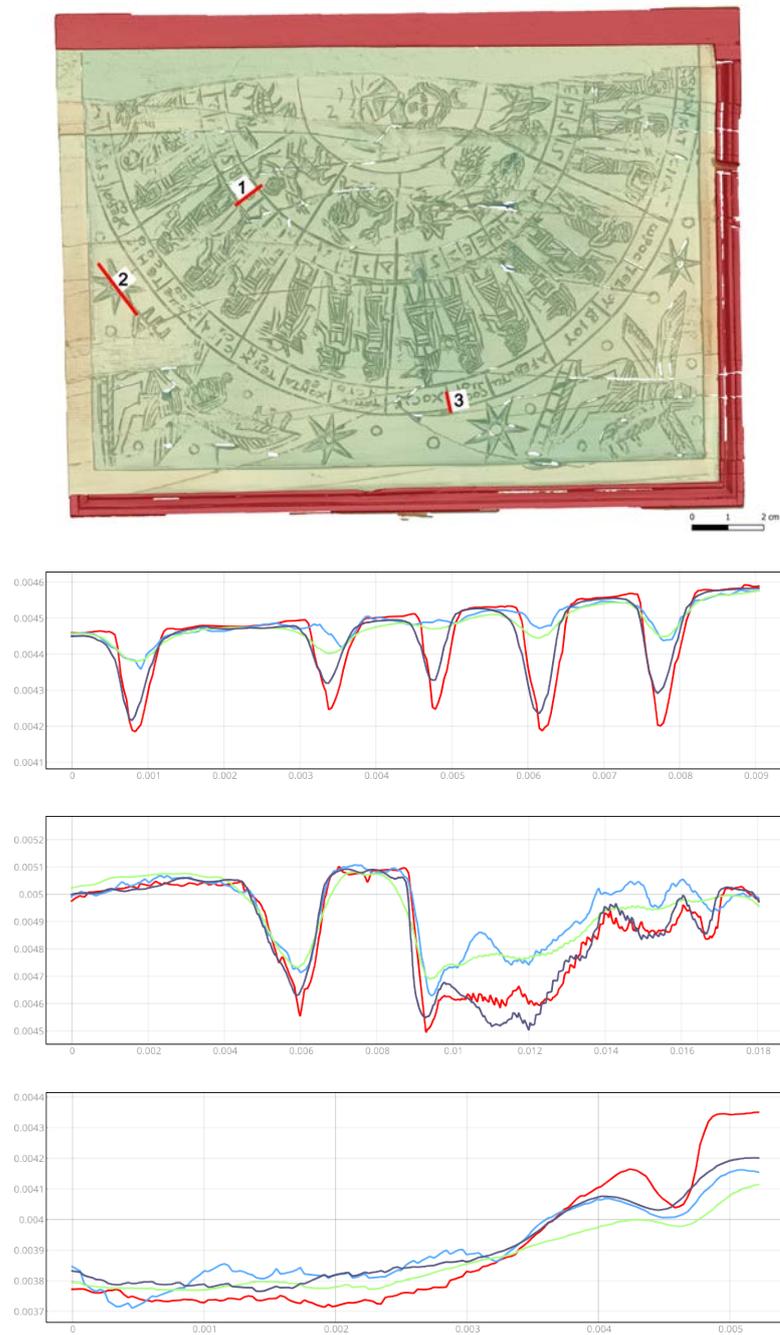


FIGURE 2.15 – En haut : localisation de trois profils sur le MNS du scanner. En bas : profils de la tablette zodiacale reconstruits par le scanner (en rouge), Meshroom (en bleu), Metashape (en vert) et RealityCapture (en violet). L'unité de longueur est le mètre.

Néanmoins, l'évaluation des méthodes de reconstruction 3D nécessite de les tester sur des données réelles. En archéologie, le résultat du scanner est souvent considéré comme vérité terrain [135]. Tel est le cas du jeu de données multiéclairage DiLiGenT [230], et de ses extensions au contexte multivue [155], aux sources ponctuelles [168] ou aux surfaces planes [247], mais l'utilisation du scanner reste discutable, car sa précision est difficile à évaluer. D'ailleurs, dans la plupart de ces articles, le terme « vérité terrain » est utilisé entre guillemets. D'autres travaux préfèrent utiliser comme référence des modèles de CAO [207] ou des objets de géométrie parfaitement connue [106], mais la vérité terrain peut quand même différer de la géométrie des objets réels, à cause des inexactitudes de fabrication.

2.3 Limites de la photogrammétrie

Malgré sa facilité de mise en œuvre, qui explique en grande partie son succès, la photogrammétrie est loin d'être infaillible, et ce pour différentes raisons. Dans cette section, nous souhaitons mettre en évidence les principales limites de la photogrammétrie, que nous avons regroupées en deux catégories : problèmes liés à la texture, et perte de résolution.

2.3.1 Problèmes liés à la texture

Surfaces peu texturées

Les pipelines de photogrammétrie présentent tous la même limite : la qualité des résultats dépend fortement du caractère texturé de la scène à reconstruire. Nous avons réalisé la numérisation du masque funéraire de Jean Jaurès, conservé au musée de Castres. Pour cet objet en résine de couleur parfaitement uniforme, la carte de profondeur obtenue par MVS est tellement bruitée qu'elle ne restitue que très grossièrement le relief (cf. figure 2.16-b, p. 71). Il est possible de réduire le bruit en fusionnant plusieurs cartes de profondeur, mais le maillage final reste malgré tout décevant.

Cette limite de la photogrammétrie provient de la difficulté à apparier correctement les images par maximisation de la cohérence photométrique, lorsque la surface est à la fois lisse et de couleur uniforme. Il en va de même des objets métalliques, à cause de leur caractère spéculaire, mais le manque de cohérence photométrique entre images peut alors être pallié par l'utilisation de lumière polarisée croisée [109, 89].

Dans le cas d'un objet de couleur uniforme, mais dont la surface n'est pas lisse, comme cela est le cas du masque funéraire de Jean Jaurès, un moyen d'améliorer le résultat de la photogrammétrie consiste à jouer sur l'éclairage, afin de « faire ressortir » le relief (cf. figure 2.16-a, p. 71). Cette idée constitue le principe des méthodes de reconstruction 3D photométriques, sur lesquelles nous reviendrons dans le chapitre 3.

Utilisation de textures photo-réalistes

Une autre limite de la photogrammétrie liée à la texture provient de son incapacité à estimer la couleur réelle des objets photographiés. Il est question de *texture photo-réaliste* lorsque, dans une image simulée à partir d'une reconstruction 3D obtenue par photogrammétrie, la couleur restituée est obtenue par composition des images utilisées en entrée de

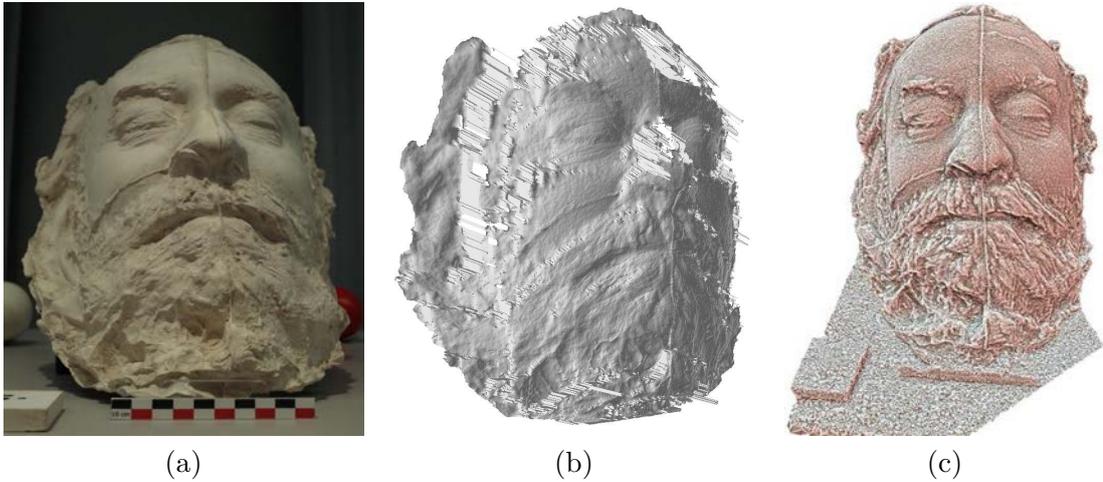


FIGURE 2.16 – Reconstruction 3D du masque funéraire de Jean Jaurès par photogrammétrie. (a) Sur cette photographie, il apparaît clairement que l’aspect texturé est dû à l’éclairage rasant. (b) Carte de profondeur obtenue par MVS, qui met en évidence le caractère très bruité de la reconstruction 3D, à cause du manque de texture. (c) Rendu du maillage en l’absence de post-traitement.

la chaîne de traitement, la texture pouvant parfois être obtenue par fusion d’images à différentes résolutions [36, 22].

Or, comme le montrent les orthophotographies du dolmen de Gréalou (cf. figure 2.10, p. 63), en l’absence de correction colorimétrique, un même site numérisé par différents capteurs, et surtout sous différentes configurations de l’éclairage, peut apparaître avec des couleurs très différentes. Même si, dans le cas précis de la figure 2.10 (p. 63), la variabilité de cette information est sans conséquence, puisque les orthophotographies servent de fond pour la réalisation de plans en DAO (dessin assisté par ordinateur), il est nécessaire de corriger cette donnée pour l’observation de certains vestiges.

Les outils de *delighting* sont censés supprimer les ombres, mais cela s’effectue au prix d’un certain empirisme. Nous verrons dans le chapitre 3 que, sous une hypothèse relativement réaliste, dite « hypothèse lambertienne », chaque niveau de couleur d’une photographie est égal au produit de deux grandeurs appelées « albédo » (ou « réflectance ») et « éclairage », et que la première de ces grandeurs peut être assimilée à la « vraie couleur » de l’objet dans le canal considéré. Il est possible de jouer sur l’éclairage pour que le niveau de couleur de la photographie soit proportionnel à l’albédo, c’est-à-dire de « gommer » les variations d’éclairage, mais cela peut être difficile à réaliser en pratique, surtout pour des acquisitions en extérieur.

De fait, la texture plaquée sur un maillage 3D mélange albédo et éclairage, alors que ce dernier dépend des conditions d’éclairage au moment de l’acquisition. Cela compromet donc fortement le réalisme d’un rééclairage de la scène dans le cadre, par exemple, d’applications de réalité augmentée.

Dans le cas précis de l'étude des parois de grottes ornées, il peut même exister un conflit entre les photographies prises sous un éclairage diffus, censé limiter les variations d'éclairément, et le souhait des pariétalistes d'utiliser des éclairages rasants pour faciliter la lecture de la « matière ». Pour cette raison, il arrive que les photographies soient prises en double, sous ces deux types d'éclairage. Enfin, il est notable que l'utilisation d'un flash tenu à la main, qui provoque forcément un éclairément variable d'une vue à l'autre, et qui diminue donc la cohérence photométrique entre les vues, ne dégrade que très marginalement les modèles 3D produits [208, 95].

2.3.2 Perte de résolution

Une autre limite des maillages générés par photogrammétrie est la *perte de résolution*, en comparaison de la résolution des images en entrée. La GSD donne la dimension théorique du pixel au niveau de la surface de l'objet. Cependant, la résolution spatiale des modèles 3D obtenus par photogrammétrie n'atteint généralement pas cette valeur théorique. La figure 2.17 (p. 73) illustre cette limite bien connue. Après plaquage sur un maillage 3D produit par photogrammétrie d'une texture provenant des informations colorimétriques contenues dans les images en entrée, il semble que le maillage possède la même résolution que les images, mais cela n'est qu'une illusion. La résolution géométrique du modèle 3D est généralement plus grossière. L'observation d'une photographie prise en lumière rasante, qui accentue la sensation de relief, et de l'image du modèle 3D simulée sous le même éclairage, suffit à confirmer qualitativement cette perte de résolution.

En d'autres termes, si la photogrammétrie réussit généralement à modéliser fidèlement le volume global d'un objet, c'est-à-dire les basses fréquences de sa carte de profondeur, cela n'est pas le cas des hautes fréquences, qui sont pourtant présentes dans les images. Les raisons de cet état de fait sont multiples, mais comme dans toute chaîne de traitement, il existe un effet d'accumulation des erreurs. Dans le cas de la photogrammétrie, cela commence dès l'acquisition des données, avec un taux de recouvrement et un nombre d'images limités, puis avec l'estimation des poses et des paramètres internes de la caméra obtenus par SfM, ensuite avec les cartes de profondeur obtenues par MVS, qui dépendent de nombreux paramètres, et enfin avec la création du maillage, qui fait intervenir différentes opérations (interpolation, filtrage, simplification, etc.).

Pour pallier cette perte des hautes fréquences, une parade naturelle consiste à ajouter un niveau de résolution, dans une approche multiscalaire, comme cela a été proposé dans [208]. Une autre piste (cf. figure 2.17-b, p. 73) consiste à s'appuyer sur des éclairages rasants [88, 95]. Une troisième possibilité est d'utiliser plusieurs éclairages lors de l'acquisition [146, 52]. Cela permet, par exemple, de mieux localiser les gravures sur une paroi de grotte ornée, mais en aucun cas de répercuter réellement les hautes fréquences du relief dans la géométrie du modèle 3D.



FIGURE 2.17 – Tête de guerrier chypriote en céramique (musée Saint-Raymond, Toulouse). (a) Photographie prise sous un éclairage diffus. (b) Photographie prise en éclairage rasant, afin d’accentuer la sensation de relief. (c) Modèle 3D obtenu par photogrammétrie, sur lequel une texture photo-réaliste a été plaquée : la résolution apparente du modèle 3D est en réalité celle de la texture. (d) Sans plaquage de cette texture, la résolution du modèle 3D apparaît plus grossière. Ligne du bas : agrandissements d’une zone située au niveau de la bouche et de la barbe.

2.4 Création d’un corpus multimodal

Choix des objets du corpus

La création d’un corpus multimodal devait à la fois aborder les problèmes liés aux vestiges rencontrés en archéologie, et être représentative des méthodes adaptées au mobilier. Notre corpus a été constitué de manière à illustrer la récurrence des objets trouvés dans les fouilles et la diversité des matériaux et des formes. Les six objets sélectionnés font partie du mobilier archéologique du musée de Préhistoire du Pech Merle. Ils vont du Paléolithique moyen à la Protohistoire et sont remarquables, tant par leur état de conservation que par la grande finesse de leur décor ou de leur mise en forme (cf. figure 2.18, p. 74).

Le premier objet est un biface en silex du Moustérien, qui présente deux avantages pour notre étude. D’une part, la surface conserve en son centre une partie corticale (l’extérieur d’un éclat de silex) dont les caractéristiques diffèrent sensiblement de celles des contours. D’autre part, les enlèvements fins résultant du débitage révèlent un relief facetté aux arêtes vives. Le deuxième objet est également un silex, de couleur relativement uniforme, datant du Paléolithique moyen. Il présente un fossile à sa surface, qui a été volontairement conservé par le tailleur pour décorer l’outil. Il s’agit d’un objet complexe à reconstituer, en raison de la cannelure du coquillage. Le troisième objet est un tesson de céramique de l’âge du Bronze

CHAPITRE 2. LA RECONSTRUCTION 3D DANS LA PRATIQUE ARCHÉOLOGIQUE

provenant d'une poterie non tournée, dont la surface comporte des éléments de façonnage. Son décor incisé peut rendre la reconstruction 3D difficile. Le quatrième objet est une lame de poignard en silex du Néolithique, de teinte uniforme. Les nombreux enlèvements destinés à raviver la partie active de l'outil sont importants pour retracer la chronologie des gestes techniques effectués. Le cinquième objet est une hache protohistorique en bronze, dont la surface altérée est caractéristique des objets métalliques. Le sixième et dernier objet est un harpon en bois de renne datant du Paléolithique supérieur, dont les fines incisions de surface et les deux rangées de barbelures semblent difficiles à reconstruire en 3D.

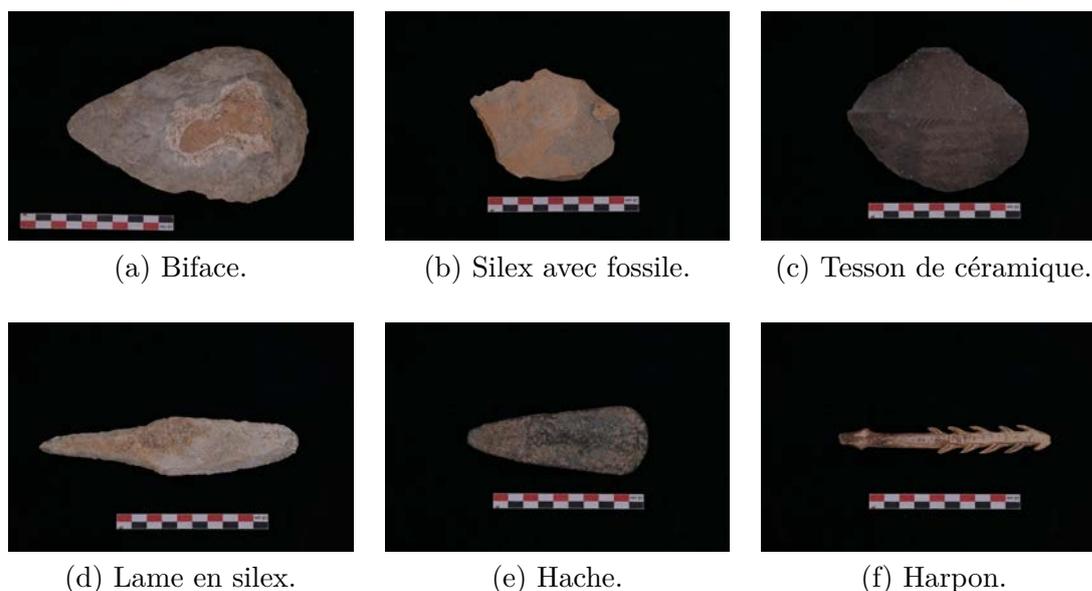


FIGURE 2.18 – Objets archéologiques composant notre corpus multimodal : (a) biface ; (b) éclat de silex retouché avec fossile ; (c) tesson de poterie décoré d’incisions ; (d) lame de poignard ; (e) hache tranchante ; (f) harpon avec deux rangées de barbelures. Tous ces objets ont une taille d’environ 10 cm.

Acquisition et traitement des données

Nous avons effectué trois acquisitions de la face principale de chaque objet du corpus (cf. figure 2.19, p. 75) :

- une numérisation avec un scanner à main à lumière structurée ;
- une acquisition photographique multivue, nécessaire à la photogrammétrie ;
- une série de photographies monovue, où la scène est successivement éclairée par les LEDs d’un dôme de RTI (ces données seront utilisées dans le chapitre 3).

Le scanner utilisé est le modèle Space Spider de la société Artec. Le fabricant garantit une précision de 50 microns et une résolution du maillage pouvant aller jusqu’à 100 microns. Tous les traitements ont été effectués avec le logiciel Artec Studio v18 [3]. Lors

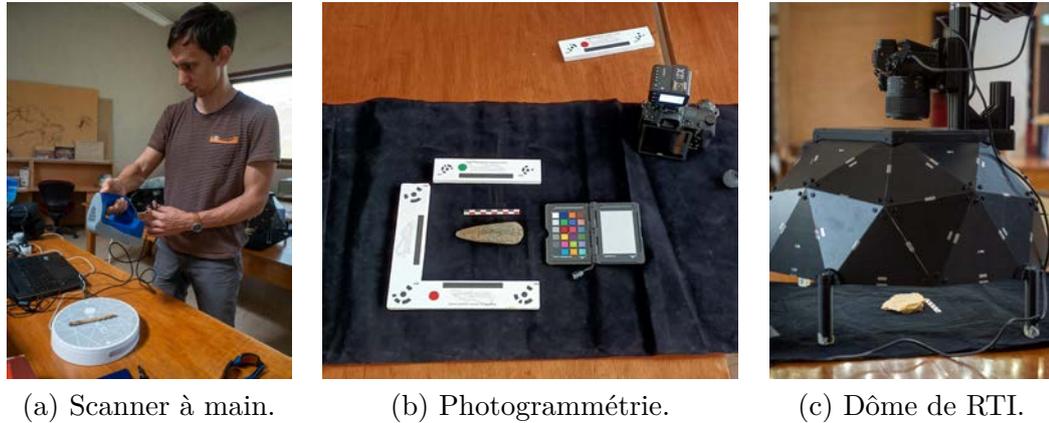


FIGURE 2.19 – Acquisition des données pour la création d'un corpus multimodal. [Photographies de Jean-François Fabriol].

de la génération du maillage, l'option de « fermeture » a été activée, afin de combler les éventuelles lacunes lors de la captation.

L'acquisition photographique multivue a été réalisée avec un appareil photographique Nikon Z7II équipé d'un objectif 50 mm, pour une résolution en plein format de 8256×5504 pixels. La scène est constituée de l'objet, entouré d'une règle et d'une équerre. Ces deux éléments, qui comportent des cibles reconnues automatiquement par le logiciel de photogrammétrie, sont utilisés pour caractériser l'échelle et l'orientation de l'objet. Les photographies ont été prises sous un éclairage fixe provenant de trois flashes, d'abord à une distance de 75 cm, puis à une distance de 30 cm. Chaque série de photographies contient entre 45 et 80 photographies. Le traitement photogrammétrique a été réalisé avec le logiciel Metashape [2]. Après recalage et mise à l'échelle, le maillage a été généré en « ultra-haute » qualité (résolution égale à un pixel) à partir des cartes de profondeur.

Enfin, l'acquisition multiéclairage a été effectuée avec le même appareil photographique. Le dôme de RTI utilisé est le modèle Imaging CEOS de la société Mercurio, d'un diamètre de 50 cm, équipé de 105 LEDs. La séquence de prise de vue est automatique. La distance entre l'objet et la caméra est d'environ 30 cm. Une photographie supplémentaire, prise en allumant la totalité des LEDs, est intégrée aux images multivue, afin de pouvoir positionner les différentes reconstructions 3D photographiques dans le même repère caméra, sans nécessiter de recalage. La figure 2.20 (p. 76) présente un échantillon des données photographiques (multivue et multiéclairage) du biface.

Les maillages du scanner à main ont été recalés avec ceux de la photogrammétrie. La procédure de recalage commence par la mise en correspondance de descripteurs calculés sur un maillage décimé, puis est affinée par ICP (*iterative closest point*). Le champ de normales est ensuite calculé à l'aide du logiciel Blender [4]. De cette façon, les champs de normales sont tous définis dans un même repère caméra, en l'occurrence celui de l'acquisition multiéclairage.

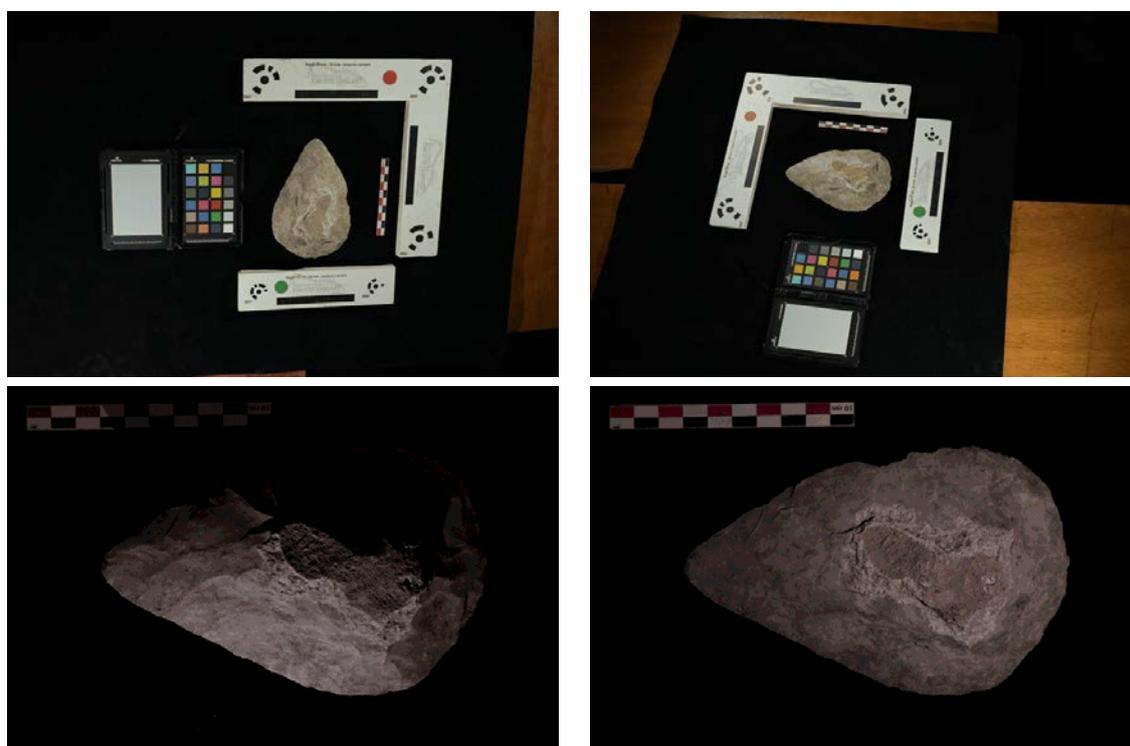


FIGURE 2.20 – Ligne du haut : deux des photographies multivue du biface (données de photogrammétrie). Ligne du bas : deux des photographies multiéclairage prises avec un dôme de RTI, qui seront utilisées dans le chapitre 3.

Comparaison des modèles 3D

Le scanner, donné comme référence, est d'abord comparé aux modèles 3D de la photogrammétrie et de NeuS2, qui est une méthode de reconstruction 3D par rendu différentiable que nous avons déjà mentionnée dans le chapitre 1. Pour le cas du biface de la figure 2.21 (p. 77), les géométries sont proches et prouvent une certaine fiabilité à restituer le volume global. Toutefois, nous pouvons constater que NeuS2 est en léger retrait en terme de résolution et de finesse du maillage. Nous proposons de nous appuyer sur le champ de normales comme métrique de comparaison, qui pourra facilement être étendue aux méthodes multiéclairage. Pour notre biface, la finesse d'analyse apportée par les normales entre les trois premières modalités ne montrent que de légères différences.

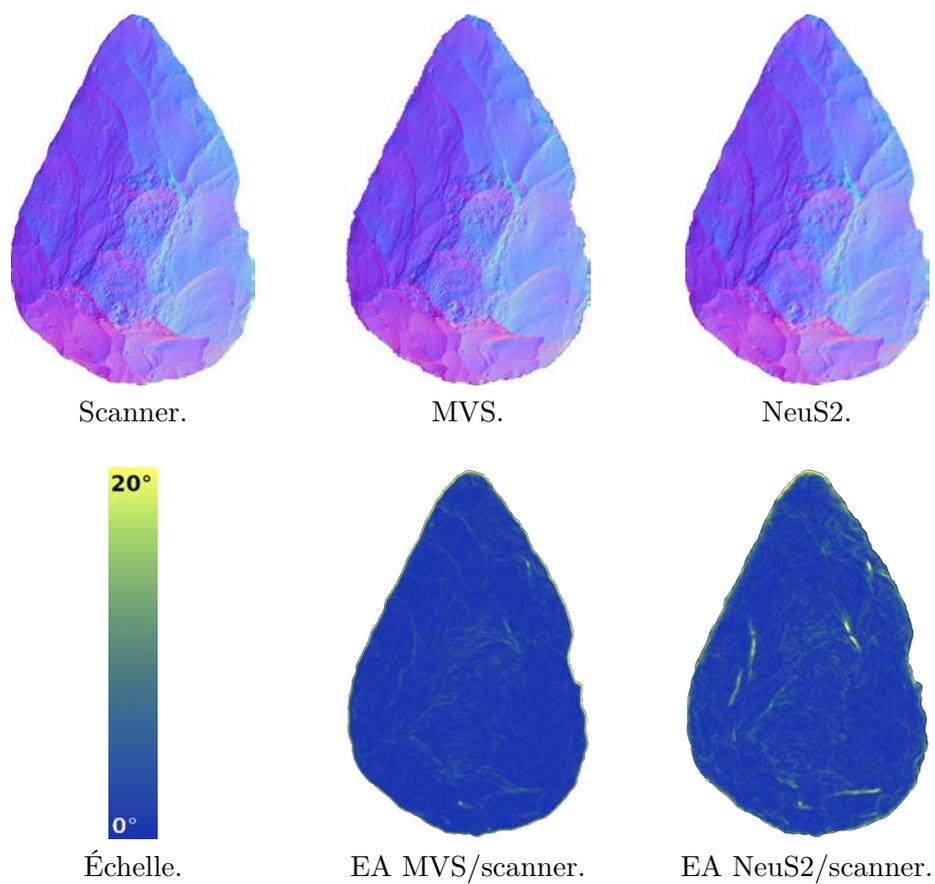


FIGURE 2.21 – Ligne du haut : champs de normales du biface obtenus par scanner, par MVS et par apprentissage (NeuS2). Ligne du bas : échelle des écarts angulaires (EA) en fausses couleurs, et deux cartes d'écarts angulaires calculés en utilisant le résultat du scanner comme vérité terrain.

CHAPITRE 2. LA RECONSTRUCTION 3D DANS LA PRATIQUE ARCHÉOLOGIQUE

Une autre méthode de reconstruction 3D pertinente pour l'archéologie

Une méthode de reconstruction 3D photographique, qui est encore confidentielle dans les sciences du patrimoine, permet d'estimer séparément le relief et la couleur de surface. À l'instar des archéologues qui s'appuient sur le mouvement des ombres pour lire le relief, la *stéréophotométrie* repose sur la mesure de l'intensité de la lumière pour reconstruire le volume de surface.

La stéréophotométrie a déjà été utilisée pour l'étude d'œuvres d'art. C'est le cas de la restauration de tableaux de Soulages [114], dont la peinture a subi des changements de propriétés qui ont entraîné des coulures et des écailles. Pour la lecture de l'art graphique (texte, estampe, tableau) [48], la stéréophotométrie permet de détecter le relief de surface et les différences de réflectance, qui servent à l'étude des pigments ou de l'encre.

D'autres exemples d'usage en archéologie concernent la description des volumes en numismatique [162], l'aide à la lecture de roches gravées [176, 65] ou d'objets de musée, comme par exemple les tablettes cunéiformes [108].

La stéréophotométrie est qualifiée de « méthode de laboratoire », de par ses contraintes de déploiement, qui nécessitent de bien contrôler l'éclairage. Au regard de cette dénomination restrictive, nous allons examiner son mode de fonctionnement, afin d'évaluer sa pertinence pour les besoins de l'archéologie.

3.1 Stéréophotométrie : reconstruction 3D photométrique

Parmi les techniques photométriques de *shape-from-X*, le *shape-from-shading* tente de retrouver le relief d'un objet à partir d'une seule photographie. Les variations de niveau de gris sont-elles suffisantes pour dissocier le relief de la couleur de surface ? La réponse est non, car le problème est *mal posé*. En effet, une même image peut découler de plusieurs combinaisons entre relief, albédo et éclairage. Le principe fondateur de la stéréophotométrie consiste à lever cette ambiguïté en utilisant des vues supplémentaires de la scène 3D prises sous différents éclairages [251].

3.1.1 Principe de la stéréophotométrie

Dans le chapitre 2, nous avons utilisé le terme « photogrammétrie » pour désigner la méthode de reconstruction 3D photographique la plus utilisée en archéologie. Néanmoins,

CHAPITRE 3. UNE AUTRE MÉTHODE DE RECONSTRUCTION 3D PERTINENTE POUR L'ARCHÉOLOGIE

de par son étymologie, le terme « photogrammétrie » devrait désigner l'ensemble des méthodes de reconstruction 3D photographique, y compris la stéréophotométrie (*photometric stereo* en anglais).

Pour mettre en évidence le relief d'un objet, il est recommandé de faire varier l'éclairage tout en maintenant fixe la *pose* de l'appareil photographique, c'est-à-dire sa position et son orientation (cf. figure 3.1, p. 80). Ce principe est celui de la RTI [165]. Or, si la RTI permet d'extrapoler un éclairage variable de manière interactive, il ne s'agit pas à proprement parler d'une méthode de reconstruction 3D, au contraire de la stéréophotométrie, qui utilise pourtant le même type de données [77].

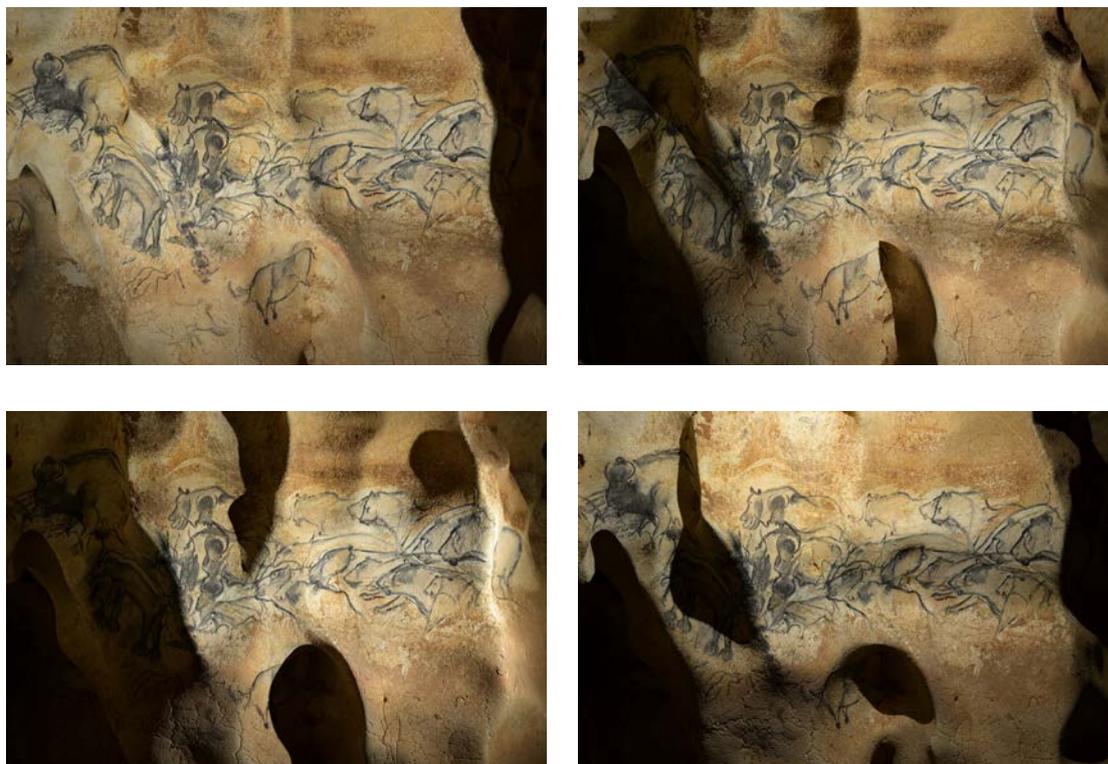


FIGURE 3.1 – Quatre photographies du panneau des Lions de la grotte Chauvet prises sous la même pose de la caméra, mais avec quatre éclairages différents.

La stéréophotométrie se fonde sur l'hypothèse lambertienne, selon laquelle l'apparence d'un point 3D est indépendante de la pose de la caméra, c'est-à-dire que la *luminance* de ce point est indépendante de la position depuis laquelle il est observé. Sous cette même hypothèse, la *luminance* d'un point 3D est proportionnelle au produit de l'*albédo*, ou *réflectance*, par l'*éclaircissement*, qui est maximal lorsque l'éclairage est orthogonal à la surface, et minimal en éclairage rasant :

$$\text{Luminance} \propto \text{Albédo} \times \text{Éclaircissement} \quad (3.1)$$

En pratique, la luminance devrait être mesurée avec un instrument dédié, mais l'appareil photographique peut jouer ce rôle, car le niveau de gris d'un pixel (chaque niveau de couleur, le cas échéant) est proportionnel au produit de la luminance du point 3D dont ce pixel est l'image, par le temps de pose, pour peu que l'on se situe dans la zone de linéarité du capteur. Par conséquent, d'après l'égalité (3.1), comme l'éclairement dépend de l'orientation locale de la surface de l'objet, relativement à la direction d'éclairage (qui peut varier d'un point à l'autre, par exemple dans le cas d'une source ponctuelle), son relief peut être estimé, de même que son albédo, si l'on dispose de suffisamment de photographies prises sous différents éclairages, ce qui constitue le principe de la stéréophotométrie.

Au registre des bénéfiques, la stéréophotométrie fonctionne mieux que la photogrammétrie lorsque la surface à reconstruire est lisse et sans texture, car elle n'est pas tributaire de l'étape de mise en correspondance entre images. En effet, si l'appareil photographique est fixe, un même pixel correspond au même point 3D de la surface dans toutes les images [171].

3.1.2 Estimation de l'albédo et des normales

Dans le cadre de la *stéréophotométrie calibrée*, et si le temps de pose est fixé, le niveau de gris (ou chacun des niveaux de couleur) de chaque photosite du capteur de la caméra est proportionnel à la luminance émise par la scène, qui dépend du relief de la scène, de son albédo et de l'éclairage. Dans le cas d'une surface lambertienne, le niveau de gris en un point de l'image $\mathbf{p} = [u, v]^T$ s'écrit :

$$I(u, v) \propto \rho(u, v) \max\{\mathbf{n}(u, v) \cdot \mathbf{s}(u, v), 0\} \quad (3.2)$$

où $I(u, v)$ désigne le niveau de gris, $\rho(u, v)$ l'albédo, $\mathbf{n}(u, v)$ la normale à la surface, de norme unitaire, $\mathbf{s}(u, v) \in \mathbb{R}^3$ le vecteur d'éclairage, qui caractérise l'éclairage en norme et en direction. Une hypothèse simplificatrice consiste à négliger les *ombres propres*, c'est-à-dire à accepter les valeurs de $I(u, v)$ pour lesquelles $\mathbf{n}(u, v) \cdot \mathbf{s}(u, v) < 0$. Une autre hypothèse simplificatrice consiste à supposer que le champ vectoriel \mathbf{s} est parallèle et uniforme, donc qu'il ne dépend pas de (u, v) . De plus, le coefficient de proportionnalité dans (3.2) peut être intégré à l'albédo, ce qui permet de réécrire (3.2) :

$$I(u, v) = \rho(u, v) \mathbf{n}(u, v) \cdot \mathbf{s} \quad (3.3)$$

Même si l'albédo $\rho(u, v)$ et le vecteur d'éclairage \mathbf{s} sont connus, l'estimation de $\mathbf{n}(u, v)$ à partir de (3.3) constitue le problème mal posé dont il a déjà été question, appelé *shape-from-shading* [123]. En effet, en chaque point $[u, v]^T$ de l'image, cette équation comporte deux inconnues correspondant aux deux degrés de liberté de la normale $\mathbf{n}(u, v)$. Le principe de la stéréophotométrie est de résoudre ce problème en utilisant plusieurs images prises sous le même point de vue, mais sous N éclairages différents (cf. figure 3.2, p. 82).

Chaque éclairage est caractérisé par un vecteur $\mathbf{s}^i \in \mathbb{R}^3$, $i \in \{1, \dots, N\}$. Afin d'obtenir la reconstruction 3D la plus précise possible, nous supposons que les éclairages sont étalonnés. De plus, en introduisant comme nouvelle inconnue le vecteur $\mathbf{m}(u, v) = \rho(u, v) \mathbf{n}(u, v)$, l'équation (3.3) se traduit par le système linéaire suivant :

$$I^i(u, v) = \mathbf{m}(u, v) \cdot \mathbf{s}^i, \quad i \in \{1, \dots, N\} \quad (3.4)$$



FIGURE 3.2 – Trois photographies du masque mortuaire de Jean Jaurès prises sous trois éclairages différents.

Si la scène est photographiée sous $N \geq 3$ éclairages non tous coplanaires, (3.4) admet une solution unique en $\mathbf{m}(u, v)$, au sens des moindres carrés (cf. figure 3.3, p. 83), dont l'albédo et la normale se déduisent facilement :

$$\rho(u, v) = \|\mathbf{m}(u, v)\| \quad \text{et} \quad \mathbf{n}(u, v) = \frac{\mathbf{m}(u, v)}{\|\mathbf{m}(u, v)\|} \quad (3.5)$$

De nombreuses extensions de cette méthode de reconstruction 3D ont été proposées, par exemple à la *stéréophotométrie non calibrée* [35], qui correspond au cas où les éclairages ne sont pas étalonnés. D'autre part, sous l'hypothèse lambertienne, la réflectance d'une surface est entièrement caractérisée par l'albédo, mais très souvent, elle présente des écarts au modèle (3.3). Bien que le cas des réflectances non lambertiennes ait été étudié [169], nous préférons tirer parti de la simplicité du modèle lambertien en considérant les écarts au modèle, tels que les réflexions spéculaires ou les ombres, comme des *données aberrantes*, et utiliser des estimateurs robustes [127]. Il est également notable que des approches par apprentissage profond (*deep learning*) ont récemment vu le jour [217], qui ont permis de s'abstraire de l'hypothèse lambertienne [59].

Par ailleurs, il est souvent difficile de garantir le caractère parallèle et uniforme de l'éclairage. Des modèles plus réalistes ont permis d'étendre les méthodes de résolution de la stéréophotométrie à la prise en compte de sources lumineuses ponctuelles [201, 136], qui caractérisent bien les LEDs. D'autres modèles d'éclairage par harmoniques sphériques ont également été proposés [35, 107], qui décrivent de manière relativement fidèle les éclairages « naturels ».

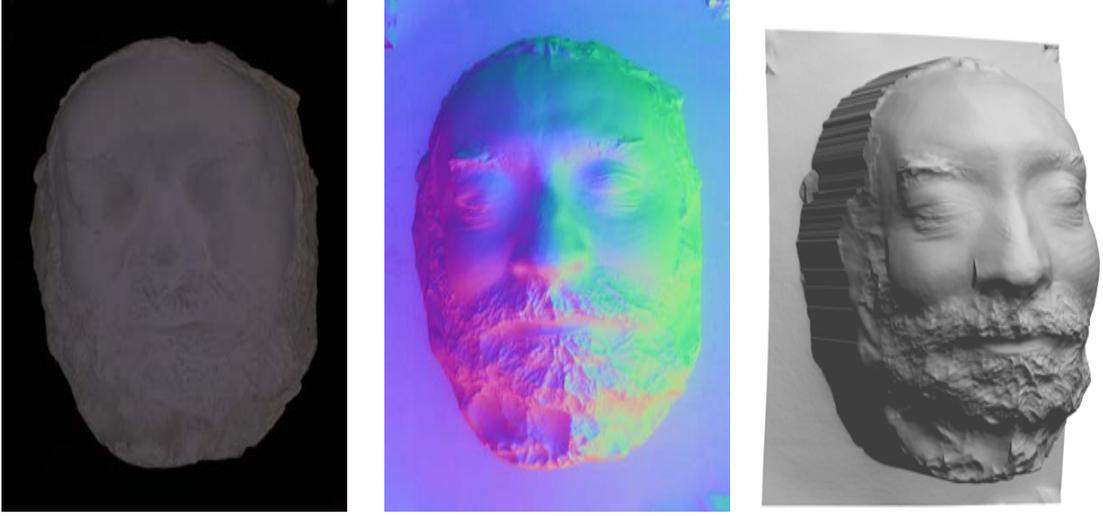


FIGURE 3.3 – Reconstruction 3D du masque mortuaire de Jean Jaurès. De gauche à droite : carte d'albédo et champ de normales estimés par stéréophotométrie calibrée, à partir de $N = 105$ images telles que celles de la figure 3.2 (p. 82) ; carte de profondeur obtenue par intégration du champ de normales.

3.1.3 Intégration des normales

Le deuxième étape de la stéréophotométrie consiste à intégrer le champ de normales estimé, ce qui permet d'obtenir la *carte de profondeur* z caractéristique du relief (cf. figure 3.3, p. 83), bien que certaines méthodes de résolution de la stéréophotométrie estiment directement la profondeur [232]. Si la projection perspective est approchée par la projection orthogonale, la normale est facile à exprimer en fonction du gradient de profondeur :

$$\mathbf{n} = \frac{1}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}} \begin{bmatrix} p \\ q \\ -1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

où :

$$p := \frac{\partial z}{\partial u} \quad \text{et} \quad q := \frac{\partial z}{\partial v} \quad (3.7)$$

Dans le cas de la projection perspective, le changement de variable $\tilde{z} = \ln(z)$ permet de ramener le problème à une égalité très similaire à (3.6), si ce n'est que les définitions de p et de q doivent être légèrement modifiées.

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour intégrer un champ de normales. Le choix d'une méthode doit tenir compte des attendus en matière de temps de calcul, de robustesse au bruit sur les normales, etc. Une solution standard consiste à exprimer le problème sous forme variationnelle, en moindres carrés :

$$\min_{z: \Omega \rightarrow \mathbb{R}} \int_{\Omega} \left\| \nabla z(u, v) - [p(u, v), q(u, v)]^{\top} \right\|^2 du dv \quad (3.8)$$

qui peut être résolu, par exemple, en utilisant la transformation en cosinus discrète [231] ou une méthode itérative [27], un choix qui dépend en particulier de la forme du domaine de reconstruction Ω et des conditions au bord.

Conclusion

De manière générale, la résolution numérique de la stéréophotométrie est plus rapide que celle de la photogrammétrie, mais le temps de calcul dépend bien évidemment du nombre d'images et de la taille de celles-ci. À titre d'exemple, le résultat de la figure 3.3 (p. 83), obtenu avec la version 2023 de AliceVision/Meshroom à partir de 105 images comportant 36 millions de pixels chacune, a nécessité environ 45 minutes de calcul sur un ordinateur portable à douze cœurs i-7. Ce temps de calcul peut sembler énorme, mais l'estimation du relief et de l'albédo, qui est effectuée localement, c'est-à-dire pixel par pixel, pourrait être parallélisée.

Un autre avantage majeur de la stéréophotométrie, en comparaison de la photogrammétrie, est sa capacité à évaluer non seulement le relief de la scène, mais également son albédo, ce qui est très appréciable, en particulier pour des applications de réalité augmentée.

Enfin, comme nous le verrons sur plusieurs exemples, plus loin dans ce chapitre, la résolution spatiale du résultat, qu'il s'agisse du champ de normales, de l'albédo ou de la carte de profondeur, est la même que celle des images, ce qui constitue un avantage décisif, dans le cas de l'archéologie, pour l'aide à la lecture de reliefs très ténus tels que des gravures. Bien sûr, la résolution du résultat dépend de la distance focale de l'appareil photographique et de la taille de ses photosites, mais contrairement à la photogrammétrie, la stéréophotométrie permet de garantir la valeur de cette résolution, qui se traduit par une valeur prévisible de la GSD (*ground sample distance*).

3.2 Mise en œuvre de la stéréophotométrie

Afin de valider la pertinence de la stéréophotométrie pour le patrimoine archéologique, nous l'avons déployée dans différents contextes. En testant cette méthode sur des objets aux propriétés de surface très variées, son champ applicatif a pu être élargi avec profit. La confrontation de la stéréophotométrie à des objets du patrimoine a un double objectif : répondre à des questions techniques de faisabilité, et évaluer en quoi cette méthode peut rendre service aux archéologues. Les cas d'étude sont présentés selon les difficultés rencontrées, qui sont notamment liées aux propriétés des matériaux.

3.2.1 Protocoles d'acquisition

La principale difficulté de mise en œuvre de la stéréophotométrie consiste à étalonner l'éclairage, en estimant aussi précisément que possible son orientation et son intensité. Cela peut être réalisé de plusieurs façons.

Sphère fixe

L'estimation de l'éclairage peut être effectuée en positionnant dans la scène un ou plusieurs objets de relief et de couleur connus. L'utilisation de sphères de couleur uniforme (cf. figure 3.4, p. 85) est particulièrement intéressante car, non seulement la normale est parfaitement connue en chaque point de la partie visible d'une sphère, mais son albédo est également connu, à un facteur près qui est le même pour l'ensemble des points. Pour peu que la surface soit mate, cela garantit la validité de l'hypothèse lambertienne. Il est alors possible de déduire de (3.4) une estimation du vecteur \mathbf{s}^i grâce à la connaissance de $\mathbf{m}(u, v)$ en au moins trois points $[u, v]^T$ (en pratique, mieux vaut utiliser la totalité des points visibles).

Le montage complet comporte également l'appareil photographique, posé sur un trépied en visée orthogonale à la surface d'intérêt. Le déclenchement est télécommandé, afin d'éviter tout déplacement de la caméra, même minime. Les paramètres de prise de vue sont tous réglés en mode manuel, et les stabilisateurs sont désactivés, afin de garantir la cohérence pixellaire entre les clichés. Les règles de positionnement de la sphère dans le champ sont identiques à celles de la H-RTI [122] : elle doit se situer sur le même plan que la surface étudiée, ne pas provoquer d'ombre et être adaptée à la sensibilité du capteur.

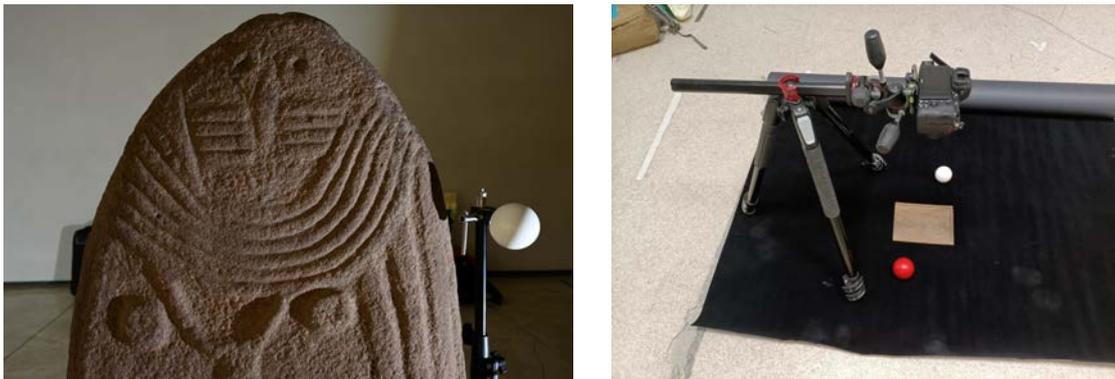


FIGURE 3.4 – La stéréophotométrie nécessite de poser l'appareil photographique sur un trépied, pour qu'un même pixel corresponde au même point 3D dans les différentes images. Les sphères permettent d'estimer la direction et l'intensité de l'éclairage. À gauche : numérisation de la « Dame de Saint-Sernin » au musée Fenaille (Rodez). À droite : numérisation de la tablette zodiacale du musée d'Archéologie nationale (Saint-Germain-en-Laye).

Ces précautions peuvent se révéler fastidieuses, et le dispositif sembler encombrant, mais il facilite grandement la résolution numérique du problème. Nous avons mis en œuvre ce protocole d'acquisition pour numériser le panneau des Mammouths raclés de la grotte Chauvet (cf. figure 3.5, p. 86). Dans cet espace où les déplacements sont limités par des passerelles, nous avons pu positionner la sphère sur un trépied près du panneau, grâce à un retour de la paroi et à la présence de calcite sur le sol, qui le prémunit de toute dégradation. Malgré ces précautions, il était impossible de maintenir la source lumineuse à une distance constante de la paroi. L'intensité lumineuse des éclairages était donc variable d'un cliché

CHAPITRE 3. UNE AUTRE MÉTHODE DE RECONSTRUCTION 3D PERTINENTE POUR L'ARCHÉOLOGIE

à l'autre, ce qui n'aurait pas autorisé l'utilisation d'une sphère brillante, car une sphère de ce type permet d'estimer la direction de l'éclairage, mais pas son intensité. De manière générale, l'utilisation d'une sphère positionnée dans le champ de la caméra est plus adaptée aux objets qu'aux grottes ornées, car la préservation des sols limite fortement les déplacements et empêche de positionner un trépied près de la paroi, sauf en quelques endroits comme le panneau des Mammouths raclés, et donc de déployer la stéréophotométrie sur les panneaux distants des cheminements.



FIGURE 3.5 – Panneau des Mammouths raclés de la grotte Chauvet sous deux éclairages différents (cf. annexe 6, p. 158, pour la localisation des acquisitions de stéréophotométrie dans la grotte Chauvet). La sphère d'étalonnage de l'éclairage a pu être positionnée dans un retour de la paroi, sans aucun risque de dégradation, grâce à la présence de calcite sur le sol.

Sphère mobile

Pour pouvoir numériser les panneaux distants des cheminements, une idée consiste à disposer une sphère au bout d'une perche tenue à bout de bras, de façon à la disposer au plus près de la paroi tout en la maintenant dans le champ de la caméra, auquel cas la position de la sphère dans l'image varie d'un cliché à l'autre. Pour éviter la tâche fastidieuse qui consiste à détourner manuellement la silhouette de la sphère dans chaque image (une telle silhouette étant une ellipse de faible excentricité), nous avons développé une méthode de détection automatique de sphères dans une image par apprentissage profond (*deep learning*), qui détermine également leur typologie (mate/brillante/réfléchissante) [79].

Ce protocole d'acquisition des données a été testé sur le panneau des Lions de la grotte Chauvet (cf. figure 3.6, p. 87). La distance minimale entre ce panneau et les cheminements étant de cinq mètres environ, les principales difficultés de mise en œuvre ont été les suivantes :

- Il est délicat de positionner la sphère au plus près de la paroi, tout en gardant une distance de sécurité pour éviter tout contact.
- Selon la direction d'éclairage, il est nécessaire de modifier la position de la sphère pour éviter les ombres projetées sur la paroi, tout en maintenant la sphère dans le champ de la caméra et sans occulter la zone d'intérêt.



FIGURE 3.6 – Difficultés de mise en œuvre de la stéréophotométrie sur le panneau des Lions de la grotte Chauvet. En haut : la sphère d'étalonnage est positionnée près de la paroi à l'aide d'une perche. En bas à gauche : un temps de pose trop élevé, pourtant bien adapté aux conditions d'éclairage, rend l'image de la sphère floue, donc inexploitable. En bas à droite : l'image de la sphère devient nette après réduction du temps de pose et augmentation de l'ouverture de l'objectif, mais cela se fait au détriment de la profondeur de champ. Autre problème : la perche et la sphère projettent des ombres sur la paroi.

- Il est impossible de faire en sorte que la sphère soit parfaitement immobile pendant le laps de temps d'une prise de vue, ce qui se traduit par un flou de bougé. Cela nous a contraints à diminuer le temps de pose, et donc à augmenter l'ouverture de l'objectif, au détriment de la profondeur de champ.
- Malgré tout, les contraintes liées aux cheminements ont fortement limité le choix des directions d'éclairage.

Dispositif d'éclairage pré-étalonné

L'utilisation d'un dispositif d'éclairage pré-étalonné est intéressante, puisque les positions des éclairages, relativement au repère caméra de l'appareil photographique, sont connues à l'avance. L'utilisation d'une sphère d'étalonnage devient alors superflue. Pour ce faire, il est nécessaire que les sources lumineuses soient fixes entre elles et relativement à l'appareil photographique, ce qui est la caractéristique d'un dôme de RTI (cf. chapitre 2).

CHAPITRE 3. UNE AUTRE MÉTHODE DE RECONSTRUCTION 3D PERTINENTE POUR L'ARCHÉOLOGIE

L'utilisation d'un dôme de RTI est courante pour des petits objets ou des surfaces quasi-planes, comme par exemple les mosaïques.

Les avantages à utiliser un tel équipement sont multiples : précision de l'étalonnage des éclairages, répétabilité des mesures, quantité de données produites. Le dôme que nous utilisons est équipé de 105 LEDs réparties sur une surface hémisphérique. Étant donné que sa structure rigide est fixée sur l'objectif de l'appareil photographique, les éclairages peuvent être étalonnés une fois pour toutes, ce qui allège sensiblement le protocole d'acquisition. Cependant, l'usage d'un dôme de RTI en grotte est relativement limité, à cause de l'encombrement d'un tel dispositif (cf. figure 3.7, p. 88).

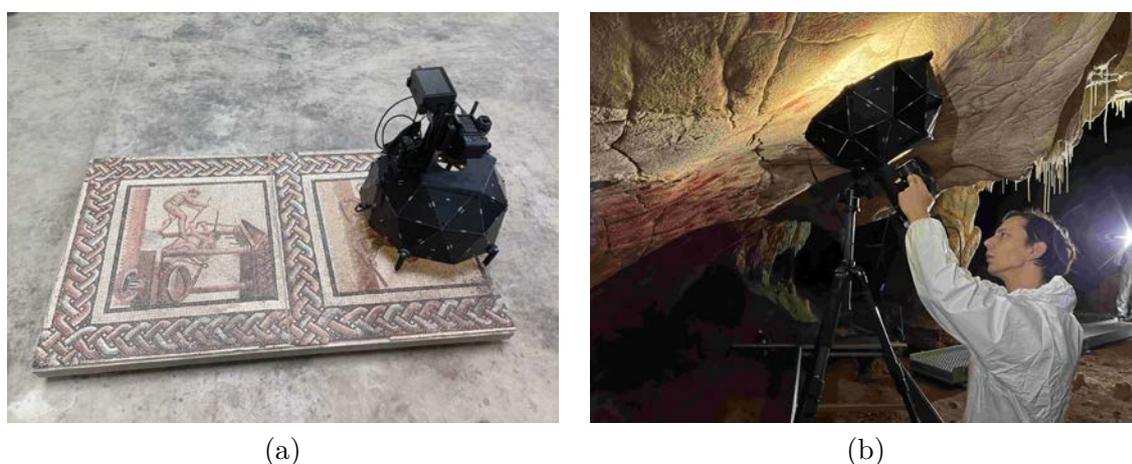


FIGURE 3.7 – Mise en place du dôme de RTI : (a) sur la mosaïque des Saisons de Saint-Romain-en-Gal (Rhône) ; (b) devant une paroi ornée de la grotte Chauvet.

3.2.2 Aide à la lecture

Dans cette section, nous tentons de démontrer l'intérêt de la stéréophotométrie pour l'archéologie, en nous focalisant sur l'aide à la lecture.

Statue-menhir de la « Dame de Saint-Sernin »

Nous commençons par mettre en œuvre la stéréophotométrie sur la « Dame de Saint-Sernin », qui est la statue-menhir la plus emblématique du musée Fenaille de Rodez. Le caractère particulièrement diffusant du grès valide l'hypothèse lambertienne, ce qui augure de « bons » résultats, tout au moins du point de vue qualitatif, c'est-à-dire qui puissent aider à la lecture. Ces résultats sont composés du champ de normales affiché en fausses couleurs et de la carte d'albédo. La figure 3.8 (p. 89) montre un agrandissement du résultat au niveau de la tête de la statue, qui autorise une bonne lecture des détails de surface, et permet en particulier d'apprécier les percussions lithiques de la formation des motifs.

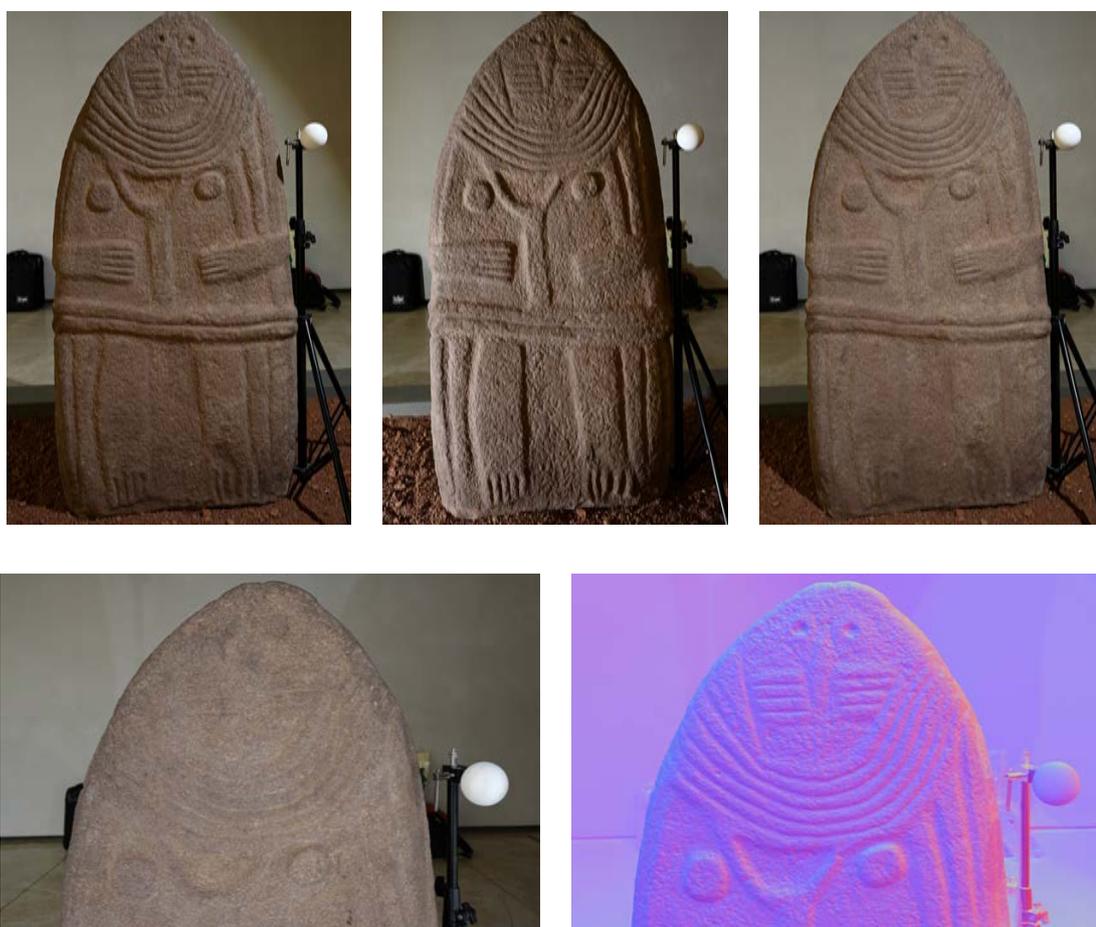


FIGURE 3.8 – Stéréophotométrie appliquée à la statue-menhir de la « Dame de Saint-Sernin » (musée Fenaille, Rodez). Ligne du haut : trois photographies de stéréophotométrie (parmi une vingtaine). La sphère blanche posée sur un trépied sert à estimer l'éclairage. Ligne du bas : agrandissement des résultats sur la tête de la statue, composés de la carte d'albédo (à gauche) et du champ de normales en fausses couleurs (à droite).

Tablette de Mayence

La tablette MAN 2919, conservée au musée d'Archéologie nationale de Saint-Germain-en-Laye, a été découverte à Mayence dans un terrain d'où est sortie la caliga MAN 2257. Elle a été achetée en 1865 auprès d'un antiquaire. Cette tablette en sapin était à l'origine enduite de cire. Le texte était gravé à l'aide de la pointe d'un styilet. Le texte pouvait être effacé par un simple grattage de la cire. Compte tenu de la nature périssable des matériaux et de l'usage donné à ces objets, il est impossible de savoir ce qui était inscrit. Les fantômes des écritures sont peut-être encore perceptibles parmi les traces incisées dans le bois.

CHAPITRE 3. UNE AUTRE MÉTHODE DE RECONSTRUCTION 3D PERTINENTE POUR L'ARCHÉOLOGIE

Parallèlement, l'observation dendrochronologique faite par François Blondel en 2023 livre la date de 35 av. n.è. pour le dernier cerne. Cette datation est précoce, par rapport à celle que l'on donne habituellement des camps romains de Mayence. Certains indices plaident en effet pour un début d'occupation en 17 av. n.è.. La présence de troupes permanentes, sous la forme de deux légions, n'est cependant envisageable qu'à partir de 17 ap. n.è. avec l'établissement d'un camp de 37 ha. La datation de la tablette interroge la durée de vie de ces instruments d'écriture, qu'on imagine aisément « consommables », et surtout les modalités de production de la filière bois et l'éventualité d'un réemploi des matériaux.

Le ré-éclairage de la partie du champ de normales encadrée en rouge sur la figure 3.9 (p. 90), avec le logiciel de retouche photographique Krita, met en évidence les lettres laissées à travers la cire et restitue bien les nervures du bois. La présence de caractères résultant de traces d'écriture pourra ainsi être mise en évidence à partir des observations des archéologues.

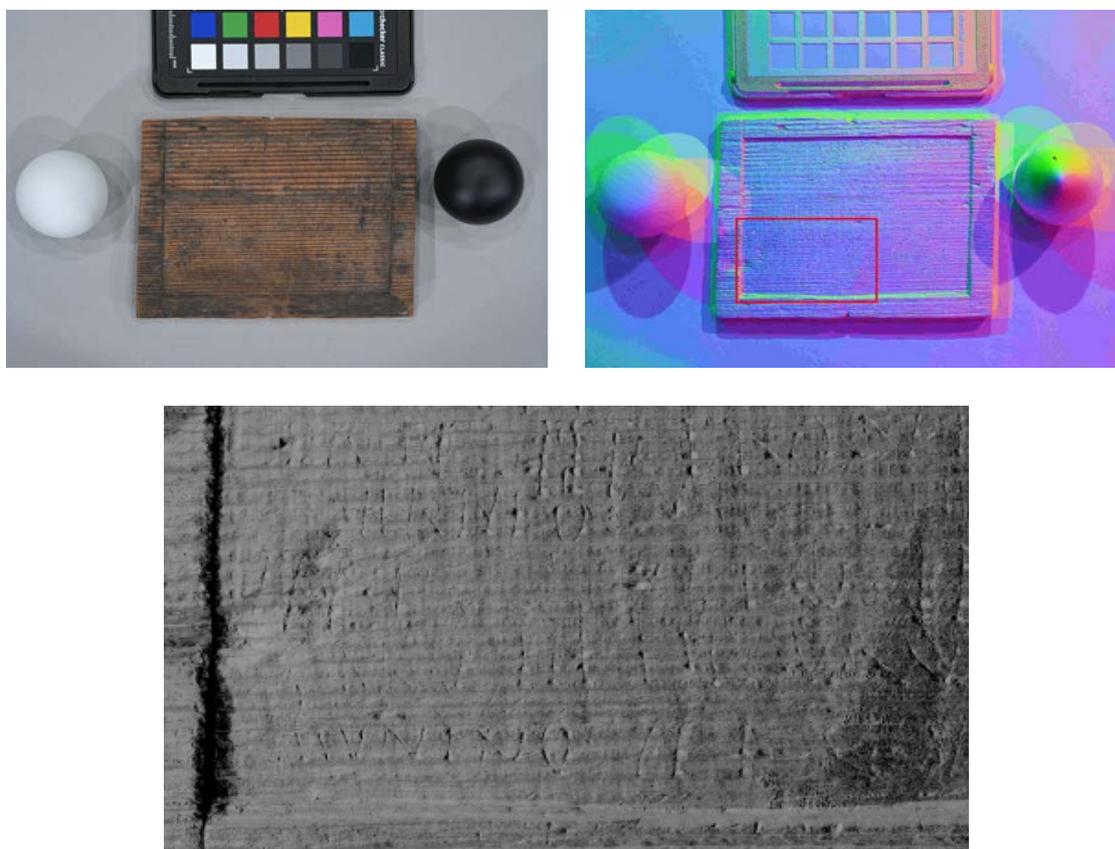


FIGURE 3.9 – Tablette de Mayence du musée d'Archéologie nationale (Saint-Germain-en-Laye). Ligne du haut : albédo et champ de normales estimés par stéréophotométrie à partir d'une douzaine de photographies. En bas : ré-éclairage de la partie du champ de normales encadrée en rouge, avec le logiciel de retouche photographique Krita.

Coquillage du Mas d’Azil

De 1887 à 1894, Édouard Piette (1827-1906), un pionnier de la préhistoire, fouille la grotte du Mas d’Azil sur la commune homonyme, en Ariège [194]. C’est la quatrième cavité pyrénéenne qu’il explore, après les grottes de Gourdan (Haute-Garonne), Lortet (Hautes-Pyrénées) et Espalungue-Arudy (Pyrénées-Atlantiques), dans les années 1870, et avant la grotte du Pape à Brassempouy (Landes), de 1894 à 1897. La grotte du Mas d’Azil est tellement vaste et riche que le mobilier archéologique qui y est découvert constitue la moitié de la collection Piette [236]. En 1904, le préhistorien cède cette dernière, longtemps conservée dans sa maison ardennaise, au musée des Antiquités nationales, devenu musée d’Archéologie nationale, qui est visible aujourd’hui dans la salle Piette, dont la présentation muséographique ancienne a été restaurée il y a une quinzaine d’années [223].

Le mobilier archéologique mis au jour dans les couches magdaléniennes de la grotte du Mas d’Azil comporte de nombreux coquillages perforés [80]. Ces éléments de parure pouvaient être portés en pendeloque ou cousus en applique sur les vêtements de peau. Quelques coquillages ont même été façonnés et gravés de motifs plus ou moins organisés. Un fragment d’un grand coquillage bivalve (MAN 47569), appartenant à l’espèce *Pecten maximus*, plus connue sous le nom de « coquille Saint-Jacques », montre un reste de perforation et, sur sa face interne lisse, un décor gravé exceptionnellement figuratif. Il faut signaler ici que le *Pecten maximus* vit dans l’océan Atlantique et se trouve donc, dans la grotte du Mas d’Azil, à plusieurs centaines de kilomètres de son milieu d’origine, après un long voyage ou quelques échanges.

Les incisions, probablement réalisées avec la pointe d’un burin de silex taillé, sont d’une finesse telle qu’il faut un éclairage rasant pour les déchiffrer. Il s’agit d’une tête animale, représentée de profil droit. La forme des oreilles et des cornes, ainsi que le contour arrondi du museau, font penser à un bison. Les détails de l’œil et du pelage, notamment au niveau de la barbe et du chanfrein, sont caractéristiques du naturalisme magdalénien. La tête du bovidé est traversée de lignes gravées dans le sens des rainures de la coquille, ce qui rend sa lecture encore plus malaisée.

Un relevé complet de ce coquillage et un relevé simplifié de son décor gravé, sans les lignes transversales, ont été publiés en 1896 par Henri Fischer (cf. figure 3.10, p. 92), malacologue reconnu et neveu d’Édouard Piette, dans un article de la revue *L’Anthropologie*. Un cliché figure dans le catalogue de la collection Piette, rédigé par Marthe Chollot [61] et édité par les musées nationaux en 1964. La gravure n’est guère visible sur la photographie, ce qui montre combien cette pièce est difficile à appréhender.

Le résultat de la figure 3.10 (p. 92) permettra à la fois de mettre en évidence le motif, et surtout d’appréhender la chronologie relative des tracés. Dans l’agrandissement, il est aisé d’observer quel tracé recoupe quel autre et d’en déduire sa postériorité. Par la multiplication de ces observations au niveau des croisements, l’archéologue reconstruit les étapes de la mise en place des motifs.

CHAPITRE 3. UNE AUTRE MÉTHODE DE RECONSTRUCTION 3D PERTINENTE POUR L'ARCHÉOLOGIE

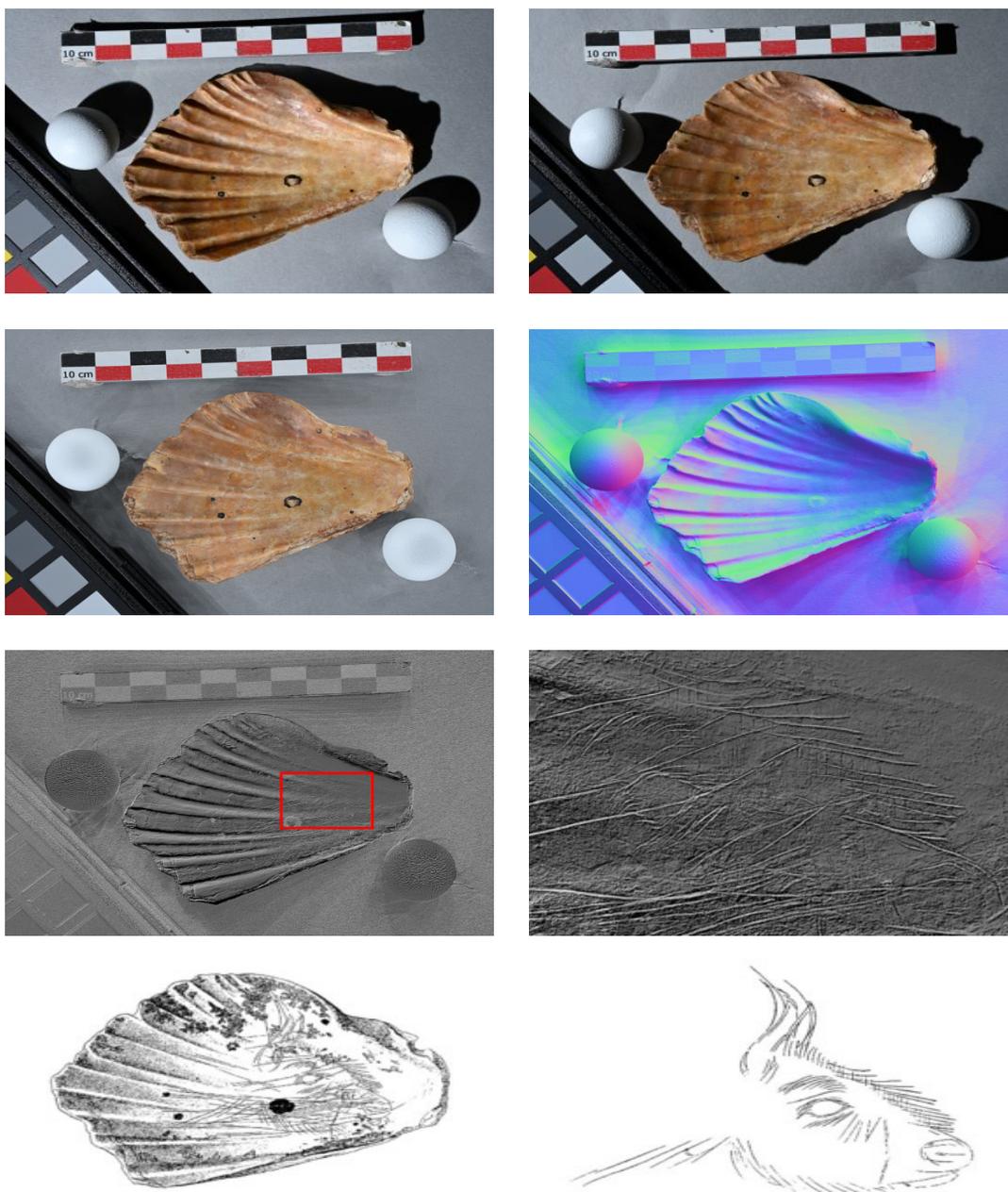


FIGURE 3.10 – Coquillage gravé de la grotte du Mas d’Azil, en Ariège (MAN 47569), datant du Magdalénien (entre -20500 et -13000 ans environ), d’une longueur de 8,1 cm, d’une largeur de 5,5 cm et d’une épaisseur de 0,4 cm, figurant une tête de bovidé. Première ligne : deux images de stéréophotométrie (parmi une dizaine). Deuxième ligne : albédo et champ de normales estimés par stéréophotométrie. Troisième ligne : en ré-éclairant le champ de normales et en agrandissant la zone encadrée en rouge, ce motif apparaît clairement avec une bonne lecture de la chronologie des gravures au niveau des intersections. Quatrième ligne : relevé de la face interne gravée et relevé simplifié de la gravure, publiés par Henri Fischer en 1896.

Biface en silex du Pech Merle

Le biface en silex conservé dans le musée de Préhistoire du Pech Merle (Lot) fait partie des objets du corpus décrit dans le chapitre 2 (cf. figure 2.18, p. 74). Ce corpus est constitué à dessein de données permettant de tester différentes modalités de reconstruction 3D. La figure 3.11 (p. 93) montre les résultats obtenus par stéréophotométrie à partir des 105 images multiéclairage d'un dôme de RTI. Manifestement, le champ de normales comporte plus de détails que ceux de la figure 2.21 (p. 77), détails qui sont également bien visibles sur la carte de pente et la carte de profondeur.

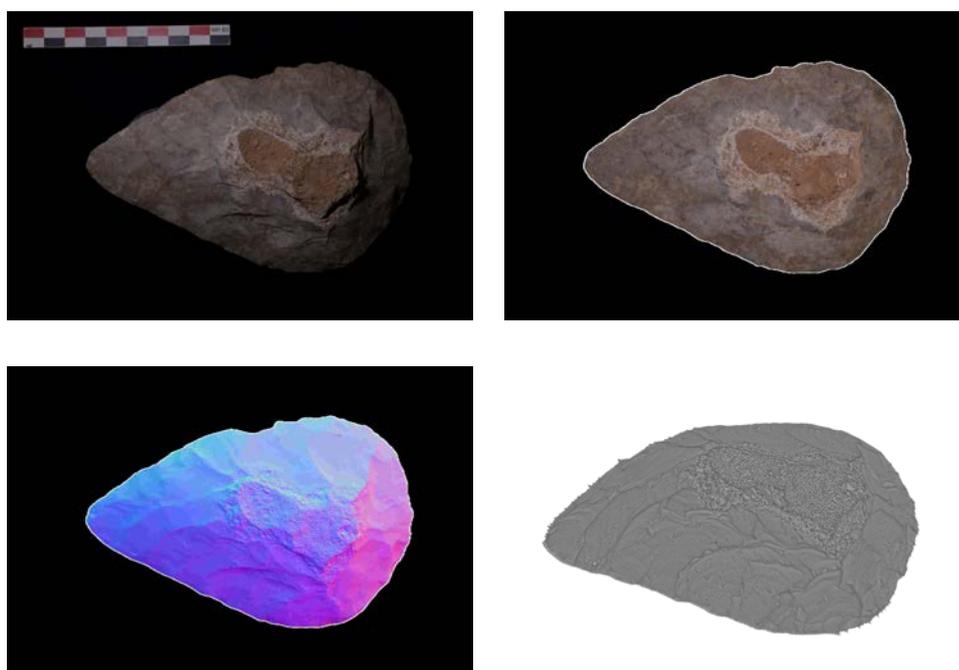


FIGURE 3.11 – Biface en silex du Pech Merle. Ligne du haut : une des 105 images de RTI, et albédo estimé par stéréophotométrie. Ligne du bas : normales estimées, et modèle 3D (obtenu par intégration du champ de normales), visualisé dans Meshlab.

Autres objets testés

La figure 3.12 (p. 94) montre une céramique gallo-romaine du musée Saint-Raymond de Toulouse. Cet objet classique du mobilier archéologique est bien adapté à la stéréophotométrie, de par le caractère diffusant du matériau. En effet, les traces de façonnage sont parfaitement visibles sur le champ de normales. Dans le coin inférieur droit, la profondeur de champ insuffisante provoque un flou de mise au point qui dégrade les résultats.

Enfin, un dernier test concluant a été effectué sur le cheval gravé numéro 09 de la grotte Chauvet (cf. figure 3.13, p. 94). L'agrandissement affiché sur la ligne du bas met en évidence non seulement les tracés digités, mais également des traces de griffes de chauve-souris.

CHAPITRE 3. UNE AUTRE MÉTHODE DE RECONSTRUCTION 3D PERTINENTE POUR L'ARCHÉOLOGIE



FIGURE 3.12 – Fond de céramique gallo-romaine du musée Saint-Raymond (MSR HL 2216-2230) : albédo et normales estimés par stéréophotométrie.

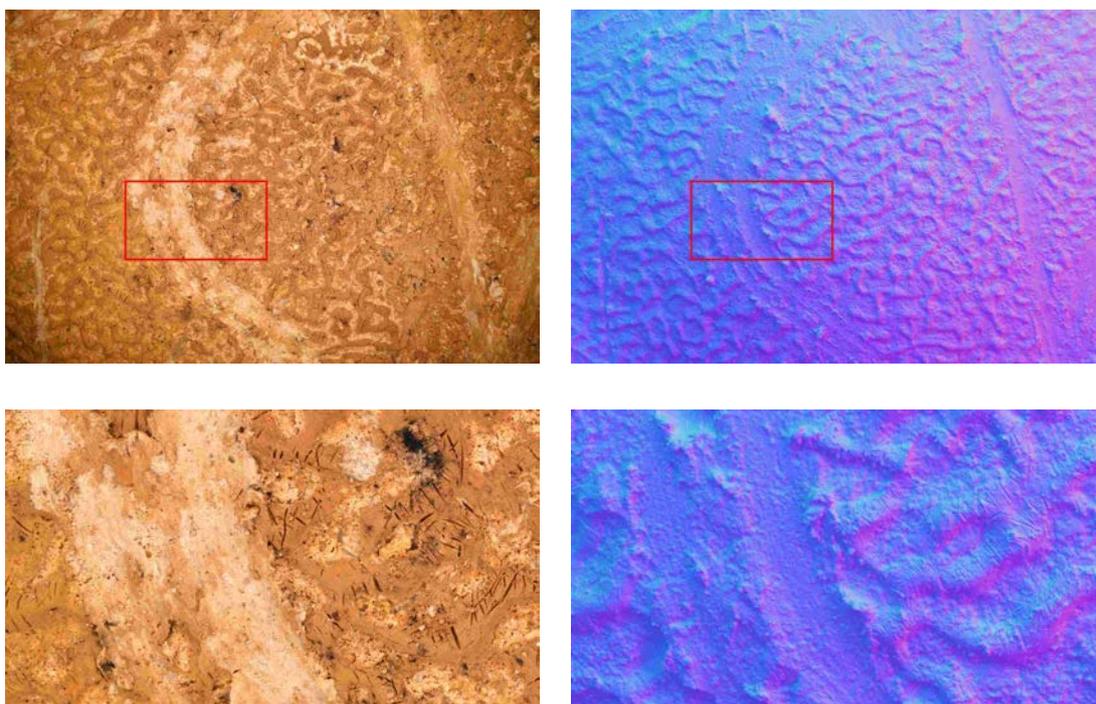


FIGURE 3.13 – Cheval gravé de la galerie des Croisillons (grotte Chauvet). Ligne du haut : albédo et normales estimés. Ligne du bas : agrandissements de la zone encadrée en rouge, sur lesquels apparaissent clairement les tracés digités, ainsi que des traces de griffes de chauve-souris.

3.2.3 Influence de la couleur

Mammouths raclés de la grotte Chauvet

La stéréophotométrie permet-elle réellement d'aider la lecture lorsque la scène est de couleur quasi-uniforme ? Les grands Mammouths raclés ($2\text{ m} \times 4\text{ m}$ environ) ont été entièrement réalisés au doigt par enlèvement du film/dépôt d'argile en surface, afin de retrouver le blanc de la paroi.

L'acquisition de données de stéréophotométrie (cf. figure 3.5, p. 86) a été effectuée à $2,5\text{ m}$ de la paroi, pour un GSD de $0,3\text{ mm/pixel}$, la plasticité de la paroi ne permettant pas de retrouver les empreintes digitales. Les résultats de la figure 3.14 (p. 95) montrent qu'il est effectivement possible de retrouver la chronologie des tracés.

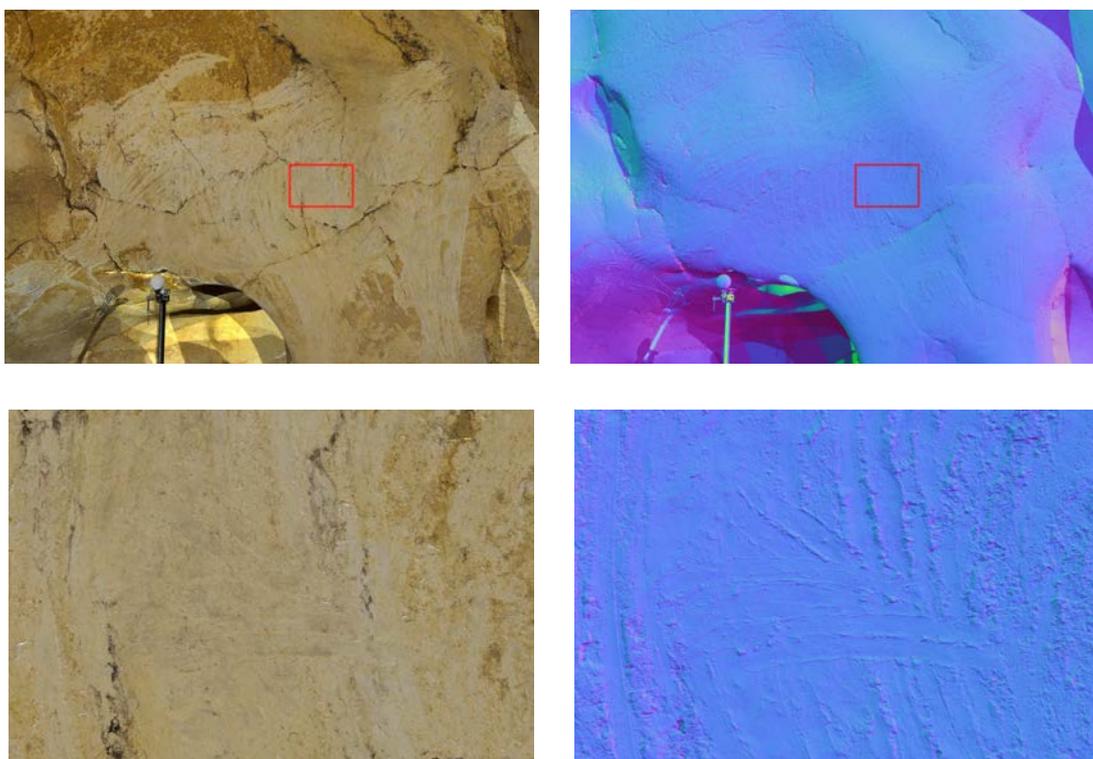


FIGURE 3.14 – Mammouths raclés de la grotte Chauvet. Première ligne : albédo et normales estimés. Cette surface unie ne pourrait pas être numérisée avec autant de finesse par lasergrammétrie ou photogrammétrie. Ligne du bas : agrandissements sur le travail au doigt de la paroi (zone encadrée en rouge), qui montrent les différentes interventions, verticales, puis obliques, puis enfin horizontales.

Bouquetin de la grotte Chauvet

À l'opposé, qu'en est-il lorsque la scène présente un fort contraste de couleurs ? Cela est le cas d'une paroi blanche de la grotte Chauvet, rehaussée du dessin d'un bouquetin réalisé au charbon. Les résultats de la figure 3.15 (p. 96) sont globalement positifs : la simulation d'un nouvel éclairage avec le logiciel Blender permet de voir les détails des fossiles présents dans la paroi.

Néanmoins, le champ de normales présente une forte inclinaison au niveau du dos du bouquetin (cf. figure 3.15, p. 96). Cela montre que si le réglage du temps d'exposition semble bien adapté à la plus grande partie de la scène, un traitement spécifique doit être prévu pour les zones d'albédo très sombre, selon le principe de l'imagerie HDR (*high dynamic range*).

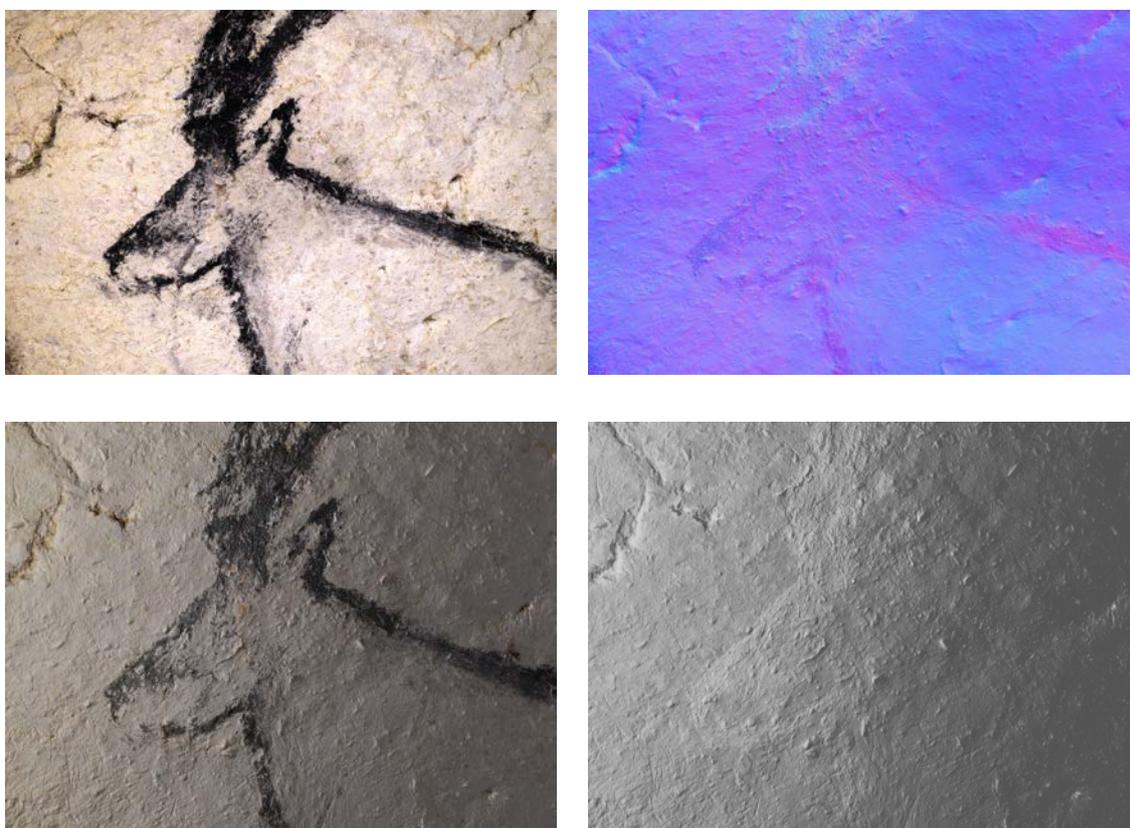


FIGURE 3.15 – Bouquetin de la grotte Chauvet. Ligne du haut : albédo et normales estimés. Ligne du bas : simulation d'un nouvel éclairage avec le logiciel Blender, avec et sans plaquage de l'albédo estimé. Ce dernier résultat met clairement en évidence une dépression au niveau du tracé au charbon, qui semble provenir d'une estimation erronée des normales là où la paroi est noire.

Panneau des Lions de la grotte Chauvet

Les résultats obtenus sur le panneau des Lions de la grotte Chauvet sont suffisants pour effectuer un ré-éclairage (cf. figure 3.16, p. 97). Cependant, une partie de l'image est inexploitable à cause de la présence d'artefacts provoqués par la sphère et par la perche à laquelle elle est fixée. Il est nécessaire d'effectuer un traitement supplémentaire pour effacer les ombres projetées sur la paroi, en l'occurrence une résolution robuste des équations (3.4).

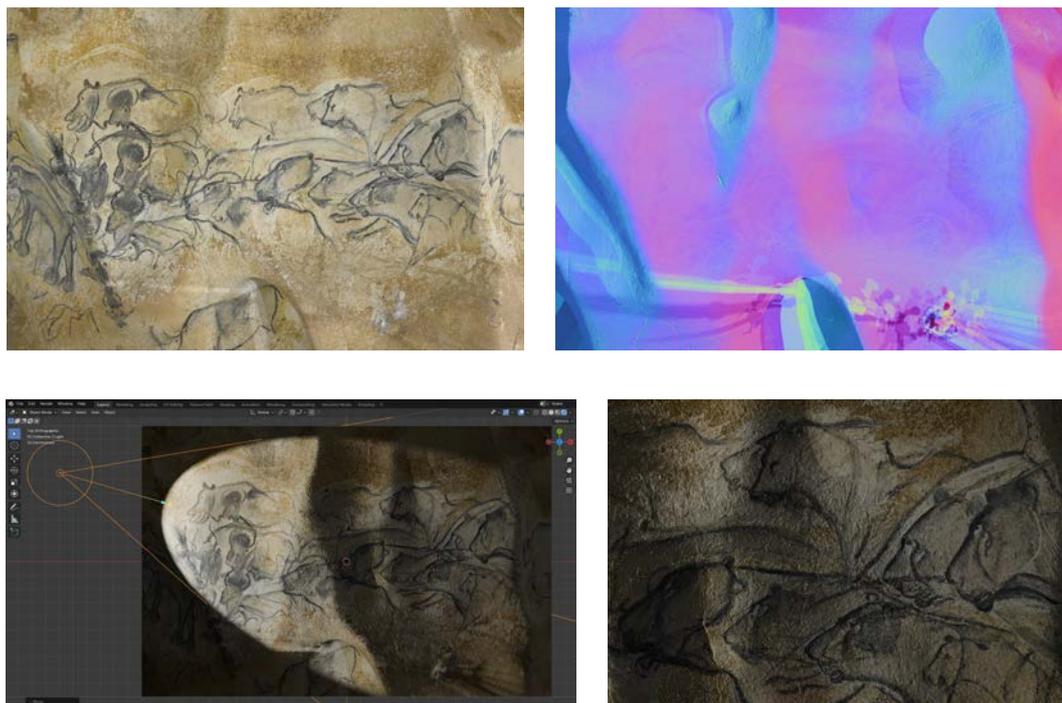


FIGURE 3.16 – Panneau des Lions de la grotte Chauvet. Ligne du haut : albédo et normales estimés par stéréophotométrie non robuste à partir de photographies telles que celles de la figure 3.1 (p. 80). Les traces de la perche et de la sphère d'étalonnage sont nettement visibles. Ligne du bas : le ré-éclairage, effectué ici avec le logiciel Blender, permet de simuler des éclairages impossibles à réaliser *in situ*.

Suivi temporel

La stéréophotométrie est-elle adaptée au suivi temporel (*monitoring*) d'un objet situé en extérieur, dont la géométrie est susceptible d'évoluer au cours du temps ? Pour répondre à cette interrogation, nous avons effectué deux numérisations d'un bac à sable à l'aide d'un dôme de RTI, avant et après modification de la surface du sable, afin de comparer les champs de normales. Lors de ces acquisitions, le sable utilisé étant plus fin que la GSD, ce ne sont pas les normales des grains de sable individuels qui sont estimées (un grain de sable peut être assimilé à une petite sphère), mais bien les normales à la surface à l'échelle

CHAPITRE 3. UNE AUTRE MÉTHODE DE RECONSTRUCTION 3D PERTINENTE POUR L'ARCHÉOLOGIE

de la GSD (un pixel correspond à un grand nombre de grains de sable). Sur la figure 3.17 (p. 98), la modification de la surface est clairement révélée par la carte d'écart angulaire entre les deux champs de normales. D'autre part, comme nous pouvions nous y attendre, l'albédo reste parfaitement uniforme.

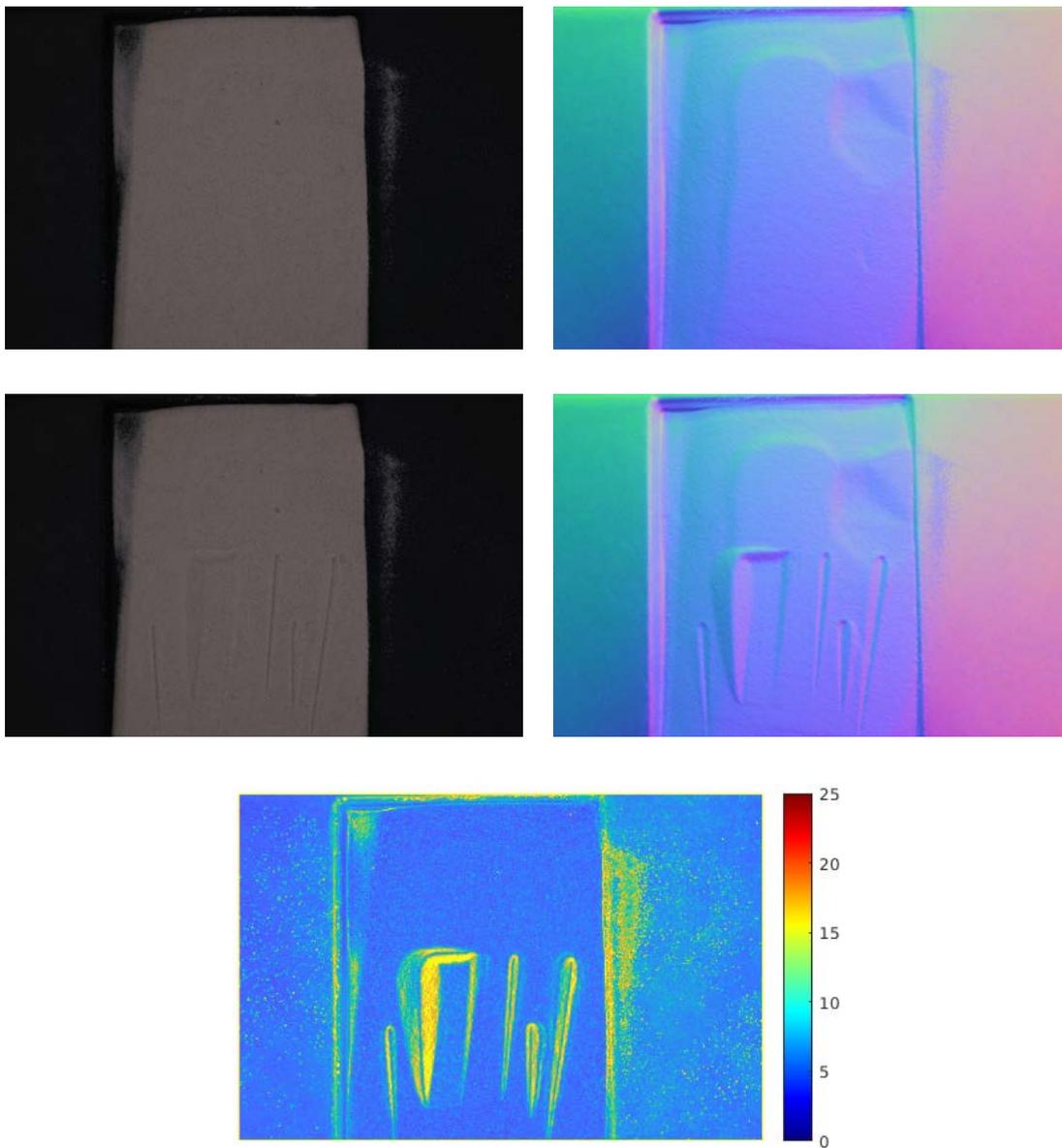


FIGURE 3.17 – Suivi temporel : simulation de l'érosion d'un objet situé en extérieur à l'aide d'un bac à sable. Première ligne : albédo et normales estimés avant modification du relief. Ligne du milieu : albédo et normales estimés après modification du relief. En bas : carte des écarts angulaires entre les deux champs de normales (l'échelle est exprimée en degrés).

3.2.4 Comparaison entre stéréophotométrie et scanner

Dans le chapitre 2, il a été montré que le scanner à lumière structurée fournissait une meilleure estimation du relief de la tablette zodiacale du MAN que les logiciels de photogrammétrie, avec en outre une meilleure résolution. Afin de comparer ce résultat à celui de la stéréophotométrie, nous avons photographié la tablette zodiacale avec une GSD proche de la résolution des cartes de profondeur du scanner, autour de 25 microns.

La figure 3.18 (p. 99) montre les résultats (albédo et champ de normales) de la stéréophotométrie appliquée à une douzaine de photographies de la tablette zodiacale du MAN, qui ont été obtenus en quelques minutes de traitement. Le ré-éclairage du champ de normales met en avant la résolution obtenue et la qualité de lecture qu'elle procure. La légèreté de mise en œuvre de la stéréophotométrie, ainsi que la rapidité du rendu, constituent des avantages décisifs pour appréhender le relief et la couleur des surfaces.

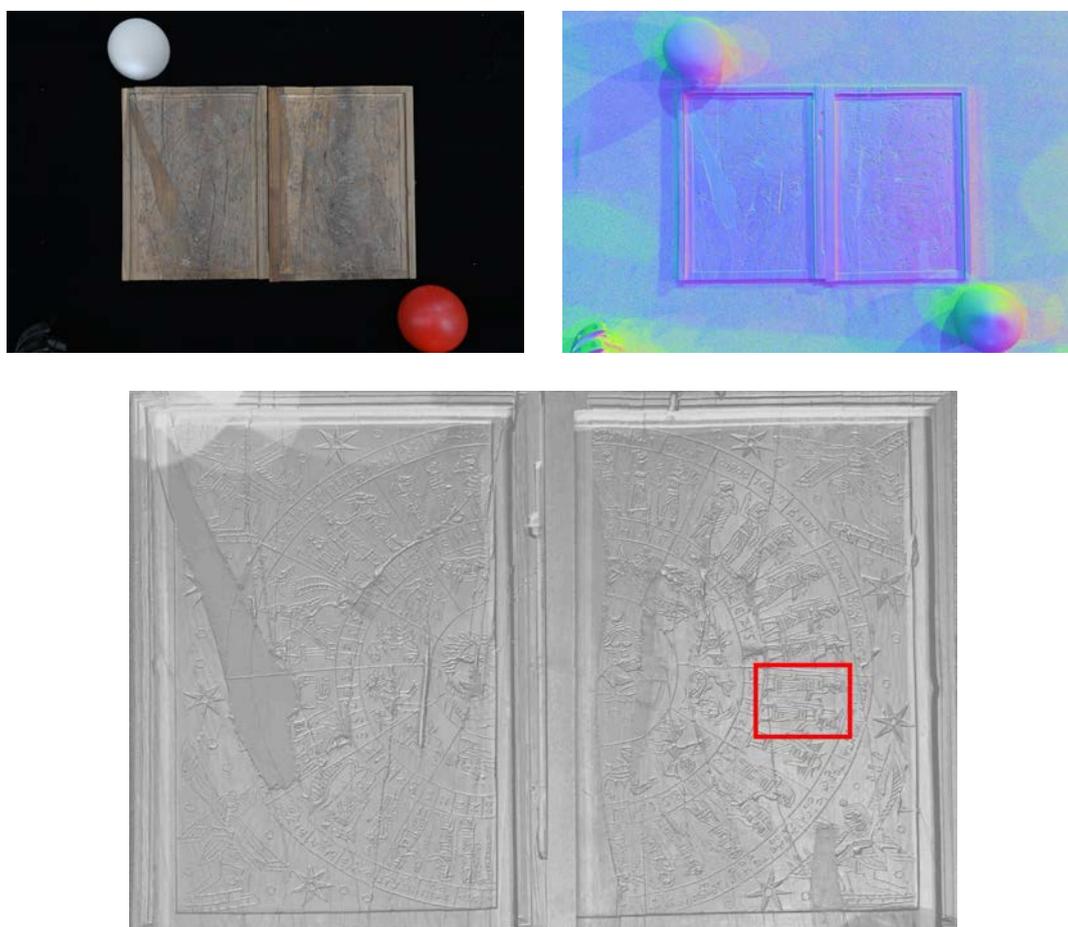


FIGURE 3.18 – Tablette zodiacale du MAN. En haut : albédo et normales estimés par stéréophotométrie à partir d’une douzaine de photographies. La résolution est d’environ 25 microns. En bas : ré-éclairage du champ de normales avec le logiciel Krita. La zone encadrée en rouge sert à comparer stéréophotométrie et scanner (cf. figure 3.19, p. 100).

CHAPITRE 3. UNE AUTRE MÉTHODE DE RECONSTRUCTION 3D PERTINENTE POUR L'ARCHÉOLOGIE

Pour la comparaison des deux méthodes de reconstruction 3D, nous avons sélectionné un secteur situé entre deux personnages, dont la surface comporte à la fois des représentations gravées et des rayures accidentelles. Le modèle 3D du scanner est mis en regard d'une carte de profondeur obtenue par intégration du champ de normales (cf. figure 3.19, p. 100). La stéréophotométrie fait apparaître les rayures situées entre les deux personnages. L'affichage de la profondeur en fausses couleurs montre que la stéréophotométrie ne retrouve pas le même MNS que le scanner. Cela met en évidence une limite de la stéréophotométrie, qui concerne l'intégration des normales, lorsque la surface comporte des discontinuités, comme cela est le cas ici avec les gravures profondes. De plus, il existe une déformation géométrique globale du relief reconstruit par stéréophotométrie, sur lequel nous reviendrons dans le chapitre 4. Pour ces deux raisons, les deux cartes de profondeur peuvent difficilement être superposées.

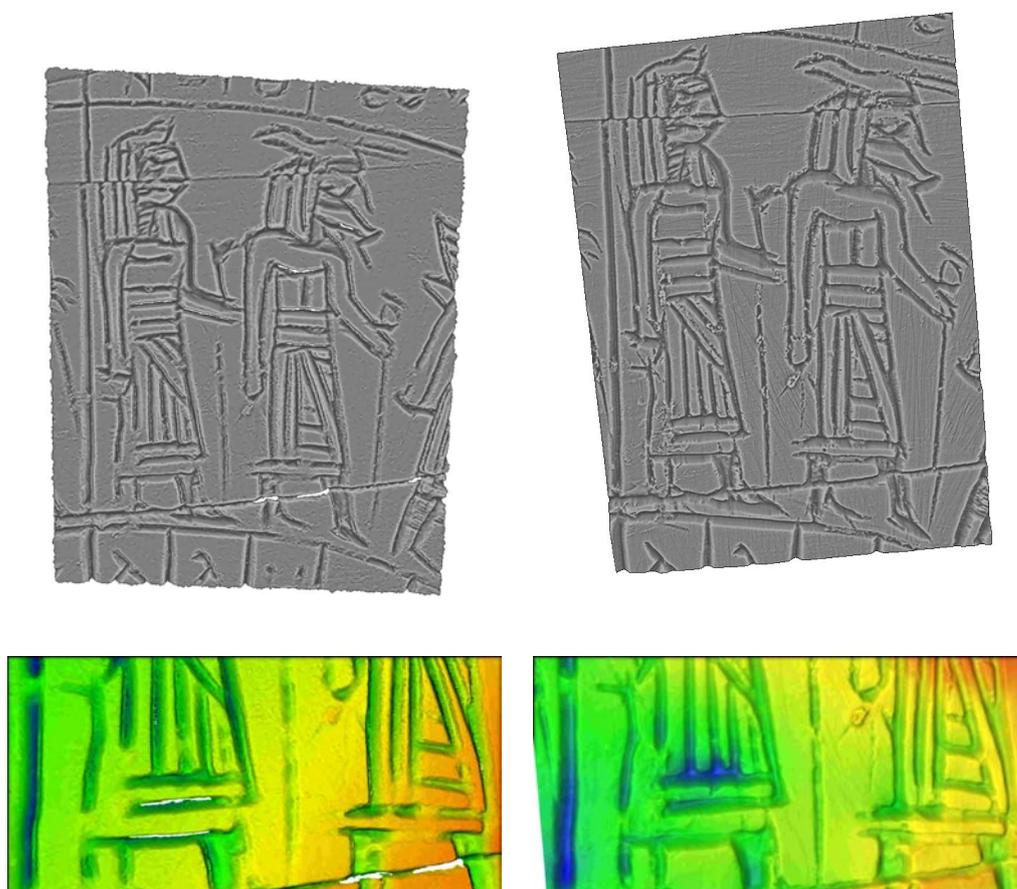


FIGURE 3.19 – Tablette zodiacale du MAN. Comparaison des maillages du scanner (colonne de gauche) et de la stéréophotométrie (colonne de droite) sur la zone encadrée en rouge sur la figure 3.18 (p. 99). Ligne du haut : simulations des modèles 3D sous un éclairage rasant avec le logiciel Meshlab. Ligne du bas : MNS affichés en fausses couleurs selon la hauteur.

L'analyse du modèle 3D ombré montre quand même un saut qualitatif avec la stéréophotométrie, qui révèle l'ensemble des rayures et offre une meilleure visualisation de la chronologie des tracés. Cependant, les MNS affichés en fausses couleurs sont affectés par les artefacts dus à l'intégration des normales. Enfin, les différences observées tendent à montrer que la stéréophotométrie monovue estime mal les basses fréquences de la profondeur, ce qui empêche toute analyse morphométrique, comme par exemple la réalisation de profils dans les gravures.

3.3 Limites de la stéréophotométrie

Au registre des avantages de la stéréophotométrie, nous pouvons citer pêle-mêle :

- son aptitude à numériser des surfaces lisses peu ou pas texturées ;
- sa capacité à estimer non seulement le relief de la scène, mais également son albédo ;
- la rapidité avec laquelle le problème peut être résolu, pixel par pixel, donc son caractère parallélisable ;
- sa capacité naturelle à conserver la résolution des images en entrée.

Néanmoins, cette méthode de reconstruction 3D, souvent qualifiée de « technique de laboratoire », présente également quelques limites :

- les discontinuités de profondeur sont difficiles à retrouver pas intégration des normales ;
- l'intégration du champ de normales estimé fournit une carte de profondeur, et non pas une véritable reconstruction 3D ;
- la reconstruction est effectuée à un facteur d'échelle près (comme la photogrammétrie) ;
- si l'hypothèse lambertienne facilite grandement le traitement des données, elle est loin d'être toujours valide ;
- là où l'albédo est très sombre, l'estimation des normales nécessite d'utiliser des données HDR ;
- les inter-réflexions étant négligées, l'estimation est biaisée dans les zones concaves ;
- enfin, elle nécessite de contrôler l'éclairage.

Dans cette section, nous allons illustrer sur quelques objets archéologiques ces deux dernières limites, c'est-à-dire que nous allons successivement tester la stéréophotométrie sur des objets manifestement peu ou pas lambertiens, puis nous étudierons l'influence de l'éclairage sur les résultats.

3.3.1 Surfaces non lambertiennes

La principale limite de la stéréophotométrie est son incapacité à traiter convenablement les surfaces ne respectant pas, ou pas suffisamment, l'hypothèse lambertienne. Rappelons que, selon cette hypothèse, un point 3D situé à la surface d'un objet a la même apparence depuis n'importe quel point de vue. Dans cette section, nous nous intéressons donc à des objets archéologiques ne respectant pas cette hypothèse, afin de mieux cerner le champ d'application de la méthode.

Mosaïque de Saint-Romain-en-Gal

La mosaïque des Saisons de Saint-Romain-en-Gal (MAN 83116) date du début du III^e siècle ap. J.-C. Cette mosaïque, dont plus du tiers est manquant (4,48 m sur 8,86 m ont été conservés), ornait le sol d'une grande demeure suburbaine de Saint-Romain-en-Gal, un des quartiers de Vienne dans l'Antiquité. C'était l'une des villes les plus belles et les plus prospères de la Gaule. Des ateliers de mosaïstes installés à Vienne satisfaisaient la demande d'une clientèle aisée.

Les activités agricoles et les fêtes des quatre saisons sont représentées en 40 tableaux de 59 cm chacun, dont 27 subsistent, insérés dans une riche tresse décorative. Ce thème n'est pas souvent utilisé par les mosaïstes en général, et par les ateliers de Vienne en particulier, qui préfèrent représenter des scènes mythologiques ou des natures mortes. Ils se sont sans doute inspirés d'un ou plusieurs modèles romains, valables pour l'ensemble des pays méditerranéens, aussi ne faut-il pas considérer cette mosaïque comme un « reportage » sur les pratiques agricoles gallo-romaines.

Les différents tableaux s'articulent autour des quatre compositions centrales où figurent des personnifications des Saisons : l'Hiver est une femme emmitouflée sur un sanglier, le Printemps un Amour nu sur un taureau, l'Été un Amour nu sur un lion, l'Automne un Amour nu sur un tigre.

Un vaste projet de restauration à l'atelier de restauration des mosaïques et des enduits peints de Saint-Romain-en-Gal a donné lieu à une numérisation 3D par photogrammétrie de la mosaïque assemblée, ainsi qu'à une prise de vue de très haute résolution. Ces supports, combinés à des outils de géomatique, offrent d'intéressantes perspectives d'étude et de recherche (cartographie des restaurations, automatisation du dénombrement des tesselles, étude d'usure des surfaces, etc.) et de médiation, dans le cadre d'un projet d'exposition.

Les mosaïques permettent de bien illustrer notre propos, car elles sont composées de différentes couleurs et de différents matériaux. L'aspect des tesselles, qui peuvent être brillantes ou mates, du fait de l'usure, constitue un indice de « rugosité » utilisé par les spécialistes de la restauration.

La figure 3.20 (p. 103) montre deux des 105 images de RTI de la mosaïque, que nous utilisons comme données de stéréophotométrie. L'utilisation d'un dôme de RTI étalonné permet d'éviter les artefacts dus aux ombres des sphères, qui étaient nettement visibles sur les champs de normales des figures 3.9 (p. 90) et 3.10 (p. 92). En outre, la redondance des données de RTI, en comparaison des données usuelles de stéréophotométrie, ouvre plusieurs perspectives : une estimation plus robuste des normales et de l'albédo, l'estimation d'autres propriétés des matériaux que leur simple couleur, voire l'estimation de l'état de surface des tesselles.

Sur la figure 3.20 (p. 103), nous montrons également le résultat de la segmentation des tesselles par un réseau de neurones entraîné, qui permet de classer les tesselles selon la couleur moyenne de la tesselle et sa « rugosité », définie comme une mesure de la variation locale des normales. Enfin, nous mettons en regard le champ de normales estimé par une version « classique » de stéréophotométrie, et le résultat d'une méthode récente par apprentissage profond, dite « universelle » [110], qui semble effectivement plus fidèle à la forme globalement plane de la mosaïque.

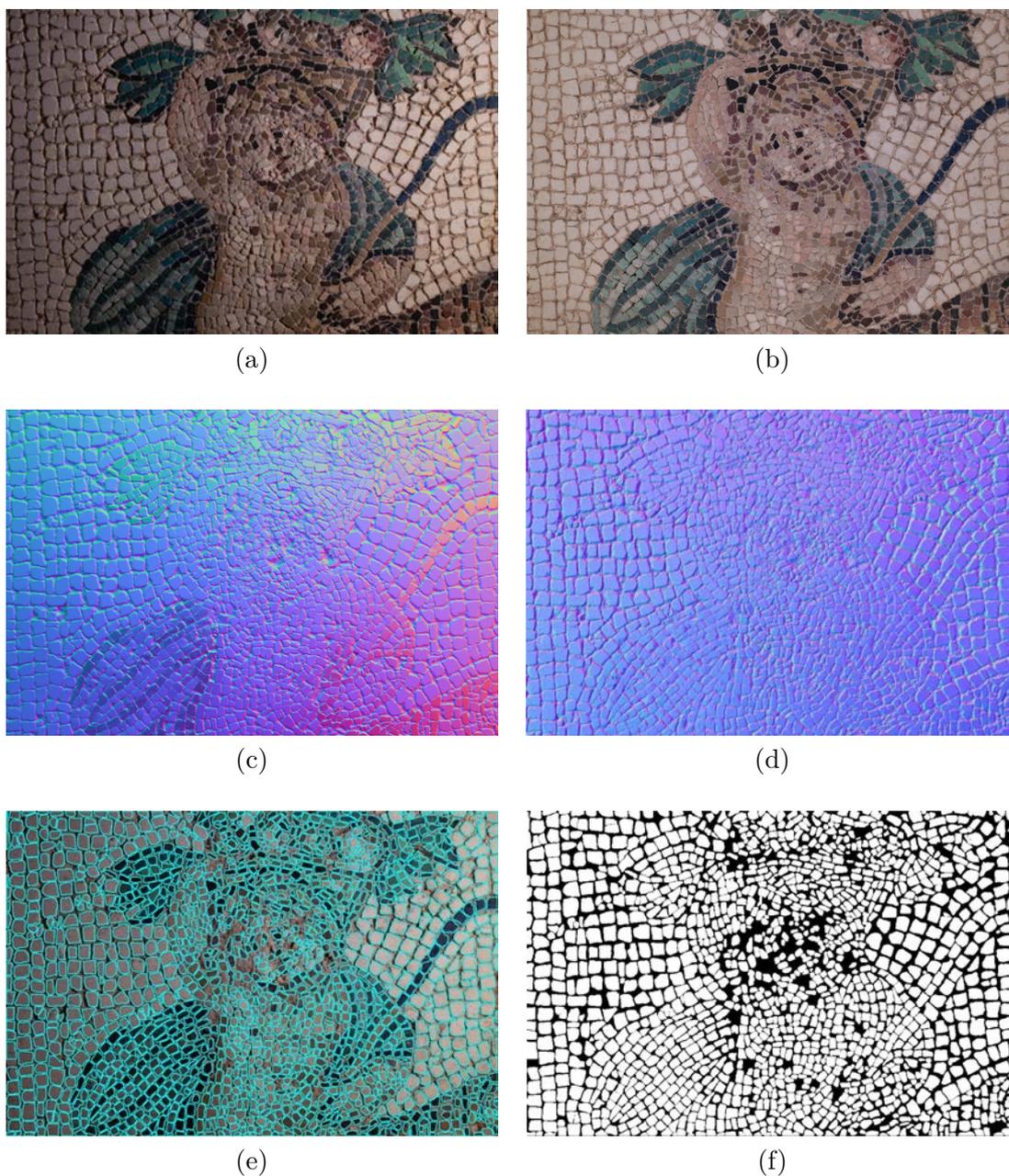


FIGURE 3.20 – Mosaïque de Saint-Romain-en-Gal. (a) Une des 105 photographies prises avec un dôme de RTI. (b) Albédo estimé par stéréophotométrie. (c) Normales estimées par stéréophotométrie. (d) Normales estimées par apprentissage profond (Uni MS-PS) [110]. (e) Segmentation par apprentissage profond. (f) Masque de segmentation des tesselles.

Objets non lambertiens du musée Saint-Raymond

La figure 3.21 (p. 105) montre les résultats de la stéréophotométrie appliquée à un pavement glaçuré du musée Saint-Raymond. Si les carreaux de pavement médiévaux illustrent bien notre propos, cela vient de la présence d'une glaçure [63]. Il apparaît que, malgré la glaçure, les craquelures de surface sont visibles, grâce à la différence de densité du matériau.

Cette figure nous permet d'introduire deux indicateurs liés à la méthode de résolution de la stéréophotométrie. Le premier évalue en chaque pixel la « validité » des acquisitions, c'est-à-dire le nombre d'éclairages ayant effectivement servi à la reconstruction 3D, le score d'un pixel situé dans une zone concave pouvant être relativement faible à cause des nombreuses ombres qu'il subit. Le deuxième indicateur, qui affiche le résidu des équations (3.4) utilisées en chaque pixel pour estimer l'albédo et la normale, est très pratique pour qualifier la qualité de la reconstruction 3D. Il mesure également le caractère plus ou moins lambertien de la surface en chaque point.

Le champ de la numismatique est important pour l'étude des périodes historiques. L'aureus du musée Saint-Raymond a été frappé à Rome avec la figure de Marc Aurèle et l'inscription « M. ANTONINUS AUG / ARMENIACUS ». Malgré l'aspect brillant de la composition en or, la stéréophotométrie permet de bien analyser la surface (cf. figure 3.22, p. 106).

Les plaques-boucles mérovingiennes sont constituées de bronze comportant différents états de surface. Deux plaques-boucles du musée Saint-Raymond ont été numérisées par stéréophotométrie (cf. figure 3.23, p. 107). Bien que certaines parties soient oxydées, il subsiste des zones réfléchissantes qui ont nécessité de sous-exposer ces objets à la lumière lors de l'acquisition.

Une autre catégorie d'objets ne respectant pas l'hypothèse lambertienne est celle des matériaux translucides, qui diffusent la lumière mais ne permettent pas de voir au travers. Les intailles du musée Saint-Raymond relèvent de cette catégorie. Ils nous intéressent particulièrement car ils comportent des gravures de surface. La diffusion de la lumière à la traversée du matériau empêche-t-elle la lecture du relief? Les résultats de la figure 3.24 (p. 108) semblent montrer le contraire.

Tracés digités de la grotte Chauvet

De nombreuses parois de la grotte Chauvet sont recouvertes de calcite, qui forme un vernis translucide et possède une épaisseur non négligeable. Le secteur sélectionné, qui se situe au niveau du cheminement proche du Hibou, est intéressant pour deux raisons. Primo, la calcite s'est déposée sous la forme d'un voile au-dessus de tracés digités au plafond. Secundo, des fistuleuses et des excentriques se sont formées. Comment la stéréophotométrie se comporte-t-elle face à cette épaisseur vitrée, et en présence des fistuleuses qui ont la forme de tubes dirigés vers le sol? Le résultat de la figure 3.25 (p. 109) semble indiquer que le champ de normales estimé révèle le relief de la calcite, et que le relief au niveau des fistuleuses n'est pas bien restitué, sans doute à cause d'un matériau proche de la transparence.

3.3. LIMITES DE LA STÉRÉOPHOTOMÉTRIE

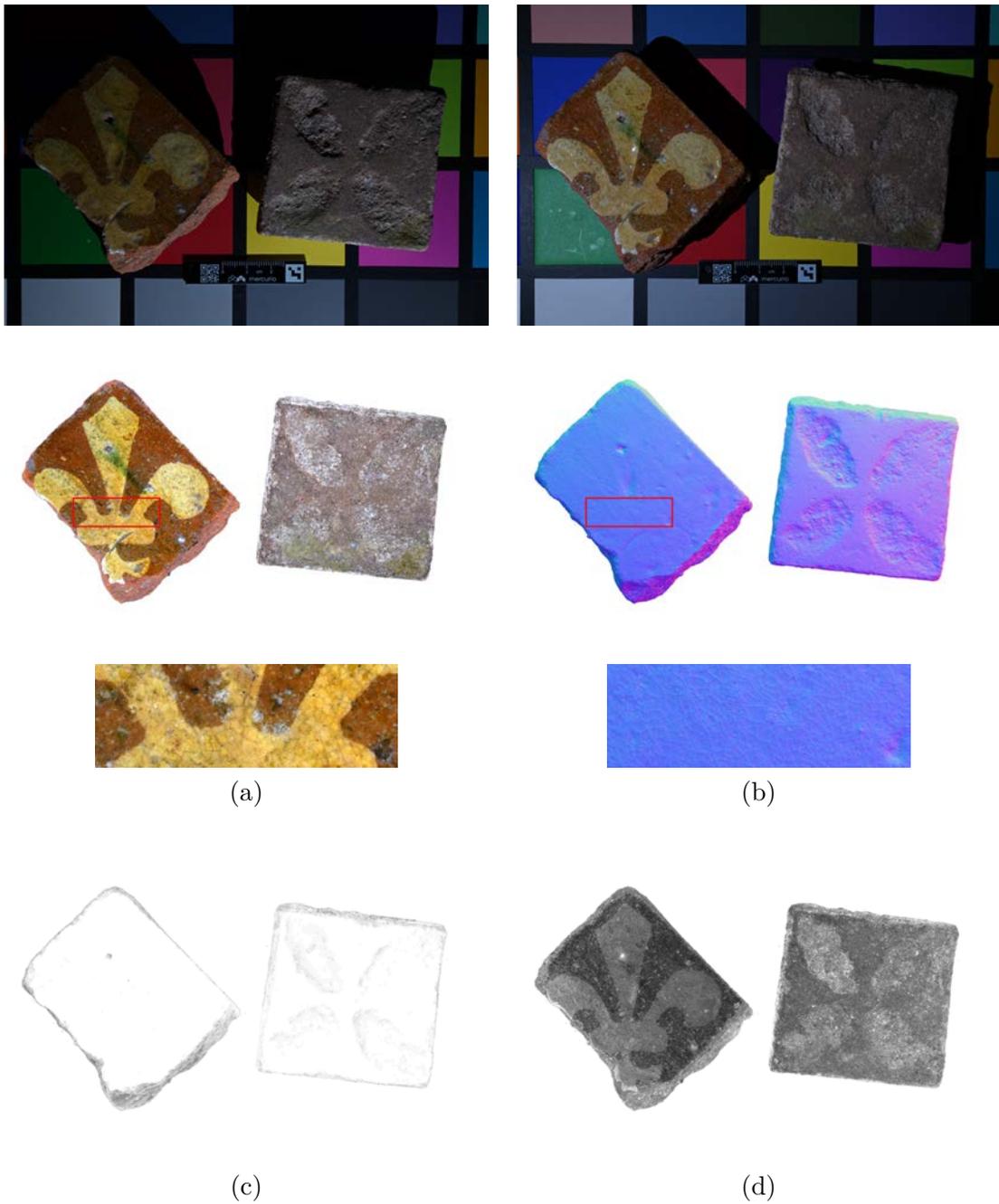


FIGURE 3.21 – Pavement glaçuré du musée Saint-Raymond. Ligne du haut : deux des 105 photographies de RTI. (a) Albédo estimé et (b) normales estimées, avec agrandissements de la zone encadrée en rouge. (c) Nombre d'images jugées valides (un pixel blanc indique que ce nombre est maximal). (d) Résidus des équations (3.4).

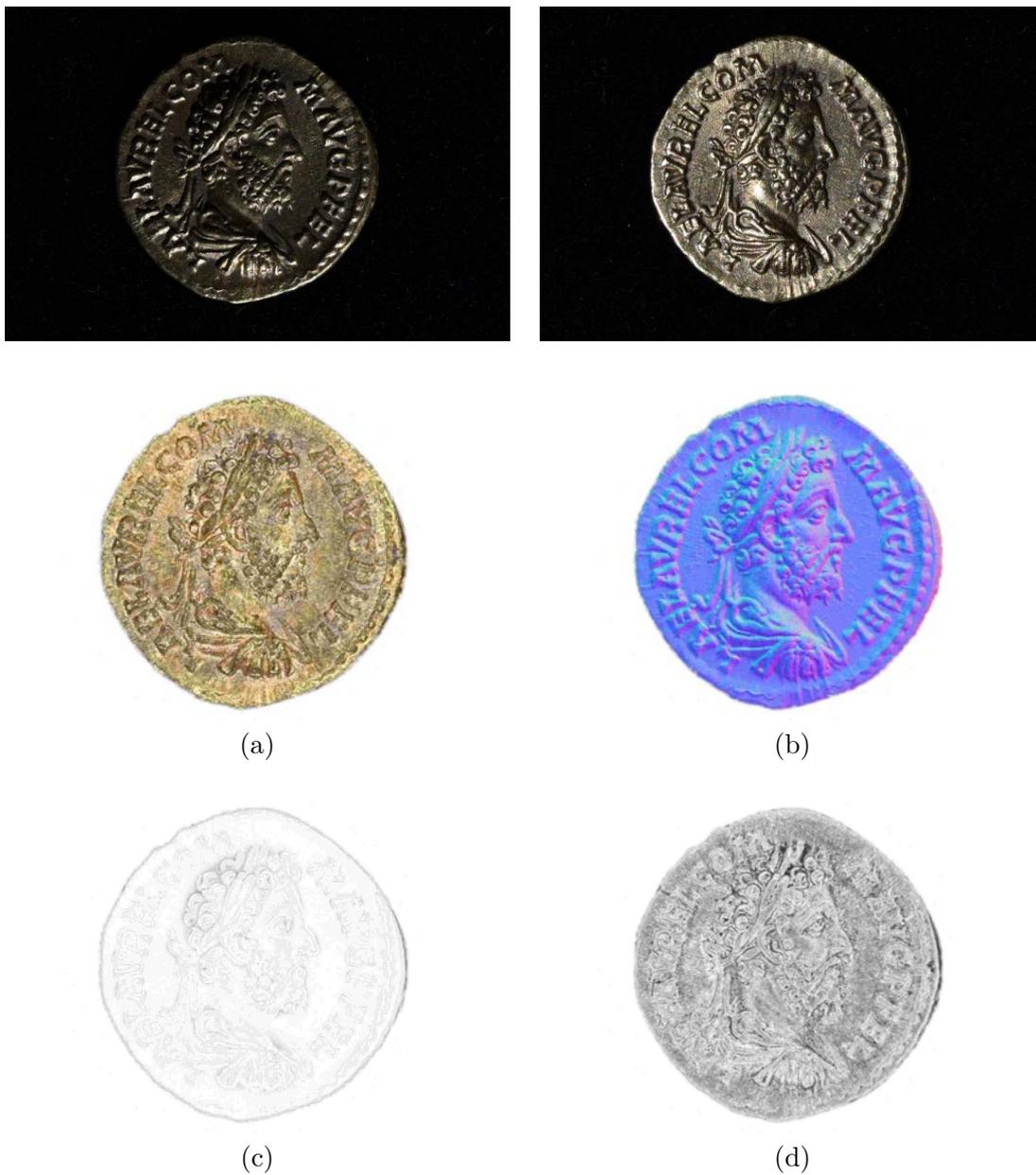


FIGURE 3.22 – Auréus du musée Saint-Raymond. Ligne du haut : deux des 105 photographies de RTI. (a) Albédo estimé. (b) Normales estimées. (c) Nombre d'images jugées valides. (d) Résidus des équations (3.4).

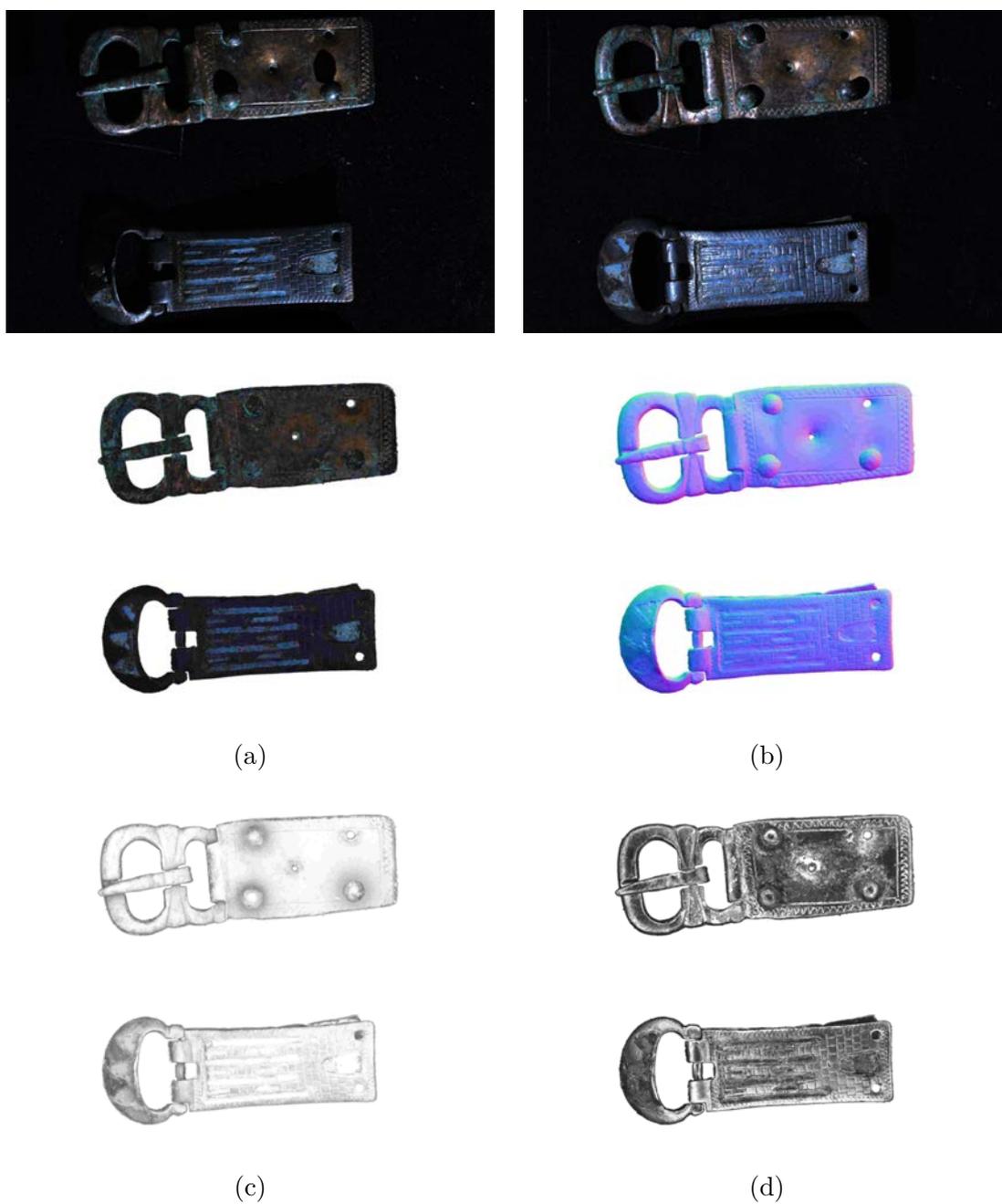


FIGURE 3.23 – Plaques-boucles du musée Saint-Raymond. Ligne du haut : deux des 105 photographies de RTI. (a) Albédo estimé. (b) Normales estimées. (c) Nombre d'images jugées valides. (d) Résidus des équations (3.4).

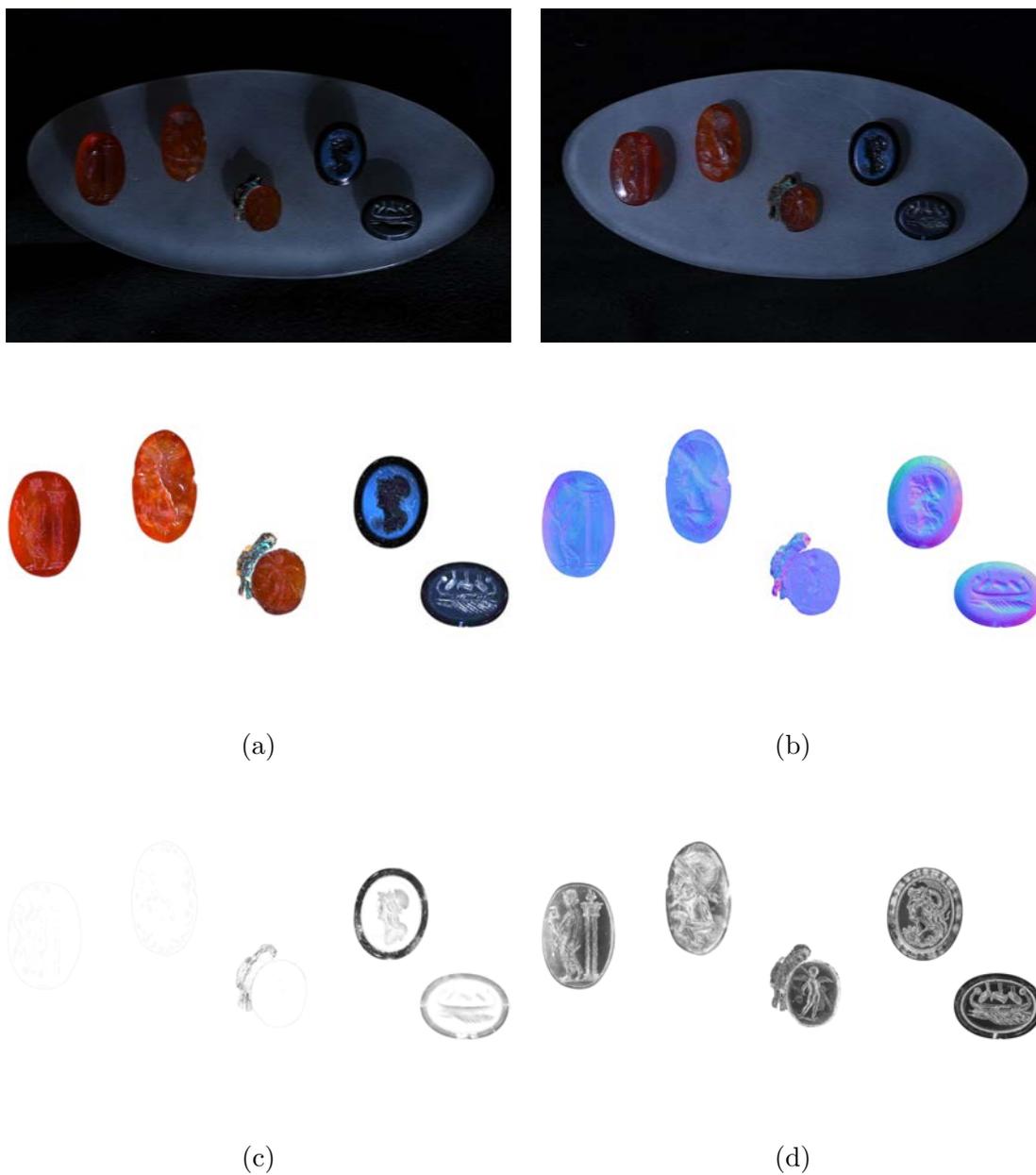


FIGURE 3.24 – Intailles du musée Saint-Raymond (trois agates et une cornaline). Ligne du haut : deux des 105 photographies de RTI. (a) Albédo estimé. (b) Normales estimées. (c) Nombre d'images jugées valides. (d) Résidus des équations (3.4).

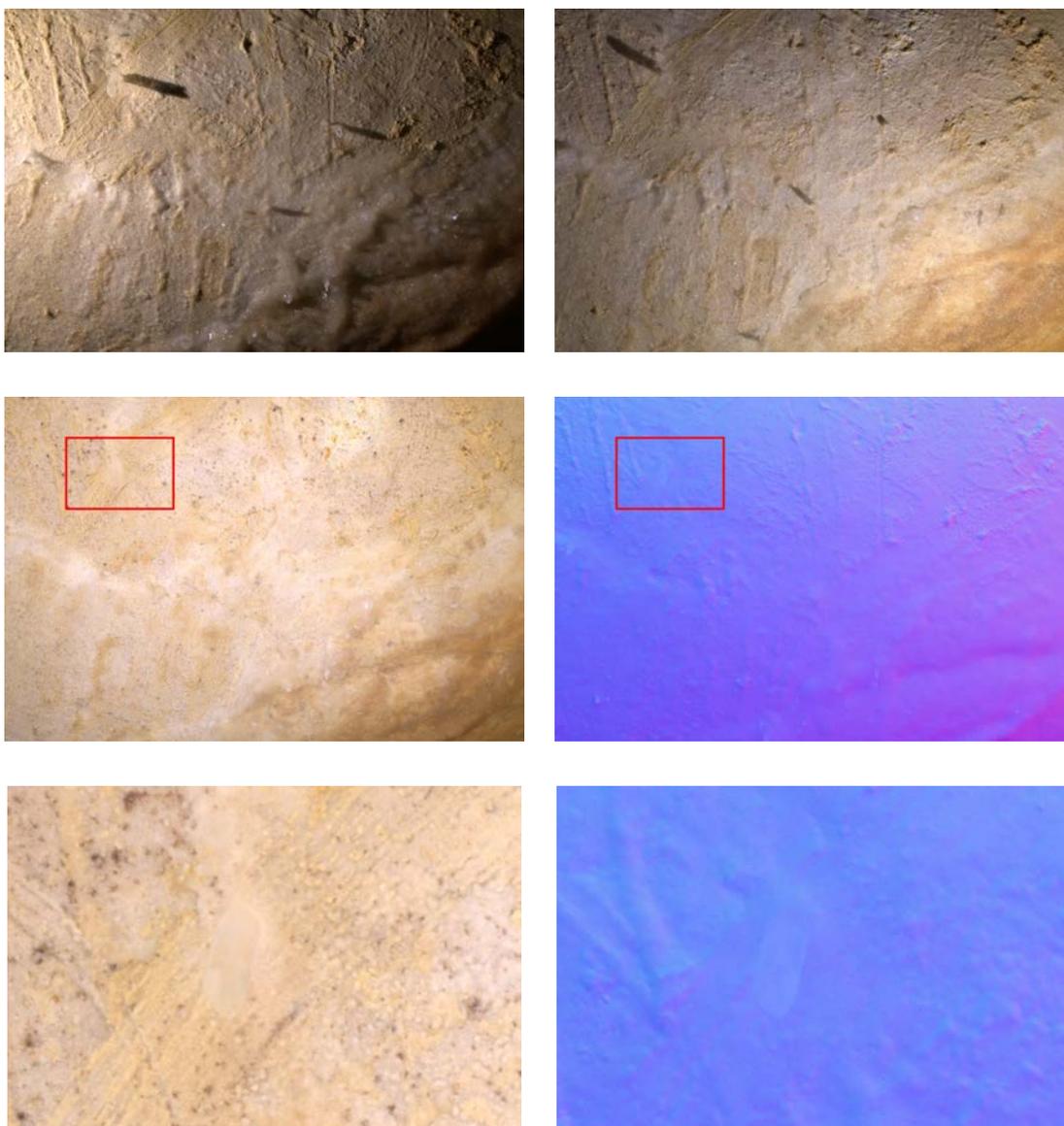


FIGURE 3.25 – Tracés digités de la grotte Chauvet. Ligne du haut : deux photographies de RTI (parmi 35). La présence de fistuleuses est révélée par les ombres projetées sur la paroi. Ligne du milieu : albédo et normales estimés. Ligne du bas : agrandissement de la zone encadrée en rouge, qui comporte une fistuleuse.

3.3.2 Influence de l'éclairage sur les résultats

De par son principe même, la stéréophotométrie dépend fortement des conditions d'éclairage de la scène, ce qui peut avoir des conséquences de différents ordres. De façon générale, bien que la valeur de l'angle d'incidence de l'éclairage considérée comme optimale soit égale à $54,74^\circ$ relativement à la normale [75], l'irrégularité du relief des objets archéologiques impose de multiplier les angulations.

Tout d'abord, le nombre d'éclairages utilisé est décisif vis-à-vis de l'estimation du champ de normales. En théorie, trois éclairages non coplanaires suffisent à dissocier relief et albédo. Mais en pratique, la méthode ne fournit une estimation du relief réellement comparable à la vérité terrain, en termes d'écart angulaire, que si l'on dispose d'un minimum de $N = 12$ images [48, 237].

D'autre part, la lumière ambiante est susceptible de biaiser l'estimation des éclairages. Par exemple, une lumière provenant d'un côté de la scène aura tendance à orienter la reconstruction 3D globalement dans cette direction. Deux parades sont possibles. La première consiste soit à masquer les sources lumineuses parasites au moment de la prise de vue, en limitant les inter-réflexions sur les parois réfléchissantes, soit à augmenter l'intensité de l'éclairage, de manière à rendre négligeable l'éclairage ambiant. La deuxième parade consiste à prendre une photographie de la scène avec seulement la lumière ambiante, qui sera ensuite soustraite de toutes les autres photographies.

Marbre de Chiragan

Un autre problème vient de l'utilisation d'une sphère d'étalonnage, si l'estimation de l'éclairage en un point est extrapolée à l'ensemble de la scène. Il est envisageable, dans une certaine mesure, d'augmenter le nombre de sphères dans le champ de la caméra, puis d'interpoler les différentes estimations de l'éclairage. Cette idée a été mise en pratique sur un marbre du musée Saint-Raymond provenant du gisement de Chiragan à Martres Tolosane (Haute-Garonne), qui comporte une inscription très difficile à déchiffrer. La figure 3.26 (p. 111) montre que l'utilisation de l'une ou l'autre des deux sphères a un impact non négligeable sur l'estimation de l'albédo et des normales.

Masque mortuaire de Jean Jaurès

Un autre point concerne la reproductibilité des résultats en utilisant différents jeux de sources lumineuses. La figure 3.27 (p. 112) compare les champs de normales du masque mortuaire de Jean Jaurès, estimés avec les 105 LEDs du dôme de RTI, puis avec un des trois jeux de 35 LEDs répartis de manière uniforme sur la surface du dôme. Les cartes d'écarts angulaires entre ces versions « allégées » du jeu de données et la version de référence utilisant la totalité des 105 LEDs montrent que seules les zones se trouvant fréquemment dans l'ombre sont moins bien reconstruites.

3.3. LIMITES DE LA STÉRÉOPHOTOMÉTRIE

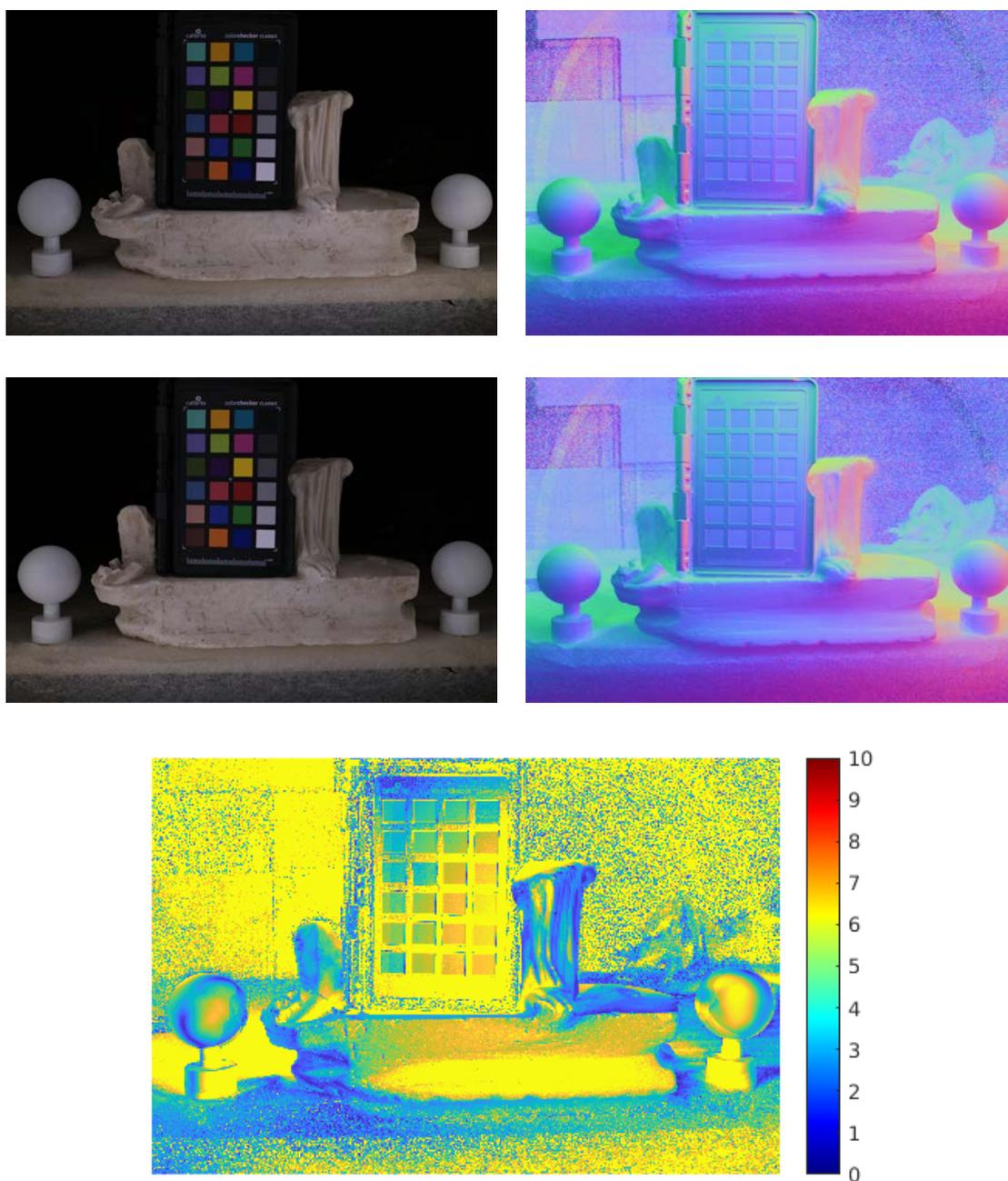


FIGURE 3.26 – Marbre de Chiragan. Ligne du haut : albédo et normales estimés en utilisant la sphère de gauche pour étalonner l'éclairage. Ligne du milieu : mêmes estimations, mais en utilisant la sphère de droite. En bas : carte d'écart angulaire entre les deux champs de normales estimés (l'échelle est exprimée en degrés).

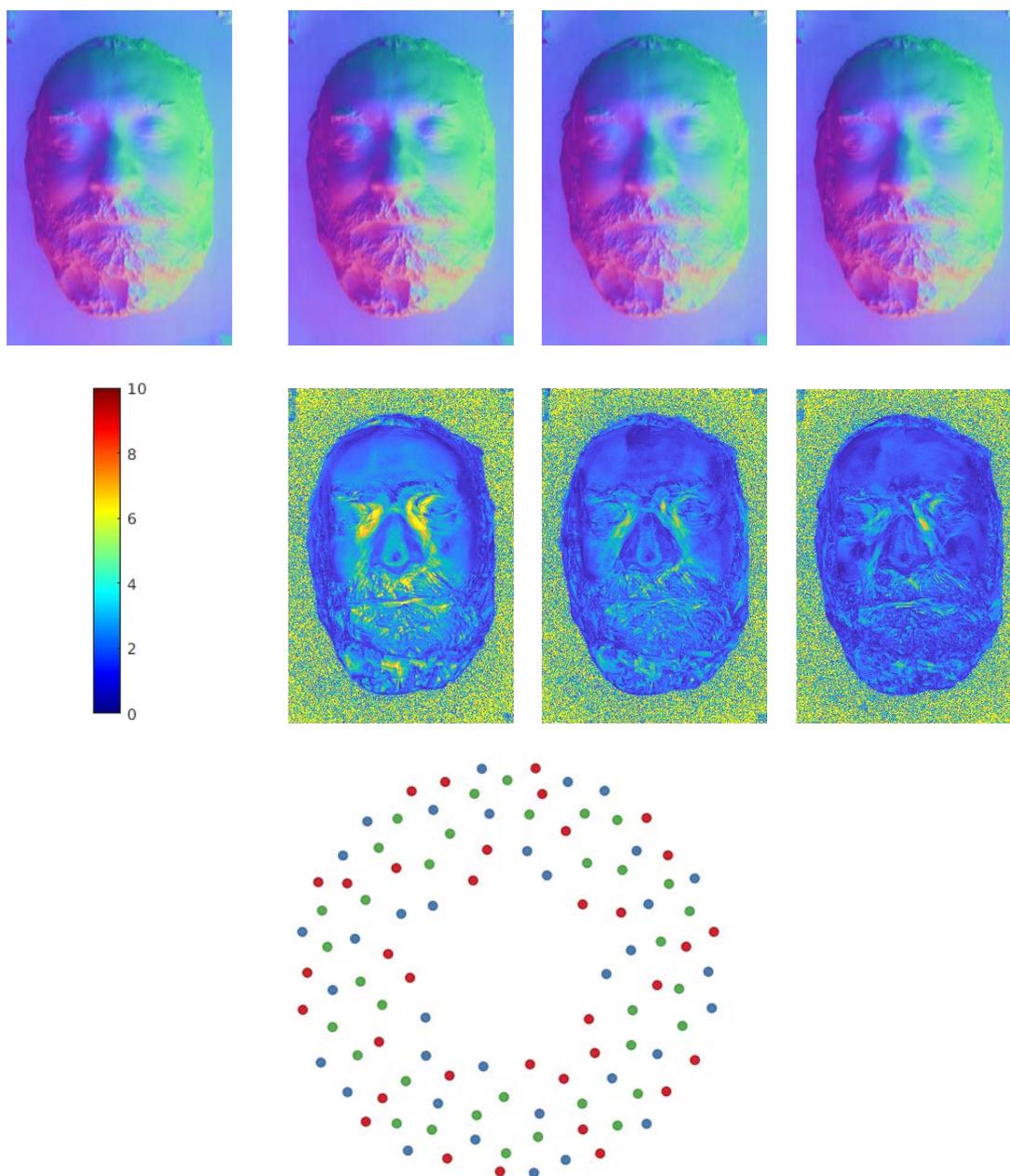


FIGURE 3.27 – Masque mortuaire de Jean Jaurès. Étude de la reproductibilité des résultats avec différents jeux de sources lumineuses. Ligne du haut : champs de normales obtenus soit avec les 105 LEDs du dôme de RTI, soit avec trois jeux comportant 35 LEDs chacun. Ligne du milieu : échelle des écarts angulaires (exprimée en degrés), et cartes des écarts angulaires entre les trois champs de normales à 35 LEDs et le champ de normales à 105 LEDs, utilisé comme référence. Ligne du bas : répartition des trois jeux de 35 LEDs du dôme de RTI matérialisés en trois couleurs.

Fibule discoïde du musée Saint-Raymond

Un dernier point concerne l'influence des ombres portées, en cas de forte concavité. La figure 3.28 (p. 114) montre une fibule discoïde de type septentrional à inclusions de grenats retrouvée dans une sépulture de la nécropole du Mouraut (V^e - VI^e siècle), conservée au musée Saint-Raymond. Cet objet présente simultanément trois difficultés : un métal brillant qui compose la base de l'objet, des pierres semi-précieuses et translucides qui composent le décor en rayon, et plusieurs évidements là où ces pierres ont été perdues. Le fond de ces cavités se trouve la plupart du temps dans l'ombre. L'élimination des niveaux de gris trop faibles ou trop élevés, caractéristiques des ombres et des reflets brillants, nécessite d'ajuster correctement les seuils haut et bas pour que les résultats soient fidèles à la réalité du terrain.

Discussion

En guise de conclusion sur la pertinence à utiliser la stéréophotométrie en archéologie, signalons pour commencer que cette « technique de laboratoire » est compatible avec les activités de terrain, même si son déploiement a nécessité de nombreux allers-retours tout au long de cette thèse.

Pour la recherche et la conservation, la stéréophotométrie fournit en une seule pose plusieurs couches d'information : l'albédo, l'orientation locale de la surface, un petit nombre de photographies prises sous des éclairages réels et la possibilité d'en simuler de nouveaux, une information sur la réflectance des matériaux, la carte de profondeur estimée et ses dérivés (pente, rugosité, etc.), ainsi que les annotations des experts. Un avantage de l'archive produite par stéréophotométrie est lié au faible poids de celle-ci, qui se réduit à la douzaine de photographies d'origine. En effet, comme les résultats peuvent être obtenus en quelques minutes à partir de ces photographies, il n'est pas nécessaire de les conserver, ce qui limite l'impact environnemental.

D'autre part, il nous paraît essentiel de dissiper deux idées reçues. Premièrement, en raison de la complexité de la numérisation 3D, aucune méthode ne permet à elle seule de restituer toutes les composantes d'un objet archéologique. Deuxièmement, l'utilisation du double numérique ne peut en aucun cas se substituer à l'objet original. Il sera toujours nécessaire, pour certaines études, de revenir à l'objet réel.

La stéréophotométrie apparaît enfin comme une réponse à certaines limites sur la question des hautes fréquences de la profondeur, c'est-à-dire sur la possibilité de restituer dans le double numérique les détails du relief. Une méthode « idéale » devrait posséder la précision de la stéréophotométrie dans les hautes fréquences, tout en étant exempte de biais dans les basses fréquences et simple à utiliser. Dans le prochain chapitre, nous allons présenter une méthode de reconstruction 3D « mixte », c'est-à-dire à la fois géométrique et photométrique, dont l'idée directrice est d'utiliser le résultat de la photogrammétrie pour estimer localement l'éclairage.

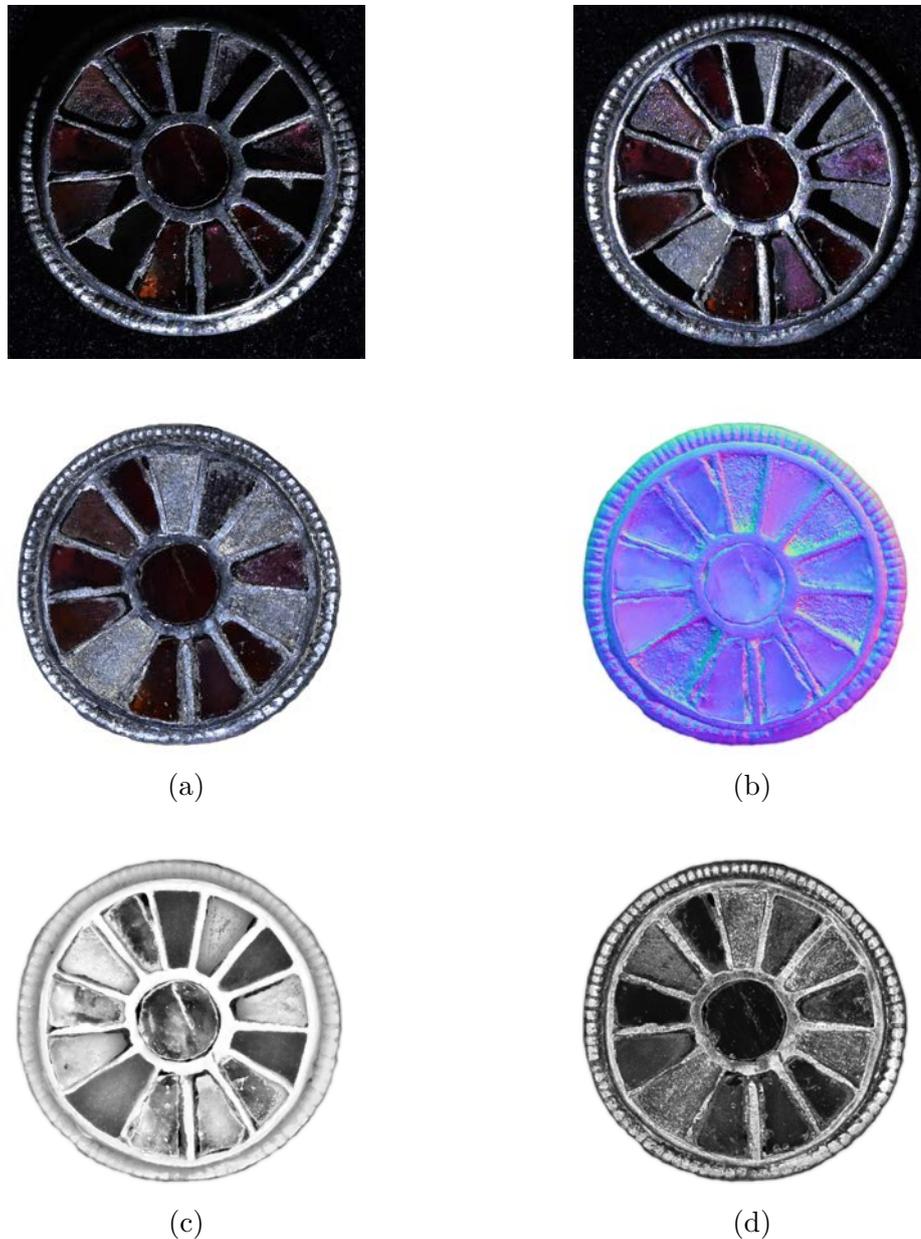


FIGURE 3.28 – Parure de sépulture du musée Saint-Raymond. Ligne du haut : deux des 105 photographies de RTI, qui comportent à la fois des ombres portées, des reflets brillants et de la translucidité. (a) Albédo estimé. (b) Normales estimées. (c) Nombre d'images jugées valides. (d) Résidus des équations (3.4).

Vers une nouvelle chaîne opératoire de numérisation 3D

4.1 Fusion des approches géométrique et photométrique

Dans le chapitre 2, nous avons montré, sur plusieurs types de vestiges, la capacité de la photogrammétrie à restituer les basses fréquences de la profondeur. Cela se fait au prix d'une perte de résolution, en comparaison de la résolution des photographies utilisées. De plus, la photogrammétrie n'enregistre que l'information de couleur au moment de la prise de vue. Dans le chapitre 3, nous nous sommes tournés vers la stéréophotométrie ; qui permet de dissocier l'albédo de l'éclairement, tout en conservant la résolution des photographies. Nous avons validé son intérêt sur différents mobiliers archéologiques. Il nous reste à tenter de fusionner les bénéfices de ces deux approches.

4.1.1 Comparaison entre photogrammétrie et stéréophotométrie

La figure 4.1 (p. 116) montre la reconstruction 3D de la face avant d'une statue-menhir par photogrammétrie, en utilisant 30 images telles que celles de la figure 2.8 (p. 61). Cette figure montre aussi une représentation en fausses couleurs du champ de normales estimé par stéréophotométrie, en utilisant 20 images telles que celles de la figure 3.8 (p. 89). Les photographies ont été prises avec un appareil Nikon Z7 II équipé d'un objectif 35 mm, à environ 1 m de la statue. Elles comportent 45,75 millions de pixels. Pour rendre la comparaison la plus impartiale possible, nous avons utilisé des nombres d'images équivalents. Bien que ces deux résultats puissent sembler corrects à cette échelle, nous verrons plus loin qu'ils ne sont pas équivalents.

Si la quantité de données utilisées par les deux méthodes est du même ordre, de par le nombre d'images utilisées et la résolution des images, tel n'est pas le cas du temps de calcul. En effet, alors que le résultat de gauche de la figure 4.1 (p. 116), obtenu par photogrammétrie avec le logiciel Meshroom (cf. figure 4.2, p. 116), a nécessité environ une heure de calcul sur GPU, l'estimation du champ de normales, affiché au centre de la figure 4.1 (p. 116), et son intégration n'ont nécessité que quelques minutes sur un ordinateur portable standard.

La comparaison qualitative des cartes de profondeur correspondant aux trois rectangles délimités en bleu, jaune et rouge sur l'image de droite de la figure 4.1 (p. 116) est illustrée sur la figure 4.3 (p. 117). Les résultats de la première ligne sont extraits des cartes de profondeur du MVS. Une trame régulière est clairement visible, qui est due à un sous-échantillonnage des images censé accélérer les calculs. Les cartes de profondeur de la deuxième ligne ont été

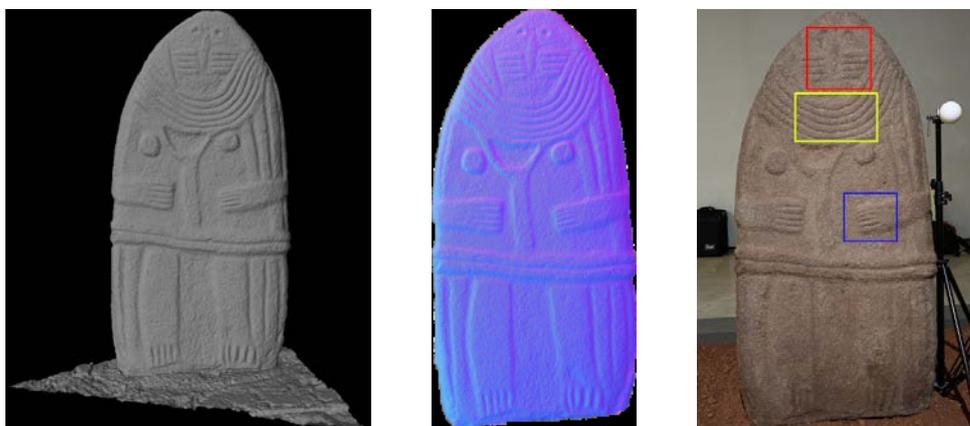


FIGURE 4.1 – Reconstruction 3D de la face avant de la Dame de Saint-Sernin. De gauche à droite : modèle 3D obtenu par photogrammétrie, en utilisant une trentaine d’images telles que celles de la figure 2.8 (p. 61) ; champ de normales estimé par stéréophotométrie, en utilisant une vingtaine d’images telles que celles de la figure 3.8 (p. 89) ; sélection des trois zones qui sont agrandies sur la figure 4.3 (p. 117).

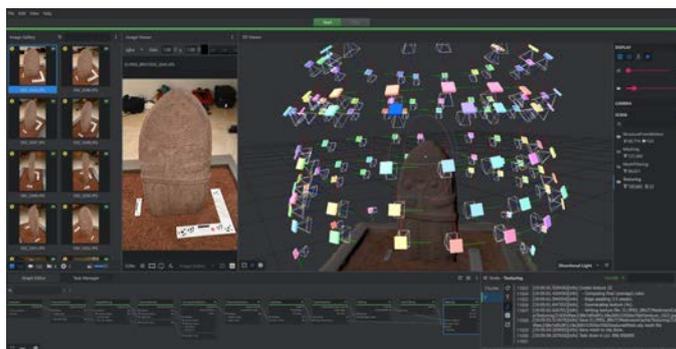
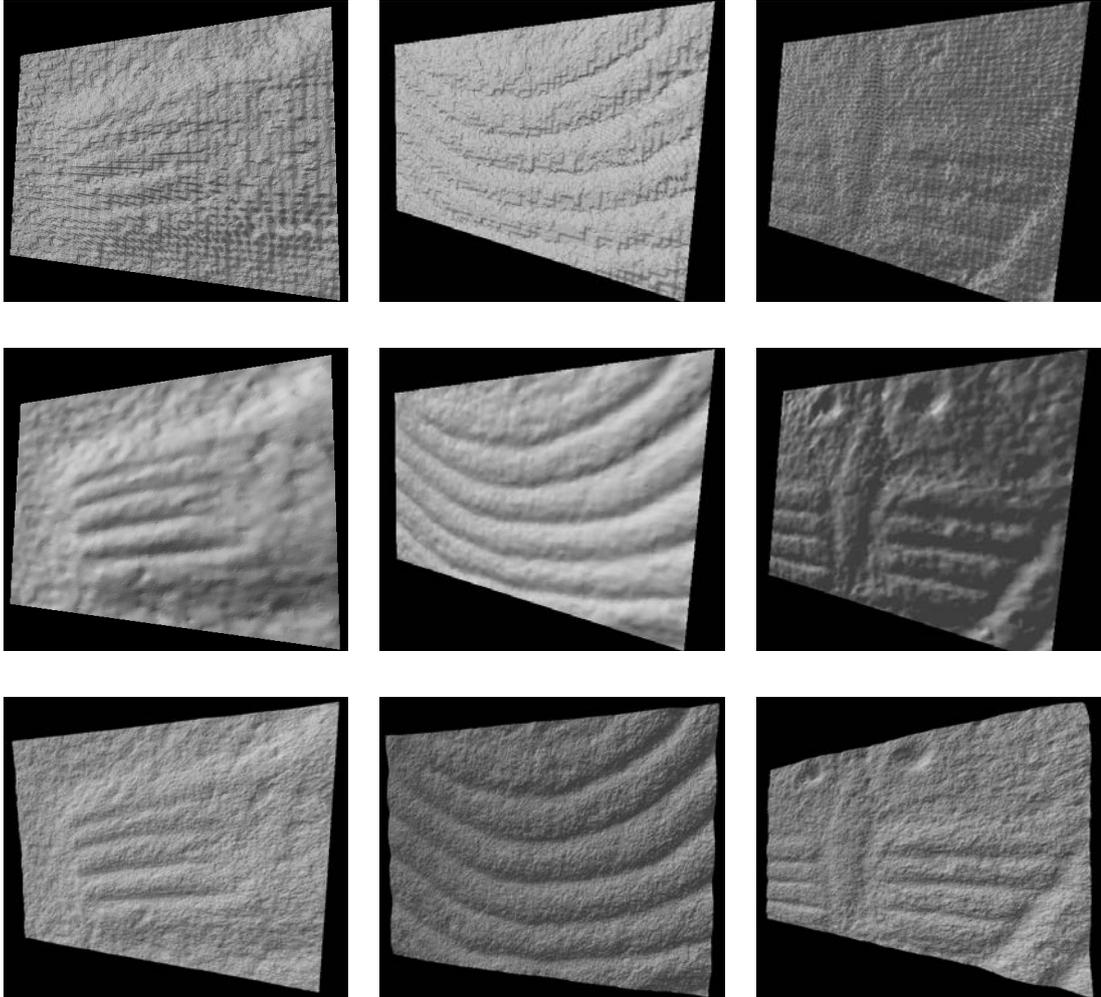


FIGURE 4.2 – Interface Meshroom à la fin de l’étape de SfM, au cours de la reconstruction 3D de la Dame de Saint-Sernin, à partir 122 images telles que celles de la figure 2.8 (p. 61).

produites artificiellement à partir du maillage obtenu par fusion des cartes de profondeur de Meshroom, en reprojétant le maillage sur la grille des pixels. Les résultats de ces deux lignes montrent que le relief est beaucoup mieux restitué par le maillage 3D que par une carte de profondeur du MVS prise isolément.

Enfin, la troisième ligne de la figure 4.3 (p. 117) montre les cartes de profondeur obtenues par stéréophotométrie, après intégration des normales estimées par une transformation en cosinus discrète [231]. Puisqu’une valeur de la profondeur est estimée en chaque pixel, il est normal que la résolution du résultat soit meilleure que celle du résultat obtenu par MVS, que ce soit avant ou après construction du maillage.



Rectangle bleu.

Rectangle jaune.

Rectangle rouge.

FIGURE 4.3 – Comparaison qualitative des cartes de profondeur sur les trois rectangles délimités en bleu, jaune et rouge à droite de la figure 4.1 (p. 116). Première ligne : cartes de profondeur du MVS de Meshroom. Deuxième ligne : cartes de profondeur extraites du maillage de Meshroom. Troisième ligne : cartes de profondeur obtenues par intégration des normales estimées par stéréophotométrie. Bien que cette comparaison soit qualitative, il apparaît que la troisième ligne reproduit mieux l'apparence granulaire de la pierre.

4.1.2 Combinaison des deux approches

La combinaison des deux approches qui viennent d'être comparées peut s'effectuer de différentes manières. De nombreuses passerelles existent, que nous allons rappeler.

Plaquage des résultats de la stéréophotométrie

Une première possibilité consiste à combiner le modèle 3D obtenu par photogrammétrie avec les normales et les albédos estimés par stéréophotométrie. Cela s'effectue soit après mise en correspondance entre photographies des deux modes d'acquisition, grâce au SfM, soit en utilisant une pose commune. Les données de photogrammétrie servent à la reconstruction grossière du volume, tandis que les données de stéréophotométrie servent à obtenir une texture caractérisée par de plus hautes fréquences.

Cette idée de combiner la photogrammétrie avec des données multiéclairage n'est pas nouvelle. Elle a même été déjà proposée par plusieurs sociétés¹. Elle reprend une idée très similaire consistant à plaquer les normales obtenues par RTI sur un maillage obtenu par photogrammétrie [180].

Le but est bien sûr de pouvoir bénéficier à la fois de la géométrie obtenue par photogrammétrie et de la résolution des photographies en entrée. Le résultat est léger, en ce qui concerne le maillage, et sa lisibilité est garantie par la texture. La visualisation se fait à l'aide de méthodes de rendu. Les ombres contenues dans l'image finale résultent d'un mélange d'ombres portées et d'ombres propres, mais dans ce cas précis, le mélange est atypique puisque les ombres portées proviennent uniquement de la géométrie du maillage, tandis que les ombres propres résultent des normales qui sont plaquées sur ce dernier.

Il est possible de multiplier les acquisitions multiéclairage, comme le montre l'exemple du Cheval gravé de la salle Hillaire (cf. figure 4.4, p. 119), pour lequel nous avons effectué quatre acquisitions de stéréophotométrie en estimant l'éclairage à l'aide de deux sphères maintenues au bout d'une perche. Bien entendu, les quatre champs de normales ont dû être exprimés dans un repère commun pour pouvoir être fusionnés.

Cette solution fonctionne bien avec un dispositif étalonné tel qu'un dôme de RTI, alors que son déploiement est plus contraint, dans cet exemple, par la présence des deux sphères d'étalonnage, qui sont visibles dans les images et risquent de dégrader les résultats.

Intégration des normales guidée par les points 3D du SfM

Une autre idée consiste à contraindre l'intégration des normales à s'appuyer sur les points 3D obtenus par SfM. Parmi les méthodes d'intégration, celles qui utilisent une formulation variationnelle permettent facilement d'imposer la profondeur en certains points [203], ce qui d'ailleurs détermine l'échelle des cartes de profondeur produites. Un procédé similaire consiste à imposer cette contrainte non pas *a priori*, mais *a posteriori* : une fois les cartes de profondeur calculées, celles-ci sont corrigées dans les basses fréquences par le résultat de la photogrammétrie [136].

1. https://www.youtube.com/watch?v=Aly65Guka_w&ab_channel=PiotrFoxWysocki

4.1. FUSION DES APPROCHES GÉOMÉTRIQUE ET PHOTOMÉTRIQUE

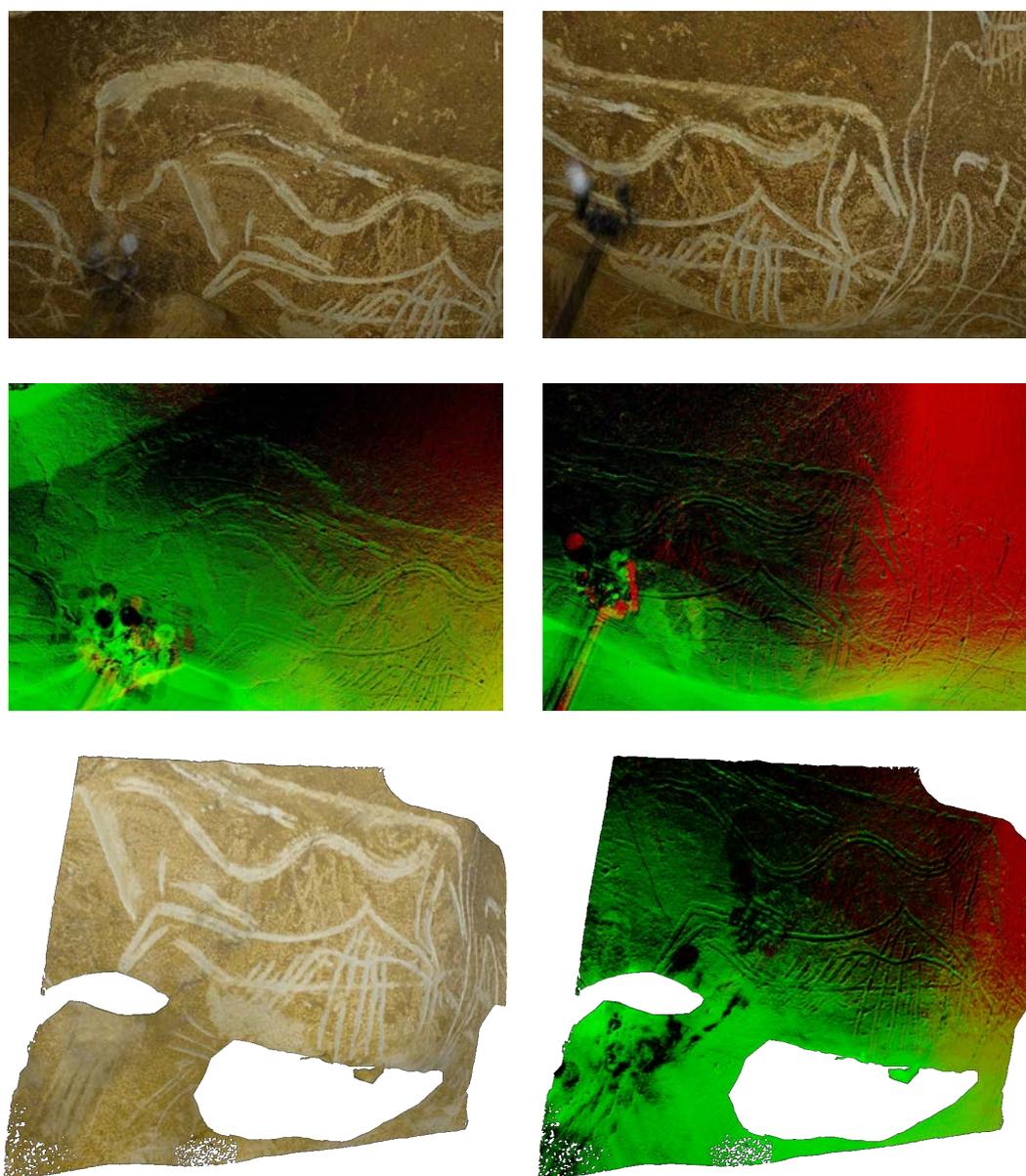


FIGURE 4.4 – Cheval gravé de la salle Hillaire (grotte Chauvet). Ligne du haut : deux des quatre cartes d'albédo estimées par stéréophotométrie, en utilisant une paire de sphères maintenues au bout d'une perche pour étalonner l'éclairage. Ligne du milieu : deux des quatre champs de normales estimés par le même procédé. Ligne du bas : maillage obtenu par photogrammétrie, sur lequel est plaquée soit la fusion des cartes d'albédo (à gauche), soit la fusion des champs de normales (à droite).

Ces deux voies sont toutefois limitées par la quantité de données à manipuler lors de l'intégration des normales. En effet, les matrices étant de grande dimension, nous n'avons pu traiter des images comportant plus d'un million de pixels. Mais outre ce problème de mémoire, l'intégration de normales, contrôlée ou non par les points du SfM, présente une autre limitation majeure : sa difficulté à restituer les discontinuités de profondeur.

Générer les cartes de profondeur du MVS par stéréophotométrie

Une autre piste, que nous n'avons finalement pas retenue, consiste à remplacer une des étapes du pipeline de photogrammétrie. Au lieu de calculer une carte de profondeur par MVS pour chaque vue, nous calculons ces cartes de profondeur par stéréophotométrie [171]. Malheureusement, la difficulté, déjà citée ci-dessus, de l'intégration des normales guidée par le SfM, nous empêche d'obtenir des cartes de profondeur sans biais dans les basses fréquences.

Partant de ce constat, il nous a paru pertinent de réaliser des acquisitions de stéréophotométrie sans sphère d'étalonnage, en postulant que les champs de normales estimés puissent comporter moins de biais dans les basses fréquences.

4.2 Une méthode originale d'estimation locale de l'éclairage

L'encombrement d'un dispositif étalonné tel qu'un dôme de RTI, aussi bien que la nécessité de positionner une ou plusieurs sphères d'étalonnage dans le champ de la caméra, constituent des contraintes lourdes. Pour nous en affranchir, nous allons nous servir de la scène 3D elle-même pour étalonner l'éclairage.

4.2.1 Une nouvelle méthode de stéréophotométrie

Supposons que nous disposions d'une reconstruction 3D fidèle à l'original dans les basses fréquences, obtenue par exemple par photogrammétrie, dont nous déduisons un ensemble de normales $\mathbf{n}(\mathbf{p})$. Nous allons chercher à inverser le modèle de formation de l'image afin de récupérer une estimation de l'éclairage, puis nous réinjecterons cette estimation dans un algorithme de stéréophotométrie calibrée pour ré-estimer plus densément et plus précisément les normales.

Malheureusement, la connaissance de la normale $\mathbf{n}(\mathbf{p})$ en un certain nombre de points ne suffit pas à estimer l'éclairage, car la réflectance $\rho(\mathbf{p})$ est également inconnue. En effet, si la réflectance d'une sphère d'étalonnage de couleur uniforme est connue (à un facteur près), il n'en va pas de même pour une scène 3D quelconque. Ce problème peut être contourné si l'on sait identifier des points possédant la même réflectance [118, 105], mais cela n'est pas toujours possible. Nous proposons d'estimer conjointement l'éclairage et la réflectance, comme cela a déjà été proposé, par exemple, dans [172].

Ce problème d'optimisation conjointe est facile à résoudre sous l'hypothèse lambertienne, car la réflectance, qui se résume alors à l'albédo, devient indépendante de l'éclairage incident. Par conséquent, dans une configuration de stéréophotométrie à $N \geq 3$ images et P pixels, nous disposons de NP observations pour estimer N vecteurs d'éclairage et P

albédos. En supposant que chaque éclairage est directionnel, c'est-à-dire caractérisé par un vecteur $\mathbf{s}^i \in \mathbb{R}^3$, $i \in \{1, \dots, N\}$, le modèle lambertien s'écrit :

$$I^i(\mathbf{p}) = \rho(\mathbf{p}) \max\{\mathbf{n}(\mathbf{p}) \cdot \mathbf{s}^i, 0\} \quad (4.1)$$

où $I^i(\mathbf{p})$ est le niveau de gris en \mathbf{p} , $\rho(\mathbf{p})$ l'albédo du point 3D qui lui est conjugué, et $\mathbf{n}(\mathbf{p})$ la normale unitaire en ce point.

En notant \bar{I}^i la photographie de l'objet sous le $i^{\text{ème}}$ éclairage, et I^i sa valeur prédite par le modèle lambertien (4.1), cette estimation conjointe peut être formulée comme la minimisation de l'expression suivante :

$$\mathcal{L}(\mathbf{s}^i, \rho) = \mathbb{E}_{\mathbf{p}} \left[\sum_{i=1}^N \mathcal{H} \left(I^i(\mathbf{p}) - \bar{I}^i(\mathbf{p}) \right) \right] \quad (4.2)$$

où \mathcal{H} désigne la *fonction de perte de Huber*, et $\mathbb{E}_{\mathbf{p}}$ l'espérance calculée seulement sur un ensemble aléatoire de pixels \mathbf{p} , afin de limiter la charge de calcul.

Cependant, dans la majorité des acquisitions *in situ*, l'hypothèse d'un éclairage directionnel n'est pas réaliste, en raison de contraintes matérielles inhérentes et de la distance entre la source lumineuse et la scène. Cette approximation du modèle d'éclairage est en grande partie responsable de l'écart angulaire dans les basses fréquences sur les normales estimées par stéréophotométrie, bien que des techniques récentes, dites universelles [126, 110], soient parvenues à atténuer considérablement ce biais.

Pour réduire les écarts angulaires dans les basses fréquences, nous pourrions supposer que chaque vecteur d'éclairage varie spatialement, à la fois en direction et en intensité, et donc le désigner par $\mathbf{s}^i(\mathbf{p})$. Malheureusement, l'évaluation de $\mathbf{s}^i(\mathbf{p})$ en chaque pixel \mathbf{p} constitue un problème mal posé, qui nécessite d'introduire un *a priori*. Il est raisonnable de supposer que l'éclairage varie moins vite que le relief de la scène ou sa couleur. Plutôt que de recourir à un terme de régularisation *ad hoc*, nous préférons introduire un interpolant linéaire $\mathbf{s}^i(\mathbf{p})$ sur une grille, dont les paramètres $\theta^i \in \mathbb{R}^{3Q}$ caractérisent Q vecteurs d'éclairage définis en Q points de contrôle, comme cela est illustré sur la figure 4.5 (p. 122).

En pratique, les paramètres de la grille d'interpolation sont également optimisés, afin de mieux prendre en compte les variations d'éclairage. L'expression (4.2) est donc optimisée vis-à-vis de tous les paramètres d'éclairage et des valeurs de l'albédo. Pour ce faire, nous utilisons la descente de gradient stochastique avec élan de la méthode Adam [138]. Les albédos sont initialisés par la médiane des images, les éclairages par une estimation en moindres carrés sous l'hypothèse directionnelle, et les points de contrôle forment une grille régulière.

Une fois les éclairages estimés à partir d'un certain nombre de normales obtenues par photogrammétrie, nous pouvons les réinjecter dans un algorithme de stéréophotométrie calibrée pour ré-estimer les normales, en utilisant par exemple la fonction de perte de Huber.

4.2.2 Comparaison multimodale

Dans le chapitre 2, nous avons comparé les techniques de numérisation classiques que sont la photogrammétrie et le scanner à lumière structurée. Ces deux techniques fournissent

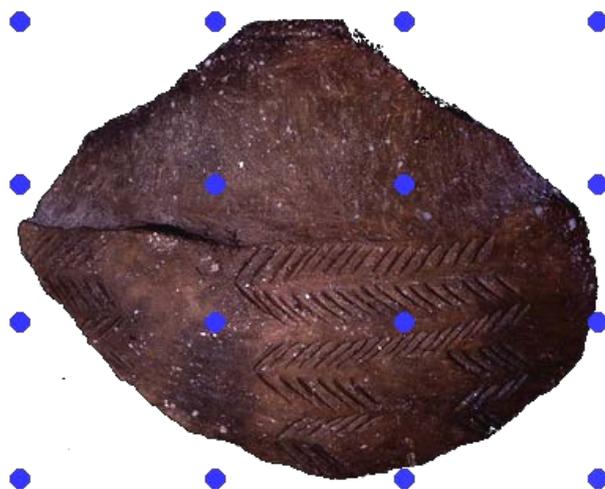


FIGURE 4.5 – Grille d’interpolation utilisée pour l’estimation locale de l’éclairage. Chaque point bleu représente un des Q points de contrôle.

des résultats similaires, qui restituent bien la forme globale des objets. Cependant, nous avons constaté une dégradation de la résolution, qui se traduit par la perte de détails qui apparaissent pourtant sur les photographies en lumière rasante.

La stéréophotométrie est une méthode de numérisation capable de conserver l’information des hautes fréquences. À partir d’un même jeu de données multiéclairage, deux variantes ont été déployées : stéréophotométrie calibrée et stéréophotométrie non calibrée (cf. figure 4.6, p. 123).

Sans connaissance préalable de l’éclairage, il est possible d’utiliser un algorithme de stéréophotométrie non calibrée, mais il est connu que ce problème fondamentalement mal posé [37, 113] nécessite d’introduire un a priori [105, 229, 252]. L’approche que nous allons présenter dans la section 4.2.3 consiste à utiliser la scène elle-même comme mire d’étalonnage. Cette idée a déjà été exploitée dans [118], mais en faisant l’hypothèse qu’un certain nombre de points de la scène possèdent le même albédo, ce qui peut être difficile à garantir en pratique, et dont nous allons essayer de nous dispenser.

Notons enfin que les approches neuronales de stéréophotométrie non calibrée supposent généralement l’éclairage directionnel. Un premier réseau détermine l’éclairage [59], qui est reversé dans une méthode de stéréophotométrie calibrée, mais cette approche en deux étapes échoue si l’hypothèse directionnelle est invalide. La stéréophotométrie « universelle », qui a été proposée très récemment pour limiter ce risque [125, 126], s’adapte à une grande variété de conditions d’éclairage par apprentissage profond. Il s’agit sans doute aujourd’hui de la méthode de stéréophotométrie non calibrée la plus efficace.

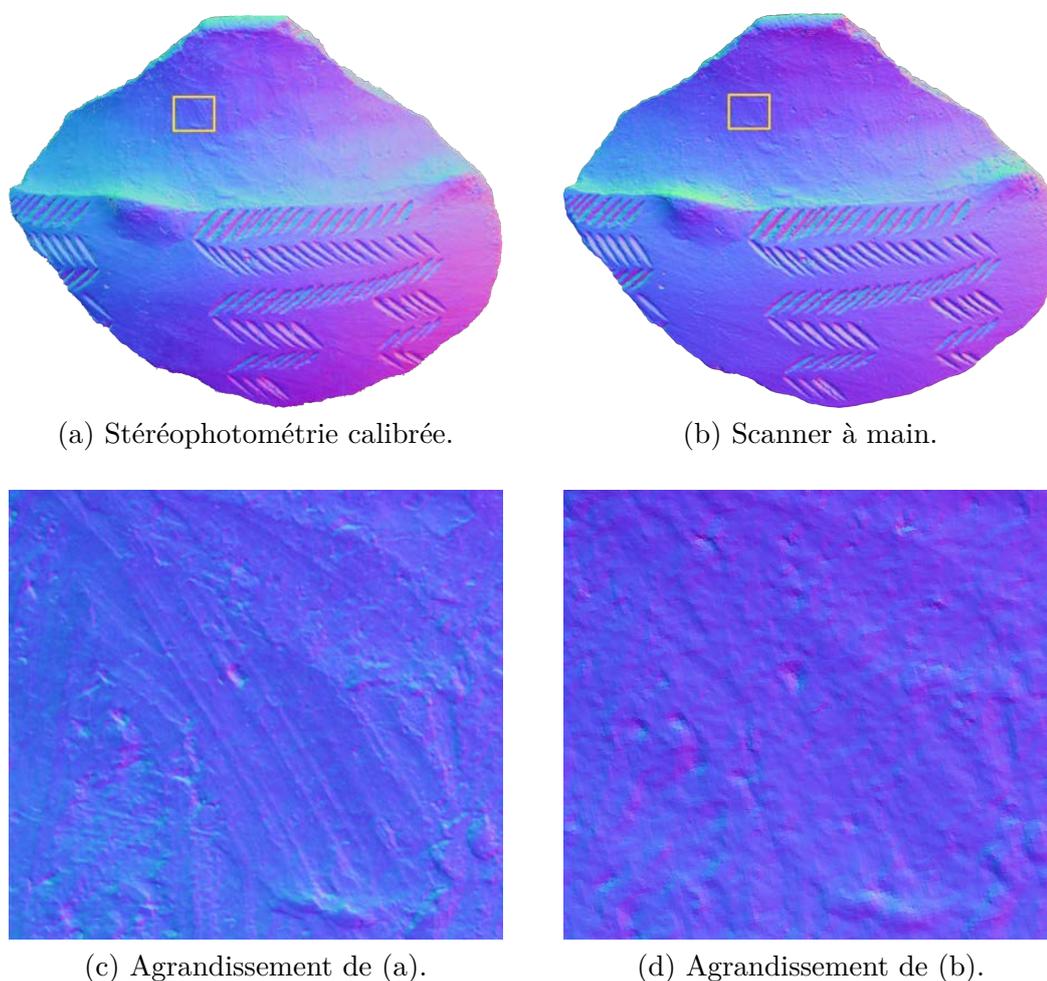


FIGURE 4.6 – Tesson de céramique du musée du Pech Merle (cf. figure 2.18-c, p. 74). (a) Champ de normales estimé par stéréophotométrie calibrée (CPS). (b) Champ de normales estimé à partir du modèle 3D du scanner à main. La forme générale de l'objet est moins bien rendue par CPS, probablement en raison d'un manque de précision dans l'éta-lonnage de l'éclairage, ce qui a pour effet de « bomber » le relief. En revanche, les détails de la surface sont moins bien rendus par le scanner, qui a tendance à lisser le relief, comme le montrent les agrandissements (c) et (d) de la zone délimitée en blanc : l'empreinte digitale que l'on distingue nettement sur (c) est beaucoup moins perceptible sur (d).

Définition d'une métrique

Les méthodes de reconstruction 3D géométriques produisent des résultats fiables dans les basses fréquences. Les surfaces reconstruites sont proches de celles acquises par un scanner portable, qui sont généralement utilisées comme vérité terrain. Cependant, la figure 4.6 (p. 123) montre que la stéréophotométrie calibrée (CPS, pour *calibrated photometric ste-*

reo) produit un résultat bien plus résolu que celui du scanner, même si la forme globale de l'objet est moins bien rendue. Ceci est dû au manque de précision de l'estimation de l'éclairage, qui a pour effet de « bomber » le relief. Il semble donc que les informations de relief recueillies par un scanner à main et par CPS soient complémentaires, d'où l'idée d'évaluer les basses fréquences d'une reconstruction 3D relativement au résultat du scanner, et les hautes fréquences relativement au résultat obtenu par CPS.

Les champs de normales obtenus par CPS pourraient être intégrés, de manière à effectuer les comparaisons entre cartes de profondeur, mais cela comporte deux difficultés. D'une part, l'intégration d'un champ de normales ne peut être réalisée qu'à un facteur d'échelle près. D'autre part, les discontinuités de profondeur étant difficiles à restituer lors de l'intégration, cela risquerait de fausser la comparaison [53]. C'est pourquoi nous préférons effectuer les comparaisons entre champs de normales (cf. figure 4.6, p. 123), qui sont d'ailleurs utilisés en archéologie pour la visualisation des reliefs [139].

Afin d'évaluer la précision des basses fréquences d'une reconstruction 3D, les détails doivent être supprimés. À cette fin, les normales sont lissées à l'aide d'un filtre gaussien normalisé défini comme suit :

$$F_\sigma(\mathbf{n}) = \frac{\mathbf{n} * G_\sigma}{\|\mathbf{n} * G_\sigma\|} \quad (4.3)$$

où $*$ désigne l'opérateur de convolution bidimensionnel et σ l'écart-type du filtre gaussien (égal à 20 pixels, dans notre étude). La mesure de l'erreur $E_{\text{LF}}(\mathbf{p})$ dans les basses fréquences en un pixel \mathbf{p} est alors définie comme l'écart angulaire après filtrage entre $\mathbf{n}(\mathbf{p})$ et la normale de référence $\mathbf{n}_{\text{LF}}(\mathbf{p})$ fournie par le scanner :

$$E_{\text{LF}}(\mathbf{p}) = \arccos \{F_\sigma(\mathbf{n}_{\text{LF}})(\mathbf{p}) \cdot F_\sigma(\mathbf{n})(\mathbf{p})\} \quad (4.4)$$

Quant à l'erreur dans les hautes fréquences, elle ne doit pas être biaisée par un écart dans les basses fréquences. Pour cette raison, nous recalons préalablement la normale $\mathbf{n}(\mathbf{p})$ avec la normale de référence $\mathbf{n}_{\text{HF}}(\mathbf{p})$ dans les hautes fréquences (obtenue par CPS), après recalage local des deux surfaces, ce qui revient à appliquer une rotation $\mathbf{R}(\mathbf{p})$ estimée par minimisation de l'écart angulaire dans les basses fréquences :

$$\mathbf{R}(\mathbf{p}) = \underset{\mathbf{R} \in \text{SO}(3)}{\operatorname{argmin}} \sum_{\mathbf{q} \in \nu(\mathbf{p})} \|\mathbf{R} F_\sigma(\mathbf{n}_{\text{HF}})(\mathbf{q}) - F_\sigma(\mathbf{n})(\mathbf{q})\|^2 \quad (4.5)$$

où $\nu(\mathbf{p})$ désigne un voisinage de \mathbf{p} suffisamment grand pour éviter les configurations dégénérées (dans notre cas, $\nu(\mathbf{p})$ contient les 25 plus proches voisins de \mathbf{p} , au sens de la distance de Manhattan). Le problème d'optimisation (4.5) peut être résolu par exemple par SVD décomposition en valeurs singulières [222]. La mesure de l'erreur $E_{\text{HF}}(\mathbf{p})$ dans les hautes fréquences en un pixel \mathbf{p} est alors définie comme l'écart angulaire entre $\mathbf{n}(\mathbf{p})$ et la normale de référence $\mathbf{n}_{\text{HF}}(\mathbf{p})$ obtenue par CPS, après recalage :

$$E_{\text{HF}}(\mathbf{p}) = \arccos \{\mathbf{R}(\mathbf{p}) \mathbf{n}_{\text{HF}}(\mathbf{p}) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{p})\} \quad (4.6)$$

La figure 4.7 (p. 125) illustre ces mesures sur le tessou de céramique du musée du Pech Merle. Nous disposons donc dorénavant d'un outil de comparaison des résultats de reconstruction 3D dans les deux gammes de fréquences.

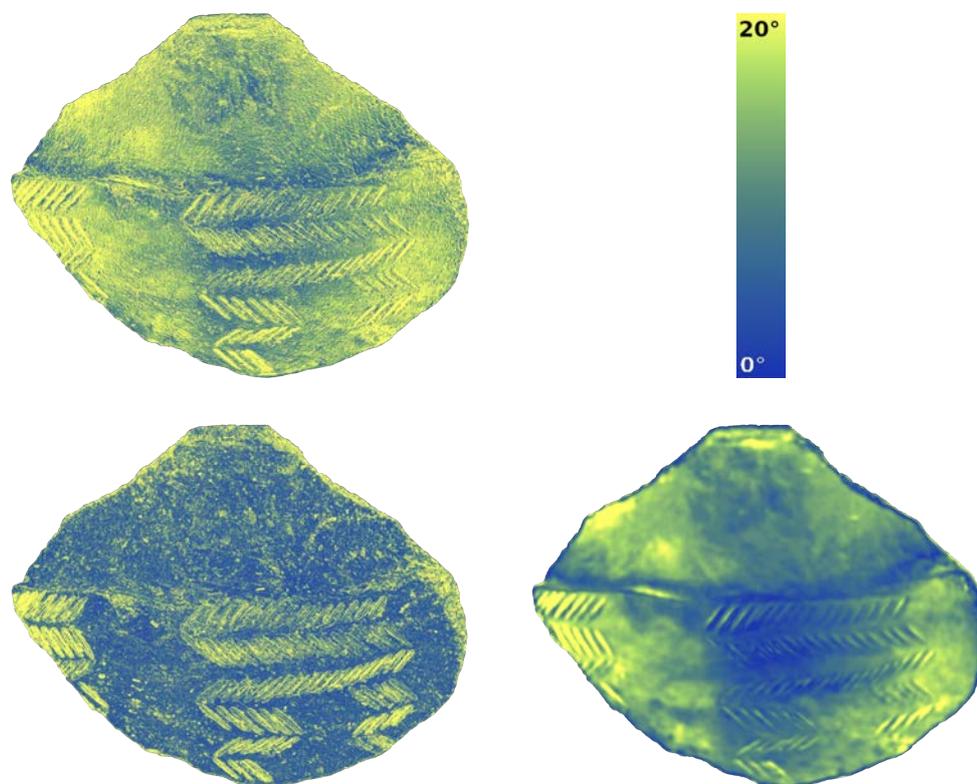


FIGURE 4.7 – Tesson de céramique du musée du Pech Merle. Ligne du haut : écarts angulaires entre les résultats du scanner et de la CPS; échelle des écarts angulaires en fausses couleurs (exprimée en degrés). Ligne du bas : écarts angulaires dans les hautes fréquences, qui mettent en évidence les erreurs du scanner; écarts angulaires dans les basses fréquences, qui mettent en évidence les erreurs de la CPS.

Comparaison des méthodes de reconstruction 3D

Dans le chapitre 2, nous avons sélectionné un corpus d'objets archéologiques provenant du musée de la Préhistoire du Pech Merle, dans le Lot. Puisque les matériaux de ces objets opaques et mats sont manifestement conformes au modèle lambertien, nous utilisons comme référence dans les hautes fréquences, notée VT pour « vérité terrain », la reconstruction 3D obtenue par une méthode de stéréophotométrie calibrée (CPS) robuste [127], à partir des 105 photographies acquises par un dôme de RTI calibré. Pour souligner l'importance de l'étalonnage, nous fournissons également les résultats de deux méthodes de stéréophotométrie non calibrée par apprentissage profond considérées comme des références, à savoir SDM [126] et UniMSPS [110].

En ce qui concerne les méthodes de reconstruction 3D géométriques, les résultats du scanner portable servent de référence dans les basses fréquences (VT), auxquels nous comparons ceux de NeuS2 [248] et du logiciel Metashape.

Comme nous l’avons expliqué plus haut, les résultats du scanner servent de référence pour l’évaluation dans les basses fréquences, et ceux de la CPS pour l’évaluation dans les hautes fréquences. Les évaluations sont effectuées en mesurant l’écart angulaire entre normales. Toutes les champs de normales sont stockés sous forme de valeurs à virgule flottante de 16 bits, affichées en fausses couleurs, en utilisant la convention RVB standard (R pour la direction horizontale, G pour la direction verticale et B pour l’axe de la caméra). Comme certaines méthodes fournissent des résultats sous forme de maillages, ceux-ci sont recalés afin d’extraire le champ de normales correspondant à la pose de la stéréophotométrie.

Les résultats qualitatifs dans les hautes fréquences sont présentés sur la figure 4.8 (p. 126). Comme prévu, les méthodes de reconstruction 3D photométriques sont bien meilleures que leurs homologues géométriques. Ceci est confirmé pour l’ensemble des objets par les résultats quantitatifs du tableau 4.1 (p. 127).

Les résultats qualitatifs dans les basses fréquences sont affichés sur la figure 4.9 (p. 127). Comme prévu, les méthodes géométriques sont plus performantes, ce qui est confirmé quantitativement par les résultats du tableau 4.2. Bien que les méthodes de stéréophotométrie non calibrée réduisent partiellement le biais inhérent à l’étalonnage de l’éclairage, les résultats des méthodes photométriques sont moins bons que ceux des méthodes géométriques.

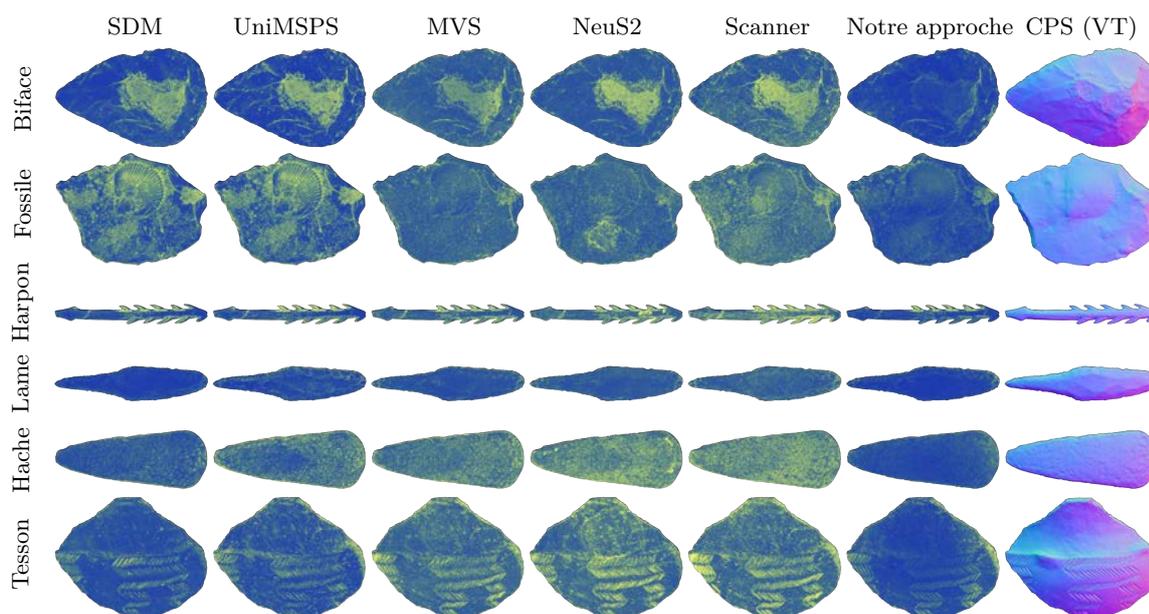


FIGURE 4.8 – Cartes des écarts angulaires dans les hautes fréquences, en utilisant comme référence le résultat de la CPS. Les méthodes géométriques (MVS, NeuS2 et scanner) restituent mal les détails du relief. En outre, la nouvelle méthode de stéréophotométrie décrite dans la section 4.2.2 (p. 121) améliore sensiblement les méthodes de stéréophotométrie non calibrée par apprentissage profond (SDM et UniMSPS).

4.2. UNE MÉTHODE ORIGINALE D'ESTIMATION LOCALE DE L'ÉCLAIRAGE

	SDM	UniMSPS	MVS	NeuS2	Scanner	Notre approche
Biface	5.5	5.5	7.1	6.9	8.3	3.1
Fossile	4.5	8.3	6.8	7.1	8.7	4.7
Harpon	7.2	7.8	8.9	10.1	12.1	5.9
Lame	2.5	4.1	4.6	5.3	6.3	2.4
Hache	5.6	8.3	9.2	11.1	11.4	4.1
Tesson	4.8	5.9	8.4	9.6	9.5	4.4

TABLE 4.1 – Écarts angulaires moyens (en degrés) dans les hautes fréquences, relativement au résultat de la CPS. Les méthodes photométriques (SDM et UniMSPS) sont bien plus performantes que les méthodes géométriques (MVS, NeuS2 et scanner), qui ne restituent aucun des détails géométriques. Cependant, notre approche mixte photométrique/géométrique améliore encore les résultats.

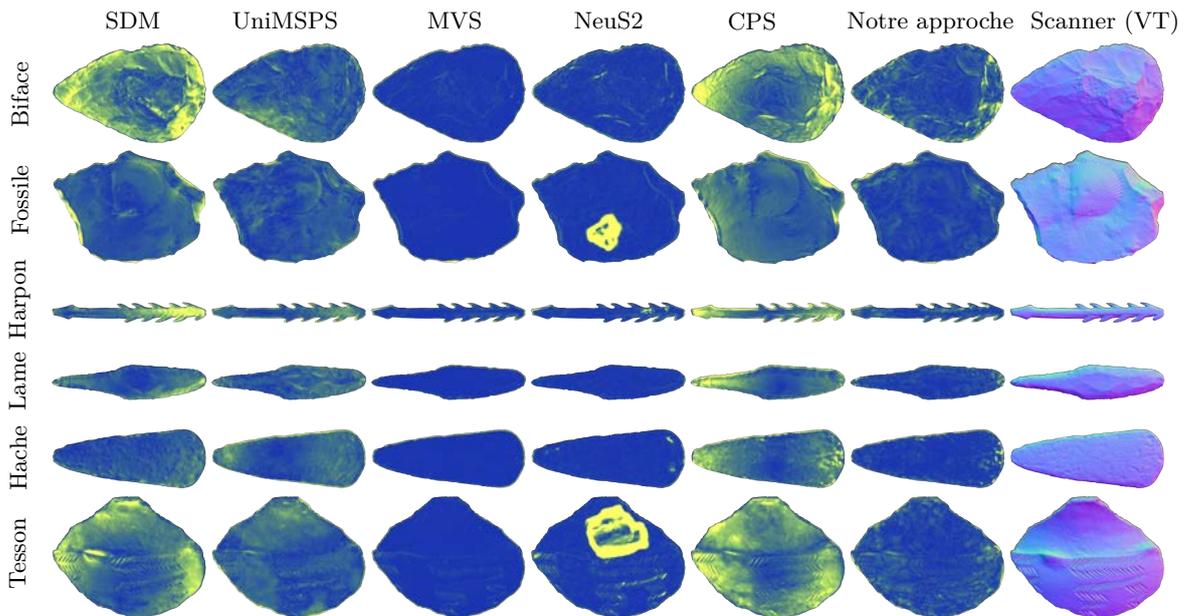


FIGURE 4.9 – Cartes des écarts angulaires dans les basses fréquences, en utilisant comme référence le résultat du scanner. Les méthodes photométriques (SDM, UniMSPS et CPS) présentent un biais dans les basses fréquences, qui est fortement atténué par la nouvelle méthode de stéréophotométrie que nous décrivons dans la section 4.2.2 (p. 121), tout en préservant les détails du relief. Les résultats de NeuS2 comportent quelques irrégularités localisées qui faussent l'écart angulaire moyen.

Le tableau 4.1 montre que les normales de la méthode que nous proposons sont comparables, dans les hautes fréquences, aux algorithmes de stéréophotométrie non calibrée

CHAPITRE 4. VERS UNE NOUVELLE CHAÎNE OPÉRATOIRE DE NUMÉRISATION 3D

	SDM	UniMSPS	CPS	MVS	NeuS2	Notre approche
Biface	11.5	5.8	10.8	1.5	2.2	5.0
Fossile	5.5	4.4	7.2	1.1	3.4	3.0
Harpon	10.8	7.8	12.2	3.3	3.4	5.3
Lame	6.3	6.0	8.2	1.0	1.1	2.8
Hache	5.0	6.2	7.8	1.1	1.3	2.4
Tesson	9.1	5.9	10.8	1.0	7.1	3.6

TABLE 4.2 – Écart angles moyens (en degrés) dans les basses fréquences, relativement au résultat du scanner. Notre approche mixte géométrique/photométrique fournit des résultats comparables, dans les basses fréquences, à ceux des méthodes géométriques (MVS et NeuS2), bien meilleurs en tout cas que les résultats des méthodes de stéréophotométrie classiques (SDM, UniMSPS et CPS).

les plus récents, bien que notre nouvelle méthode n’ait recours à aucune forme d’apprentissage. En outre, elle les surpasse largement dans les basses fréquences (cf. tableau 4.2). Cela tend à montrer que, malgré la remarquable efficacité des méthodes les plus récentes de stéréophotométrie non calibrée par apprentissage profond, les méthodes calibrées restent supérieures, à condition bien sûr de limiter le biais d’estimation de l’éclairage.

4.2.3 Un nouveau protocole d’acquisition adapté aux grottes

Notre nouvelle approche permet de grandement faciliter l’acquisition de données de stéréophotométrie *in situ*. L’utilisation d’une sphère n’étant plus nécessaire pour étalonner l’éclairage, nous ne sommes plus contraints à positionner une mire dans le champ de la caméra, ni gênés par l’encombrement d’un dispositif étalonné. Nous avons validé ce changement de protocole de numérisation 3D dans deux grottes différentes.

Grotte du Pech Merle

La grotte du Pech Merle, qui a été découverte à Cabrerets dans le Lot en 1922, a connu deux phases d’étude principales, d’abord par l’abbé Lemozi [153], puis par Michel Lorblanchet [158]. Notre intervention s’est concentrée sur le panneau des Chevaux ponctués (3,6 m de large sur 1,5 m de haut).

Nous avons effectué une acquisition photogrammétrique globale, puis une session d’acquisition stéréophotométrique. Dans notre protocole, nous avons utilisé une sphère pour pouvoir comparer les normales obtenues par différentes méthodes [64]. La figure 4.10 (p. 129) montre les champs de normales estimés par SfM, par MVS et par notre nouvelle méthode mixte, pour laquelle les normales du SfM ont servi à étalonner l’éclairage.

4.2. UNE MÉTHODE ORIGINALE D'ESTIMATION LOCALE DE L'ÉCLAIRAGE

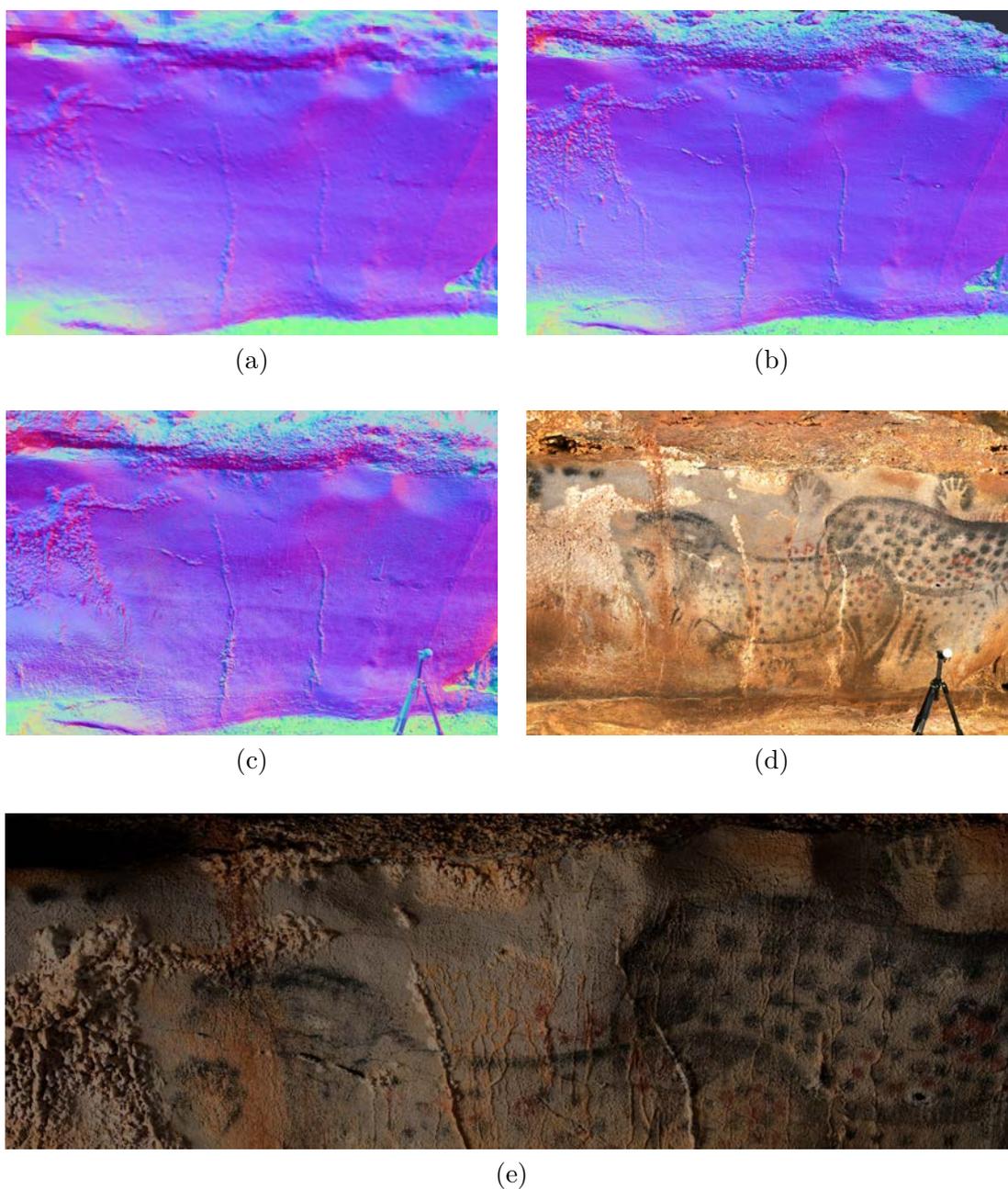


FIGURE 4.10 – Panneau des Chevaux ponctués (grotte du Pech Merle). Champs de normales estimés : (a) par SfM ; (b) par MVS ; (c) par notre nouvelle méthode (la sphère n'a pas été utilisée pour étalonner l'éclairage). (d) Albedo estimé par stéréophotométrie. (e) Rendu orthophotographique du modèle 3D par Blender, en plaquant sur le maillage du MVS l'albédo (d), sous un éclairage rasant venant de la gauche.

Grotte du Mas d'Azil

Forts de ce nouveau protocole d'étalonnage de l'éclairage par la scène elle-même, nous avons voulu le tester dans un programme de recherche en cours, afin de répondre aux questions liées à l'intégration dans le travail d'une équipe de recherche.

Dans l'étude récente de l'art pariétal de la grotte du Mas d'Azil, en Ariège, nous avons concentré nos efforts sur quelques panneaux de la galerie du Masque. Ce lieu présente de nombreuses contraintes, de par la nature de ses représentations comportant des dizaines de gravures fines, et à cause des difficultés d'accès dans une galerie particulièrement exiguë (cf. figure 4.11, p. 130).



FIGURE 4.11 – Conditions d'acquisition difficiles dans la galerie du Masque de la grotte du Mas d'Azil : la mise en œuvre de la stéréophotométrie doit s'adapter aux pratiques et à la réalité du terrain.

Nous avons effectué une acquisition multiéclairage du Masque, qui représente un visage de profil, en adaptant la distance du flash à la morphologie de la paroi. Le flash est utilisé en mode TTL (*through the lens*), ce qui permet d'ajuster l'intensité de la lumière émise sans modifier les paramètres de l'appareil photographique. La figure 4.12 (p. 131) confirme bien que les résultats obtenus par stéréophotométrie facilitent la lecture des gravures, en comparaison des résultats de la photogrammétrie.

Ce nouveau protocole d'acquisition combinant photogrammétrie et stéréophotométrie (cf. figure 4.13, qui a été validé sur d'autres panneaux de cette grotte, p. 131), ouvre des perspectives prometteuses dans la création de supports pour le relevé d'art pariétal. Il pourrait révolutionner les pratiques à plusieurs titres, par la rapidité de l'acquisition, par l'utilisation d'un matériel connu des archéologues, et par la simplicité du procédé, tout en offrant les qualités présentées dans le chapitre 3. Il sera poursuivi et étendu au reste de la cavité.

4.2. UNE MÉTHODE ORIGINALE D'ESTIMATION LOCALE DE L'ÉCLAIRAGE

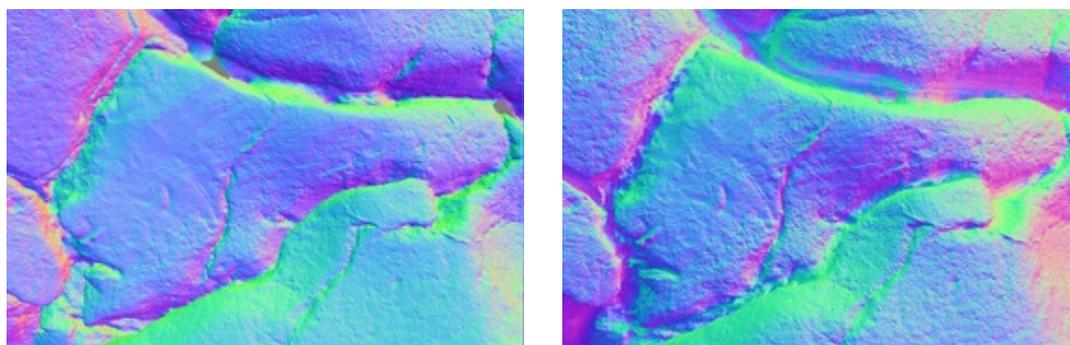


FIGURE 4.12 – Galerie du Masque. Champs de normales estimés par photogrammétrie (à gauche) et par stéréophotométrie (à droite), en utilisant la même distance d'acquisition.

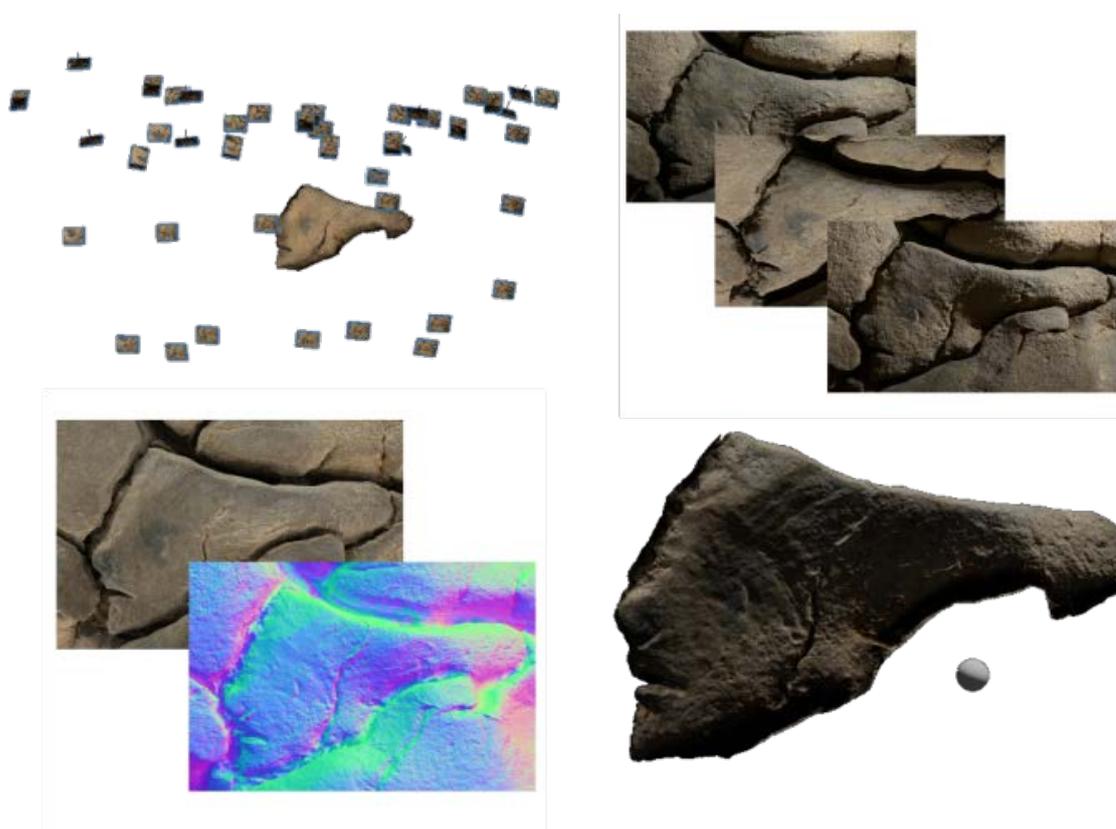


FIGURE 4.13 – Chaîne de numérisation 3D du Masque (grotte du Mas d'Azil). De haut en bas et de gauche à droite : acquisition photogrammétrique à éclairage constant ; acquisition multiéclairage ; albédo et normales estimés par stéréophotométrie, après étalonnage de l'éclairage par la scène elle-même ; ré-éclairage dynamique de la scène 3D après recalage du résultat de la stéréophotométrie sur le maillage 3D obtenu par photogrammétrie.

4.3 Intégration de normales multivue

Un dernier objectif consiste à montrer que la stéréophotométrie multivue peut constituer une véritable méthode de reconstruction 3D.

Pour valider la pertinence de la stéréophotométrie en tant que technique de numérisation 3D du patrimoine, nous devons comparer cette méthode avec celles qui sont actuellement utilisées sur le terrain. Pour ce faire, un obstacle non négligeable réside dans la difficulté à obtenir la vérité terrain de vestiges archéologiques, puis à fusionner les résultats ou à les repositionner dans un repère 3D commun, afin de pouvoir les comparer [137].

Plusieurs modalités sont testées dans notre étude : la lasergrammétrie (scanner TLS), le scanner manuel à projection de franges, la photogrammétrie, la stéréophotométrie calibrée, la stéréophotométrie multivue. Pour réaliser des comparaisons quantitatives, nous veillons à ce que le même équipement soit utilisé pour toutes les acquisitions photographiques, et que les différentes modalités de numérisation 3D soient utilisées lors d'une même session. Nous comparons les méthodes soit sur le terrain, soit dans des conditions contrôlées, l'objectif final de cette étude étant de proposer une chaîne de traitement fonctionnelle, orientée vers la pratique et efficace.

4.3.1 Études de cas

Paroi de grotte ornée

La première étude de cas concerne le cheval numéro 4 du panneau des Chevaux de la grotte Chauvet, en Ardèche, un site du patrimoine mondial de l'UNESCO. Cette œuvre d'art rupestre peut être examinée qualitativement, sur la base d'une étude archéologique [82, 86]. En revanche, la variété des couvertures numériques sur une période de près de vingt ans rend l'analyse quantitative difficile : photographies et relevés effectués entre 1999 et 2011 (cf. figure 1.6, p. 20), lasergrammétrie par TLS (nous utilisons le relevé de 2016 par les géomètres de Perazio Engineering pour la Conservation), photographies pour la photogrammétrie (2024), photographies pour la stéréophotométrie avec une sphère d'étalonnage (2022) ou avec un dôme de RTI (2023).

Cette œuvre majeure de l'art pariétal, datant de près de 38 000 ans, présente plusieurs défis spécifiques à la numérisation. Elle a été préservée grâce à son emplacement dans une grotte, ce qui nécessite l'utilisation d'un éclairage alimenté par batterie et d'équipements peu encombrants, non invasifs et capables de résister à une forte humidité. Une autre spécificité tient à l'œuvre elle-même, qui a été créée sur un mur de calcaire recouvert d'une pellicule d'argile de couleur ocre. Elle est composée d'une couche de peinture à base de charbon de bois et d'une accentuation contrastée des contours, réalisée à l'aide de fines gravures infra-millimétriques. Ce travail rapide et précis est particulièrement visible autour du nez et de la bouche du cheval numéro 4. Enfin, l'ensemble est recouvert d'un voile de calcite qui agit comme un vernis sur le mur. La surface de notre fenêtre d'étude mesure moins d'un mètre carré.

Figurine en céramique

La deuxième étude de cas concerne une petite pièce en céramique (5,7 cm sur 4,2 cm et 1,4 cm d'épaisseur) exposée au musée Saint-Raymond de Toulouse. Datant du IV^e siècle av. J.-C. et provenant de Chypre, elle représente une tête de femme avec un calathos, et est cassée au niveau du cou. « *Au-dessus du front, les cheveux sont tirés symétriquement en bandes ondulées vers les tempes, sur la mitra (bandeau) marquée au centre d'une croix couchée. Ils sont surmontés d'un haut calathos (panier) constitué de rangées d'éléments végétaux stylisés* » [13]. Cet objet en terre cuite offre un double avantage, en termes de comparaison quantitative. Sa surface opaque et mate valide l'hypothèse lambertienne [77], ce qui limite les difficultés de numérisation. L'autre avantage est la finesse des détails de surface, qui fournit des informations sur la mise en forme et l'état de la surface.



FIGURE 4.14 – Tête chypriote en céramique (musée Saint-Raymond, Toulouse).

4.3.2 Méthodologie

Acquisition des données

Pour le panneau des Chevaux, les acquisitions ont été réalisées dans des buts différents et par plusieurs opérateurs. La difficulté réside dans le repositionnement de toutes les données dans un même repère 3D de référence correspondant au canevas topographique de la grotte.

L'acquisition principale à l'échelle de la cavité a été réalisée par lasergrammétrie. Deux phases d'acquisition ont eu lieu en 2010 et en 2016, à la demande de la Conservation. L'objectif était d'obtenir une empreinte numérique globale du site, avec des stations plus

CHAPITRE 4. VERS UNE NOUVELLE CHAÎNE OPÉRATOIRE DE NUMÉRISATION 3D

denses et rapprochées au niveau des panneaux principaux. Le nuage de points 3D de 2010 a été utilisé notamment pour la production de la réplique Chauvet 2 [238]. La deuxième numérisation, datant de 2016, a été réalisée pour répondre aux besoins d'une cartographie fine pour la conservation et la recherche. Ce dernier nuage a été choisi pour notre étude.

L'équipement utilisé est un scanner Zoller+Fröhlich 5010C, qui fonctionne sur le principe de la différence de phase. Pour les besoins de cette étude, seule la station la plus proche du panneau (cf. figure 4.15, p. 134), à une distance d'environ 3 m, a été utilisée, avec 43,3 millions de points 3D, afin d'éviter toute erreur entre les stations [41].



FIGURE 4.15 – Nuage de points 3D du panneau des Chevaux, obtenu avec un scanner TLS. Les niveaux de gris de l'intensité du signal sont sans rapport avec la couleur de la paroi. [Données provenant de Perazio Engineering, ministère de la Culture].

La deuxième acquisition a été réalisée par photogrammétrie, en utilisant la corrélation d'images dense. Plusieurs séances d'acquisition photographique avaient déjà été effectuées, notamment par l'équipe de recherche de la grotte Chauvet. Cependant, nous avons pris une nouvelle série de photographies en 2024 avec un appareil Nikon Z7 II en plein format, équipé d'un objectif à focale fixe de 50 mm, sous un éclairage provenant d'un ensemble de panneaux LED fixes éclairant la paroi de façon uniforme. Les principaux paramètres de l'appareil étaient l'ouverture à F/14, la sensibilité ISO à 100, pour des images de taille 8256×5504 (45,4 millions de pixels). Acquisées à une distance de 1,8 m, la GSD est estimée à $150 \mu\text{m}/\text{pixel}$.

La troisième acquisition a été réalisée en 2023 à l'aide d'un dôme de RTI comportant 105 LEDs, d'un diamètre de 50 cm, avec le même appareil photographique que précédemment, mais avec un objectif à focale fixe de 35 mm (cf. la photographie de gauche de la figure 4.16, p. 135). Avec une distance de prise de vue d'environ 40 cm, la GSD est égale à $50 \mu\text{m}/\text{pixel}$.

La quatrième et dernière acquisition correspond à une série de photographies prises sous la même pose, mais sous différents éclairages (cf. la photographie de droite de la figure 4.16, p. 135). Une sphère d'étalonnage a été positionnée près de la paroi, dans le champ de la caméra. Ces photographies ont été prises avec un appareil photographique



FIGURE 4.16 – Mise en œuvre de la numérisation par stéréophotométrie calibrée du panneau des Chevaux. À gauche : utilisation d'une sphère blanche (étalonnage a posteriori). À droite : utilisation d'un dôme de RTI (éclairage pré-étalonné).

Canon R5 équipé d'un objectif à focale fixe de 35 mm, à environ 1,6 m de la paroi, pour une GSD de 200 $\mu\text{m}/\text{pixel}$. La source de lumière est une LED éclairant en continu. Cette acquisition comprend 21 photographies.

Pour la tête chypriote, les acquisitions ont toutes été réalisées en 2024, en une seule journée, dans les réserves du musée Saint-Raymond de Toulouse. La première acquisition a été effectuée à l'aide d'un scanner à main Artec Spider. Selon le fabricant, cet instrument garantit une précision des points 3D et une résolution du maillage 3D allant, respectivement, jusqu'à 50 μm et 100 μm . Toutes les autres acquisitions ont été réalisées en utilisant des techniques photographiques, dans le but d'obtenir les meilleurs résultats possibles pour chaque modalité.

Comme dans la première étude de cas, nous avons appliqué des méthodes de reconstruction 3D photographiques de types géométrique et photométrique. Toutes les photographies ont été prises avec un appareil Nikon Z7 II équipé d'un objectif à focale fixe de 50 mm. La première acquisition, pour la photogrammétrie, comprend 48 photographies de la face avant, prises à une distance moyenne de 22 cm, pour une GSD estimée à 20 $\mu\text{m}/\text{pixel}$. La deuxième acquisition, destinée à la stéréophotométrie, comprend six séquences de 35 prises de vue avec un dôme de RTI, pour une GSD d'environ 25 $\mu\text{m}/\text{pixel}$. Lors de la première séquence, la scène comportait cinq sphères blanches, afin de pré-étalonner le dôme de RTI. Cinq autres séquences de la face avant de la tête chypriote ont ensuite été prises, sous cinq angles différents.

Traitement des données

L'acquisition par lasergrammétrie a été géoréférencée par la société de géomètres déjà mentionnée. Les nuages de points 3D ont été traités avec le logiciel Trimble Realworks [9] et exportés au format e57. Le nuage de points complet a été converti en maillage 3D à l'aide du logiciel Metashape 1.8 [2].

Les données du scanner à main ont été traitées avec le logiciel Artec Studio version 18 [3]. Parmi plusieurs centaines de cartes de profondeur, celles qui présentent une erreur supérieure à 100 μm ont été supprimées. Le maillage 3D, généré avec la meilleure résolution possible, a ensuite été exporté.

Les données de photogrammétrie ont été traitées avec le logiciel Agisoft Metashape. Le géoréférencement utilise une dizaine de points de référence obtenus à partir de l'acquisition par TLS. Dans le lot des photographies de photogrammétrie, il est intéressant d'intégrer les photographies destinées à la stéréophotométrie, prises avec la totalité des éclairages (cf. l'éclairage L^0 de la figure C.2, p. 145), puisque l'étape de SfM fournit les différentes poses de la caméra. Cela s'avère utile pour exprimer les reconstructions 3D des différentes méthodes photographiques dans un même repère 3D.

Nous utilisons ici plusieurs variantes de la stéréophotométrie monovue. Nous pouvons étalonner l'éclairage avec une sphère blanche positionnée dans le champ de la caméra, mais nous pouvons aussi utiliser un dôme de RTI dont l'éclairage est pré-étalonné. Par la suite, une même méthode de stéréophotométrie peut être appliquée aux deux types d'acquisition.

Comme nous l'avons déjà vu, il est également possible d'utiliser la scène 3D elle-même comme objet d'étalonnage de l'éclairage, à condition que les normales en un certain nombre de points de la scène soient connues. Par exemple, si l'utilisateur réalise une acquisition multivue suivie d'une acquisition multiéclairage, il est possible d'étalonner l'éclairage sans utiliser ni sphère blanche ni dôme de RTI, puisque le maillage obtenu par photogrammétrie est suffisamment fiable pour être utilisé comme mire d'étalonnage [64].

Comparaison des différentes méthodes

Afin de comparer les différentes méthodes de reconstruction 3D, il est nécessaire d'effectuer certains recalages. Par exemple, pour comparer les résultats obtenus avec le scanner à main et par photogrammétrie, les maillages obtenus sont recalés par ICP [39]. D'autre part, pour comparer un maillage triangulaire issu de la photogrammétrie avec un champ de normales obtenu par stéréophotométrie, nous calculons le champ de normales dérivé du maillage, dans le même repère de référence que l'acquisition stéréophotométrique.

4.3.3 Résultats et discussion

Panneau des Chevaux

La figure 4.17 (p. 137) montre trois reconstructions 3D de la tête du cheval numéro 4, présentées sous forme de champs de normales en représentation RVB, obtenus par lasergrammétrie, par photogrammétrie avec le logiciel Metashape, et par stéréophotométrie calibrée avec un dôme de RTI.

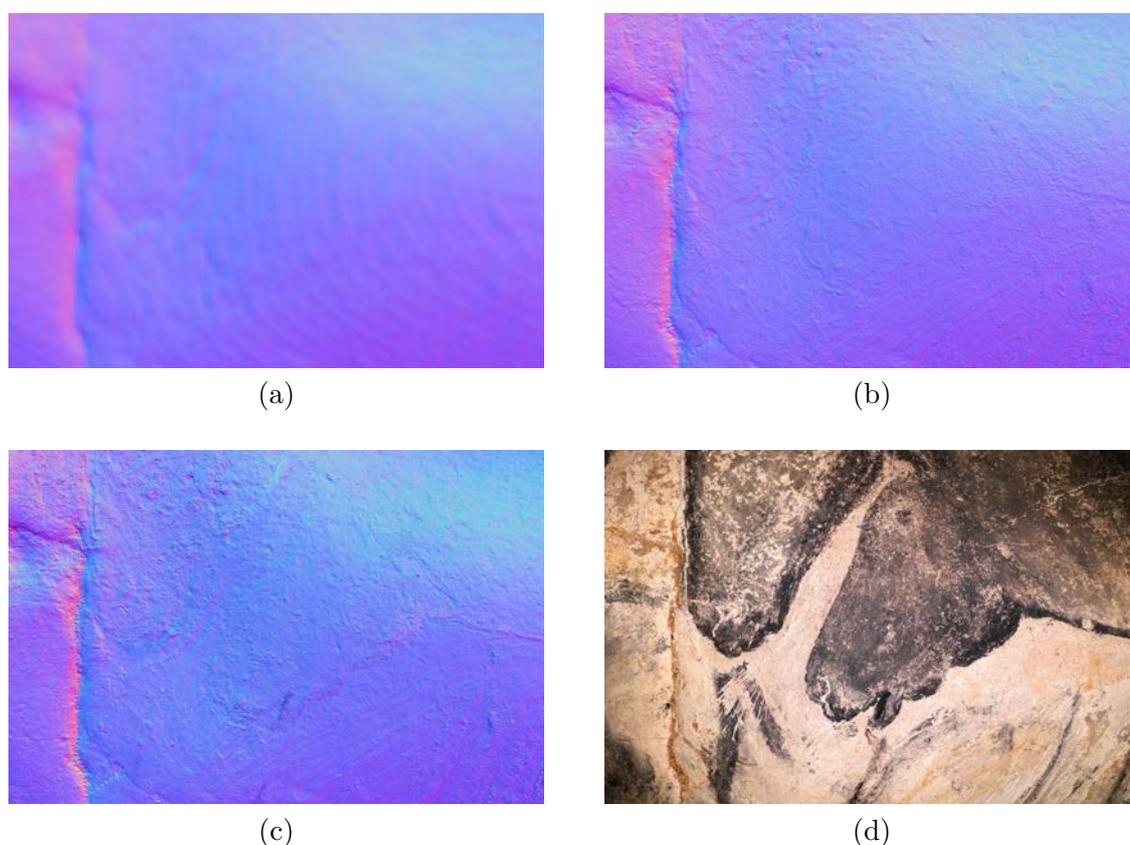


FIGURE 4.17 – Trois reconstructions 3D de la tête du cheval numéro 4, sous la forme de champs de normales en représentation RVB. (a) Scanner à laser. (b) Photogrammétrie. (c) Stéréophotométrie calibrée avec dôme de RTI. D'un point de vue qualitatif, cette dernière technique est clairement celle qui reproduit le mieux les hautes fréquences. (d) Albédo estimé par stéréophotométrie.

Les deux premières méthodes testées offrent des résultats satisfaisants, du moins d'un point de vue qualitatif, qui permettent de restituer la forme générale de la paroi, c'est-à-dire dans les basses fréquences, mais où seules les fissures les plus visibles sont rendues. Il convient cependant de noter que le résultat de la photogrammétrie semble avoir une meilleure résolution que celui du scanner à laser. C'est sans doute la raison pour laquelle il s'agit aujourd'hui de la méthode la plus prisée par les archéologues qui, lorsqu'ils étudient l'art pariétal, complètent le maillage photogrammétrique par des prises de vue en éclairage rasant pour visualiser les micro-reliefs.

D'autre part, la stéréophotométrie semble offrir un niveau de détail très élevé, les micro-gravures étant observables sur le champ de normales estimé, ce qui permet de récupérer, par exemple, des informations sur la chronologie relative des tracés nasaux. Cependant, nous notons un biais dans les basses fréquences, probablement dû à un étalonnage insuffisamment

CHAPITRE 4. VERS UNE NOUVELLE CHAÎNE OPÉRATOIRE DE NUMÉRISATION 3D

précis du dôme de RTI. En effet, l'éclairage provenant de LEDs situées à courte distance de la paroi est considéré comme uniforme, sans doute à tort. Un autre inconvénient significatif de l'utilisation d'un dôme de RTI pour une paroi de grotte est que le champ de vision est extrêmement limité.

En guise de comparaison quantitative, le tableau 4.3 (p. 138) recense les écarts angulaires moyens entre les trois champs de normales de la figure 4.17 (p. 137). Ces valeurs, exprimées en degrés, peuvent sembler contredire l'observation précédente, selon laquelle la stéréophotométrie serait plus précise que les deux autres méthodes. Premièrement, il a déjà été mentionné que l'étalonnage du dôme de RTI est insuffisamment précis, ce qui entraîne un biais dans les basses fréquences visible sur la figure 4.17 (p. 137). Deuxièmement, étant donné que la stéréophotométrie est censée mieux rendre les détails du relief, c'est-à-dire ses hautes fréquences, la comparaison entre normales n'est pas significative. En effet, puisque le relevé au scanner est censé constituer la vérité terrain, en raison de sa réputation de précision, il n'est pas facile de remettre en question ce présupposé, même avec une méthode telle que la stéréophotométrie qui offre pourtant une meilleure résolution et, possiblement, une précision plus élevée.

	Scanner TLS	Photogrammétrie	Stéréophotométrie
Scanner TLS	-	6,5	19,7
Photogrammétrie	6,5	-	20,6
Stéréophotométrie	19,7	20,6	-

TABLE 4.3 – Comparaison de trois méthodes de reconstruction 3D : écarts angulaires moyens (en degrés) entre les champs de normales de la figure 4.17 (p. 137).

Le résultat obtenu en utilisant la stéréophotométrie avec une sphère d'étalonnage est montré sur la figure 4.18 (p. 139). Cette procédure d'acquisition, sans dôme de RTI, est plus légère à mettre en œuvre et permet également de numériser des surfaces de paroi plus grandes. Cependant, elle n'est pas sans inconvénient. L'éclairage est estimé en un seul point de la scène 3D, là où se trouve la sphère d'étalonnage. Faute de mieux, cette estimation est ensuite extrapolée à toute la scène, ce qui entraîne, comme avec le dôme de RTI, un biais dans l'estimation des basses fréquences de la profondeur. De plus, il est nécessaire de positionner la sphère dans le champ de la caméra, aussi près que possible de la paroi. Cette opération délicate provoque des ombres sur la paroi, et donc des artefacts qui se retrouvent dans le champ de normales estimé (cf. figure 4.18, p. 139).

L'exemple du panneau des Chevaux montre néanmoins l'apport qualitatif de la stéréophotométrie, avec l'une ou l'autre de ses deux variantes. Cependant, cette technique n'est pas censée produire une véritable reconstruction 3D, mais au mieux un champ de normales pouvant être transformé en une carte de profondeur par intégration des normales [202]. Nous souhaitons proposer une véritable méthode de reconstruction 3D, comparable aux autres techniques de numérisation 3D couramment utilisées par les archéologues, et potentiellement plus précise.



FIGURE 4.18 – Reconstruction 3D de la tête du cheval numéro 4 par stéréophotométrie calibrée, en utilisant une sphère d'étalonnage positionnée dans la scène (cf. photographie de droite de la figure 4.16, p. 135). En comparaison du résultat obtenu avec le dôme de RTI (cf. figure 4.17, p. 137), l'ombre de la sphère projetée sur le mur cause des artefacts nécessitant un traitement spécifique. De plus, le modèle d'éclairage directionnel provoque un biais d'estimation des normales dans les parties les plus éloignées de la sphère.

Tête chypriote

La figure 4.19 (p. 140) montre trois reconstructions 3D de la deuxième étude de cas, obtenues par photogrammétrie, par stéréophotométrie avec dôme de RTI (et donc éclairage pré-étalonné), et par la nouvelle méthode de stéréophotométrie que nous préconisons, où l'éclairage est étalonné par la scène elle-même, en utilisant le résultat de la photogrammétrie. Comme précédemment, les résultats de la stéréophotométrie sont plus détaillés que le résultat de la photogrammétrie. Les écarts entre champs de normales sont reportés dans le tableau 4.4 (p. 139).

	Photogrammétrie	Stéréophotométrie	Méthode mixte
Photogrammétrie	-	11,4	7,3
Stéréophotométrie	11,4	-	8,7
Méthode mixte	7,3	8,7	-

TABLE 4.4 – Comparaison de trois méthodes de reconstruction 3D : écarts angulaires moyens (en degrés) entre les champs de normales de la figure 4.19 (p. 140).

Les écarts entre ces méthodes sont plus faibles sur cet exemple que sur le précédent. En particulier, l'utilisation du résultat de la photogrammétrie pour étalonner l'éclairage réduit considérablement le biais dans les basses fréquences de la profondeur. En effet, en appliquant un filtrage gaussien (de taille 10×10 pixels) aux champs de normales pour isoler les basses fréquences, l'écart angulaire moyen entre les résultats obtenus par photogrammétrie et par stéréophotométrie n'est plus que de 2 degrés (au lieu de 11,4).

Une extension directe de notre étude est la stéréophotométrie multivue (MV-PS, pour *multi-view photometric stereo*). Une première approche consiste à considérer chaque vue indépendamment : les champs de normales sont intégrés en cartes de profondeur, qui sont



FIGURE 4.19 – Trois champs de normales issus des reconstructions 3D de la tête chypriote en représentation RVB. À gauche : photogrammétrie avec le logiciel Metashape. Au centre : stéréophotométrie calibrée avec dôme de RTI. À droite : méthode mixte géométrique/photométrique décrite par le diagramme de la figure C.2 (p. 145). La ligne du bas montre des agrandissements d’une zone située au niveau de la bouche.

ensuite fusionnées pour produire un maillage 3D. Cependant, l’intégration des champs de normales soulève un certain nombre de problèmes. En plus de l’ambiguïté sur l’échelle inhérente à chaque intégration, qui peut éventuellement être surmontée en utilisant les points 3D du SfM comme points de contrôle [171], des inexactitudes au niveau des discontinuités de profondeur sont inévitables.

Une intégration globale semble plus prometteuse. Les méthodes MV-PS font actuellement l’objet de nombreux travaux, grâce aux avancées spectaculaires des approches neuronales. La reconstruction 3D par MV-PS de la figure 4.20 (p. 141) a été obtenue en utilisant la méthode RNb-NeuS [50], qui fusionne les champs de normales obtenus par stéréophotométrie en un maillage 3D.

Trois maillages 3D de la tête chypriote, obtenus avec le scanner à main, par photogrammétrie et par MV-PS, sont affichés sur la figure 4.20 (p. 141). Afin de mesurer les écarts entre ces maillages [19], nous utilisons le logiciel CloudCompare [5]. Après recalage par ICP du maillage obtenu par MV-PS avec le maillage du scanner manuel, nous mesurons un écart moyen de 75 microns. Étant donné que le maillage par MV-PS est nettement plus détaillé que les deux autres, la question du relief de référence (vérité terrain) se pose à nouveau.



FIGURE 4.20 – Trois reconstructions 3D de la tête chypriote, représentées sous forme de maillages. À gauche : scanner à main. Au centre : photogrammétrie avec le logiciel Metashape. À droite : méthode mixte géométrique/photométrique.

4.3.4 Un outil en devenir

Dans le chapitre 3, nous avons utilisé la stéréophotométrie dans le contexte de l'archéologie. Cette méthode semble compléter idéalement la photogrammétrie. Nous avons présenté, dans le présent chapitre, une nouvelle méthode de reconstruction 3D qui combine les deux approches. Si les premiers résultats sont prometteurs, il reste beaucoup à faire pour dépasser la simple « preuve de concept » et fournir un outil clé en main aux archéologues.

Des tests complémentaires sont requis pour les différentes étapes de notre chaîne de traitement. Tout d'abord, il nous faudra tester l'estimation de l'éclairage avec des normales de différentes provenances (scanner, carte de profondeur, etc.), afin d'optimiser la durée de prise de vue. L'étape de stéréophotométrie pourra profiter des dernières avancées en la matière, afin d'offrir des résultats de plus en plus précis. Enfin, la fusion des champs de normales, qui utilise une approche très récente, nécessite d'autres évaluations spécifiques au contexte multivue, notamment en ce qui concerne le nombre de poses, leur recouvrement et leur localisation.

Les différentes étapes du processus proposé étant étroitement liées, il s'ensuit qu'une amélioration dans l'estimation des champs de normales entraînera bien sûr une amélioration du résultat final. L'interdépendance entre celles-ci est d'autant plus marquée que les résultats de l'ensemble des étapes de notre méthode reposent fortement sur les conditions opératoires au moment de l'acquisition des données, qui constituent la première étape de toute chaîne de numérisation 3D.

Conclusion et perspectives

L'interdisciplinarité bâtie autour de cette thèse a permis de franchir plusieurs verrous méthodologiques, tant archéologiques que numériques.

Résumé des contributions

Dans ce mémoire, nous avons présenté plusieurs contributions, théoriques et numériques, qui visent à comparer les différentes approches de la reconstruction 3D pour le patrimoine archéologique, au regard des questions de recherche et de conservation. Dans le chapitre 1, nous avons dressé un bilan des pratiques liées à la 3D en archéologie.

Une fois cet état des lieux effectué, nous nous sommes focalisés dans le chapitre 2 sur le processus classique de reconstruction 3D par photogrammétrie. S'il permet en général d'obtenir de bons résultats, il présente certaines limites, de par l'aspect purement géométrique des méthodes sur lesquelles il repose. En particulier, le MVS est inapte à restituer le relief d'une scène peu ou pas texturée, ce qui apparaît comme l'une des principales faiblesses de cette chaîne de traitement.

La stéréophotométrie, en revanche, est parfaitement adaptée à la reconstruction 3D de scènes non texturées. Cette méthode de reconstruction 3D nécessite de bien contrôler l'éclairage. Cela limite généralement son champ d'application à des photographies prises en laboratoire. Toutefois, nous avons montré dans le chapitre 3 comment la mettre en œuvre dans des conditions opératoires plus variées.

La stéréophotométrie comporte elle aussi quelques faiblesses, mais elle semble constituer un complément idéal à la photogrammétrie. Nous avons présenté dans le chapitre 4 la *stéréophotométrie multivue*, une approche mixte combinant photogrammétrie et stéréophotométrie qui pourrait prochainement faire son entrée dans la palette d'outils des acteurs du patrimoine.

Un nouvel outil de reconstruction 3D pour l'archéologie

Les méthodes de reconstruction 3D exposées ici représentent un gain qualitatif significatif dans la pratique du relevé, sans pour autant bouleverser les pratiques des archéologues. En effet, l'ensemble du matériel nécessaire à sa mise en œuvre (appareil photographique, trépied et sources lumineuses) fait déjà partie de leur équipement de base.

De plus, l'acquisition multiéclairage de la stéréophotométrie est plus légère que celle de la RTI, puisqu'il suffit de 12 à 18 vues, selon la complexité de l'objet, pour la déployer. Cette méthode se révélera d'autant plus simple à adopter que nous avons montré comment se dispenser de l'utilisation d'une sphère d'étalonnage et d'un système d'éclairage pré-étalonné tel qu'un dôme de RTI. À cette fin, nous proposons de coupler photogrammétrie et stéréophotométrie, en exploitant la scène elle-même comme objet d'étalonnage de l'éclairage. Cette nouvelle approche de reconstruction 3D a été développée pour répondre à des situations spécifiques rencontrées en archéologie [64].

La diversité des protocoles d'acquisition proposés rend possible l'étude d'une grande gamme de vestiges. Ils se révèlent adaptables aux contraintes des objets, des lieux, des outils et du temps de captation des données, et opèrent, condition *sine qua non*, dans le respect de la préservation des artefacts.

Dans cette continuité de développement, la solution la plus prometteuse semble être la stéréophotométrie multivue. Les principales étapes de cette méthode de reconstruction 3D combinent les avantages des approches géométrique et photométrique, et sont résumées sur la figure C.2 (p. 145).

Pour finir, il est intéressant de positionner la stéréophotométrie multivue dans la « nébuleuse » des méthodes de numérisation 3D (cf. figure C.1, p. 144) proposée dans [161]. L'expérience sur le terrain nous permet de la recommander pour des objets allant de quelques centimètres, comme la tête chypriote, à des parois ornées de plusieurs mètres de long. La précision du modèle, qui dépend de la résolution du capteur employé, oscille de quelques millimètres à quelques dizaines de microns.

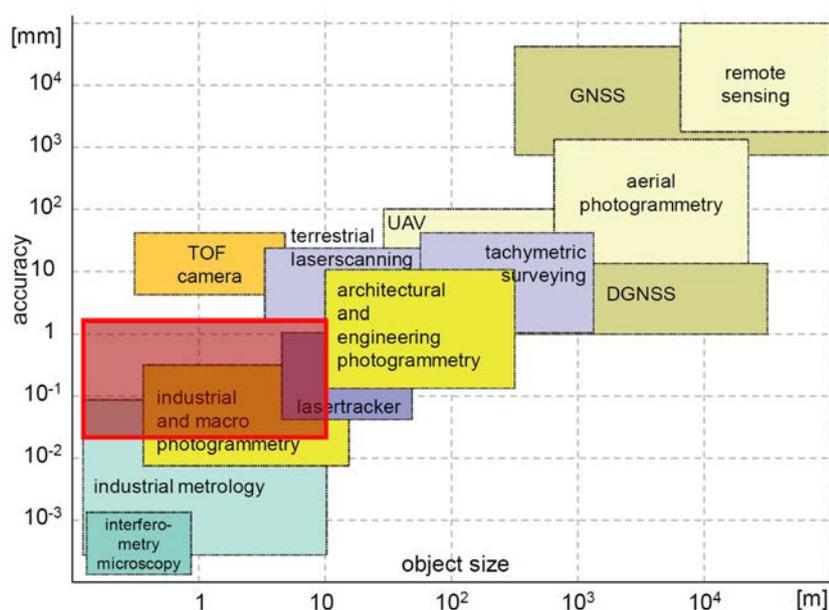


FIGURE C.1 – Positionnement de la stéréophotométrie multivue dans la « nébuleuse » des méthodes de reconstruction 3D. [Adapté de [161]].

Dissémination des outils

Le principal objectif de cette thèse est de mettre les outils de numérisation 3D développés à la disposition de la communauté des acteurs du patrimoine. Dans une optique de science ouverte, nous donnerons libre accès à l'ensemble de ses éléments constitutifs.

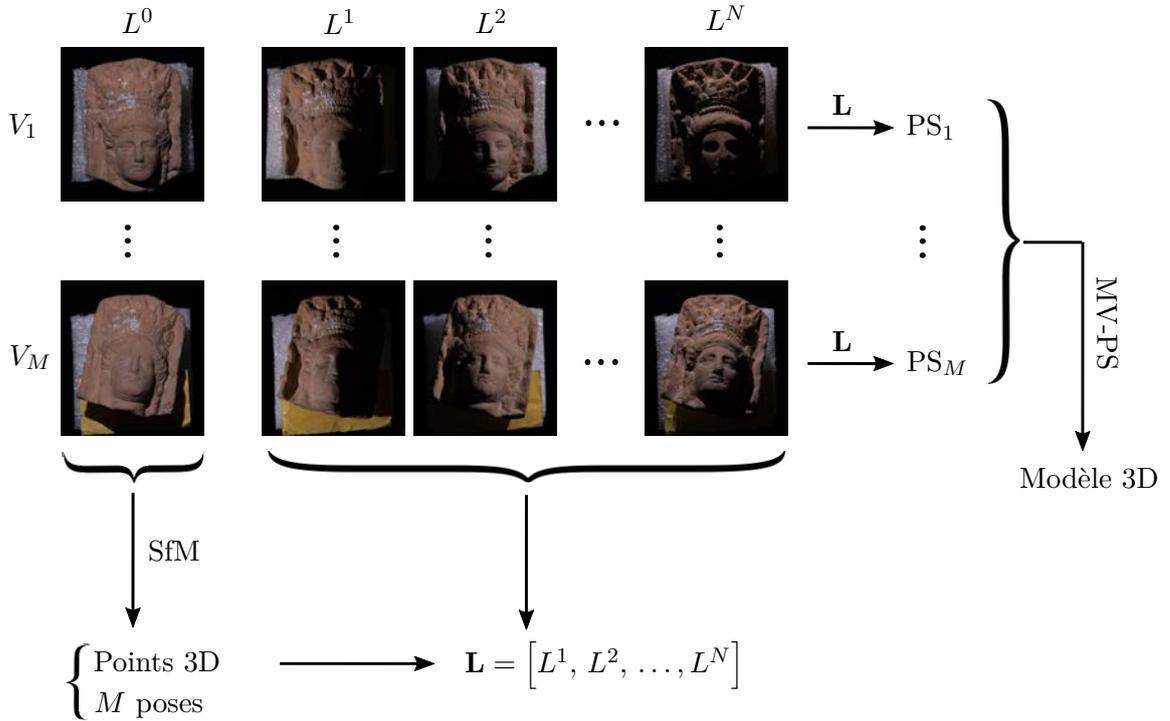


FIGURE C.2 – La méthode de reconstruction 3D que nous préconisons nécessite de photographier la scène depuis plusieurs poses V_1, \dots, V_M et sous plusieurs éclairages L^1, \dots, L^N . L'éclairage L^0 , produit par l'ensemble des N sources lumineuses, est utilisé comme donnée du SfM pour obtenir un nuage de points 3D parcimonieux, ainsi que les M poses de la caméra. Cette première reconstruction 3D, non dense mais fiable dans les basses fréquences, est utilisée pour estimer l'éclairage $\mathbf{L} = [L^1, L^2, \dots, L^N]$. Il devient ensuite possible d'appliquer la stéréophotométrie calibrée pour chacune des M poses, et d'en déduire un modèle 3D complet en utilisant la stéréophotométrie multivue (MV-PS).

Développement du logiciel AliceVision/Meshroom

Longtemps cantonné à la seule photogrammétrie, le logiciel AliceVision/Meshroom s'est désormais doté de codes de stéréophotométrie. Le processus est découpé en trois nœuds dédiés. Le premier de ces nœuds permet de détourner manuellement ou de détecter automatiquement une ou plusieurs sphères d'étalonnage [149]. Le deuxième nœud estime l'éclairage à partir des silhouettes des sphères. Enfin, le troisième et dernier nœud résout le problème de la stéréophotométrie. Chacun de ces nœuds possède différentes options (par exemple, l'utilisation d'un fichier d'étalonnage propre à un dispositif d'éclairage). Cependant, ces trois nœuds ne couvrent qu'une partie des situations que nous avons abordées dans ce manuscrit. Une perspective à court terme consiste donc à intégrer tous les outils développés dans cette thèse dans le logiciel *open source* AliceVision/Meshroom [102].

Afin de rester au plus près des habitudes des archéologues, nous avons doté l'interface Meshroom d'un module spécifique de ré-éclairage des scènes 2D et 3D. Ainsi, un nouvel

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

affichage 2D permet de combiner l'albédo avec les normales calculées par stéréophotométrie (cf. figure C.3, p. 146), la direction de l'éclairage étant contrôlée au travers d'une sphère, comme il est de coutume dans les logiciels de RTI.

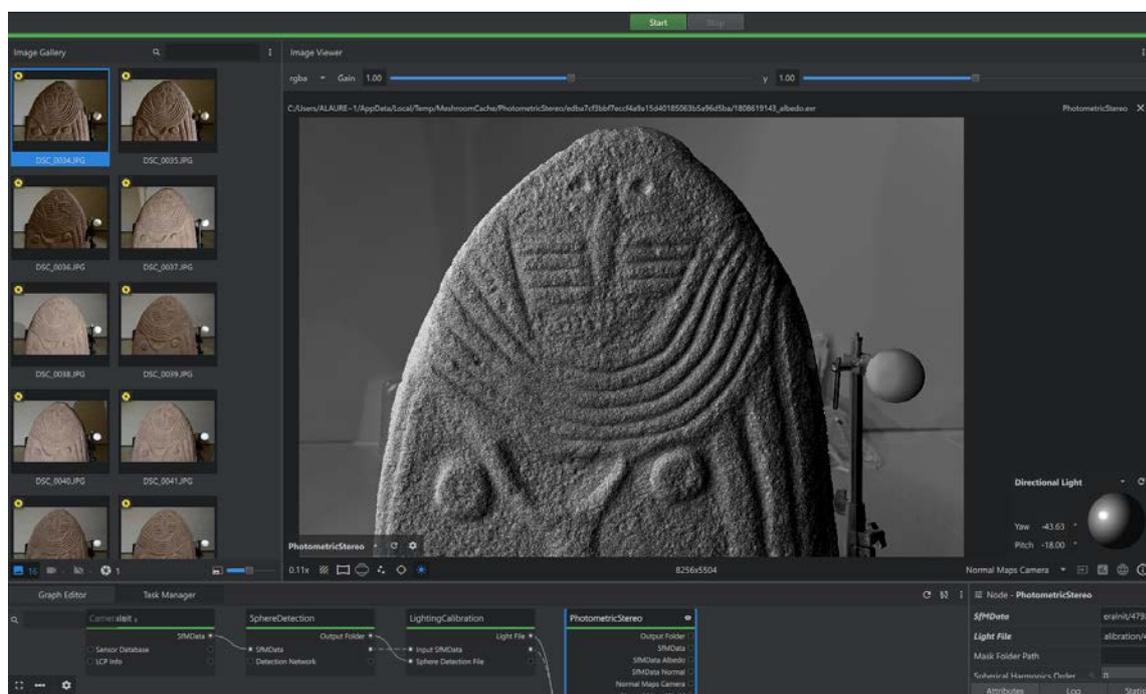


FIGURE C.3 – Interface Meshroom de ré-éclairage avec un résultat de stéréophotométrie.

Jeux de données

Afin d'accompagner les utilisateurs, nous mettons à leur disposition plusieurs jeux de données de recherche, qui concernent la grotte de Marsoulas² (cf. figure C.4, p. 147) et six objets du musée du Pech Merle. À l'avenir, d'autres données multivue et multiéclairage, dont un échantillon a été présenté dans le chapitre 4, seront rendues librement accessibles. Ces données pourront intéresser à la fois la communauté des sciences du patrimoine et celle de la vision par ordinateur.

Perspectives

Amélioration de notre nouvelle méthode de reconstruction 3D

La nouvelle méthode de reconstruction 3D proposée comporte encore des éléments à étudier et à améliorer. Dans le chapitre 4, nous avons mené une discussion sur la question de la « vérité terrain ». Les scanners (TLS ou à lumière structurée) sont généralement donnés

2. https://github.com/alicevision/dataset_photometricStereo/tree/master



FIGURE C.4 – Deux photographies (parmi treize) du jeu de données de stéréophotométrie accessible sur le github d’AliceVision.

comme outils de référence, mais nos derniers résultats paraissent restituer plus finement les détails du relief. Il restera donc à analyser la précision de la reconstruction, soit en utilisant un objet manufacturé de géométrie parfaitement connue [163], soit en ayant recours à la tomographie [119], qui est une méthode plus résolue et plus précise.

D’autre part, l’estimation de l’éclairage par la scène elle-même ne fonctionne pas si l’orientation locale de la surface photographiée ne varie pas suffisamment. Par exemple, la scène du Bison de la grotte de Bédeilhac ou la statue-menhir de la Dame de Saint-Sernin (cf. figure C.5, p. 147) n’ont pu être reconstruites en 3D par cette méthode mixte.



FIGURE C.5 – La statue-menhir de la Dame de Saint-Sernin, reconstruite ici par photogrammétrie, ne se prête pas à l’approche mixte géométrique/photométrique, à cause du relief globalement plan de ses faces avant et arrière.

Une des pistes pour dépasser cette difficulté consiste à modéliser l'éclairage. Par exemple, un modèle de source ponctuelle anisotrope semble bien adapté au cas d'une LED. La résolution de ce nouveau problème passera possiblement par l'usage de réseaux de neurones.

Recours aux réseaux de neurones

Les méthodes de reconstruction 3D photographique sont en plein bouleversement, en raison de la multitude de nouvelles approches utilisant les réseaux de neurones, le rythme de développement étant très élevé. L'article fondateur de cette mouvance [174] est à ce jour cité plus de mille fois. Si ces outils n'ont pas encore atteint une pleine maturité, les maillages 3D produits rendent de mieux en mieux compte de la réalité des objets, avec des résultats qui peuvent dépasser dans certains cas ceux de la photogrammétrie [156]. D'ailleurs, les dernières avancées présentées dans ce manuscrit, qui ont bénéficié de ces développements récents [49], étaient à peine envisageables au début de cette thèse.

Compte tenu de l'évolution continue des réseaux de neurones, des changements rapides sont prévisibles à différents niveaux des pipelines de photogrammétrie et de stéréophotométrie. Il est donc important de suivre cette progression. Mais il ne faut pas perdre de vue tout l'intérêt de conserver la donnée source que constituent les images, puisque les futures reconstructions 3D seront forcément meilleures que celles d'aujourd'hui.

Étude de la couleur - HDR

La couleur est un élément important dans l'analyse des œuvres et des vestiges. La plupart des méthodes de reconstruction 3D sont dites « photo-réalistes », là où la stéréophotométrie dissocie l'albédo de l'éclairage. Cependant, une ambiguïté existe entre le spectre coloré de l'éclairage et l'albédo de la scène [204]. L'étalonnage colorimétrique constitue donc une perspective essentielle de notre travail. Une piste envisagée consiste à comparer l'albédo calibré d'une charte colorimétrique avec l'albédo estimé par stéréophotométrie.

Par ailleurs, alors qu'une valeur élevée du niveau de couleur est seuillée à la valeur de saturation du capteur photosensible, une valeur très faible est toujours bruitée. Afin de capter toute la « gamme dynamique » d'une image, plusieurs photographies, prises avec différents temps de pose, peuvent être combinées. C'est ce que l'on appelle l'imagerie HDR (pour *high dynamic range*). Par exemple, les canaux vert et bleu ne constituent pas une information fiable pour une scène à dominante rouge. Un autre axe de travail consistera donc à fusionner les images au format HDR pour pallier ce problème.

Création d'un musée virtuel

Le projet NéNuFAR, soutenu par la MITI (mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires) du CNRS en 2024 et 2025, est consacré aux vestiges archéologiques de la grotte du Mas d'Azil, en Ariège, qui comprennent l'expression pariétale présente sur les parois et l'art mobilier découvert dans la cavité. L'objectif de ce projet est de réunifier virtuellement le mobilier présent sur plusieurs sites.

Si la diversité dans les caractéristiques des objets d'étude nécessite la mise en place de nouveaux protocoles d'acquisition, nous soulevons à présent la question de la visualisation des données. Nous pourrions suivre les exemples du module Voyager du Smithsonian³ ou du module Aioli développé par le laboratoire MAP de Marseille [191]. Ce dernier, déjà utilisé pour la visualisation de données multimodales, permet d'afficher toutes les données disponibles par vue (albédo, normales, profondeur), mais aussi de faire des annotations, élément indispensable pour les équipes de recherche et de conservation.

Matériaux non lambertiens

Dans ce mémoire, nous nous sommes cantonnés à l'étude des surfaces lambertiennes, pour lesquelles la réflectance est entièrement caractérisée par l'albédo. Or, il pourrait être profitable de prendre en compte des réflectances plus complexes. Cela permettrait non seulement de simuler le ré-éclairage d'une scène 3D de manière plus photo-réaliste, mais également d'améliorer la reconstruction 3D d'objets non lambertiens.

La stéréophotométrie peut être étendue aux matériaux brillants en utilisant un modèle plus complexe que le modèle lambertien, mais il est plus simple de traiter les taches brillantes comme des données aberrantes, c'est-à-dire de les éliminer. Une de nos perspectives est de faire un autre usage de ces données dites « aberrantes », afin d'en déduire une estimation plus fine de la réflectance de la surface. Une autre piste consiste à commencer par segmenter l'image en différents matériaux puis, à l'aide d'une base de données, à identifier chaque matériau, ce qui revient à résoudre un problème de classification. Cela pourrait nous autoriser à élargir cette étude aux matériaux transparents et translucides, que nous avons délibérément laissés de côté dans ce travail.

Suivi temporel

Déjà en partie évoquée, la préservation du patrimoine passe parfois par le suivi temporel de la couleur et du volume d'un objet. Sa mise en œuvre par stéréophotométrie semble cependant complexe, notamment à cause du changement de pose entre deux acquisitions, qui empêche toute comparaison des champs de normales estimés sans recalage préalable.

À titre d'exemple, la figure C.6 (p. 150) présente trois acquisitions d'une stèle éthiopienne au cours de sa restauration. Un léger déplacement de la stèle empêche toute comparaison numérique des champs de normales. Une autre des perspectives de cette thèse est de proposer un protocole adapté au suivi temporel. Notons par ailleurs, dans ce cas précis, que la comparaison des cartes d'albédo ne peut être menée puisqu'un nettoyage à la vapeur a modifié la couleur de la scène.

Intégration dans les pratiques ?

Les résultats encourageants que nous avons présentés dans ce manuscrit ne garantissent en rien que la communauté des sciences du patrimoine adoptera la stéréophotométrie comme méthode de numérisation 3D. Si le principal objectif de cette thèse était de

3. <https://3d.si.edu/>

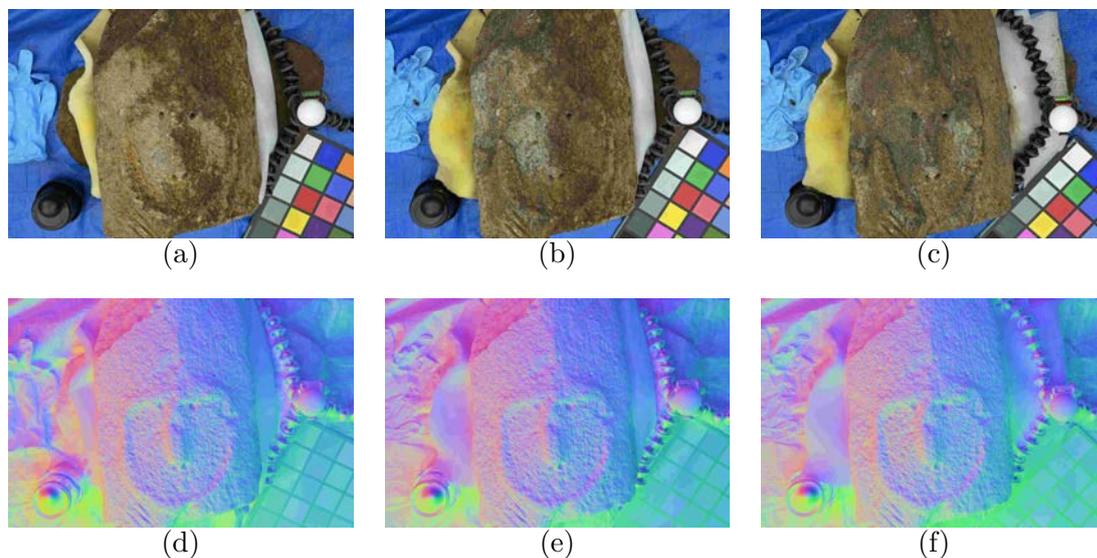


FIGURE C.6 – Suivi temporel d'une stèle en Éthiopie. Ligne du haut : cartes d'albédo (a) avant restauration, (b) en cours de restauration et (c) après restauration. Ligne du bas : champs de normales (d) avant restauration, (e) en cours de restauration et (f) après restauration.

fournir aux archéologues une nouvelle approche de la reconstruction 3D, la question de sa démocratisation reste en suspens. L'un des points clés favorisant la diffusion d'une nouvelle méthode réside dans sa facilité d'utilisation. Aussi, nous espérons que les travaux présentés dans cette thèse marqueront un tournant décisif dans l'acquisition numérique des données archéologiques.

Annexes

Annexe 1

Cette thèse a été financée par une bourse du programme ADI 2021 (allocations doctorale interdisciplinaires), soutenu par l'Université Fédérale de Toulouse Midi-Pyrénées et par la Région Occitanie. Plusieurs projets ont contribué à son financement :

- bourse ADI : financement du salaire ;
- bourse de recherche de l'association Archéologies : achat d'un appareil photographique ;
- projet du Labcom ALICIA-Vision : financement du post-doctorat de Jean Mélou qui a participé à l'encadrement de cette thèse ;
- projet RTI-3D de la SATT Toulouse Tech Transfer : achat d'un dôme de RTI ;
- projet TECME pour l'étude du bâti du site d'Ertu en Éthiopie : prise en charge de missions ;
- bourse de l'EDMITT pour co-financer le projet TECME : prise en charge de missions ;
- projet FelaNum@Abaya soutenu par la MSH Monde : prestation du développement de l'interface Meshroom, prise en charge de missions ;
- mission Abaya en Éthiopie soutenu par le MEAE : prise en charge de missions ;
- projet de numérisation des statues-menhirs de l'Aveyron soutenu par le Département de l'Aveyron, du Service régional de l'archéologie et l'association Archéologies (SRA) : prise en charge de missions ;
- projet ANR Monumen puis ANR Link : prise en charge de missions ;
- opérations d'archéologie programmée soutenues par le SRA : prise en charge de missions ;
- projet NéNuFAR soutenu par la MITI du CNRS : développement d'un dispositif de numérisation 3D multivue et multiéclairage, prise en charge de missions ;
- étude de la grotte de Bédeilhac soutenue par le Département de l'Ariège : prise en charge de missions.

Afin de couvrir un large éventail des faciès des vestiges archéologiques, nous avons multiplié les opportunités de nouvelles collaborations. Un juste milieu devait être trouvé entre le souhait de répondre à des problèmes de recherche ou de conservation en cours et celui de diversifier nos sujets d'étude. Dans la mesure du possible, nous avons souhaité proposer et confronter nos recherches aux pratiques actuelles.

Les principaux déplacements et missions de terrain sont :

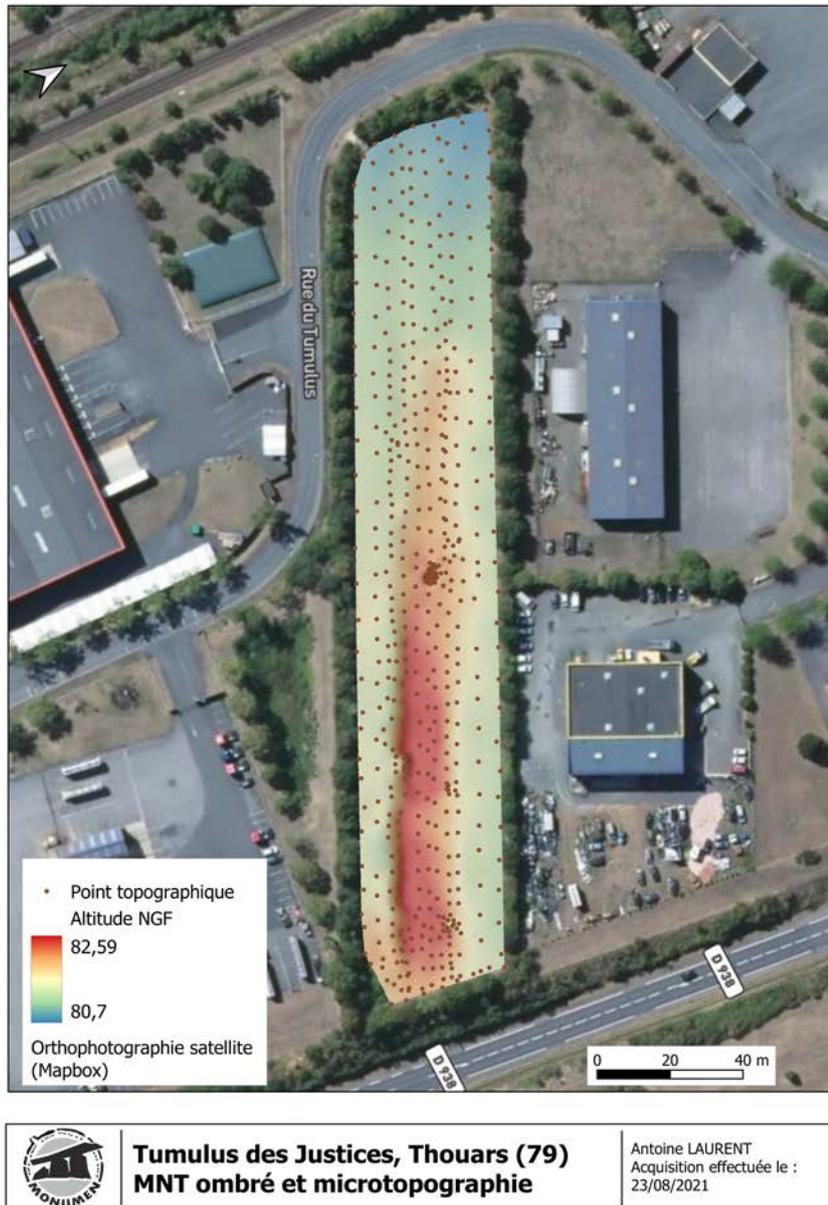
- 2021, Toulouse, ateliers de Gilles Tosello ;
- 2021, Castres, association du CERAC ;
- 2022, Veyre-Monton, mégalithes ;

ANNEXES

- 2022, Marsoulas, grotte ornée ;
- 2022, Labruguière, bastion moderne ;
- 2022, Vallon Pont-d’Arc, grotte Chauvet ;
- 2022, Vallon Pont-d’Arc, grotte d’Ebbou ;
- 2022, Pépieux, dolmen des fades ;
- 2022, Gréalou, dolmen de Pech Laglaire ;
- 2022, Castres, musée Jean Jaurès ;
- 2022, Rodez, musée Fenaille ;
- 2022, Saint-Germain-en-Laye, musée d’Archéologie nationale ;
- 2022, département de l’Aveyron, statues-menhirs ;
- 2022, Toulouse, Société archéologique du Midi de la France, statues-menhirs ;
- 2022, Lattes, musée Henri Prades de Lattara, statues-menhirs ;
- 2022, Montrozier, musée, statues-menhirs ;
- 2022, Éthiopie, mégalithes ;
- 2022, Mas d’Azil, grotte ornée ;
- 2022, Pays basque, dolmens ;
- 2022, Éthiopie, bâti médiéval ;
- 2023, Lattes, musée Henri Prades de Lattara, statues-menhirs ;
- 2023, Foissac, grotte protohistorique ;
- 2023, Vallon Pont-d’Arc, grotte Chauvet ;
- 2023, Le Pescher, menhir ;
- 2023, Rodez, musée Fenaille ;
- 2023, Gréalou, dolmen de Pech Laglaire ;
- 2023, Marsoulas, grotte ornée ;
- 2023, Saint-Romain-en-Gal, musée ;
- 2023, Saint-Germain-en-Laye, musée d’Archéologie nationale ;
- 2023, Vannes, mégalithes ;
- 2023, Irouléguy, dolmens ;
- 2023, Bruniquel, dolmen ;
- 2023, Bédeilhac, grotte ornée ;
- 2023, Mas d’Azil, grotte ornée ;
- 2023, Toulouse, musée Saint-Raymond ;
- 2023, Éthiopie, mégalithes ;
- 2024, Vallon Pont-d’Arc, grotte Chauvet ;
- 2024, Toulouse, musée Saint-Raymond ;

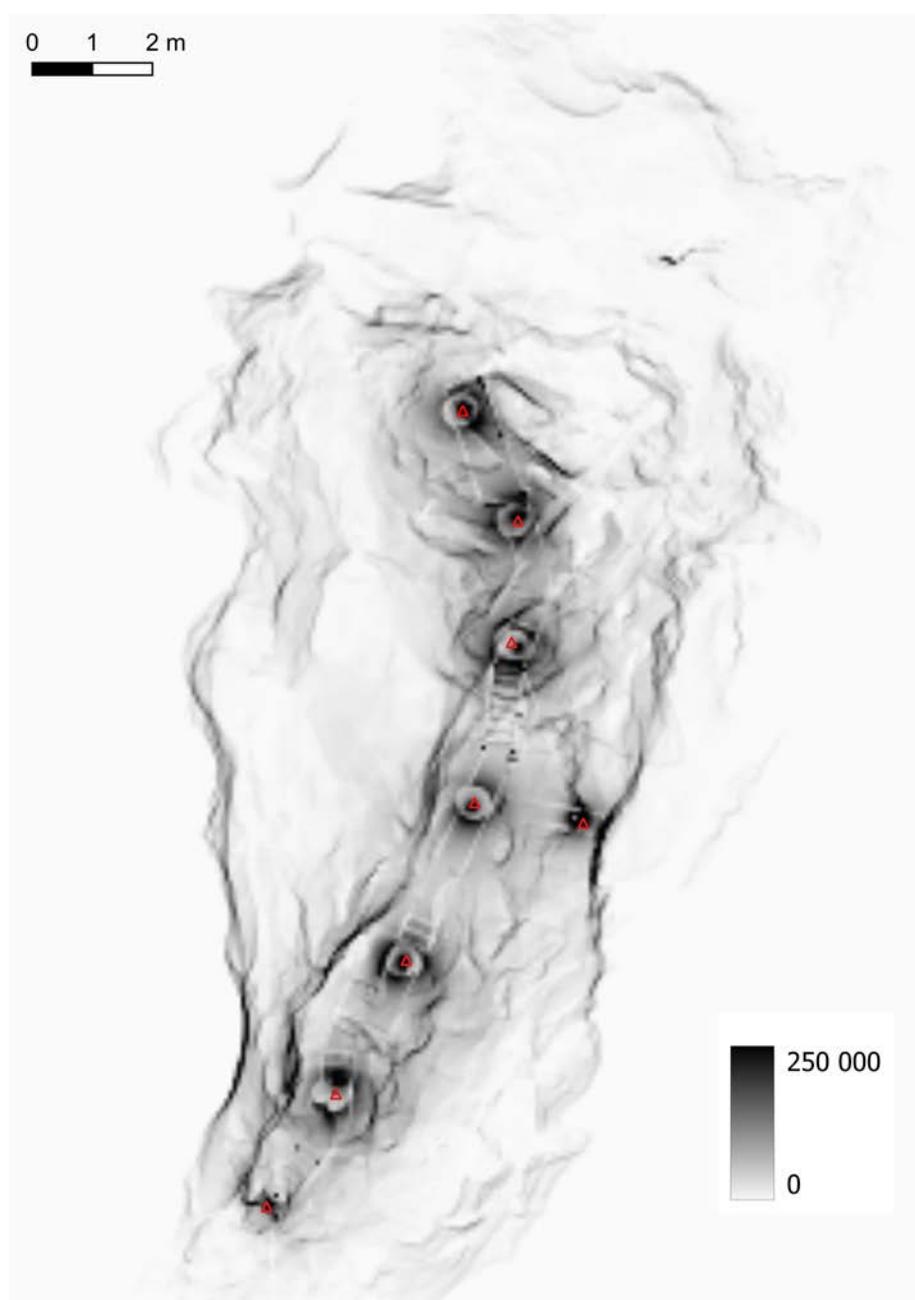
- 2024, Foissac, grotte ;
- 2024, Cabrerets, grotte et musée du Pech Merle ;
- 2024, Rodez, musée Fenaille.

Annexe 2



Exemple de levé topographique permettant la création d'un modèle numérique de terrain (MNT) sur le site du tumulus de la Motte des Justices à Thouars.

Annexe 3



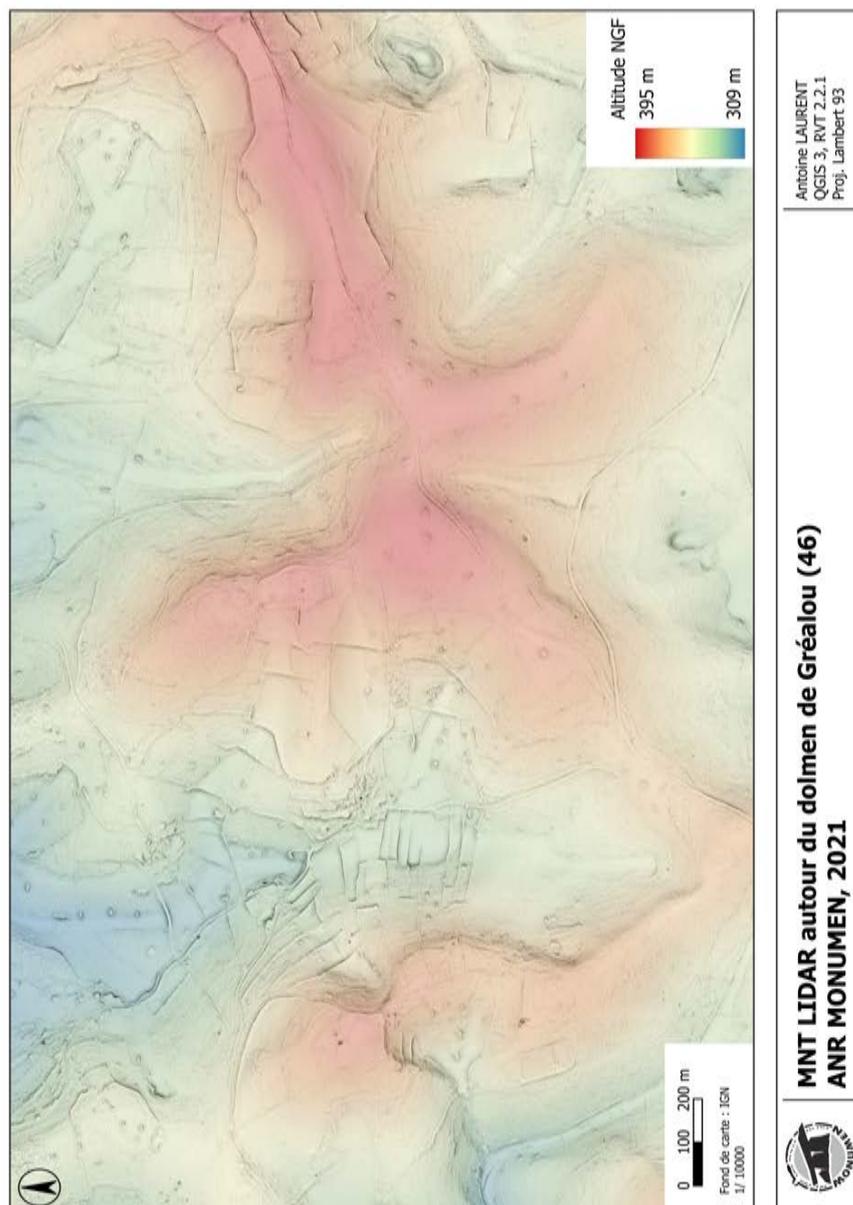
Carte de la densité de points des 8 stations de scanner de la Salle du fond de la grotte Chauvet (limitée à 250000 points par maille de 10 cm de côté).

Annexe 4



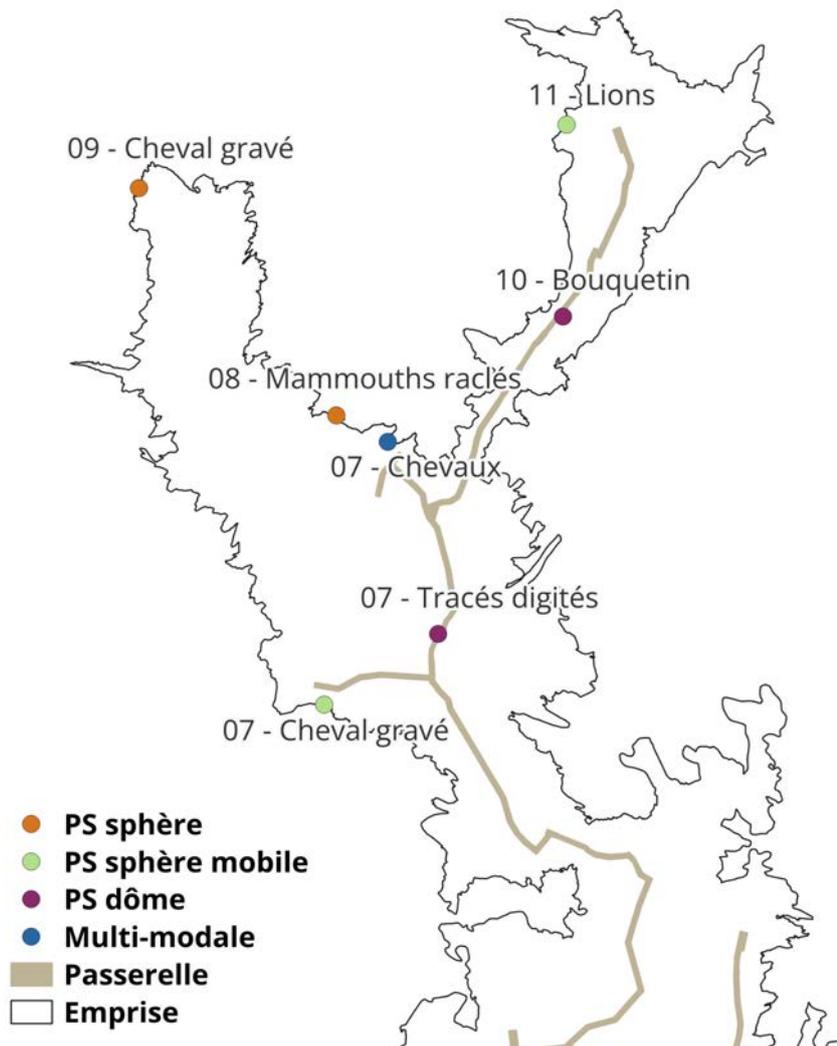
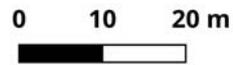
Une des 558 planches du programme de numérisation des statues-menhirs de l'Aveyron.

Annexe 5



Cartographie du territoire d'implantation du dolmen de Pech Laglaire à partir du relevé Lidar HD de l'IGN.

Annexe 6



Carte de localisation des acquisitions de stéréophotométrie dans la grotte Chauvet.

Bibliographie

- [1] Logiciel 3DF Zephyr. <https://www.3dflow.net/>. 47
- [2] Logiciel Agisoft Metashape (version 1.8.5). <https://www.agisoft.com/>. 47, 66, 75, 136
- [3] Logiciel Artec Studio 18. <https://www.artec3d.com/3d-software/artec-studio>. 74, 136
- [4] Logiciel Blender. <https://www.blender.org/>. 75
- [5] Logiciel CloudCompare (version 2.11.3). <https://github.com/cloudcompare/cloudcompare>. 140
- [6] Logiciel iTwin Capture. <https://fr.bentley.com/software/itwin-capture/>. 47
- [7] Logiciel PIX4D matic. <https://www.pix4d.com/>. 47
- [8] Logiciel RealityCapture. <https://www.capturingreality.com/>. 47, 66
- [9] Logiciel Trimble RealWorks. <https://geospatial.trimble.com/en/products/software/trimble-realworks>. 136
- [10] ODM – A command line toolkit to generate maps, point clouds, 3D models and DEMs from drone, balloon or kite images. <https://github.com/OpenDroneMap/ODM>. 47
- [11] Terminologie de la conservation-restauration du patrimoine culturel matériel. International Council of Museums, 2009. 44
- [12] European Digital Strategy - Shaping Europe's Digital Future. European Commission, 2020. 25, 26
- [13] Base Joconde : notice 05630030349. Ministère de la Culture, 2021. 133
- [14] Le bloc de l'Alcazar en lumière. Reportage CNRS, 2022. 35
- [15] Study on quality in 3D digitisation of tangible cultural heritage? Mapping parameters, formats, standards, benchmarks, methodologies, and guidelines? Final study report. European Commission and Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology, 2022. 26, 27, 36
- [16] Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure? Partie 1 : Principes généraux et définitions. International Organization for Standardization, 2023. 26
- [17] Programmation nationale de la recherche archéologique 2023. Ministère de la Culture, 2023. 3, 48
- [18] Violette ABERGEL : *Relevé numérique d'art pariétal : définition d'une approche innovante combinant propriétés géométriques, visuelles et sémantiques au sein d'un environnement de réalité mixte*. Thèse de doctorat, HESAM Université, 2020. 4, 13, 14

BIBLIOGRAPHIE

- [19] Efstathios ADAMOPOULOS, Fulvio RINAUDO et Liliana ARDISSONO : A Critical Comparison of 3D Digitization Techniques for Heritage Objects. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(1), 2020. 140
- [20] Edward ADELSON et Alex PENTLAND : The perception of shading and reflectance. In *Perception as Bayesian inference*, chapitre 11, pages 409–424. Cambridge University Press, 1996. 18
- [21] Francisco AGÜERA-VEGA, Fernando CARVAJAL-RAMÍREZ et Patricio MARTÍNEZ-CARRICONDO : Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. *Measurement*, 98:221–227, 2017. 64
- [22] Cédric ALLENE, Jean-Philippe PONS et Renaud KERIVEN : Seamless image-based texture atlases using multi-band blending. In *Proceedings of the 19th International Conference on Pattern Recognition*, 2008. 71
- [23] Anthony ANDRADY, Anu HEIKKILÄ, Krishna PANDEY, Laura BRUCKMAN, Christopher WHITE, M ZHU et Liping ZHU : Effects of UV radiation on natural and synthetic materials. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 22(5):1177–1202, 2023. 14
- [24] Jean ARNAL : *Les statues-menhirs, hommes et dieux*. Éditions des Hespérides, 1976. 40
- [25] Norbert AUJOLAT : Le relevé des œuvres pariétales paléolithiques. Enregistrement et traitement des données. *Documents d'archéologie française*, 9:9–122, 1987. 14, 15, 16
- [26] Norbert AUJOLAT : L'évolution des techniques. In *L'art pariétal paléolithique, techniques et méthodes d'étude*, pages 317–327. Comité des Travaux Historiques et Scientifiques, 1993. 15, 16
- [27] Martin BÄHR, Michael BREUSS, Yvain QUÉAU, Ali Sharifi BOROUJERDI et Jean-Denis DUROU : Fast and accurate surface normal integration on non-rectangular domains. *Computational Visual Media*, 3(2):107–129, 2017. 84
- [28] François BALEUX : Modélisation 3D d'un fragment de verre médiéval. Protocole d'acquisition et résultats. Rapport technique, TRACES UMR 5608, 2018. 26
- [29] Louis BALSAN : La statue-menhir de Nicoulès, commune de Saint-Sever-du-Moustier (Aveyron). *Procès-verbaux des séances de la Société des lettres, sciences et arts de l'Aveyron*, 43(3):133–136, 1981. 40
- [30] Emmanuel BALTSAVIAS : Airborne laser scanning : basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2–3):199–214, 1999. 29
- [31] Michel BARBAZA : Premières datations 14C des niveaux archéologiques de la galerie Vidal, grotte de Bèdeilhac (Ariège). *Bulletin de la Société préhistorique de l'Ariège*, 52:33–43, 1997. 45
- [32] Michel BARBAZA et Carole FRITZ : Art et habitats magdaléniens dans les Pyrénées Centrales : Un siècle et demi de recherches en Comminges. *Revue de Comminges*, 116(3):291–320, 2000. 45

-
- [33] Priscilia BARBUTI, Oscar FUENTES, Stéphane KONIK et Geneviève PINÇON : Le relevé interdisciplinaire d'art pariétal paléolithique en trois dimensions : intérêt, méthode et premiers résultats. *Humanités numériques*, 7, 2023. 19
- [34] Adrien BARTOLI, Yan GÉRARD, François CHADEBECQ, Toby COLLINS et Daniel PIZARRO : Shape-from-Template. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 37(10):2099–2118, 2015. 51
- [35] Ronen BASRI, David JACOBS et Ira KEMELMACHER : Photometric stereo with general, unknown lighting. *International Journal of Computer Vision*, 72(3):239–257, 2007. 82
- [36] Adam BAUMBERG : Blending Images for Texturing 3D Models. *In Proceedings of the British Machine Vision Conference*, 2002. 71
- [37] Peter BELHUMEUR et David KRIEGMAN : What is the set of images of an object under all possible illumination conditions? *International Journal of Computer Vision*, 28:245–260, 1998. 122
- [38] Jacques BERTIN : *Sémiologie graphique : les diagrammes, les réseaux, les cartes*. Gauthier-Villars, 1973. 23
- [39] Paul BESL et Neil MCKAY : Method for registration of 3-D shapes. *In Sensor Fusion IV : Control Paradigms and Data Structures*, pages 586–606, 1992. 29, 136
- [40] Alexandre BISSON-LARRIVÉE et Jean-Baptiste LEMOINE : Photogrammetry and the impact of camera placement and angular intervals between images on model reconstruction. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 26(2):e00224, 2022. 60
- [41] Daniel BLERSCH, Christoph HELD, Markus METTENLEITER et Christoph FRÖHLICH : Towards Sustainable Digitization : Technology Solutions for Complex and Challenging Survey Projects. *In 3D Research Challenges in Cultural Heritage III : Complexity and Quality in Digitisation*, pages 34–49. 2023. 29, 31, 134
- [42] Samuel BONNAUD-LE ROUX : Les enjeux juridiques liés à la numérisation tridimensionnelle du patrimoine. *In Situ - Revue des patrimoines*, 42, 2020. 45
- [43] Yohan BOULARD : L'interaction lumière-matière au service de la grotte Chauvet : modélisations et approches expérimentales. Thèse de doctorat en cours dirigée par Philippe Walter et Maguy Jaber. 42
- [44] Camille BOURDIER, Oscar FUENTES, Geneviève PINÇON et François BALEUX : Methodological contribution to the integrated study of European Palaeolithic rock art : The issue of the audience and the perceptibility of Roc-aux-Sorciers rock art (Angles-sur-l'Anglin, France). *Quaternary International*, 430:114–129, 2017. 4
- [45] Clotilde BOUST : Imagerie scientifique pour la conservation et la restauration du patrimoine. *In Publication électronique des journées d'étude du C2RMF*, pages 6–16, 2018. 20
- [46] Yuri BOYKOV et Vladimir KOLMOGOROV : An experimental comparison of min-cut/max-flow algorithms for energy minimization in vision. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26(9):1124–1137, 2004. 58

BIBLIOGRAPHIE

- [47] Michael BRADY et Alan YUILLE : An Extremum Principle for Shape from Contour. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 6(3):288–301, 1984. [51](#)
- [48] Simon BRENNER : *Multi-Light Imaging for Graphical Heritage*. Thèse de doctorat, Technische Universität Wien, 2024. [79](#), [110](#)
- [49] Baptiste BRUMENT : *Apprentissage profond pour l'amélioration des techniques de reconstruction 3D*. Thèse de doctorat en cours, Université de Toulouse, 2021. [148](#)
- [50] Baptiste BRUMENT, Robin BRUNEAU, Yvain QUÉAU, Jean MÉLOU, François LAUZE, Jean-Denis DUROU et Lilian CALVET : RNb-NeuS : Reflectance and Normal-based Multi-View 3D Reconstruction. *In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 5230–5239, 2024. [140](#)
- [51] Michèle BRUNET : E-stampages : la mise en ligne des collections d'estampages. Une nouvelle ressource pour l'étude des inscriptions grecques. *Comptes-rendus des séances de l'Académie des inscriptions et belles-lettres*, 163(1):263–285, 2019. [16](#), [20](#)
- [52] Ana CANTÓ, José Luis LERMA, Rafael MARTÍNEZ VALLE et Valentín VILLAVERDE : Multi-light photogrammetric survey applied to the complex documentation of engravings in Palaeolithic rock art : the Cova de les Meravelles (Gandia, Valencia, Spain). *Heritage Science*, 10(1):169, 2022. [72](#)
- [53] Xu CAO, Hiroaki SANTO, Boxin SHI, Fumio OKURA et Yasuyuki MATSUSHITA : Bilateral normal integration. *In Proceedings of the 17th European Conference on Computer Vision*, pages 552–567, 2022. [124](#)
- [54] Laura CASSARD : *Systèmes de production céramique des premiers paysans du domaine liguro-provençal (VIème millénaire BCE) : traditions techniques des décors*. Thèse de doctorat, Université Côte d'Azur, 2020. [31](#), [32](#)
- [55] Serge CASSEN et Valentin GRIMAUD : Aux dimensions de l'image dans l'étude des représentations gravées néolithiques. *In Archéologie : imagerie numérique et 3D*, 2018. [18](#)
- [56] Angel CHANG, Thomas FUNKHOUSER, Leonidas GUIBAS, Pat HANRAHAN, Qixing HUANG, Zimo LI, Silvio SAVARESE, Manolis SAVVA, Shuran SONG, Hao SU et al. : Shapenet : An information-rich 3d model repository. *arXiv preprint arXiv :1512.03012*, 2015. [68](#)
- [57] Stamatis CHATZISTAMATIS, George TSEKOURAS et Christos-Nikolaos ANAGNOSTOPOULOS : The Quality in 3D Acquisition of Cultural Heritage Assets : Challenges and Risks. *In 3D Research Challenges in Cultural Heritage III : Complexity and Quality in Digitisation*, pages 65–76, 2023. [26](#)
- [58] Bertrand CHAZALY : Relevés de la grotte Cosquer (partie 1) : la grotte, les premiers relevés, un monument et une histoire chaotiques. *XYZ*, 168, 2021. [64](#)
- [59] Guanying CHEN, Kai HAN, Boxin SHI, Yasuyuki MATSUSHITA et Kwan-Yee K WONG : Self-calibrating deep photometric stereo networks. *In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 8739–8747, 2019. [82](#), [122](#)

- [60] Léopold CHIRON : La grotte Chabot, commune d'Aiguèze (Gard). *Publications de la Société Linnéenne de Lyon*, 8(1):96–97, 1889. 15
- [61] Marthe CHOLLOT : *Musée des Antiquités Nationales. Collection Piette. Art mobilier préhistorique*. Musées Nationaux, 1964. 91
- [62] Michel COTTE : Intégrité et authenticité d'un objet patrimonial numérisé : l'approche déontologique du projet Reseed. *Humanités numériques*, 7, 2023. 45
- [63] Corentin COU : *New approach of 3D for monumental heritage*. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 2023. 104
- [64] Benjamin COUPRY, Jean MÉLOU, Antoine LAURENT, Baptiste BRUMENT, Pierre GURDJOS, Yvain QUÉAU et Jean-Denis DUROU : Stéréophotométrie avec estimation locale de l'éclairage - Application à la reconstruction 3D du patrimoine archéologique. *In Actes du congrès Reconnaissance des Formes, Image, Apprentissage et Perception*, 2024. 128, 136, 143
- [65] Elisa CRABU, Federica PES, Giuseppe RODRIGUEZ et Giuseppa TANDA : Ascertaining the Ideality of Photometric Stereo Datasets under Unknown Lighting. *Algorithms*, 16(8), 2023. 79
- [66] Michel DABAS, Thomas SAGORY, Antoine LAURENT, Jean-Baptiste HOUAL, Matteo TANGHE et Louise Thoëë ALIKIE : L'apport des techniques de numérisation à la recherche et à la valorisation des tablettes de Grand. *In Les tablettes zodiacales de Grand (Vosges) : nouvelles recherches sur les deux diptyques*, 2024. 32
- [67] André D'ANNA : *Les statues-menhirs et stèles anthropomorphes du Midi de la France*. Éditions du CNRS, 1977. 40
- [68] Livio DE LUCA, Violette ABERGEL, Anaïs GUILLEM, Olivier MALAVERGNE, Adeline MANUEL, Ariane NÉROULIDIS, Roxane ROUSSEL, Miled ROUSSET et Sarah TOURNON : L'écosystème numérique n-dame pour l'analyse et la mémorisation multi-dimensionnelle du chantier scientifique Notre-Dame-de-Paris. *In Actes du Séminaire de Conception Architecturale Numérique*, 2022. 22
- [69] Marcelino de SAUTUOLA : *Breves apuntes sobre objetos prehistóricos de la provincia de Santander*. Real Academia de la Historia, Madrid, 1880. 16
- [70] Jean-Jacques DELANNOY, Benjamin SADIÉ, Serge VALCKE, José PERAL, Guy PERAZIO, Stéphane JAILLET, Gilles TOSELLO, Jean-Michel GENESTE et Jean CLOTTES : La modélisation 3D, outil de transfert des connaissances. Exemple de la réplique de la grotte Chauvet Pont d'Arc : la caverne du Pont d'Arc (Ardèche, France). *Karstologia*, 64:41–57, 2014. 64
- [71] Hélène DESSALES, Jean PONCE, Agnès TRICOCHÉ et Alban-Brice PIMPAUD : La villa de Diomède à Pompéi, du corpus d'archives à la modélisation 3D. *In Les archives de fouilles : modes d'emploi*. Collège de France, 2017. 20
- [72] Federico DI IORIO, Leila ES SEBAR, Sara CROCI, Federico TAVERNI, Johannes AUENMÜLLER, Federica POZZI et Sabrina GRASSINI : The Use of Virtual Reflectance Transformation Imaging (V-RTI) in the Field of Cultural Heritage : Approaching the Materiality of an Ancient Egyptian Rock-Cut Chapel. *Applied Sciences*, 14(11):4768, 2024. 35

BIBLIOGRAPHIE

- [73] Francesco DI STEFANO, Alessandro TORRESANI, Elisa FARELLA, Roberto PIERDICCA, Fabio MENNA et Fabio REMONDINO : 3D surveying of underground built heritage : Opportunities and challenges of mobile technologies. *Sustainability*, 13(23):13289, 2021. 29
- [74] Marta DÍAZ-GUARDAMINO, Leonardo García SANJUÁN, David WHEATLEY et Víctor Rodríguez ZAMORA : RTI and the study of engraved rock art : A re-examination of the Iberian south-western stelae of Setefilla and Almadén de la Plata 2 (Seville, Spain). *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 2(2–3):41–54, 2015. 34
- [75] Ondrej DRBOHLAV et Mike CHANTLER : On optimal light configurations in photometric stereo. In *Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Computer Vision*, volume 2, pages 1707–1712, 2005. 110
- [76] Henri DUCASSE : La Néo-Archéo-Informatique ou les possibilités de faire du neuf avec de l’ancien. *Bulletin de la Société préhistorique française*, 83(10):291–293, 1986. 20
- [77] Jean-Denis DUROU, Maurizio FALCONE, Yvain QUÉAU et Silvia TOZZA : A comprehensive introduction to photometric 3D-reconstruction. In *Advances in Photometric 3D-Reconstruction*, pages 1–29. Springer, 2020. 80, 133
- [78] Mohammed ELFARARGY, Amr RIZQ et Marwa RASHWAN : 3D surface reconstruction using polynomial texture mapping. In *Proceedings of the 9th International Symposium on Visual Computing*, pages 353–362, 2013. 35
- [79] Laurent FAINSIN, Jean MÉLOU, Lilian CALVET, Axel CARLIER et Jean-Denis DUROU : Neural detection of spheres in images for lighting calibration. In *Proceedings of the 16th International Conference on Quality Control by Artificial Vision*, 2023. 86
- [80] Henri FISCHER : Note sur les coquilles récoltées par M. É. Piette dans la grotte du Mas d’Azil (Ariège). *L’Anthropologie*, VII:633–652, 1896. 91
- [81] Carole FRITZ : *La gravure dans l’art mobilier magdalénien*. Éditions de la Maison des sciences de l’homme, 1999. 4
- [82] Carole FRITZ : Grotte Chauvet-Pont d’Arc : approche structurelle et comparative du Panneau des Chevaux. In *Actes du congrès de l’UISPP - L’art Pariétal Paléolithique dans son Contexte Naturel*, pages 69–86, 2004. 20, 132
- [83] Carole FRITZ : *L’art de la Préhistoire*. Citadelles & Mazenod, 2017. 64
- [84] Carole FRITZ : Grotte Chauvet-Pont d’Arc. Rapport d’activité, CNRS, 2019. 64
- [85] Carole FRITZ : Grotte Chauvet-Pont d’Arc. Rapport triennal 2020-2023, CNRS, 2023. 42, 64
- [86] Carole FRITZ et Gilles TOSELLO : The Hidden Meaning of Forms : Methods of Recording Paleolithic Parietal Art. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 14:48–80, 2007. 20, 132
- [87] Carole FRITZ et Gilles TOSELLO : L’art pariétal, objet virtuel de recherche? *Les nouvelles de l’archéologie*, 154:69–74, 2018. 18

-
- [88] Carole FRITZ, Mark WILLIS et Gilles TOSELLO : Reconstructing Paleolithic cave art : The example of Marsoulas cave (France). *Journal of Archaeological Science : Reports*, 10:910–916, 2016. 18, 43, 72
- [89] Adam FROST, Sophia MIRASHRAFI, Clara Molina SÁNCHEZ, David VACAS-MADRID, Elina Rodriguez MILLAN et Lyn WILSON : Digital documentation of reflective objects : a cross-polarised photogrammetry workflow for complex materials. In *3D Research Challenges in Cultural Heritage III : Complexity and Quality in Digitisation*, pages 131–155. 2023. 70
- [90] Oscar FUENTES, Julie LEPELÉ et Geneviève PINÇON : Transferts méthodologiques 3D appliqués à l'étude de l'art paléolithique : une nouvelle dimension pour les relevés d'art préhistorique. In *Situ - Revue des patrimoines*, 39, 2019. 18
- [91] Yasutaka FURUKAWA, Carlos HERNÁNDEZ *et al.* : Multi-view stereo : A tutorial. *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, 9(1–2):1–148, 2015. 51, 57, 58
- [92] Yasutaka FURUKAWA et Jean PONCE : Accurate, dense, and robust multiview stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(8):1362–1376, 2009. 58
- [93] Philippe GALANT, Mireille LEDUC et Henri MARCHESI : *Les statues-menhirs et la fin du Néolithique en Occitanie*. Ministère de la Culture (DRAC Occitanie, SRA), 2022. 40
- [94] Andrés GARCÍA-ARILLA OLIVER, Héctor CONGET VICENTE, Alejandro MORENO TERRÉ et Óscar PUEYO ANCHUELA : Análisis compositivo y de profundidad de los grabados de la estela de Luna-Valpalmas mediante digitalización 3D por luz estructurada. *Complutum*, 32(1):49, 2021. 31
- [95] Miguel GARCÍA-BUSTOS, Xabier EGUILLEOR-CARMONA, Olivia RIVERO et Ana María MATEO-PELLITERO : 3D Recording of Palaeolithic Rock Art through Different Techniques : a Critical Comparison and Evaluation. *Journal of Field Archaeology*, pages 1–19, 2024. 31, 72
- [96] Jason GENG : Structured-light 3D surface imaging : a tutorial. *Advances in Optics and Photonics*, 3(2):128–160, 2011. 51
- [97] Michael GOESELE, Brian CURLESS et Steven SEITZ : Multi-view stereo revisited. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, volume 2, pages 2402–2409, 2006. 58
- [98] Xavier GRANIER, Mehdi CHAYANI, Violette ABERGEL, Pascal BÉNISTANT, Laurent BERGEROT, Hervé BOHBOT, Serge CASSEN, Livio DE LUCA, Bruno DUTAILLY, Frédéric EPAUD *et al.* : Les recommandations du Consortium 3D SHS. Rapport technique, CNRS-SHS, 2019. 13, 22, 26, 28, 29, 31, 37, 48
- [99] Valentin GRIMAUD : PETrA automatisé! Protocole d'Exploitation des représentations TRidimensionnelles en Archéologie. In *Actes des Journées du Consortium 3D SHS*, 2021. 40

- [100] Valentin GRIMAUD et Serge CASSEN : Implementing a protocol for employing three-dimensional representations in archaeology (PETRA) for the documentation of neolithic funeral architecture in Western France. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 13, 2019. 40
- [101] Valentin GRIMAUD, Serge CASSEN et Carlos RODRÍGUEZ-RELLÁN : De l’usage de la représentation tridimensionnelle pour documenter les architectures funéraires monumentales ornées du Néolithique de l’ouest de la France. *Les nouvelles de l’archéologie*, 146:23–27, 2016. 18
- [102] Carsten GRIWODZ, Simone GASPARINI, Lilian CALVET, Pierre GURDJOS, Fabien CASTAN, Benoit MAUJEAN, Gregoire DE LILLO et Yann LANTHONY : AliceVision Meshroom : An open-source 3D reconstruction pipeline. *In Proceedings of the 12th ACM Multimedia Systems Conference*, pages 241–247, 2021. 9, 11, 47, 66, 145
- [103] Leore GROSMAN, Antoine MULLER, Itamar DAG, Hadas GOLDGEIER, Ortal HARUSH, Gadi HERZLINGER, Keren NEBENHAUS, Francesco VALETTA, Talia YASHUV et Nir DICK : Artifact3-D : New software for accurate, objective and efficient 3D analysis and documentation of archaeological artifacts. *PLoS ONE*, 17(6), 2022. 40
- [104] Pierre GRUSSENMEYER, Albane BURENS, Emmanuel MOISAN, Samuel GUILLEMIN, Laurent CAROZZA, Raphaëlle BOURRILLON et Stéphane PETROGNANI : 3D Multi-scale Scanning of the Archaeological Cave “Les Fraux” in Dordogne (France). *In Progress in Cultural Heritage Preservation*, pages 388–395, 2012. 64
- [105] Heng GUO, Zhipeng MO, Boxin SHI, Feng LU, Sai-Kit YEUNG, Ping TAN et Yasuyuki MATSUSHITA : Patch-based uncalibrated photometric stereo under natural illumination. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 44(11):7809–7823, 2021. 120, 122
- [106] Heng GUO, Jieji REN, Feishi WANG, Boxin SHI, Mingjun REN et Yasuyuki MATSUSHITA : DiLiGenRT : A Photometric Stereo Dataset with Quantified Roughness and Translucency. *In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 11810–11820, 2024. 70
- [107] Bjoern HAEFNER, Zhenzhang YE, Maolin GAO, Tao WU, Yvain QUÉAU et Daniel CREMERS : Variational uncalibrated photometric stereo under general lighting. *In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, pages 8539–8548, 2019. 82
- [108] Daniel HAHN, Donald DUNCAN, Kevin BALDWIN, Jonathon COHEN et Budirijanto PURNOMO : Digital Hammurabi : design and development of a 3D scanner for cuneiform tablets. *In Three-Dimensional Image Capture and Applications VII*, pages 130–141, 2006. 79
- [109] Pierre HALLOT et Marc GIL : Methodology for 3D acquisition of highly reflective goldsmithing artefacts. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42:129–134, 2019. 70
- [110] Clément HARDY, Yvain QUÉAU et David TSCHUMPERLÉ : Uni MS-PS : a Multi-Scale Encoder Decoder Transformer for Universal Photometric Stereo. *Computer Vision and Image Understanding*, 248, 2024. 102, 103, 121, 125

-
- [111] Jon HARMAN : Using decorrelation stretch to enhance rock art images. *In American Rock Art Research Association Annual Meeting*, volume 28, pages 1–4, 2005. 20
- [112] Richard HARTLEY et Andrew ZISSERMAN : *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge University Press, 2003. 52, 55
- [113] Hideki HAYAKAWA : Photometric stereo under a light source with arbitrary motion. *Journal of the Optical Society of America A*, 11(11):3079–3089, 1994. 122
- [114] Mathieu HÉBERT, Lionel SIMONOT, Benjamin BRINGIER, Mathieu THOURY et Pauline Hélou-de LA GRANDIÈRE : Quand l'imagerie accompagne la restauration d'œuvres picturales : le cas Soulages. *Photoniques*, 124:26–30, 2024. 79
- [115] Raphaële HÉNO et Laure CHANDELIER : *3D modeling of buildings : outstanding sites*. John Wiley & Sons, 2014. 36
- [116] Carlos HERNÁNDEZ : *Stereo and Silhouette Fusion for 3D Object Modeling from Uncalibrated Images Under Circular Motion*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Télécommunications, 2004. 58
- [117] Carlos HERNÁNDEZ et Francis SCHMITT : Silhouette and stereo fusion for 3D object modeling. *Computer Vision and Image Understanding*, 96(3):367–392, 2004. 51
- [118] Carlos HERNÁNDEZ, George VOGIATZIS et Roberto CIPOLLA : Multiview photometric stereo. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 30(3):548–554, 2008. 51, 120, 122
- [119] Mona HESS, Lindsay MACDONALD et Jaroslav VALACH : Application of multi-modal 2D and 3D imaging and analytical techniques to document and examine coins on the example of two Roman silver denarii. *Heritage Science*, 6:1–22, 2018. 147
- [120] Heiko HIRSCHMULLER : Stereo processing by semiglobal matching and mutual information. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 30(2):328–341, 2007. 58
- [121] Historic England. *Photogrammetric Applications for Cultural Heritage : Guidance for Good Practice*, 2017. 37, 60
- [122] Historic England. *Multi-light Imaging : Highlight-Reflectance Transformation Imaging (H-RTI) for Cultural Heritage*, 2018. 34, 85
- [123] Berthold HORN : *Shape From Shading : A Method for Obtaining the Shape of a Smooth Opaque Object From One View*. Phd thesis, MIT, Department of Electrical Engineering and Computer Science, 1970. 51, 81
- [124] Arnaud HUREL : Les peintures préhistoriques de la grotte d'Altamira à Santillane (Espagne). *Bibnum. Textes fondateurs de la science*, 2013. 17
- [125] Satoshi IKEHATA : Universal photometric stereo network using global lighting contexts. *In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 12591–12600, 2022. 68, 122
- [126] Satoshi IKEHATA : Scalable, detailed and mask-free universal photometric stereo. *In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 13198–13207, 2023. 68, 121, 122, 125

BIBLIOGRAPHIE

- [127] Satoshi IKEHATA, David WIPF, Yasuyuki MATSUSHITA et Kiyoharu AIZAWA : Robust photometric stereo using sparse regression. *In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 318–325, 2012. [82](#), [125](#)
- [128] Marinos IOANNIDES et Petros PATIAS : The Complexity and Quality in 3D Digitisation of the Past : Challenges and Risks. *In 3D Research Challenges in Cultural Heritage III : Complexity and Quality in Digitisation*, pages 1–33. 2023. [25](#)
- [129] Kevin JACQUOT : *Numérisation et restitution virtuelle des maquettes de la collection de Louis XIV, le cas des fortifications bastionnées*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2014. [13](#), [14](#)
- [130] Stéphane JAILLET, Laurence AUDIN, Stéphane BUJAN, Gaël CAZES, Armelle COUILLET, Alexandre HONIAT, Sylvia LOPEZ, Gaël MONVOISIN, Bertrand QUENAUULT et Xavier ROBERT : Drones souterrains, inspection et imagerie 3D : contraintes et potentialités d’un nouvel outil de documentation des grottes et du karst. *Karstologia*, 81, 2023. [64](#)
- [131] Michal JANCOSEK et Tomas PAJDLA : Multi-view reconstruction preserving weakly-supported surfaces. *In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 3121–3128, 2011. [10](#)
- [132] Michal JANCOSEK et Tomas PAJDLA : Exploiting visibility information in surface reconstruction to preserve weakly supported surfaces. *International Scholarly Research Notices*, 2014. [58](#)
- [133] Marc JARRY : Étude documentaire de statues-menhirs du département du Tarn en vue de mesures de protection et de conservation. *In Actes du 2e colloque international sur la statuaire mégalithique*, pages 363–375, 1998. [16](#)
- [134] Marc JARRY : Les statues-menhirs du groupe rouergat : méthode d’étude adaptée à la statuaire mégalithique. *In Sociétés et Espaces : Rencontres méridionales de Préhistoire récente*, pages 387–391, 2000. [16](#)
- [135] Rasmus JENSEN, Anders DAHL, George VOGIATZIS, Engin TOLA et Henrik AANÆS : Large scale multi-view stereopsis evaluation. *In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 406–413, 2014. [70](#)
- [136] Ali KARAMI, Fabio MENNA et Fabio REMONDINO : Combining Photogrammetry and Photometric Stereo to Achieve Precise and Complete 3D Reconstruction. *Sensors*, 22(21):8172, 2022. [82](#), [118](#)
- [137] Bahador KHALEGHI, Alaa KHAMIS, Fakhreddine KARRAY et Saiedeh RAZAVI : Multi-sensor data fusion : A review of the state-of-the-art. *Information Fusion*, 14(1):28–44, 2013. [22](#), [132](#)
- [138] Diederik KINGMA et Jimmy BA : Adam : A Method for Stochastic Optimization. *In Proceedings of the 3rd International Conference on Learning Representations*, 2015. [121](#)
- [139] Žiga KOKALJ et Maja SOMRAK : Why Not a Single Image ? Combining Visualizations to Facilitate Fieldwork and On-Screen Mapping. *Remote Sensing*, 11(7), 2019. [40](#), [124](#)

-
- [140] Stéphane KONIK, Noël COYE et Oscar FUENTES : Photographier l'archéologie des grottes ornées. *Les nouvelles de l'archéologie*, 170:6–12, 2023. 18
- [141] Dimitri LABOURY, Maud MULLIEZ et François DANIEL : Étude du buste d'Akhénaton du musée du Louvre par restitution 3D polychrome. In *Virtual Retrospect 2017 : Restituer les couleurs – Reconstruction of Polychromy*, pages 163–172, 2017. 4
- [142] Fantine LAHMER : Aux sources de la photographie archéologique en France : l'apport du musée d'Archéologie nationale. Mémoire de fin d'études, École du Louvre, 2019. 18
- [143] Tania LANDES : Évaluation de la qualité de modèles 3D issus de nuages de points. *XYZ*, 171, 2022. 26, 27
- [144] Tania LANDES et Pierre GRUSSENMEYER : Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre : systèmes et caractéristiques. *XYZ*, 128:37–49, 2011. 28
- [145] Tania LANDES, Pierre GRUSSENMEYER et Hakim BOULAASSAL : Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre : acquisition, traitement des données et applications. *XYZ*, 129:25–38, 2011. 29
- [146] Anne-Sophie LAURENT, Camille MANGIER et Maxime SEGUIN : LumRas de MicMac : une alternative aux techniques de RTI. In *Actes du séminaire Archéologie : imagerie numérique et 3D*, 2018. 72
- [147] Antoine LAURENT : Acquisition 3D des statues-menhirs du PETR des Hautes Terres d'Oc. Rapport technique, ministère de la Culture (SRA Occitanie), 2020. 62
- [148] Antoine LAURENT : Numérisation 3D des statues-menhirs de l'Aveyron. Rapport technique, ministère de la Culture (SRA Occitanie), 2023. 60, 62
- [149] Antoine LAURENT, Jean MÉLOU, Benjamin COUPRY, Thomas SAGORY, Carole FRITZ et Jean-Denis DUROU : Intégration de la stéréophotométrie pour le patrimoine dans la suite logicielle open-source Alicevision Meshroom. In *Actes des Journées du Consortium 3D SHS*, pages 1–10, 2023. 145
- [150] Aimé LAUSSEDAT : *La métrophotographie*. Gauthier-Villars, 1899. 19
- [151] Jean-Loïc LE QUELLEC, Jon HARMAN, Claudia DEFRASNE et Frédérique DUQUENOY : DStretch® et l'amélioration des images numériques : applications à l'archéologie des images rupestres. *Les Cahiers de l'AARS*, 16:177–198, 2013. 20
- [152] Mireille LEDUC, éditeur. *Les sites mégalithiques : conservation et mise en valeur, un enjeu européen*, 2018. 6
- [153] Amédée LEMOZI : *La grotte-temple du Pech-Merle : un nouveau sanctuaire préhistorique*. Auguste Picard, 1929. 17, 128
- [154] Bruno LÉVY, Sylvain PETITJEAN, Nicolas RAY et Jérôme MAILLOT : Least squares conformal maps for automatic texture atlas generation. In *Seminal Graphics Papers : Pushing the Boundaries*, volume 2, pages 193–202, 2023. 58
- [155] Min LI, Zhenglong ZHOU, Zhe WU, Boxin SHI, Changyu DIAO et Ping TAN : Multi-view photometric stereo : A robust solution and benchmark dataset for spatially varying isotropic materials. *IEEE Transactions on Image Processing*, 29:4159–4173, 2020. 70

BIBLIOGRAPHIE

- [156] Zhaoshuo LI, Thomas MÜLLER, Alex EVANS, Russell TAYLOR, Mathias UNBERATH, Ming-Yu LIU et Chen-Hsuan LIN : Neuralangelo : High-Fidelity Neural Surface Reconstruction. *In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 8456–8465, 2023. 148
- [157] Yajie LIU, Kevin HAN et William RASDORF : Assessment and prediction of impact of flight configuration factors on UAS-based photogrammetric survey accuracy. *Remote Sensing*, 14(16):4119, 2022. 64
- [158] Michel LORBLANCHET : *Art pariétal : les grottes ornées du Quercy*. Éditions du Rouergue, 2016. 128
- [159] Benjamin LORIOT : *Automatisation de l'acquisition et des post-traitements en numérisation 3D*. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 2009. 13, 14
- [160] David LOWE : Object recognition from local scale-invariant features. *In Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Computer Vision*, volume 2, pages 1150–1157, 1999. 55
- [161] Thomas LUHMANN, Stuart ROBSON, Stephen KYLE et Jan BOEHM : *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2023. 26, 36, 37, 144
- [162] Lindsay MACDONALD, Vera Moitinho de ALMEIDA et Mona HESS : Three-dimensional reconstruction of Roman coins from photometric image sets. *Journal of Electronic Imaging*, 26(1):011017–1–011017–20, 2017. 79
- [163] Lindsay MACDONALD, Isabella TOSCHI, Erica NOCERINO, Mona HESS, Fabio REMONDINO et Stuart ROBSON : Accuracy of 3D reconstruction in an illumination dome. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41:69–76, 2016. 147
- [164] Michel MAILLÉ : *Hommes et femmes de pierre. Statues-menhirs du Rouergue et du Haut-Languedoc*. Archives d'écologie préhistorique, 2010. 16, 19, 40
- [165] Thomas MALZBENDER, Dan GELB et Hans WOLTERS : Polynomial texture maps. *In Proceedings of the ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics*, pages 519–528, 2001. 33, 80
- [166] Thomas MALZBENDER, Dan GELB, Hans WOLTERS et Bruce ZUCKERMAN : Enhancement of Shape Perception by Surface Reflectance Transformation. *In Proceedings of the 9th International Fall Workshop on Vision, Modeling and Visualization*, 2004. 33
- [167] Michel MAUMONT : L'espace 3D : de la photogrammétrie à la lasergrammétrie. *In Situ - Revue des patrimoines*, 13, 2010. 21
- [168] Roberto MECCA, Fotios LOGOTHETIS, Ignas BUDVYTIS et Roberto CIPOLLA : Lucas : A dataset for near-field point light source photometric stereo. *arXiv preprint arXiv :2104.13135*, 2021. 70
- [169] Roberto MECCA, Yvain QUÉAU, Fotios LOGOTHETIS et Roberto CIPOLLA : A single-lobe photometric stereo approach for heterogeneous material. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, 9(4):1858–1888, 2016. 82

-
- [170] Jean MÉLOU : *Fusion d’approches photométriques et géométriques pour la création de modèles 3D*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2020. 10, 51
- [171] Jean MÉLOU, Antoine LAURENT, Carole FRITZ et Jean-Denis DUROU : 3D digitization of heritage : photometric stereo can help. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume 48, pages 145–152, 2022. 81, 120, 140
- [172] Jean MÉLOU, Yvain QUÉAU, Jean-Denis DUROU, Fabien CASTAN et Daniel CREMERS : Variational reflectance estimation from multi-view images. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 60(9):1527–1546, 2018. 120
- [173] Michel MENU : Bédeilhac-et-Aynat – Grotte de Bédeilhac. Relevé d’art rupestre (1990-1991). *Archéologie de la France-Informations*, Occitanie, 1997. 17, 45
- [174] Ben MILDENHALL, Pratul SRINIVASAN, Matthew TANCIK, Jonathan BARRON, Ravi RAMAMOORTHY et Ren NG : NeRF : Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis. In *Proceedings of the 16th European Conference on Computer Vision*, pages 405–421, 2020. 21, 148
- [175] James MILES, Mike PITTS, Hembo PAGI et Graeme EARL : Photogrammetry and RTI Survey of Hoa Hakananai’a Easter Island Statue. *Across Space and Time*, page 144, 2013. 35
- [176] Daisuke MIYAZAKI, Kenji HARA et Katsushi IKEUCHI : Median Photometric Stereo as Applied to the Segonko Tumulus and Museum Objects. *International Journal of Computer Vision*, 86(2):229–242, 2010. 79
- [177] Mark MONMONIER : *Comment faire mentir les cartes*. Éditions Autrement, 2019. 23
- [178] Fabrice MONNA, Tanguy ROLLAND, Jérôme MAGAIL, Yury ESIN, Benjamin BOHARD, Anne-Caroline ALLARD, Josef WILCZEK et Carmela CHATEAU-SMITH : ERA : A new, fast, machine learning-based software to document rock paintings. *Journal of Cultural Heritage*, 58:91–101, 2022. 20
- [179] Olivier MOREL : *Environnement actif pour la reconstruction tridimensionnelle de surfaces métalliques spéculaires par imagerie polarimétrique*. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 2005. 51
- [180] María Mercedes MORITA, Daniel Alejandro Loaiza CARVAJAL, Ivana Leticia González BAGUR et Gabriel Mario BILMES : A combined approach of SFM-MVS photogrammetry and reflectance transformation imaging to enhance 3D reconstructions. *Journal of Cultural Heritage*, 68:38–46, 2024. 35, 118
- [181] Pierre MOULON : *Positionnement robuste et précis de réseaux d’images*. Thèse de doctorat, Université de Paris-Est, 2014. 51
- [182] Pierre MOULON, Pascal MONASSE, Romuald PERROT et Renaud MARLET : Openmvg : Open multiple view geometry. In *Proceedings of the First International Workshop on Reproducible Research in Pattern Recognition*, pages 60–74, 2017. 10
- [183] Mark MUDGE, Tom MALZBENDER, Carla SCHROER et Marlin LUM : New reflection transformation imaging methods for rock art and multiple-viewpoint display. In

BIBLIOGRAPHIE

- Proceedings of the 7th International Conference on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage*, pages 195–202, 2006. 34
- [184] Mark MUDGE, Jean-Pierre VOUTAZ, Carla SCHROER et Marlin LUM : Reflection Transformation Imaging and Virtual Representations of Coins from the Hospice of the Grand St Bernard. In *Proceedings of the 6th International Conference on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage*, pages 29–39, 2005. 34
- [185] Harold MYTUM et John Robert PETERSON : The application of reflectance transformation imaging (RTI) in historical archaeology. *Historical Archaeology*, 52:489–503, 2018. 34
- [186] Shree NAYAR et Yasuo NAKAGAWA : Shape from focus. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 16(8):824–831, 1994. 51
- [187] François-Charles-Ernest OCTOBON : Statues-menhirs, stèles gravées, dalles sculptées. *Revue Anthropologique*, 41:297–576, 1931. 39
- [188] Joseph PADFIELD, David SAUNDERS et Tom MALZBENDER : Polynomial texture mapping : a new tool for examining the surface of paintings. *ICOM Committee for Conservation*, 1:504–510, 2005. 34
- [189] Patrick PAILLET : L’art du relevé ou le relevé de l’art. *Revue Archéologique de l’Ouest*, 39:237–241, 2023. 17
- [190] Anthony PAMART : *Spatialisation, Fusion et Enrichissement d’Imagerie Multimodale pour les Sciences du Patrimoine*. Thèse de doctorat, HESAM Université, 2024. 37, 44
- [191] Anthony PAMART, Roxane ROUSSEL, Emile HUBERT, Alain COLOMBINI, Renato SALLERI, El Mustapha MOUADDIB, Yuly CASTRO, Gaëtan LE GOÏC et Alamin MANSOURI : A semantically enriched multimodal imaging approach dedicated to conservation and restoration studies. In *3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*, 2022. 149
- [192] Annie PHILIPPON : *Statues-menhirs, des énigmes de pierre venues du fond des âges*. Éditions du Rouergue, 2002. 6
- [193] Marc PIERROT-DESEILLIGNY et Isabelle CLERY : Évolutions récentes en photogrammétrie et modélisation 3D par photo des milieux naturels. *Collection EDYTEM. Cahiers de géographie*, 12(1):51–66, 2011. 11, 47
- [194] Édouard PIETTE : *L’Art pendant l’âge du Renne*. Masson, 1907. 91
- [195] Romain PIGEAUD : L’art paléolithique est-il un art pompier ? Ou comment l’abbé Breuil fit accepter l’art paléolithique. In *Un siècle de construction du discours scientifique en préhistoire, Actes du 26e congrès préhistorique de France, centenaire de la SPF*, pages 167–184, 2007. 16
- [196] Geneviève PINÇON, Oscar FUENTES et Camille BOURDIER : Sortir de la grotte. *Les nouvelles de l’archéologie*, 154:82–87, 2018. 4
- [197] Hugo PIRES, Luís GONÇALVES SECO, Joao FONTE, Maria João CORREIA SANTOS et Orlando SOUSA : Morphological Residual Model. A tool for enhancing epigraphic

- readings of highly eroded surfaces. *Information Technologies for Epigraphy and Cultural Heritage*, pages 133–144, 2014. 40
- [198] Gilles PITARD, Gaëtan LE GOÏC, Alamin MANSOURI, Hugues FAVRELIÈRE, Simon-Frederic DESAGE, Serge SAMPER et Maurice PILLET : Discrete modal decomposition : a new approach for the reflectance modeling and rendering of real surfaces. *Machine Vision and Applications*, 28:607–621, 2017. 34
- [199] Federico PONCHIO, Massimiliano CORSINI et Roberto SCOPIGNO : A compact representation of relightable images for the web. *In Proceedings of the 23rd International ACM Conference on 3D Web Technology*, pages 1–10, 2018. 34
- [200] Yvain QUÉAU : *Reconstruction tridimensionnelle par stéréophotométrie*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2015. 51
- [201] Yvain QUÉAU, Bastien DURIX, Tao WU, Daniel CREMERS, François LAUZE et Jean-Denis DUROU : LED-based photometric stereo : Modeling, calibration and numerical solution. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 60(3):313–340, 2018. 82
- [202] Yvain QUÉAU, Jean-Denis DUROU et Jean-François AUJOL : Normal integration : A survey. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 60:576–593, 2018. 138
- [203] Yvain QUÉAU, Jean-Denis DUROU et Jean-François AUJOL : Variational methods for normal integration. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 60(4):609–632, 2018. 118
- [204] Yvain QUÉAU, Roberto MECCA et Jean-Denis DUROU : Unbiased photometric stereo for colored surfaces : A variational approach. *In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 4359–4368, 2016. 148
- [205] Jeremy REIZENSTEIN, Roman SHAPOVALOV, Philipp HENZLER, Luca SBORDONE, Patrick LABATUT et David NOVOTNY : Common objects in 3d : Large-scale learning and evaluation of real-life 3d category reconstruction. *In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, pages 10901–10911, 2021. 68
- [206] Fabio REMONDINO et Sabry EL-HAKIM : Image-based 3D modelling : a review. *The Photogrammetric Record*, 21(115):269–291, 2006. 59
- [207] Jieji REN, Feishi WANG, Jiahao ZHANG, Qian ZHENG, Mingjun REN et Boxin SHI : Diligent102 : A photometric stereo benchmark dataset with controlled shape and material variation. *In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 12581–12590, 2022. 70
- [208] Olivia RIVERO, Juan RUIZ-LÓPEZ, Iñaki INTXAURBE, Sergio SALAZAR et Diego GARATE : On the limits of 3D capture : A new method to approach the photogrammetric recording of palaeolithic thin incised engravings in Atxurra Cave (northern Spain). *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 14:e00106, 2019. 72
- [209] Émile RIVIÈRE : La grotte de la Mouthe (Dordogne). *Bulletins et mémoires de la Société d’anthropologie de Paris*, 8(1):302–329, 1897. 16
- [210] Émile RIVIÈRE : Les dessins gravés de la grotte de La Mouthe (Dordogne). *Bulletins et mémoires de la Société d’anthropologie de Paris*, 2(1):509–517, 1901. 15

BIBLIOGRAPHIE

- [211] Gabriel RODRIGUEZ : La statuaire mégalithique du bassin de l'Agout et sa relation avec la culture Saintponienne. *In Art et symboles du mégalithisme européen : actes du 2e colloque international sur l'art mégalithique*, pages 195–216, 1997. 40
- [212] Gabriel RODRIGUEZ : Quelques 'fantaisies' sur la statuaire mégalithique saintponienne. *In Hommes et passé des Causses : hommage à Georges Costantini*, pages 135–140, 2006. 16
- [213] Gabriel RODRIGUEZ : La statuaire et les saintponiens en Haut-Languedoc. *In Statues-menhirs et pierres levées du Néolithique à aujourd'hui : actes du 3e colloque international sur la statuaire mégalithique*, pages 351–365, 2015. 16
- [214] Thomas SAGORY : Le musée d'Archéologie nationale et Domaine national de Saint-Germain-en-Laye face aux enjeux du numérique. *Antiquités nationales*, 48, 2018. 66
- [215] Jean-Paul SAINT-AUBIN : *le relevé et la représentation de l'architecture*. Numéro 2 de Documents & Méthodes. Inventaire général - ELP, 1992. 3
- [216] Sergio SALAZAR, Diego GARATE, Iñaki INTXAURBE, Olivia RIVERO et Javier MORENO : An unknown "classic cave" : Re-evaluation of El Salitre (Ajanedo, Cantabria, Spain) rock art with 3D digital recording methodologies. *Journal of Archaeological Science : Reports*, 26:101921, 2019. 18
- [217] Hiroaki SANTO, Masaki SAMEJIMA, Yusuke SUGANO, Boxin SHI et Yasuyuki MATSUHITA : Deep photometric stereo network. *In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision Workshops*, pages 501–509, 2017. 82
- [218] Enoc SANZ-ABLANEDO, Jim CHANDLER, José Ramón RODRÍGUEZ-PÉREZ et Celestino ORDÓÑEZ : Accuracy of unmanned aerial vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. *Remote Sensing*, 10(10):1606, 2018. 64
- [219] Georges SAUVET : Bédeilhac, grotte. *In Bouquetins et Pyrénées*. Presses Universitaires de Provence, 2022. 45
- [220] Johannes SCHÖNBERGER et Jan-Michael FRAHM : Structure-from-Motion Revisited. *In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 4104–4113, 2016. 47, 66
- [221] Johannes SCHÖNBERGER, Enliang ZHENG, Jan-Michael FRAHM et Marc POLLEFEYS : Pixelwise View Selection for Unstructured Multi-View Stereo. *In Proceedings of the 14th European Conference on Computer Vision*, volume 3, pages 501–518, 2016. 47, 66
- [222] Peter SCHÖNEMANN : A generalized solution of the orthogonal procrustes problem. *Psychometrika*, 31(1):1–10, 1966. 124
- [223] Catherine SCHWAB : La réouverture de la salle Piette : histoire d'une restauration. *Antiquités nationales*, 39:9–24, 2008. 91
- [224] Catherine SCHWAB, Nicolas MÉLARD et Philippe CATRO : Coup de projecteur sur la Dame de Brassempouy, de la fouille ancienne à l'étude par imagerie 3D. *Antiquités nationales*, 50–51, 2021. 33

-
- [225] Jean-Pierre SERRES : *Les statues-menhirs du groupe rouergat*. Musée archéologique de Montrozier, 1997. 40
- [226] Christian SERVELLE : Statues-menhirs du groupe rouergat. *Archéologia*, 300:58–66, 1994. 6
- [227] Christian SERVELLE : Chefs d’œuvres en péril, les statues-menhirs du Rouergue en Haut-Languedoc. *In Les sites mégalithiques : conservation et mise en valeur, un enjeu européen*, pages 189–200, 2018. 6, 16, 44
- [228] Steven SHAFER et Takeo KANADE : Using shadows in finding surface orientations. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 22(1):145–176, 1983. 51
- [229] Boxin SHI, Yasuyuki MATSUSHITA, Yichen WEI, Chao XU et Ping TAN : Self-calibrating photometric stereo. *In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 1118–1125, 2010. 122
- [230] Boxin SHI, Zhe WU, Zhipeng MO, Dinglong DUAN, Sai-Kit YEUNG et Ping TAN : A benchmark dataset and evaluation for non-lambertian and uncalibrated photometric stereo. *In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 3707–3716, 2016. 49, 70
- [231] Tal SIMCHONY, Rama CHELLAPPA et Min SHAO : Direct analytical methods for solving Poisson equations in computer vision problems. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12(5):435–446, 1990. 84, 116
- [232] William SMITH et Fufu FANG : Height from photometric ratio with model-based light source selection. *Computer Vision and Image Understanding*, 145:128–138, 2016. 83
- [233] Takafumi TAKETOMI, Hideaki UCHIYAMA et Sei IKEDA : Visual SLAM algorithms : A survey from 2010 to 2016. *IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications*, 9:1–11, 2017. 56
- [234] Aurélie TALON, Clémence CAUVIN-HARDY et Alaa CHATEAUNEUF : State of the Art of HBIM to Develop the HBIM of the HeritageCare Project. *International Journal of 3-D Information Modeling*, 6(3):33–43, 2017. 22
- [235] Ayush TEWARI, Justus THIES, Ben MILDENHALL, Pratul SRINIVASAN, Edgar TRETSCHK, Wang YIFAN, Christoph LASSNER, Vincent SITZMANN, Ricardo MARTIN-BRUALLA, Stephen LOMBARDI *et al.* : Advances in neural rendering. *Computer Graphics Forum*, 41(2):703–735, 2022. 21
- [236] Marie-Hélène THIAULT et Jean-Bernard ROY : *L’art préhistorique des Pyrénées*. Musée des Antiquités nationales, château de Saint-Germain-en-Laye, 1996. 91
- [237] Ashish TIWARI, Mihir SUTARIYA et Shanmuganathan RAMAN : LIPIDS : Learning-based Illumination Planning In Discretized (Light) Space for Photometric Stereo. *arXiv preprint arXiv :2409.02716*, 2024. 110
- [238] Gilles TOSELLO, Alain DALIS et Carole FRITZ : Copier pour montrer, connaître avant de copier. Entre recherche et médiation, le fac-similé d’art préhistorique. *Collection EDYTEM. Cahiers de géographie*, 13:89–98, 2012. 4, 134
- [239] Étienne TROUVERS : *À Paul Gauguin*. LTT, 2003. 4

BIBLIOGRAPHIE

- [240] Micka ULLMAN, Ben LAUGOMER, Ido SHICHT, Boaz LANGFORD, Shemesh YA'ARAN, Ido WACHTEL, Amos FRUMKIN et Uri DAVIDOVICH : Formation processes and spatial patterning in a late prehistoric complex cave in northern Israel informed by SLAM-based LiDAR. *Journal of Archaeological Science : Reports*, 47:103745, 2023. 29
- [241] Elisabeth VALLET : Les cartes ne sont que discours. *Liberté*, 329:62–64, 2021. 24
- [242] Romain VERGNE, Romain PACANOWSKI, Pascal BARLA, Xavier GRANIER et Christophe SCHLICK : Radiance scaling for versatile surface enhancement. *In Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, pages 143–150, 2010. 22
- [243] Robert VERGNIEUX : De la CAO à la photogrammétrie : 30 ans d'exploration des nouveaux usages de la 3D pour les SHS. *In Virtual Retrospect 2013*, volume 6, pages 173–177, 2013. 20, 36, 48
- [244] Quentin VERRIEZ, Matthieu THIVET et Anna TOMASINELLI : Un guide de bonne pratique pour la photogrammétrie en archéologie. *In Actes des Journées du Consortium 3D SHS*, 2023. 14, 37
- [245] Aurélien VILA : Mise en place d'une procédure de calibration pour un dispositif d'acquisition dédié aux techniques de Reflectance Transformation Imaging. Mémoire de fin d'études, ENS Louis-Lumière, 2017. 34
- [246] Jara VILLANUEVA et Ariel BLANCO : Optimization of ground control point (GCP) configuration for unmanned aerial vehicle (UAV) survey using structure from motion (SFM). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42:167–174, 2019. 64
- [247] Feishi WANG, Jieji REN, Heng GUO, Mingjun REN et Boxin SHI : DiLiGenT-Pi : A Photometric Stereo Benchmark Dataset with Controlled Shape and Material Variation. *In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, 2023. 70
- [248] Yiming WANG, Qin HAN, Marc HABERMANN, Kostas DANILIDIS, Christian THEOBALT et Lingjie LIU : Neus2 : Fast learning of neural implicit surfaces for multi-view reconstruction. *In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, pages 3295–3306, 2023. 125
- [249] Gerald WESTHEIMER : Visual acuity. *Annual Review of Psychology*, 16(1):359–380, 1965. 4
- [250] Andrew WITKIN : Recovering surface shape and orientation from texture. *Artificial Intelligence*, 17(1):17–45, 1981. 51
- [251] Robert WOODHAM : Photometric method for determining surface orientation from multiple images. *Optical Engineering*, 19(1):139–144, 1980. 79
- [252] Zhe WU et Ping TAN : Calibrating photometric stereo by holistic reflectance symmetry analysis. *In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 1498–1505, 2013. 122
- [253] Rosa YSSAAD-FESSELIER : *Analyse psychophysique du champ visuel : détection, identification, effet de groupement et apprentissage perceptif*. Thèse de doctorat, Psychologie cognitive, Lyon 2, 2001. 4

- [254] Klemen ZAKŠEK, Kristof OŠTIR et Žiga KOKALJ : Sky-View Factor as a Relief Visualization Technique. *Remote Sensing*, 3(2):398–415, 2011. [40](#)

Production scientifique directement liée à la thèse

Articles

- **Antoine Laurent**. *Projet Archaeoroom : l'apport de la 3D à l'étude mégalithique*. Anabases - Traditions et réceptions de l'Antiquité, volume 36, pages 312–317, 2022.
- **Antoine Laurent**, Jean Mélou, Catherine Schwab, Rolande Simon-Millot, Sophie Féret, Thomas Sagory, Carole Fritz, Jean-Denis Durou. *Lumière et 3D : une exploration méthodologique des techniques de numérisation adaptées à une sélection d'objets du musée d'Archéologie nationale*. Antiquités nationales, volume 54, 2024.
- **Antoine Laurent**, Jean Mélou, Rolande Simon-Millot, Aurélien Pierre, Thomas Sagory, Carole Fritz, Jean-Denis Durou. *De l'utilité de mettre en relief la statuaire néolithique du Rouergue par les techniques photographiques de reconstruction 3D*. Monographies Instrumentum, Éditions Mergoïl, inPress, Les Monographies Instrumentum, à paraître en 2025.
- **Antoine Laurent**. *Approcher par la 3D les statues-menhirs du Pôle d'équilibre territorial et rural (PETR) des Hautes Terres d'Oc (Occitanie)*. Pierre à bâtir, pierre à penser : systèmes techniques et productions symboliques des pré et protohistoire méridionales. Actes des 13èmes Rencontres Méridionales de Préhistoire Récente, Rodez (Aveyron), pages 327–334, 2021, Archives d'Écologie Préhistorique, 978-2-35842-033-4, 2023.

Communications scientifiques

- **Antoine Laurent**. *Numérisation par photogrammétrie des statues-menhirs du PETR des Hautes Terres d'Oc (Occitanie)*. Journée Départementale d'Archéologie du Tarn, Albi, octobre 2021.
- **Antoine Laurent**, Jean-Denis Durou, Carole Fritz. *ARCHAEOROOM : la 3D au service du patrimoine archéologique pour son étude et sa conservation dans la science ouverte*. Les journées du Consortium 3D pour les SHS 2021, Bordeaux, décembre 2021.
- **Antoine Laurent**, Jean Mélou, Thomas Sagory, Carole Fritz, Jean-Denis Durou. *Contributions of Photometry to the 3D-digitization of Heritage*. Proceedings of the 4th Workshop on Structuring and Understanding of Multimedia heritAge Contents (SUMAC 2022), Lisbonne, Portugal, pages 33–41, octobre 2022.
- **Antoine Laurent**, Jean Mélou, Carole Fritz, Jean-Denis Durou. *Numérisation 3D du patrimoine par stéréophotométrie*. Les journées du Consortium 3D pour les SHS (JC3DSHS 2022), Nantes, décembre 2022.
- Jean Mélou, **Antoine Laurent**, Carole Fritz, Jean-Denis Durou. *3D Digitization of Heritage : Photometric Stereo can Help*. ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Würzburg, Allemagne, pages 145–152, décembre 2022.

- **Antoine Laurent**, Jean Mélou, Carole Fritz, Jean-Denis Durou. *Projet Archaeoroom : numérisation du patrimoine archéologique et développement de la suite logicielle open-source AliceVision Meshroom*. Colloque international Imagerie scientifique et objet archéologique (CORPUS 2023), Association Corpus, Université de Caen Normandie, Caen, mars 2023.
- **Antoine Laurent**, Jean Mélou, Thomas Sagory, Gilles Tosello, Carole Fritz, Jean-Denis Durou. *3D scanning for rock art studies : Chauvet-Pont d'Arc cave*. UISPP XX World Congress : Exploring the world's prehistory (UISPP 2023), UISPP : Union Internationale des Sciences Préhistoriques et Protohistoriques, Timisoara, Roumanie, septembre 2023.
- Jean Mélou, Yvain Quéau, Marjorie Redon, **Antoine Laurent**, Jean-Denis Durou. *Thin Details Meet Large-Scale 3D-Reconstruction : Photometric Stereo for Cultural Heritage*. 1st international conference on artificial Intelligence and applied Mathematics for History and Archaeology (IAMAHA 2023), Session 3 : AI-AM FOR MATERIALS OF THE PAST, Nice, novembre 2023.
- **Antoine Laurent**, Jean Mélou, Benjamin Coupry, Thomas Sagory, Carole Fritz, Jean-Denis Durou. *Intégration de la stéréophotométrie pour le patrimoine dans la suite logicielle open-source Alicevision Meshroom*. Actes des Journées du Consortium 3D SHS (JC3DSHS 2023), Lyon, pages 1–10, novembre 2023.
- Benjamin Coupry, **Antoine Laurent**, Jean Mélou, Yvain Quéau, Jean-Denis Durou. *Photographic 3D Scanning in the Wild*. Advances in Applied Mathematics and Learning Approaches for Cultural Heritage and the Arts, Cagliari, Italie, avril 2024.
- Michel Dabas, Thomas Sagory, **Antoine Laurent**, Jean-Baptiste Houal, Matteo Tanghe, et al. *L'apport des techniques de numérisation à la recherche et à la valorisation des tablettes de Grand*. Les tablettes zodiacales de Grand (Vosges) : nouvelles recherches sur les deux diptyques, Paris, mai 2024.
- Benjamin Coupry, Jean Mélou, **Antoine Laurent**, Baptiste Brument, Pierre Gurdjos, Yvain Quéau, Jean-Denis Durou. *Stéréophotométrie avec estimation locale de l'éclairage - Application à la reconstruction 3D du patrimoine archéologique*. Congrès de Reconnaissance des Formes, Image, Apprentissage et Perception (RFIAP 2024), Lille, juillet 2024.
- **Antoine Laurent**, Benjamin Coupry, Jean Mélou, Yvain Quéau, Carole Fritz, Jean-Denis Durou. *(R)-evolution in the implementation of photometric stereo - Application to archaeology*. Low-Cost 3D - Sensors, Algorithms, Applications, ISPRS, Brescia, Italie, décembre 2024.

Rapports d'opérations archéologiques

L'auteur a participé à une trentaine de rapports d'opérations archéologiques, dont deux en tant que responsable de l'opération :

- **Antoine Laurent**. *Numérisation 3D des statues-menhirs de l'Aveyron*. Direction de l'archéologie de l'Aveyron, pages 1–601, 2023.
- **Antoine Laurent**. *Numérisation 3D du panneau des Chevaux ponctués du Pech Merle*. Service Régional de l'Archéologie, 2024.

Titre : De l'utilité aux usages de la numérisation 3D pour le patrimoine archéologique

Mots clés : Patrimoine, Numérisation 3D, Archéologie

Résumé : A partir des usages de la numérisation 3D en archéologie, le projet de thèse Archaeoroom interroge les pratiques actuelles tant pour la recherche que pour la conservation des vestiges. Les outils déployés sur le terrain possèdent une certaine utilité en fonction des projets. Toutefois ils ne répondent pas pleinement aux besoins de précision et de résolution pour la lecture fine du relief et de la couleur dans des contextes particuliers. Le corpus se veut donc le plus large possible afin de couvrir un maximum de faciès, de matériaux, de périodes et de méthodes de travail. Il comprend des grottes ornées (Chauvet, Pech-Merle, Mas d'Azil, Marsoulas, Bèdeilhac, Foissac) pour lesquelles la création de supports pour toutes les disciplines est cruciale notamment pour l'étude de l'art pariétal, des mégalithes afin de produire des relevés 3D standardisés sur un large territoire (statues-menhirs rouergates, stèles du pays Gédéo en Ethiopie, dolmen de Gréalou dans le Lot) et du mobilier archéologique issu de plusieurs musées pour confronter les outils à la notion de vérité terrain sur des objets complexes (Musée d'archéologie nationale à Saint-Germain-en-Laye, Musée Saint-Raymond à Toulouse, Centre de Préhistoire du Pech Merle à Cabrerets, Musée et sites archéologiques de Saint-Romain-en-Gal). La thèse propose l'utilisation d'une méthode confidentielle dans les sciences du patrimoine issue du domaine de la vision par ordinateur. Ce projet interdisciplinaire entre archéologie et informatique, s'applique à déterminer l'utilité de la stéréophotométrie ainsi que sa complémentarité avec les pratiques afin d'en faciliter son appropriation par les acteurs. Cette recherche s'appuie sur le développement du logiciel open-source AliceVision Meshroom avec le souhait qu'il intègre pleinement la boîte à outil des archéologues. De plus, avec la révolution en cours des méthodes par réseau de neurones, la stéréophotométrie multi-vues a désormais la capacité de modifier le processus de numérisation 3D du patrimoine en devenant un outil de reconstruction 3D à part entière.

Title: From the usefulness to the uses of 3D digitisation for archaeological heritage

Key words: Cultural heritage, 3D digitisation, Archaeology

Abstract: Based on the uses of 3D digitisation in archaeology, the Archaeoroom thesis project examines current practices for both research and the conservation of remains. The tools deployed in the field have a certain usefulness depending on the project. However, they do not fully meet the need for precision and resolution for the accurate reading of relief and colour in specific contexts. The corpus is therefore intended to be as broad as possible, to cover as many facies, materials, periods and working methods as possible. It includes decorated caves (Chauvet, Pech-Merle, Mas d'Azil, Marsoulas, Bèdeilhac, Foissac) for which the creation of supports for all disciplines is crucial, particularly for the study of cave art, megaliths in order to produce standardised 3D readings over a wide area (statue-menhirs from Rouerga, stelae from the Gédéo country in Ethiopia, dolmen at Gréalou in the Lot department) and archaeological objects from several museums in order to test the tools against the notion of ground truth for complex objects (Musée d'archéologie nationale at Saint-Germain-en-Laye, Musée Saint-Raymond in Toulouse, Centre de Préhistoire du Pech Merle at Cabrerets, Musée et sites archéologiques de Saint-Romain-en-Gal). The thesis proposes the use of a confidential method in the heritage sciences stemming from the field of computer vision. This interdisciplinary project between archaeology and computer science aims to determine the usefulness of stereophotometry and its complementarity with current practices, in order to facilitate its appropriation by those involved. This research is based on the development of the open-source software AliceVision Meshroom, which we hope will become an integral part of the archaeologists' toolbox. In addition, with the ongoing revolution in neural network methods, multi-view stereophotometry now has the capacity to modify the process of 3D digitisation of heritage by becoming a fully-fledged 3D reconstruction tool.