



HAL
open science

Intégration de la stéréophotométrie pour le patrimoine dans la suite logicielle open-source Alicevision Meshroom

Antoine Laurent, Jean Mélou, Benjamin Coupry, Thomas Sagory, Carole
Fritz, Jean-Denis Durou

► To cite this version:

Antoine Laurent, Jean Mélou, Benjamin Coupry, Thomas Sagory, Carole Fritz, et al.. Intégration de la stéréophotométrie pour le patrimoine dans la suite logicielle open-source Alicevision Meshroom. Les Journées du Consortium 3D SHS, Lyon (JC3DSHS 2023), Nov 2023, Lyon, France. pp.1–10. hal-04469351v2

HAL Id: hal-04469351

<https://hal.science/hal-04469351v2>

Submitted on 6 Jun 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NoDerivatives 4.0 International License



JC3DSHS 2023, Les Journées du Consortium 3D SHS,
22-24 nov. 2023 Lyon (France)



Antoine Laurent, Jean Mélou, Benjamin Coupry, Thomas Sagory, Carole Fritz, et al.. Intégration de la stéréophotométrie pour le patrimoine dans la suite logicielle open-source Alicevision Meshroom. Les Journées du Consortium 3D SHS, Lyon (JC3DSHS 2023), Nov 2023, Lyon, France. pp.1--10. [⟨hal-04469351⟩](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04469351)

pp. 15-24

INTÉGRATION DE LA STÉRÉOPHOTOMÉTRIE POUR LE PATRIMOINE DANS LA SUITE LOGICIELLE OPEN-SOURCE ALICEVISION MESHROOM

Antoine Laurent¹, Jean Mélou², Benjamin Coupry², Thomas Sagory³, Carole Fritz⁴, Jean-Denis Durou²

¹IRIT (UMR 5505), TRACES (UMR 5608), Toulouse

²IRIT (UMR 5505), Toulouse

³Musée d'Archéologie nationale, MC, Saint-Germain-en-Laye

⁴LAMS (UMR 8220), Paris

Mots-clés : *Open source - AliceVision - Meshroom - Stéréophotométrie - Patrimoine culturel*

Résumé : *La numérisation photographique des vestiges est aujourd'hui une pratique courante dans le cadre d'opérations archéologiques, grâce à l'utilisation de la photogrammétrie. Cette méthode de reconstruction 3D géométrique s'adapte bien aux objets communément rencontrés sur le terrain, qui sont souvent conformes au modèle lambertien caractéristique des matériaux mats, à l'opposé des cas difficiles que sont les surfaces brillantes et/ou peu texturées. À la suite des travaux autour de la suite logicielle AliceVision entrepris depuis 2009, le projet de thèse Archaeoroom⁵ entreprend de questionner l'utilité de la stéréophotométrie pour l'étude et la conservation du patrimoine. Nous nous efforcerons ici de présenter le travail portant sur l'intégration de la stéréophotométrie, à la convergence entre le développement d'une suite logicielle open-source et les pratiques de numérisation.*

1. AliceVision Meshroom : une suite logicielle de reconstruction 3D photographique

1.1 Bref historique du projet AliceVision⁶

L'aventure AliceVision débute avec deux projets de thèse menés entre 2009 et 2013. Tout d'abord celle de Michal Jancosek, dirigée par Tomas Pajdla, portant sur le développement d'un pipeline de stéréoscopie multi-vues (MVS) appelé CMPMVS, 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. Ces collaborations mettent en mouvement des acteurs de la recherche publique européenne (IRIT à Toulouse, INRIA, École des Ponts ParisTech, laboratoire Simula à Oslo, Laboratoire CTU à Prague) et des partenaires industriels (Mikros Image, société Duran Duboi).

Cette synergie se concrétise par deux projets européens. Le premier, POPART, traite des questions de la prévisualisation 3D et du suivi de caméra propre aux besoins des effets spéciaux (VFX). Le second projet, LADIO, aborde le traitement spécifique des données 3D autour d'un hub des données entre les équipes de tournage et celles de post-production. Ces projets aboutiront à la première publication, en août 2018, de l'interface Meshroom. En parallèle, la thèse de Jean Mélou⁷, dirigée par Jean-Denis Durou et Yvain Quéau, s'applique à conjuguer les approches géométrique et photométrique de reconstruction 3D.⁸

[5] <https://www.theses.fr/s305688>

[6] <https://alicevision.org/association/>

[7] Mélou 2020

[8] Griwodz et al. 2021

L'étape suivante est un laboratoire commun de l'ANR dénommé ALICIA-Vision, qui réunit l'IRIT et la société Mikros Image autour de quatre axes : l'amélioration de la performance et de la robustesse des pipelines de reconstruction 3D, le suivi de caméra et la localisation d'objets en mouvement, l'extraction des caractéristiques géométriques et photométriques dans un cadre multi-vues, enfin la détermination des matériaux à partir de données multi-vues.

1.2 Une interface nodale pour la reconstruction⁹

L'interface Meshroom de la suite logicielle AliceVision est de type nodal. Le cœur de son fonctionnement repose sur des étapes de traitement bien définies et séparées. Ainsi, il existe pour chaque nœud des données spécifiées en entrée et en sortie. L'espace de graphe de nœuds (cf. figure 1) permet de visualiser et d'éditer toute la chaîne de traitement. Des pipelines pré-enregistrés sont livrés avec le logiciel, toutefois 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 ouvre la possibilité de créer de nouveaux nœuds permettant de lancer n'importe quel code Python. Cette fonctionnalité est au centre du développement d'une interface pour le logiciel Micmac¹⁰ développé par l'IGN¹¹

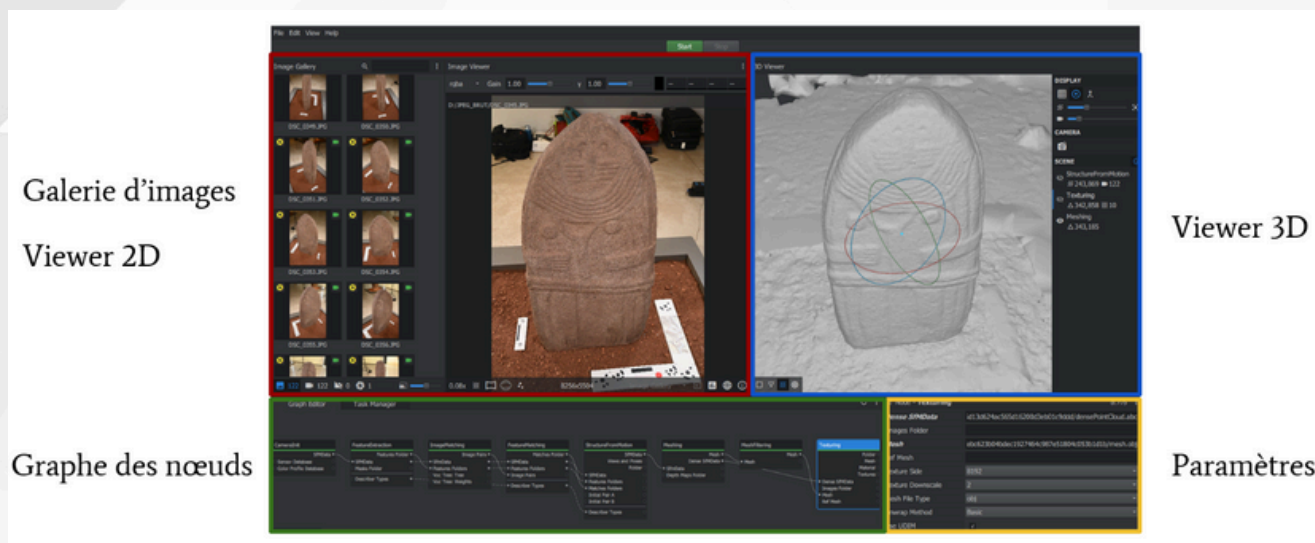


Fig. 1 - Visualisation des différents espaces de l'interface Meshroom avec un jeu de données photogrammétriques de la Dame de Saint-Sernin (musée Fenaille, Rodez).

Le fonctionnement du logiciel Meshroom est très simple, puisqu'il suffit de choisir un pipeline puis de glisser/déposer ses photographies dans la galerie d'images pour enfin appuyer sur le bouton "start". Un double-clic sur un nœud déjà calculé permet d'afficher la donnée produite dans l'espace 2D ou l'espace 3D, alors qu'un clic droit ouvre le dossier où sont stockés les résultats. Cette première approche rend l'interface très accessible, tout en permettant à un utilisateur expert de retrouver tous les paramètres du traitement.

[9] <https://alicevision.org/#photogrammetry>

[10] <https://github.com/micmacIGN/micmac>

[11] <https://shs3d.hypotheses.org/developpement-interface-multiplateforme-micmac-v2>

2. Projet Archaeoroom : la stéréophotométrie pour le patrimoine

Le projet de thèse Archaeoroom, porté par Antoine Laurent depuis 2021 et encadré par Carole Fritz et Jean-Denis Durou, aborde la question de l'utilité de la stéréophotométrie pour le patrimoine. Les objectifs sont de proposer de nouvelles méthodes de captation 3D surfacique à partir de photographies, de détecter et reconstruire avec finesse les détails tout en captant avec précision la couleur, et ce dans plusieurs types de situations représentatives des activités archéologiques et patrimoniales.

2.1 Rappels sur la stéréophotométrie

La reconstruction 3D à partir de photographies, ou photogrammétrie, est souvent assimilée à la stéréoscopie. Le relief est obtenu par la mise en correspondance d'images prises sous différents angles. Nous proposons d'utiliser une autre méthode qui permet de reconstruire le volume sans changer la pose de l'appareil photographique et en jouant sur la lumière. La stéréophotométrie nécessite de contrôler parfaitement l'éclairage¹², ce qui peut sembler difficile à réaliser en dehors du laboratoire.

Comme pour la stéréoscopie, la stéréophotométrie se fonde sur l'hypothèse lambertienne, selon laquelle la luminance d'un objet opaque est indépendante de la position de l'observateur, c'est-à-dire que la "sensation de clarté" d'un point de la surface ne dépend pas du point de vue (cf. figure 2). Mais, alors que la stéréoscopie utilise une version implicite de cette hypothèse, la stéréophotométrie en fait un usage explicite, sous la forme de l'égalité suivante, qui est une relation de proportionnalité :

$$\textit{Luminance} = \textit{Albédo} \times \textit{Ombrage}$$

L'albédo, caractéristique de la couleur de la surface, est une grandeur sans dimension définie dans chaque canal coloré, qui varie continûment entre 0 et 1, tandis que l'ombrage, égal au flux lumineux reçu par unité de surface, dépend de l'éclairage et de l'orientation locale de la surface. C'est précisément parce que la luminance dépend de l'orientation locale de la surface de l'objet que le relief peut être retrouvé, pour peu que l'on utilise suffisamment d'éclairages.

Il peut sembler difficile de connaître la luminance d'une surface si l'on ne dispose pas d'un instrument de mesure approprié. Or, il ressort de la modélisation de la photométrie photographique que le niveau de couleur enregistré dans chaque canal de l'image par le récepteur photosensible est proportionnel à la luminance, sous couvert que le récepteur soit lui-même linéaire. L'appareil photographique peut donc être considéré comme un instrument de mesure de la luminance.

[12] Durou et al., 2020

Nous avons déjà dit que la reconstruction 3D par stéréophotométrie nécessitait de connaître précisément l'éclairage. Cette estimation est généralement réalisée en positionnant une ou plusieurs sphères dans la scène. Même si cette précaution peut sembler fastidieuse, elle sert à éviter de résoudre la stéréophotométrie non calibrée, qui constitue un problème "mal posé" nettement plus difficile.



Fig. 2 - Quatre photographies du Panneau des lions (grotte Chauvet-Pont-d'Arc, Ardèche) permettent d'illustrer le lien entre albédo et ombrage du modèle lambertien.

Au registre des bénéfiques, la stéréophotométrie est plus fiable que la photogrammétrie lorsque la surface à reconstruire est lisse et sans texture, car elle n'est pas tributaire de l'étape d'appariement entre images. En effet, si la pose de l'appareil photographique est fixe, un même pixel correspond au même point de la surface dans toutes les images.

En outre, la stéréophotométrie est plus rapide que la photogrammétrie, car l'estimation du champ de normales peut être effectuée localement, c'est-à-dire en chaque pixel indépendamment de ses voisins. Enfin, et là n'est pas la moindre de ses qualités, la stéréophotométrie permet d'estimer également l'albédo de la scène, autrement dit, la couleur intrinsèque de l'objet débarrassée de tout ombrage.

Les deux grandes étapes de la résolution de la stéréophotométrie mono-pose sont l'estimation des normales et de l'albédo, puis l'intégration des normales, c'est-à-dire la transformation d'un champ de normales en carte de profondeur.

2.2 Le pipeline intégré à Meshroom¹³

Le pipeline de stéréophotométrie, dans la version 2023.3 de Meshroom, permet d'obtenir l'albédo et le champ de normales. Il est composé de quatre nœuds pour effectuer cette tâche. Le premier, qui sert à l'indexation et à l'initialisation des images, est commun à tous les pipelines. Toutefois, pour la stéréophotométrie, il faut déposer un dossier de nom "ps_01" comportant l'ensemble des photographies de la prise de vues mono-pose. Ce choix dans la gestion des dossiers anticipe les acquisitions multi-vues (cf. figure 3).

Le deuxième nœud est lié à l'étalonnage de l'éclairage à l'aide d'une sphère placée dans la scène. Par défaut, un réseau de neurones entraîné détermine la position de la sphère, ainsi que son type (mat ou brillant). Cette prédiction est effectuée sur chaque image en entrée. Dans le cas où plusieurs sphères sont présentes dans la scène, le pipeline ne conserve que celle qui présente le meilleur score. L'étalonnage de l'éclairage en différents points de la scène n'est pas encore opérationnel. Enfin, l'utilisateur a également la possibilité de "détourner" la silhouette manuellement, ce qui est particulièrement intéressant lorsque la sphère conserve la même position dans la totalité des images.

Le troisième nœud concerne l'étalonnage de l'éclairage à partir du type de sphère utilisée. Deux choix s'offrent à l'utilisateur. S'il choisit le point brillant, alors l'intensité est supposée égale à 1 et seule la direction peut être déterminée, alors que l'usage d'une sphère blanc mat permet également d'évaluer l'intensité. Il est notable que cet étalonnage se fait pour le moment en un seul point de la scène, et qu'elle ne prend pas en compte la forme elliptique de la silhouette d'une sphère, à cause de la projection perspective.

Le quatrième nœud est la résolution de la stéréophotométrie avec livraison de l'albédo et du champ de normales. Ce dernier est exprimé à la fois dans le repère caméra et dans le repère monde, afin de pouvoir conjuguer ce résultat lors d'une acquisition multi-vues. Les fonctionnalités de robustesse et de suppression de l'éclairage ambiant, qui sont en cours d'implémentation, permettent d'envisager des modes de captation plus évolués.

[13] <https://github.com/alicevision/Meshroom>

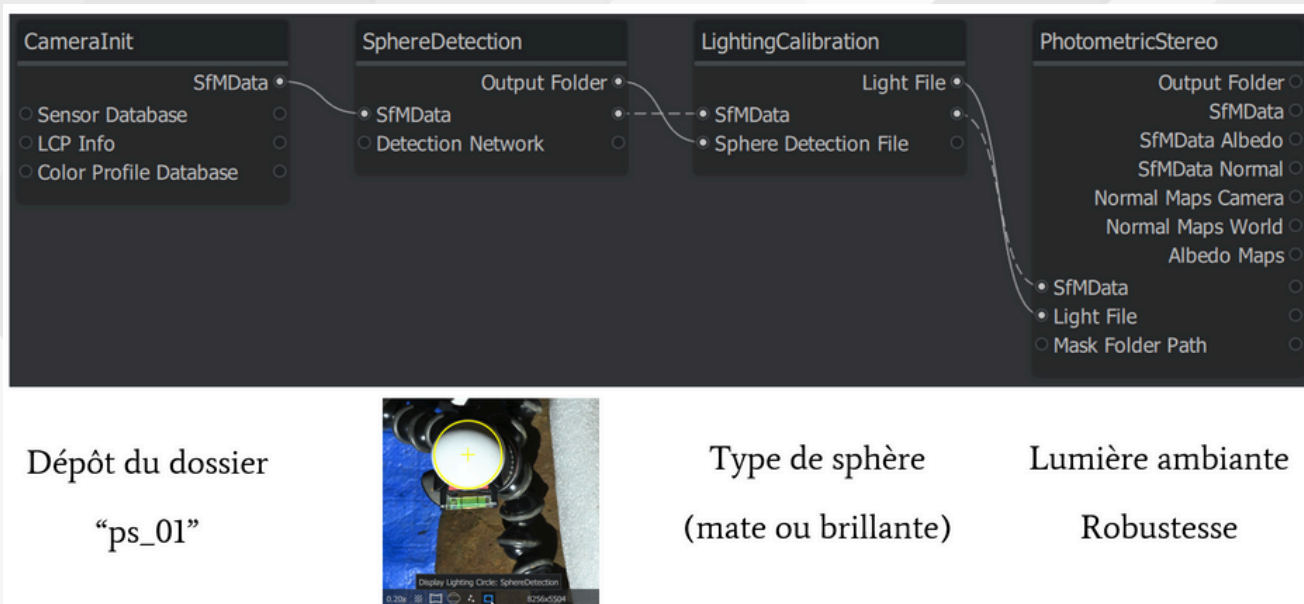


Fig. 3 - Présentation du pipeline de stéréophotométrie présent dans la version 2023.3 de Meshroom, avec les principaux paramètres éditables de chaque nœud.

L'exécution de ce pipeline s'effectue en quelques minutes, mais cela dépend bien sûr de la taille et du nombre d'images en entrée. Enfin, un nœud d'intégration des normales est en cours de développement. Cette dernière étape permettra de générer un maillage 3D.

3. Différents cas d'usage de la stéréophotométrie pour le patrimoine

L'adaptation et le développement d'un outil de reconstruction 3D photographique pour le patrimoine sont là pour répondre à certains cas applicatifs, à des questionnements ou encore à des impératifs de projet (budget, temps d'intervention, niveau de qualification de l'opérateur, etc.). Nous développons ci-après trois exemples où la stéréophotométrie trouve sa place parmi les méthodes de numérisation actuelles.

3.1 Prise de vues avec sphère d'étalonnage

L'application la plus simple et la plus rapide à mettre en œuvre consiste en une prise de vues mono-pose et multi-éclairages en positionnant dans la scène une sphère d'étalonnage de l'éclairage. L'appareil photographique, utilisé en mode totalement manuel, est posé sur un trépied (il ne faut pas oublier de désactiver la stabilisation optique et celle du boîtier) pour éviter tout décalage pixellaire entre les images. La source de lumière utilisée doit fournir un éclairage le plus directionnel possible, et être orientée de manière à fournir une répartition optimale des directions d'éclairage (en pratique, 15 à 20 éclairages suffisent), si possible à la même distance moyenne de la scène.

La force de ce dispositif est sa rapidité d'exécution, en quelques minutes, conjuguée à un protocole facile à appréhender. Un autre avantage est que l'utilisateur peut décider en amont de la résolution des images, selon le besoin de lecture du relief ou selon le matériel dont il dispose. La ground sample distance (GSD) mesure la taille du pixel central sur la surface en fonction de la taille du capteur, de la distance focale et la distance à l'objet. Dans l'exemple de la Dame de Saint-Sernin (cf. figure 4), nous obtenons une résolution de 150 microns avec un appareil photographique Nikon Z7 équipé d'un objectif 35 mm, pour une distance à la scène de 1,2 m. La quantité d'informations fournies par cette acquisition est suffisante pour approcher la chaîne opératoire de façonnage des décors et notamment la chronologie relative.

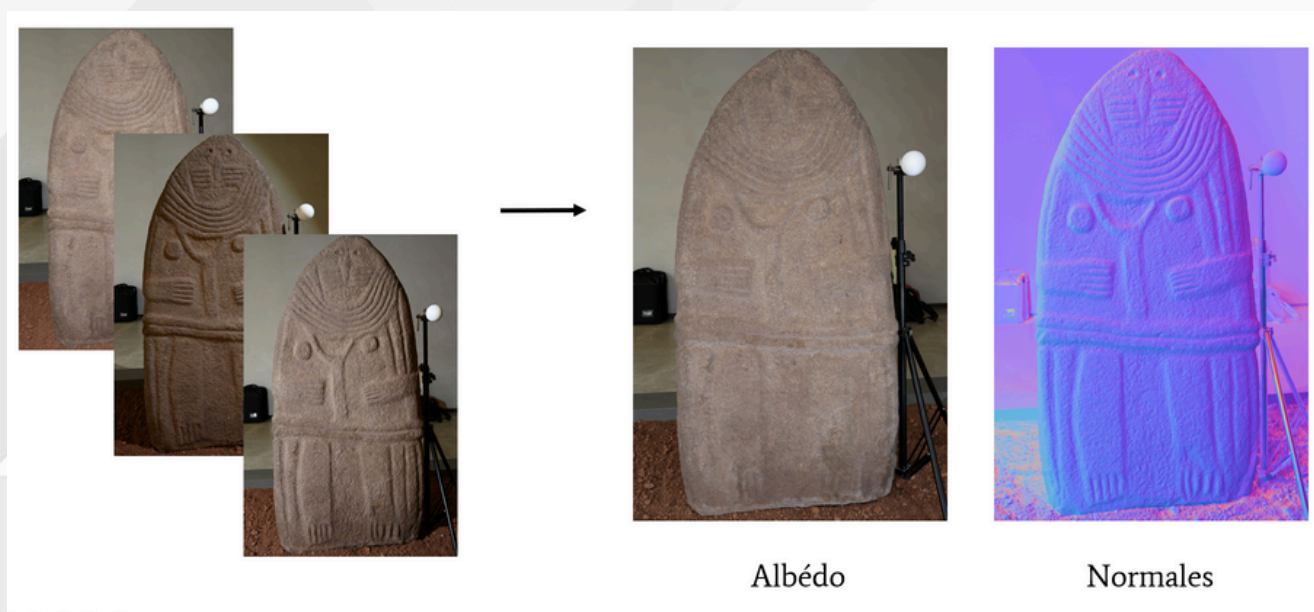


Fig. 4 - Résumé du traitement par stéréophotométrie de la Dame de Saint-Sernin, conservée au musée Fenaille de Rodez, avec trois des seize images en entrée et les estimations de l'albédo et du champ de normales.

Dans des conditions similaires d'acquisition de cette même statue-menhir, nous obtenons une meilleure résolution avec la stéréophotométrie qu'avec la stéréoscopie.¹⁴ Toutefois, la lecture de la surface n'est possible que sous un seul angle, celui de la prise de vues, ce qui correspond à une "reconstruction 2,5D". Seule l'acquisition de données multi-vues et multi-éclairages permet d'effectuer une réelle reconstruction 3D, tout en dépassant les limites que constituent les discontinuités de profondeur et la mise à l'échelle.

Un autre point de développement en cours d'intégration dans Meshroom est la prise en compte de la forme elliptique de la silhouette de la sphère. En fonction des conditions de prise de vues, des écarts angulaires importants peuvent être constatés si la sphère d'étalonnage est disposée sur un bord de l'image, avec un objectif grand angle.

3.2 Numérisation à distance

Pour le cas spécifique de l'acquisition du Panneau des lions dans la Salle du fond de la grotte Chauvet-Pont-D'Arc, plusieurs contraintes entrent en jeu. Le cheminement actuel dans la cavité correspondant au chemin des découvreurs empêche de s'approcher à moins de 5 m de la paroi, et encore moins de disposer une sphère au pied du panneau.

La nécessité de lecture pour le relevé nous contraint à une résolution de quelques dixièmes de millimètres au maximum (cf. figure 5).

Comme la méthode actuelle d'étalonnage des éclairages nécessite l'utilisation d'une sphère, et que le seul moyen stable et sûr pour l'approcher de la paroi est l'utilisation d'une perche, nous avons entraîné un réseau de neurones à reconnaître la position et le type de sphère utilisé¹⁵. En effet, il est impossible de maintenir la sphère fixe dans l'image, et le repérage manuel sur chaque photographie rendrait l'opération fastidieuse. La faible stabilité de la sphère dans l'espace nous a obligés à réduire le temps de pose pour éviter le flou de bougé, ce qui se fait bien sûr au détriment de la profondeur de champ.

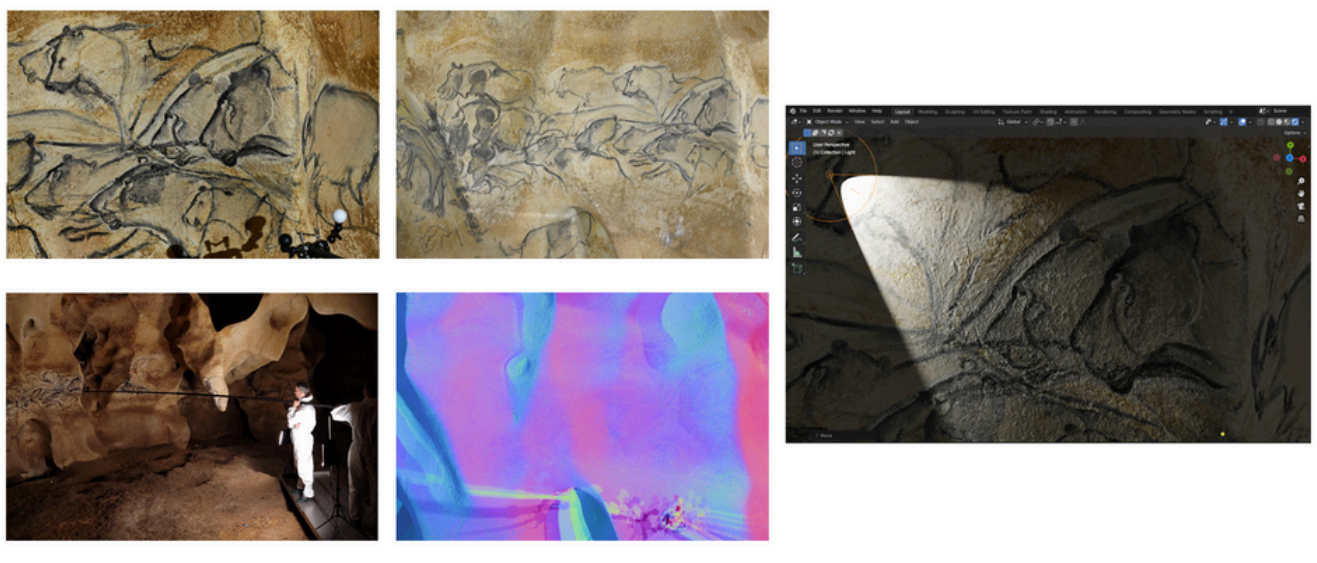


Fig. 5 - Restitution de la chaîne opératoire développée sur le Panneau des lions de la grotte Chauvet-Pont-d'Arc, pour une acquisition à distance, et ce de la captation avec deux sphères maintenues au bout d'une perche, en passant par la résolution de la stéréophotométrie, jusqu'à un éclairage simulé dans le logiciel Blender.

Une perspective à court terme, appelée "stéréophotométrie auto-calibrée", nous permet d'entrevoir la possibilité de nous dispenser de toute sphère d'étalonnage. Mais cela ne pourra se faire que si l'on dispose d'une connaissance a priori du relief, même imparfaite.

3.3 Dôme de lumière

Le dernier exemple s'inscrit dans les standards actuels de l'imagerie computationnelle, puisqu'il s'agit de convertir les données acquises par un dôme de RTI (Reflectance Transformation Imaging)¹⁶ en données de stéréophotométrie. La RTI interpole des images prises sous même point de vue et sous différents éclairages. Le résultat est un rendu dynamique en temps réel, efficace pour tous types d'objets, mais la RTI ne peut pas être considérée comme une réelle technique de reconstruction 3D.

Le principe des deux méthodes, RTI et stéréophotométrie, est néanmoins très proche. De plus, l'utilisation d'un dôme de lumière est devenue courante. Pour la stéréophotométrie, les avantages sont de pouvoir utiliser un dôme étalonné (position 3D des lumières dans le repère caméra, évaluation du diagramme de rayonnement de l'éclairage), de permettre une reproductibilité des acquisitions et la redondance des données. Ce dernier point devient intéressant lorsque l'étude des caractéristiques optiques des matériaux importe (pour aller au-delà du modèle lambertien) ou que ceux-ci sont complexes et difficiles à acquérir (par exemple un objet brillant).

Dans le cadre du développement de Meshroom, nous avons intégré la fonction d'enregistrement du modèle d'éclairage dans le nœud LightingCalibration. L'utilisateur a le choix d'étalonner lui-même son dôme à l'aide du pipeline, puis de remobiliser son modèle d'éclairage pour de futures acquisitions. Il peut également importer le fichier Light Position (.lp) fourni par le constructeur.

Afin de rester au plus près des fonctionnalités présentes dans les logiciels de RTI, nous travaillons sur le développement de l'interface Meshroom pour y intégrer un module de ré-éclairage dynamique 2D et 3D.

4. Conclusion et perspectives

Dans le cadre du projet Archaroom et du Labcom ALICIA-Vision, nous sommes en mesure de proposer une suite logicielle open-source opérationnelle, directement applicable à plusieurs cas d'usage. Les perspectives de développement évoquées élargiront bientôt le champ des applications, en particulier grâce à la stéréophotométrie multi-vues.

Notre solution se fonde principalement sur des méthodes dites traditionnelles. Il est cependant probable que certaines étapes du processus devront être effectuées par apprentissage, notamment pour le cas des matériaux complexes¹⁷, pour l'intégration de champs de normales multi-vues, et pour faire coopérer la stéréoscopie et la stéréophotométrie.¹⁸

[16] Malzbender et al. 2001

[17] Hardy et al. 2023

[18] Brument et al. 2023

5. Bibliographie

Griwodz C., Gasparini S., Calvet L. et al., AliceVision Meshroom: An open-source 3D reconstruction pipeline. 12th ACM Multimedia Systems Conference (MMSys 2021, Istanbul, Turkey). pp. 241-247, 2021 (<https://hal.science/hal-03351139v1>).

Mélou J., Fusion d'approches photométriques et géométriques pour la création de modèles 3D. Institut National Polytechnique de Toulouse, 2020 (<https://hal-emse.ccsd.cnrs.fr/IRIT-REVA/tel-02940259v2>).

Durou J-D. et al., Advances in Photometric 3D-Reconstruction, Springer, 2020.

Mélou J., Laurent A., Fritz C. et al., 3D digitization of heritage: photometric stereo can help, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLVIII-2/W1-2022, pp. 145-152, 2022 (<https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLVIII-2-W1-2022/145/2022/>).

Fainsin L., Mélou J., Calvet L. et al., Neural detection of spheres in images for lighting calibration. 16th International Conference on Quality Control By Artificial Vision 2023 (QCAV 2023), Juin 2023, Albi, France (<https://hal.science/hal-04160733>).

Malzbender T., Gelb D., Wolters H., Polynomial texture maps. In Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '01). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 519–528, 2001 (<https://doi.org/10.1145/383259.383320>).

Hardy C., Quéau Y., Tschumperlé D., MS-PS: A Multi-Scale Network for Photometric Stereo With a New Comprehensive Training Dataset. International Conference on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, 2023, Pilsen, Czech Republic. pp. 194-203, (<https://hal.science/hal-03863690>).

Brument et al. RNb-NeuS: Reflectance and Normal-based Multi-View 3D Reconstruction (<https://arxiv.org/abs/2312.01215>).