



HAL
open science

Orthorectification d'images hyperspectrales pour l'étude de peintures schématiques du Néolithique

Bastien Le Goff

► **To cite this version:**

Bastien Le Goff. Orthorectification d'images hyperspectrales pour l'étude de peintures schématiques du Néolithique. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2024. dumas-04804874

HAL Id: dumas-04804874

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04804874v1>

Submitted on 26 Nov 2024

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

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

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

MEMOIRE

présenté en vue d'obtenir
le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : Géomètre et Topographe

par

Bastien Le Goff

**Orthorectification d'images hyperspectrales pour l'étude de peintures
schématiques du Néolithique**

Soutenu le 03 Septembre 2024

JURY

Monsieur Stéphane DURAND	Président du jury
Madame Marion MASSÉ	Maître de stage
Madame Claudia DEFASNE	Maître de stage
Madame Elisabeth SIMONETTO	Enseignante référente

Remerciements

Je tiens avant tout à remercier mes deux maîtres de stages : Pour commencer, C. Defrasne, pour sa disponibilité et sa gentillesse, que ce soit par mail ou autour de l'apéro sur le terrain, et qui n'a pas hésité à me faire confiance pendant ce stage, ni à me proposer de continuer dans le projet, ce qui me paraissait improbable au début du stage.

Puis M. Massé, avec sa gentillesse, sa patience et ses supers conseils particulièrement lorsque je suivais une mauvaise piste, mais surtout pour la liberté que j'ai pu avoir pour explorer les pistes qui m'intéressait. Merci aussi pour toutes les discussions (sur la recherche ou non), les blagues et ta confiance qui m'ont sérieusement fait aimer la recherche ! Merci à toutes les deux pour ce sujet sortant de l'ordinaire et qui m'a beaucoup (beaucoup) plu.

Je tiens ensuite à remercier M. Giraud pour sa gentillesse et son aide à chaque fois que je bloquais sur un code, mais aussi pour ses avis toujours très pertinents bien que souvent éloignés de ses sujets de prédilections, et pour les conseils sur les spécialités locales.

Je remercie également S. Le Mouélic pour son attention et sa disponibilité pour les tests de VR, et de m'avoir fait me rendre compte du potentiel de cette technologie.

Pour finir les remerciements Nantais, un grand merci à Clara, Gabin, Nabil, Nino, Nusrat, Paul, Sofiane, Solène, Thomas, Valentin, Victor pour tous ces moments passés ensemble, que ce soit au labo ou non, et les nombreuses idées "*brillantes*" qui en sont sorties !

Un grand merci aussi à toute l'équipe de SCHEMA que j'ai pu rencontrer et avec qui j'ai pu échanger, tous d'une disponibilité impressionnante malgré la charge de travail à réaliser.

Je tiens également à remercier ma professeure référente E. Simonetto, pour ses conseils justes et son intérêt dans mon sujet, ainsi que pour sa relecture. Un grand merci également à l'administration de l'ESGT pour la chance que l'on m'a donnée en IG3, et qui a beaucoup payé.

Enfin, un très grand merci à ma famille et mes amis (ESGT, LGM et les autres) pour le soutien sans faille pendant ma scolarité, et m'avoir permis de me sentir épanoui tout ce temps.

Je vous souhaite une bonne lecture !

Liste des abréviations et Glossaire

ICA : *Independent Component Analysis*

HSI : *HyperSpectral Imaging*

VNIR : *Visible and Near-Infrared* (Visible proche infrarouge)

SWIR : *Short Wave Infrared* (Infrarouge à courtes longueurs d'ondes)

EMQ : *Erreur Moyenne Quadratique*

LPG : *Laboratoire de Planétologie et de Géosciences (CNRS UMR 6112)*

EDYTEM : *Environnements, Dynamiques et Territoires de Montagne (UMR 5204)*

Image rupestre ou pariétale : "Une forme peinte ou gravée, figurative ou non, sur une surface rocheuse, indissociable du lieu dans lequel elle s'insère, qui contribue à la renseigner et qu'elle renseigne en retour."¹ On utilise le terme pariétal pour des figures sur des parois verticales et rupestre pour des figures sur des rochers.

Approche intégrée : Approche croisant un grand nombre de disciplines (géologie, archéologie, géomorphologie, sciences des matériaux, sciences cognitives...) dans l'étude d'un sujet mais qui se distingue de l'approche interdisciplinaire par le fait que les disciplines (i) se concentrent sur des problématiques et secteurs d'étude communs ; (ii) et travaillent ensemble à chaque étape du projet.

Cube hyperspectral : Image hyperspectrale composée de N bandes. Le terme de cube est utilisé dans la littérature en raison de "l'empilement" des images à plusieurs longueurs d'ondes.²

Orthoimage : Image corrigée de toutes déformations et de perspectives causées par la caméra.

Point d'appui : Point connu en coordonnées utilisé par Metashape pour calculer les coordonnées du modèle photogrammétrique.

Point de liaison (Tie Point) : Point caractéristique robuste présent dans au moins deux images.

Point de vérification : Point connu en coordonnées non utilisé dans les calculs, permettant de vérifier la qualité de la transformation.

Spectralon : Cible produite par la société Labsphere composée d'une matière disposant de la plus haute réflectance connue et qui permet l'étalonnage des images hyperspectrales³

1. Defrasne, 2023a,p43

2. Massé, 2010

3. <https://www.labsphere.com/product/spectralon-diffuse-reflectance-material/>

Table des matières

Remerciements	2
Liste des abréviations et Glossaire	3
Table des matières	4
Introduction	6
I. Contexte et objectifs du TFE	8
I.1. Le projet ANR SCHEMA	8
I.1. 1. Les peintures schématiques	8
I.1.1.1 Une analyse des peintures difficile	9
I.1. 2. Objectifs du projet	10
I.1. 3. Les défis méthodologiques	10
I.2. Application inédite de l’hyperspectral à l’étude des parois ornées	11
I.2. 1. Présentation de l’abri Otello	11
I.2. 2. Une analyse améliorée grâce à une meilleure compréhension	13
I.2. 3. État du projet	14
I.3. Objectifs du TFE	15
II. La photogrammétrie au sein du projet	16
II.1. Analyse de la méthode actuelle et des problèmes rencontrés	16
II.1. 1. Précédentes acquisitions	17
II.1. 2. Une méthodologie à améliorer	17
II.2. Protocoles d’analyse du matériel	18
II.2. 1. Protocole d’étalonnage de la netteté	18
II.2.1.1 Influence de la vitesse d’obturation	19
II.2.1.2 Influence de l’ouverture	19
II.2. 2. Vérification de la précision du Distancemètre	20
II.2. 3. Calcul des abaques	21
II.3. Protocole d’acquisition et de traitements	21
II.3. 1. Présentation de la méthodologie	22
II.3. 2. Acquisitions à l’abri Otello	22

II.3. 3. Traitements Metashape	24
II.4. Résultats et analyse	24
III.L'imagerie hyperspectrale : une application novatrice	25
III.1. Présentation générale de l'imagerie hyperspectrale	26
III.2. Plusieurs campagnes d'acquisitions pour un lot de données conséquent	28
III.2. 1. Une acquisition inhabituelle	28
III.2. 2. Récapitulatif des campagnes	29
III.2. 3. Tri des données	30
III.3. Une réduction des données nécessaires	31
III.4. Une analyse à l'échelle de la paroi compliquée	32
IV. Orthorectification des données hyperspectrales	33
IV.1. Création de protocoles d'assemblages	33
IV.2. Pseudo-orthorectification des cubes existants	34
IV.2. 1. Détection automatique des points communs	34
IV.2. 2. Optimisation de l'orthorectification dans les logiciels associés	35
IV.2. 3. Source d'amélioration de la méthode	37
IV.3. Orthorectification vraie des futurs cubes	37
IV.3. 1. Tests préliminaires	38
IV.3. 2. Protocole final	39
IV.4. Une amélioration possible pour les futures acquisitions	40
Conclusion	41
Bibliographie	42
Annexe 1 : Calcul des abaques	47
Annexe 2 : Protocole étalonnage netteté	50
Annexe 3 : Détection automatique de points d'intérêts	53
Annexe 4 : Présentation du matériel	56
Annexe 5 : Produits photogrammétriques	57
Liste des figures	60
Liste des tableaux	60
Résumé	61

Introduction

Les peintures pariétales du Néolithique font l'objet d'études approfondies par les archéologues pour tenter d'en comprendre les usages et fonctions au sein des sociétés préhistoriques. Les peintures schématiques, encore méconnues du grand public, sont l'un des corpus d'art pariétal du Néolithique les plus importants d'Europe. Ce type de peintures, communes aux populations méditerranéennes est caractérisé par une similarité interrégionale associée à certaines distinctions locales. Malgré leur potentiel d'informations sur les sociétés du Néolithique, elles restent encore peu étudiées à l'heure actuelle. En cause, de nombreux défis qui entravent l'analyse, à commencer par le plus évident : ce sont des peintures schématiques. Leurs qualités diffèrent de l'esthétique prêtée aux peintures pariétales figuratives et aucune interprétation spontanée n'est possible. La datation des peintures pariétales reste également imprécise. Enfin l'état de conservation des peintures complique l'analyse, car elles sont le plus souvent exposées à l'air libre et rarement protégées des intempéries. Les parois ornées qui nous parviennent sont donc très largement altérées.

Pour étudier ces peintures, de nombreuses technologies et outils d'analyse sont mis en oeuvre. Les schémas, les cartes géomorphologiques, les photographies et les analyses physico-chimiques permettent d'établir un contexte dans lequel s'insèrent les peintures. Parmi ces outils, la modélisation 3D et plus particulièrement la photogrammétrie sont devenues de plus en plus courantes en archéologie et complètent les technologies existantes. Les produits issus de la photogrammétrie comme les Modèles Numériques de Terrain (MNT) ou les orthoimages fournissent des données topographiques et des images à haute résolution spatiale, indispensables à l'étude des sites ornés. Ces données vont servir de base et de fond de carte à toute l'analyse archéologique et géomorphologique. Lorsqu'une haute précision et une géométrie correcte est souhaitée, en particulier pour une superposition des données d'un projet, l'expertise du géomètre topographe est nécessaire. Suite à des discussions et une analyse des besoins, il va créer un produit adapté recherchant un compromis entre précision et taille des données.

L'imagerie hyperspectrale est une technique de télédétection qui s'est montrée très utile dans des domaines comme les géosciences, l'art ... Cependant, aucune utilisation approfondie n'a été réalisée dans le domaine de l'art pariétal en dehors de l'hyperspectral dans le visible. L'une des

principales raisons est la difficulté des acquisitions en milieux clos comme des grottes. Ce type de mesure est sensible à de nombreuses contraintes (éclairage, distance à la paroi ...) souvent difficile à respecter en archéologie pariétale. De plus, l'impact de la lumière et de la chaleur produite par l'instrument sur l'environnement peut être important. Les problèmes de géométries au sein de ces images (déformations) les empêchent également d'être superposées aux autres données.

En 2021 des acquisitions hyperspectrales dans le visible et dans le proche infrarouge ont été réalisées à l'abri Otello (Defrasne et al., 2023). Les peintures de ce site étant nombreuses (plus de 300), superposées et altérées, l'hyperspectral semblait la technique idéale pour essayer de révéler ces peintures et de les analyser. Ces acquisitions novatrices ont montré que cette technologie permettait de découvrir de nombreuses figures non visibles à l'œil nu et de démêler des superpositions. Malgré leur pouvoir informatif, les images hyperspectrales ne pouvaient pas être utilisées dans la réalisation des relevés graphiques d'art pariétal et cartographies de paroi du fait de leurs déformations géométriques. Ceci constituait un frein réel dans l'étude de la paroi ornée. Un projet interdisciplinaire a été créé et a pour objectif d'étudier les peintures schématiques à travers une approche intégrée et d'établir une méthodologie d'analyse autour de l'imagerie hyperspectrale. Le but de mon TFE est donc 1. De créer un MNT et une orthoimage à la résolution adaptée au projet et servant de base d'analyse à toutes les disciplines et 2. de résoudre les défis techniques de la géométrie des images hyperspectrales en orthorectifiant ces images de manière automatique. L'ensemble de ce travail a également pour but de proposer une méthodologie qui pourra s'appliquer dans le futur sur les autres sites étudiés.

Ce mémoire, divisé en 4 parties commencera par une présentation de l'étude des peintures schématiques du Néolithique, du projet de recherche dans lequel s'inscrit ce TFE et l'apport des premières acquisitions réalisées. Nous verrons ensuite l'analyse de la méthode actuelle de photogrammétrie et les améliorations possibles grâce à des analyses du matériel. Un nouveau protocole d'acquisition sera proposé, et les résultats des différents produits seront analysés. Puis, nous présenterons en détails l'imagerie hyperspectrale et les différentes campagnes d'acquisitions. Nous verrons ensuite les premières analyses qui ont été réalisées et comment les automatiser mais aussi les difficultés d'analyses à l'échelle de la paroi complète. Enfin, je proposerai deux méthodologies d'orthorectification des données, une pour les images existantes et une pour les futures acquisitions.

I. Contexte et objectifs du TFE

L'art pariétal, connu de tous par les peintures figuratives des grottes ornées comme Lascaux ou Chauvet, s'étend sur une période de temps importante (environ 60 000 ans). Les plus anciennes peintures connues aujourd'hui sont estimées à -64 000 ans avant notre ère et ont probablement été réalisées par Néandertal (Hoffmann et al., 2018). Cependant, l'art pariétal s'étend de la fin du Paléolithique moyen (-300 000 à -40 000)⁴ au Néolithique (-6000 à -2200)⁵, et de nombreuses peintures ont été retrouvées depuis le XIXe siècle.

L'une des formes prise par ces peintures est l'art schématique. C'est sur cette forme, datée du Néolithique, que se porte ce rapport. Le Néolithique correspond à la période allant du Ve au IIIe millénaire avant notre ère. Les populations se sédentarisent et on y voit l'apparition de l'agriculture, de l'élevage et de la métallurgie du cuivre (Lemercier, 2008). De nombreuses interrogations existent encore sur cette période, et l'art schématique pourrait être une source d'informations conséquentes.

I.1. Le projet ANR SCHEMA

Le projet ANR⁶ SCHEMA (*Syntax of HoloCene scHEMatic rock Art*) est un projet interdisciplinaire commencé depuis fin 2023, cherchant à étudier l'un des plus grand corpus d'art pariétal de la préhistoire européenne peu connu du grand public : l'art pariétal schématique du Néolithique.

I.1.1. Les peintures schématiques

L'art pariétal schématique a été découvert en France pour la première fois en 1867 avec l'abri de la Baume Écrite. Cette découverte marque le début d'un grand nombre de découvertes de grotte et d'abris, allant de "25 abris peints pour le grand sud-est en 1984, à plus de 140 en 2023" (Defrasne et Hameau, 2024). Il s'étend de la péninsule ibérique à l'Italie (Defrasne, 2023b), et la plupart des sites se trouvent dans "un contexte géologique bien particulier, celui des karst calcaires"⁷. Ils sont issus de l'érosion du calcaire suivi ou non d'effondrements, et cette situation se retrouve à de nombreux endroits en Europe. Les peintures sont majoritairement réalisées dans

4. *Le Paléolithique* 2016

5. *Période archéologique : Néolithique* 2024

6. L'Agence Nationale de la Recherche finance la recherche sous la forme d'un appel à projet annuel.

7. *La formation des abris sous-roche | Les abris sculptés de la Préhistoire* 2024

des abris de plein air, et à diverses altitudes. Une des hypothèses de la présence de ces peintures selon P. Hameau relève de rites d'initiations ou de passages (Defrasne et Hameau, 2024). Certaines particularités se retrouvent de site à site, mais en dehors d'études menées dans la péninsule ibérique avec l'art Levantin (art pariétal de la péninsule ibérique)(Hernández Pérez et Martínez Valle, 2003), peu d'études ont été menées jusqu'à maintenant à proximité des Alpes et dans le Sud de la France. Il est donc compliqué de mettre en relation les sites à une échelle régionale mais cela pourrait être une source de renseignement important sur les sociétés du Néolithique.

I.1.1.1 Une analyse des peintures difficile



(a) Grilles, réticulés circulaires et anthropomorphes



(b) Caprinés, figures anthropomorphes et groupes de tracés verticaux



(c) Zoom sur anthropomorphes

Figure 1 – Peintures schématiques de l'abri Otello (a) et des Eissartènes (b)(c) (*source personnelle*)

De multiples formes différentes comme des figures anthropomorphes, des grilles, des groupes de points ... sont présentes sur les parois (Figure 1) mais l'analyse des peintures est encore aujourd'hui difficile. La datation des peintures présente d'importantes incertitudes car les méthodes de datation connues ne fonctionnent que sur la matière organique et les peintures en sont dépourvues car réalisées avec des matières minérales à base d'oxydes de fer. Les nombreuses superpositions sont aussi très compliquées à analyser. Enfin le peu de contexte archéologique au pied des parois nécessite un croisement de nombreuses disciplines pour essayer de comprendre ces sites.

Pour les étudier, deux types de méthodes existent : les analyses destructives comme les microprélèvements pour les analyses chimiques et les analyses non destructives comme les photos, croquis ou cartes. Même si les analyses destructives permettent d'obtenir des informations comme

les compositions chimiques, les analyses non destructives sont priorisées. Cependant, les informations issues des traitements plus classiques ne suffisent plus à une étude exhaustive et un besoin de nouvelles méthodes se fait ressentir.

I.1. 2. Objectifs du projet

L'objectif de l'ANR SCHEMA est de construire une méthode d'étude des sites ornés de plein air, difficilement datables, qui permette de dépasser 2 difficultés : le problème de la chronologie de ces peintures et les difficultés liées à leur altération (invisibilité, recouvrement par des encroûtements...). L'interprétation des vides ainsi que les temporalités multiples au sein des parois restent également difficilement analysables.

Le projet cherche donc à faire de l'art schématique une source importante d'informations sur les sociétés préhistoriques. Pour y parvenir, la création d'une méthodologie pouvant résoudre les limites actuelles du domaine sera nécessaire dans le but de caractériser la syntaxe du corpus graphique et les pratiques qui ont pu y être associées. L'utilisation de l'analyse sémiotique pour essayer de donner un sens à ces figures a été proposée par Defrasne, 2023b. La sémiotique est la *"Théorie générale des signes dans toutes leurs formes et dans toutes leurs manifestations ; théorie générale des représentations, des systèmes signifiants."*⁸. Elle permettrait d'affirmer ou non que les peintures schématiques sont une manière d'encoder des discours dans les sociétés sans écritures.

Pour atteindre ces résultats, de nombreuses méthodes et domaines vont être mis en relation sous la forme d'une approche intégrée. Trois sites ont été choisis pour y parvenir : l'abri Perret 1, l'abri des Essartènes et l'abri Otello, site initiateur de cette ANR grâce à l'article Defrasne et al., 2023. Il a été choisi comme lieu d'étude pour créer la méthodologie d'analyse complète afin de pouvoir l'appliquer aux autres sites et sera présenté en I.2. 1.

I.1. 3. Les défis méthodologiques

Pour répondre à ces objectifs, de nombreuses disciplines vont se croiser comme l'archéologie, la géomorphologie, les géosciences, la modélisation 3D, et la physique pour restituer au mieux l'histoire des peintures. Cette approche intégrée a pour objectif de mettre en relation les différentes

8. *SÉMIOTIQUE : Définition de SÉMIOTIQUE 2024*

disciplines à toutes les étapes des traitements et d'analyses afin de définir des problématiques de recherche communes, mais aussi les contraintes existantes de chaque technologie. L'objectif est de construire des cartographies de parois et des relevés des peintures pariétales de parois complexes pour reconstruire l'histoire des événements qui ont marqué les parois ornées. Cependant, un lot de données conséquent et varié va être acquis et il va donc être nécessaire d'utiliser des outils d'analyse comme un SIG pour rassembler toutes ces données, les comparer et les faire dialoguer. Ce SIG devra être une base commune pour les différentes personnes du projet, ce qui n'est pas encore le cas dans de nombreuses études archéologiques.

I.2. Application inédite de l'hyperspectral à l'étude des parois ornées

L'ANR a été financée à la suite de tests d'imagerie hyperspectrale réalisés en 2021 sur l'abri Otello. Ces tests ont montré l'apport conséquent de cette technologie sur l'étude des peintures et elle sera une des données centrale de l'étude.

I.2.1. Présentation de l'abri Otello

Les traitements habituels réalisés en archéologie sur les photos sont réalisés avec le plug-in D-Stretch du logiciel ImageJ. Il permet de réaliser une décorrélation à partir d'images RGB classiques et de faire ressortir des informations difficilement visibles à l'oeil nu. Son usage se dégrade progressivement avec l'ajout de superpositions, ce qui est souvent le cas de l'art schématique. Après s'être rendu compte de l'apport de l'imagerie hyperspectrale sur les peintures figuratives (Bayarri et al., 2019), il a été décidé de tester cette technologie sur le site de l'abri Otello, dans le cadre du projet COPRA (Matières Colorantes, temps et PRatiques de l'Art pariétal néolithique). La complexité du site de part les multiples superpositions, la polychromie et les encroûtements en faisait une expérience intéressante pour montrer son apport face aux technologies actuelles.

Le site d'Otello est situé dans les Alpilles, sur la commune de Saint-Rémy-de-Provence dans le département des Bouches-du-Rhône. Il a été officiellement découvert en 1990, même si des marques contemporaines à l'intérieur de l'abri laisse supposer un passage, et une connaissance du site antérieure.

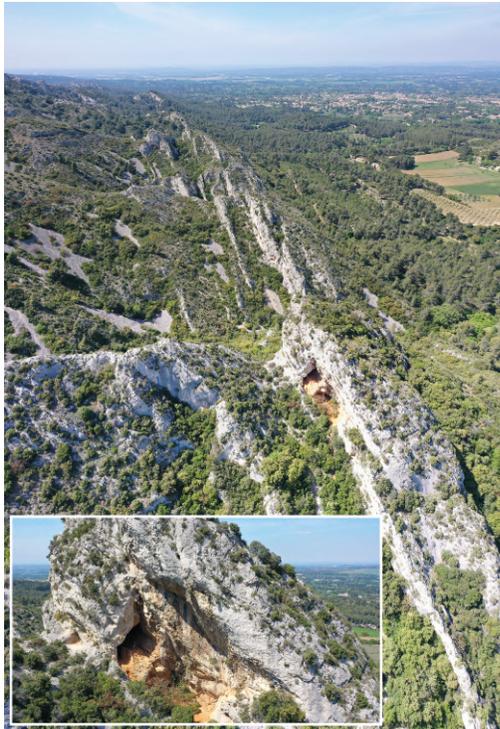


Figure 2 – Photo aérienne du site (SCHEMA)

Ce site est aujourd'hui composé de deux espaces (Defrasne et al., 2023), mais l'abri supérieur est le seul contenant des peintures. D'une dimension de 12 x 3 m avec un petit corridor permettant l'entrée de 5 x 1.50 m, l'abri permet de circuler assez facilement à l'intérieur, malgré un accès par une rampe rocheuse assez étroite et pentue. Les peintures se trouvent majoritairement sur la paroi Nord, issue d'un plan de faille orienté Est Ouest (Figure 2). De légères traces de peintures sont également présentes sur une vire surmontant l'esplanade inférieure, néanmoins beaucoup moins bien sauvegardées.

A l'intérieur de l'abri supérieur, de nombreuses figures et peintures du Néolithique sont identifiables sur la paroi Nord. Elle offre une paroi plane et relativement régulière permettant de facilement peindre dessus. On retrouve une évolution de la teinte de la paroi visible sur la Figure 3, allant du jaune calcaire de l'entrée (à droite) à un gris plus prononcé (au milieu) et enfin au noir au fond de l'abri (à gauche). Au fur et à mesure des évolutions climatiques, de nombreux dépôts et concrétions calcaires se sont déposés sur la paroi, allant de moins d'un cm de largeur à une trentaine. Les épaisseurs sont aussi très variées au sein de la paroi, mais aussi dans le reste de l'abri. Ces concrétions ont pour certaines recouvert des peintures.

Après la découverte du site, il a été très rapidement établi qu'avec plus de 300 figuratives, il était le site d'art schématique le plus fourni du Sud de la France. Les premières études menées sur le site ont été d'abord menées par Ph. Hameau en 2006 et 2007 avec des relevés des figures de la paroi et des fouilles archéologiques (Hameau, 2007).

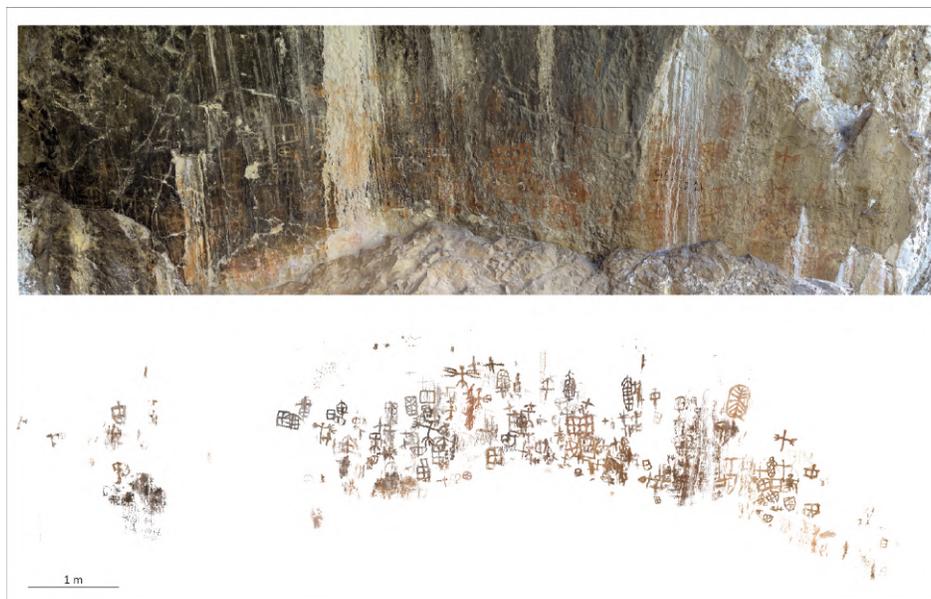


Figure 3 – Paroi Nord associée au relevé préliminaire des figures (Defrasne et al., 2023)

I.2. 2. Une analyse améliorée grâce à une meilleure compréhension

L'imagerie hyperspectrale qui sera expliquée plus en détail en III.1., est une méthode non-invasive de mesure se basant sur la capacité d'une matière à absorber et à réfléchir certaines longueurs d'ondes du spectre électromagnétique. Plusieurs arguments en faveur de l'hyperspectral pour l'analyse des peintures schématiques ont pu être mis en avant avec les acquisitions de 2021 :

Les images hyperspectrales permettent de discerner de nouvelles peintures (en rouge) non visibles avec D-Stretch (en gris) sur la Figure 4b, mais aussi de trouver des figures cachées sous des encroûtements. Le nombre de figures sur la paroi est augmenté considérablement (+20% à ce jour) et il est plus simple de grouper des figures ayant des caractéristiques communes. Cela est possible grâce à l'Analyse en Composante Indépendante (expliquée plus en détail en III.3.) qui permet une mise en correspondance d'informations similaires. Cette analyse a également permis d'agrandir le corpus schématique méditerranéen car certains types de figures révélées par l'IHS étaient inconnus ou peu connus dans le sud de la France (figures anthropomorphes, soléiformes). Il est aussi possible de mettre en avant des superpositions de peintures (Figure 4c) initialement non détectables.

L'étude des coulures de calcites et de la géomorphologie en général a été améliorée, notamment grâce à la capacité à mieux faire ressortir les coulures de différentes natures. Il est aussi

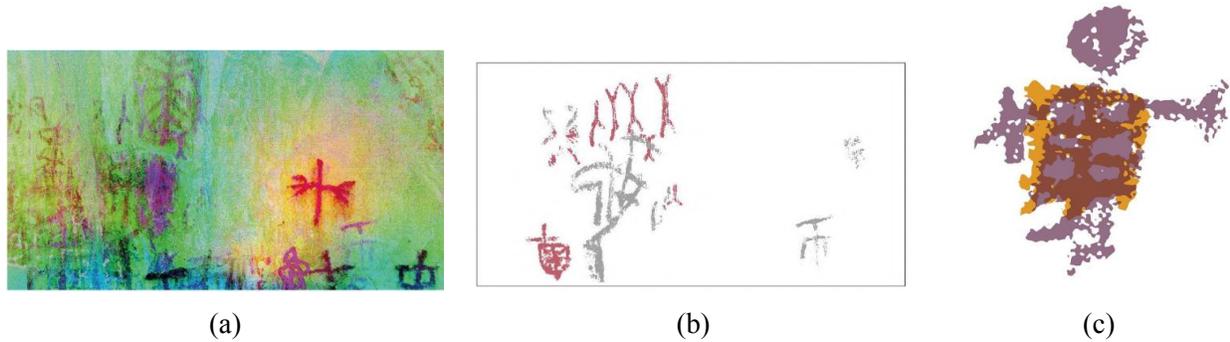


Figure 4 – faux RGB ICA de nouvelles figures (a) et relevé graphique associé (b), superposition trouvée de deux figures initialement indissociable à l’œil nu (c) (Defrasne et al., 2023)

possible de trouver des zones d’arrachements plus facilement, ce qui permettrait d’analyser la roche mère et mieux contraindre les futures analyses.

L’imagerie hyperspectrale s’est donc révélée comme une technologie indispensable pour l’étude des peintures schématiques. La facilité accrue qu’elle offre pour les relevés de paroi par la possibilité de mieux distinguer les figures ou de pouvoir les classifier de manière semi-automatique est un apport conséquent. Cependant, pour réaliser ces relevés, une correction des déformations est nécessaire. Il était impossible de faire une mosaïque des multiples petites images, ni de corrélérer ces données avec d’autres données acquises.

1.2. 3. État du projet

Le projet ayant commencé en fin d’année 2023, de nombreuses mesures et analyses ont été réalisées dans plusieurs domaines. Des acquisitions 3D ont été réalisés avec du Lidar pour Otello et Perret 1 (Blauvac, Vaucluse) à l’échelle du site et de ses environs, ainsi que des modèles photogrammétriques pour Otello. Le site des Eissartènes n’a lui pas encore fait l’objet d’acquisitions. Des analyses chimiques ont été réalisées *in situ* ou en laboratoire pour Otello, avec pour but de comprendre la composition de la paroi et des dessins. L’objectif est d’étendre aux autres sites ces analyses et trouver des potentielles similarités. Enfin, des acquisitions hyperspectrales ont été réalisées à Otello par le biais de 3 campagnes d’acquisitions qui seront détaillées en III.2. 2..

Pour permettre à l’ensemble de l’équipe du projet de découvrir les sites et d’échanger *in situ*, une réunion de lancement ANR a été réalisée en Avril 2024 à laquelle j’ai pu participer. Au

programme, une visite des trois sites, des explications consacrées aux thèses en cours sur les différents abris et une réunion d'une journée. Cela a permis de faire ressortir des besoins à plus ou moins long terme pour certains sites comme une cartographie avancée de l'abri Otello d'ici fin 2024, une méthodologie pour l'utilisation des images hyperspectrales d'ici la fin de l'ANR... Cela m'a également permis de mieux comprendre les besoins des scientifiques en lien avec la problématique de mon stage, et de mieux réfléchir aux outils adaptés.

I.3. Objectifs du TFE

Mon TFE avait donc comme objectif de produire les documents de base pour la réalisation de la cartographie archéologique et archéo-géomorphologique de l'abri Otello. Mon travail s'est donc décomposé en trois volets.

Le premier objectif de mon stage a été de produire des produits photogrammétriques d'une précision accrue par rapport aux modèles existants en fournissant une orthoimage submillimétrique corrigée de toutes déformations pour garantir la bonne analyse de la paroi Nord. Cette orthoimage permettra de localiser précisément toutes les analyses physico-chimiques déjà effectuées mais aussi de réaliser une première vraie cartographie de la paroi ainsi qu'une analyse géomorphologique. Le modèle photogrammétrique pourra également être utilisé pour la médiation scientifique du projet en servant de support pour la réalité virtuelle. Ce travail servira de base pour réaliser dans le futur les acquisitions sur les deux autres sites.

Le deuxième volet de mon stage s'est concentré sur les données hyperspectrales. Tout d'abord, les acquisitions réalisées sur 3 campagnes ont fourni un grand nombre de données. Celles-ci n'ont cependant pas toutes été traitées de la même manière, ne sont pas triées et sont difficilement accessibles aux scientifiques. Sur ce volet, le premier objectif a donc été de fournir des données triées, classifiées, traitées de manière homogène, ainsi qu'un document montrant tous les premiers traitements et résultats accessibles à tous. Le deuxième objectif de ce volet est de concevoir entièrement un protocole d'orthorectification des images hyperspectrales. Celui-ci n'existe pas actuellement et comporte de nombreuses difficultés. Il est cependant indispensable pour servir de différents relevés (archéologiques, géomorphologiques) et être intégré à un SIG pour croiser toutes ces données.

Pour garantir l'usage des images hyperspectrales comme document de base pour la cartographie de la paroi et le relevé des peintures pariétales, il sera fondamental de créer un nouveau protocole d'orthorectification des images hyperspectrales qui puisse être définitivement intégré à la méthodologie d'étude de ces parois ornées. Il sera également important de produire un cahier des charges détaillé des besoins nécessaires pour les futures acquisitions hyperspectrales si des problèmes concernant les acquisitions sont trouvés.

Ces trois processus seront des étapes clés pour l'établissement de la future méthodologie d'étude des parois ornées et sera appliquée dans le reste du projet aux autres sites. Une méthodologie claire et utilisable par le plus grand nombre sera donc nécessaire.

II. La photogrammétrie au sein du projet

L'étude approfondie des peintures pariétales nécessite l'utilisation de technique de modélisation (Grussenmeyer et al., 2014). Contrairement aux photos classiques, le lidar et la photogrammétrie rapprochée permettent de réaliser à la fois des modèles 3D, mais aussi des produits 2D orthorectifiés permettant de réaliser des mesures précises (orthoimage, MNT ombré ...). L'objectif est de produire un fond d'observation orthorectifié commun pour les disciplines du projet servant de base à une cartographie de la paroi. Le besoin de résolution submillimétrique a définitivement écarté le lidar en raison des trop gros écarts de qualité avec la photogrammétrie (Luhmann et al., 2023).

II.1. Analyse de la méthode actuelle et des problèmes rencontrés

La photogrammétrie servant de base à plusieurs disciplines pour l'orthorectification des images hyperspectrales, l'analyse, la quantification des figures et l'interprétation de la paroi, il est nécessaire d'analyser les besoins du projet. Après de nombreux échanges avec les scientifiques et les avoir interrogés sur leurs besoins, la précision de l'orthoimage finale a été estimée à une précision submillimétrique. Les deux facteurs principaux ont été le besoin des chimistes de localiser leurs échantillons d'une taille maximale de 0.5mm précisément sur la paroi, et ceux des archéologues qui réalisent l'extraction des figures par pixels. Le besoin le plus important étant une géométrie fiable, il n'est donc pas nécessaire de géoréférencer le projet dans le système légal français (RGF93), ce qui

facilitera l'acquisition des coordonnées. Ces besoins ont permis d'analyser les modèles existants et d'établir qu'ils ne remplissaient pas ces conditions en raison d'une mauvaise géométrie. Il est donc nécessaire de construire une méthodologie à partir du matériel existant pour créer un modèle fiable de la paroi et de réaliser des acquisitions similaires dans le futur de façon autonome.

II.1. 1. Précédentes acquisitions

Le matériel utilisé pour réaliser le modèle est composé d'un appareil photo Nikon D750 avec un objectif 50mm, d'un Disto S910 de Leica avec un kit de mesure d'angle, une lampe Méandre sur le boîtier et des cibles Metashape. Il est détaillé en Annexe 4 : Présentation du matériel Lors des différentes acquisitions, plusieurs protocoles ont été mis en place, se basant tous sur le logiciel Metashape d'Agisoft, 2024 :

Un *modèle complet de l'abri* a été réalisé en premier pour un objectif de visualisation pédagogique et n'est pas utilisable pour un objectif scientifique. Un *modèle de l'ensemble de la paroi peinte* a été réalisé pour une cartographie SIG. Des cibles Metashape ont été utilisées et les mesures ont été réalisées au distancemètre, en prenant la cible la plus à gauche de la paroi comme référence et en faisant un transfert de coordonnées grâce à des mesures de distances et d'angles. Cependant la méthode de mesure n'était pas fiable car réalisée à la main. Aucun point de contrôle n'a été mesuré et utilisé dans les traitements. Un *modèle d'un zoom de la paroi* a été réalisé avec les mêmes points que le modèle de la paroi pour analyser plus finement une zone sélectionnée par l'ensemble de l'équipe comme une zone d'intérêt partagé.

II.1. 2. Une méthodologie à améliorer

Après analyse de la méthode utilisée pour produire les différents modèles, plusieurs points sont ressortis pour atteindre la précision attendue :

L'acquisition des cibles doit être améliorée. En effet, si l'objectif est d'obtenir une orthoimage sub-millimétrique, il est nécessaire de réaliser des contrôles et de limiter les changements de repères. De plus il faut utiliser un déclenchement à distance du Disto en raison de l'imprécision et du manque de contrôle dans la mesure réalisée à la main. Il est aussi nécessaire de pouvoir estimer l'incertitude des cibles et qualifier le modèle produit.

L'acquisition doit être préparée à l'avance, avec le calcul d'abaques pour faciliter la méthodologie sur le terrain, mais aussi pour estimer les précisions atteignables et donc le temps d'acquisition. Cette préparation va également permettre de garantir un bon recouvrement des images et une meilleure qualité finale, à la fois du modèle mais surtout de l'orthoimage.

Il est également nécessaire d'ajouter des points de contrôle au modèle et ce pour trois raisons : Valider les calculs sur Metashape et qualifier encore une fois la qualité de la mesure ; Avoir une répartition plus homogène des points sur la paroi, car les cibles ne peuvent être posées qu'en bas pour ne pas abîmer les peintures présentes ; Obtenir des points pérennes dans le temps pour un assemblage prévu au cours de l'ANR des données lidar et photogrammétriques.

Il faut également améliorer la netteté des photos acquises. En effet, l'utilisation de l'outil "Estimer la qualité de l'image" dans Metashape⁹ a montré que des images ayant une grande ouverture et une vitesse d'obturation faible (ex : F2.5, 1/60s) utilisées dans les calculs ont obtenu un score proche des 0.5 (36 images). Ce score montre que la netteté dans l'image, ainsi que la qualité globale de l'image n'est pas suffisante. Il va donc falloir trouver une optimisation des paramètres permettant de garantir une bonne netteté à l'échelle de la paroi, tout en gardant une luminosité suffisante pour un rendu qualitatif. Il y a aussi 83 images ayant une vitesse inférieure à 1/60 de seconde.

Les améliorations évoquées vont servir à réaliser les anciens modèles (paroi ornée et zoom) corrigés géométriquement. La paroi Sud, opposée à la paroi ornée n'a pas été réalisée de manière précise jusque-là et sera également réalisée.

II.2. Protocoles d'analyse du matériel

Avant de créer la méthodologie, j'ai trouvé nécessaire de rechercher les meilleurs paramètres des différents appareils pour l'acquisition en abri. Je me suis donc concentré sur les deux appareils ayant le plus d'impact sur l'acquisition, l'appareil photo et le distancemètre.

II.2. 1. Protocole d'étalonnage de la netteté

Le premier protocole mis en place a été celui de l'étalonnage de la netteté. La netteté est assez importante, car elle permet d'avoir une orthoimage de qualité. Il est donc crucial de trouver

9. Agisoft, s. d. P25

pour notre couple appareil photo / objectif les paramètres optimaux pour cela. Comme dit précédemment, la netteté (à un niveau d'ISO donné) est issue de trois paramètres, la focale et l'ouverture du diaphragme formant la profondeur de champ¹⁰ et la vitesse d'obturation. Dans notre cas, comme nous n'avons qu'une focale, nous pouvons nous concentrer sur le diaphragme et la vitesse.

II.2.1.1 Influence de la vitesse d'obturation

La vitesse d'obturation influe sur la netteté en raison de l'introduction de flou de bougé¹¹. Ce flou est induit par un mouvement de l'appareil photo lors de la prise de vue, et il est communément admis qu'il se manifeste à partir d'une vitesse de 1/60e de seconde (Boivin, 2018). Comme ce paramètre ne peut pas être contourné et que nous ferons l'acquisition à la main, il sera qualifié de critère limitant. Sur le terrain, il faudra donc soit se mettre en mode priorité vitesse qui fixera la vitesse à une valeur prédéfinie, soit s'assurer qu'elle ne descende pas en dessous de ce critère.

II.2.1.2 Influence de l'ouverture

L'ouverture du diaphragme influant à la fois sur la lumière présente et sur la netteté, il est nécessaire de trouver l'ouverture la plus adéquate pour une netteté homogène de l'image sans trop perdre de lumière. Pour cela j'ai réalisé un protocole d'analyse de netteté se basant sur une feuille d'étalonnage de la norme ISO 12233¹². Ce protocole complet sera détaillé en Annexe 2 : Protocole étalonnage netteté. Une photo est prise à toutes les ouvertures dans les deux modes de mises aux points choisis puis des indices de nettetés sont calculés (CPBD, DOM et Tenengrad). Les différents indices permettent de montrer qu'il y a effectivement une évolution de la netteté en fonction de l'ouverture. Malgré quelques différences, on peut voir que quelque soit l'indice, la netteté commence à s'améliorer à partir de F2.8 et le ratio luminosité / netteté est optimal vers F3.5 à F4. Nous pourrions donc utiliser cette valeur d'ouverture sur le terrain sans trop contraindre la vitesse d'obturation. Le mode mise au point AF-S zone est également meilleur sur la majorité des ouvertures. Les paramètres optimaux pour le terrain seront donc une mise au point en mode zone et une ouverture au minimum à F3.5.

10. (Escoffier, 2018)

11. *Flou de bougé* 2024

12. Disponible sur <https://www.graphics.cornell.edu/~westin/misc/res-chart.html>

II.2. 2. Vérification de la précision du Distancemètre

Pour prévoir une qualité de dimensionnement du modèle final, il était également important de vérifier la qualité du distancemètre. Pour cela, des tests ont été réalisés à l'ESGT sur le mur d'éta-lonnage de photogrammétrie. Cela m'a permis de disposer de cibles déjà connues en coordonnées et de pouvoir qualifier à la fois l'écart en position relatif et absolu du distancemètre.

Le fonctionnement du distancemètre est assez différent de celui d'un tachéomètre. Contrairement à ce dernier, l'appareil fixe le repère par les deux premiers points mesurés, avec le premier point étant l'origine du repère, et le deuxième point la direction de l'axe X. Il est donc nécessaire de pointer toujours les mêmes points si l'on veut obtenir le même système de coordonnées à chaque fois. Les tests ont également révélés qu'il était obligatoire d'utiliser le logiciel Disto Transfer de Leica, 2024a, permettant de déclencher les mesures à distances. L'appui sur le disto pour déclencher la mesure provoque un bougé sur la mesure et la rend inutilisable pour une précision millimétrique.

En tenant compte de ces caractéristiques, j'ai réalisé des mesures à 3 distances : 1.50m, 2m et 2m50. Ces distances étaient le parfait compromis pour trouver la précision de l'appareil, tout en réalisant un test similaire aux acquisitions au sein de l'abri. Pour chaque distance, 3 séries de 9 mesures ont été réalisées au même endroit. La précision relative a été calculée en comparant les coordonnées des 3 séries avec leurs moyennes. Pour la précision absolue, un recalage¹³ a été effectué dans le logiciel Cloud Compare (Girardeau-Montaut, s. d.) en utilisant les 9 points et les références, puis une comparaison des coordonnées.

Distance	1m50	2m	2m50
Erreur en position relative (mm)	$0,8 \pm 0,5$	$1,2 \pm 0,7$	$2,4 \pm 1,7$
Erreur en position absolue (mm)	$2,1 \pm 1,2$	$1,3 \pm 0,5$	$2,2 \pm 1,1$

Tableau 1 – Erreur en position calculée du Disto S910

On retrouve en précision relative une précision meilleure que la précision annoncée par le constructeur jusqu'à 2m, puis une précision identique. Pour la précision absolue, la précision est meilleure à partir de 2m. Il est donc clair que l'appareil fournit des coordonnées d'une précision

13. Avec la fonction "Align two points cloud by picking equivalent point pairs"

suffisante pour un rattachement local. Il est cependant important de garantir une distance de 2m au moins pour les points de référence pour obtenir la meilleure précision possible. De plus, les coordonnées finales seront plus précises en restant sur une seule station, car l'imprécision perdue sur la distance sera moindre qu'avec un changement de station qu'il faudra recalculer.

II.2. 3. Calcul des abaques

Pour prévoir en amont du terrain les potentielles résolutions atteignables de l'orthoimage, j'ai pu calculer des abaques. L'objectif était encore une fois de pouvoir fournir des fichiers réutilisables dans le futur et j'ai donc réalisé un tableur de calcul automatique. Pour les acquisitions prévues, J'ai choisi d'utiliser un recouvrement longitudinal de 80% et de 60% en transversal. Ce recouvrement permettra de réaliser une photo par station et par bande, ce qui limitera à la fois la taille des données, mais aussi le temps de traitement. Les détails des calculs sont disponibles en Annexe 1 : Calcul des abaques.

Distance de prise de vue (m)	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2
Taille pixel sol (mm)	0,89	0,12	0,15	0,18	0,21	0,24
Emprise L (m)	0,54	0,72	0,90	1,08	1,26	1,44
Emprise H (m)	0,36	0,48	0,60	0,72	0,84	0,96
Nombre de clichés	2228	1253	802	557	382	292

Tableau 2 – Extrait des abaques d'acquisitions calculées

II.3. Protocole d'acquisition et de traitements

Une fois cette analyse des paramètres réalisés, j'ai pu réaliser un protocole complet d'acquisition et l'appliquer sur le terrain fin Juin 2024, en réalisant 3 modèles : La paroi ornée au Nord de l'abri, un zoom d'une zone d'étude commune des disciplines et la paroi opposée au Sud. J'ai ensuite réalisé les différents traitements. Pour les explications suivantes, je me suis basé sur le modèle de la paroi complète et la même méthode a été utilisée pour les autres.

II.3. 1. Présentation de la méthodologie

Le diagramme de traitement récapitulatif de la méthodologie choisie (Figure 5) sera expliqué en détails dans les parties suivantes.

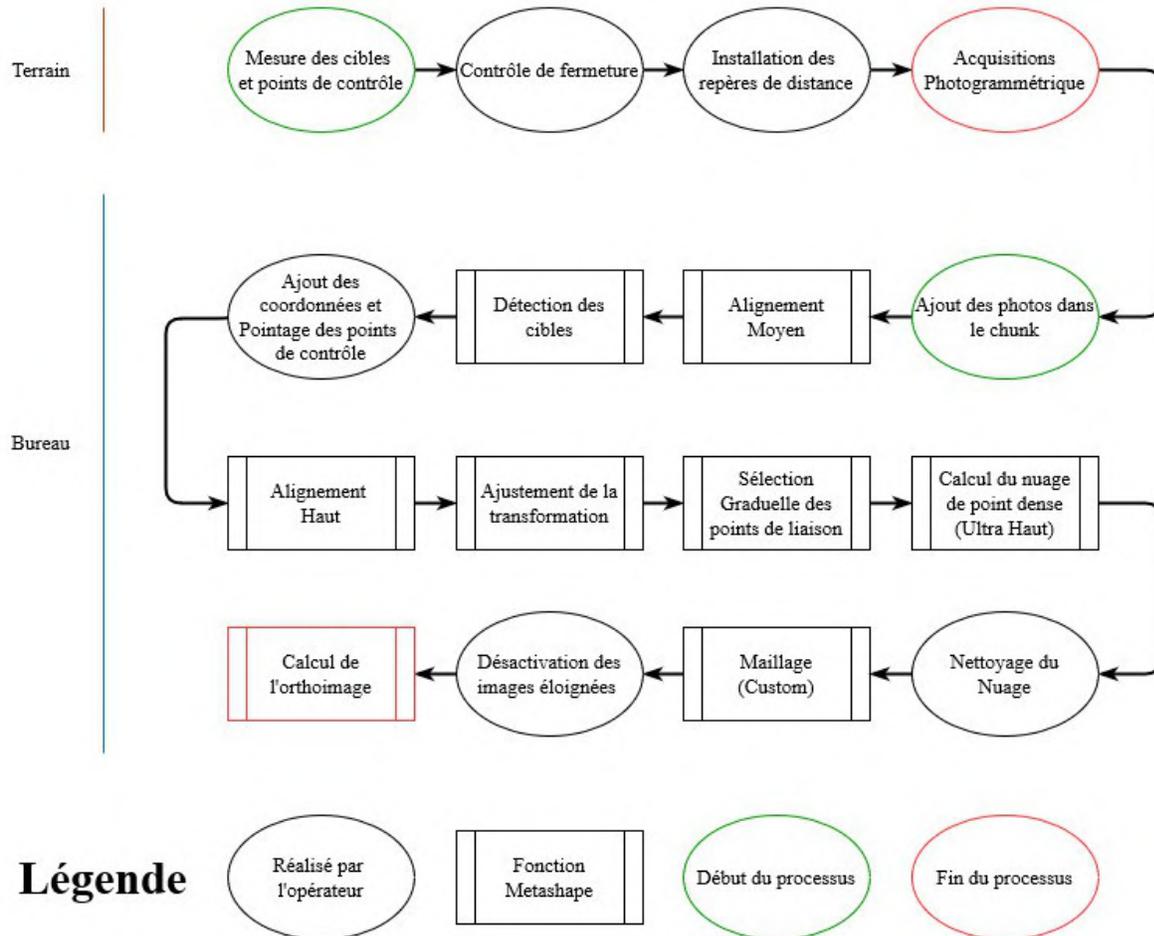


Figure 5 – Méthodologie mise en place pour la photogrammétrie

II.3. 2. Acquisitions à l'abri Otello

Pour les 3 modèles acquis, il a été nécessaire d'établir la taille théorique du pixel souhaité. Il a été choisi une taille de pixel de 0.2 mm pour les parois complètes, et entre 0.1 et 0.15 mm pour le zoom. Ces valeurs alliaient précision et la possibilité d'avoir des acquisitions réalisables dans la journée et demi prévue. Le volume de données prévu était également raisonnable (Environ 800 Mo). Grâce aux abaques (Tableau 2), nous avons choisi les distances à la paroi, soit entre 1.50m et 1.75m pour les modèles complets et entre 1m et 1.25 m pour le zoom.

Sur le terrain, nous avons commencé par mesurer les cibles. Nous avons réparti les cibles de façon homogène sur la paroi ornée avec 2 cibles servant d'origine du repère situé au centre et 13 autres cibles servant de points d'appui pour la photogrammétrie. La priorité étant sur la paroi ornée, nous avons réparti le reste des cibles sur la paroi Nord. Après avoir procédé à un contrôle de fermeture en reprenant les coordonnées des cibles d'origine et en les comparant (moins de 2mm d'écart), nous avons relevé les points de contrôle. Ces points correspondaient à des formes facilement identifiables sur les photos et mesurables avec le distancemètre.

Une fois les mesures des cibles réalisées, nous avons attendu que le soleil ne soit plus visible sur la paroi sud pour garantir une luminosité homogène. La paroi ornée est donc composée d'un plan de faille incliné où se situent la plupart des peintures, et de rochers en dessous du plan de faille (Figure 6). Pour l'observation géomorphologique il est nécessaire d'avoir les deux présents sur la même orthoimage.

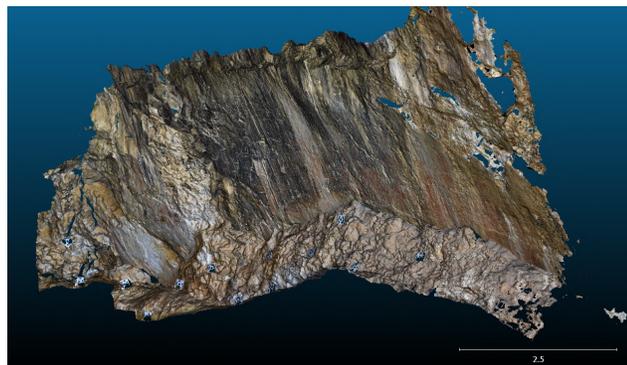


Figure 6 – Modèle 3D Juin 2024

Nous avons dû trouver une solution pour garder une distance d'acquisition identique et une orthoimage de qualité. Pour cela, nous avons placé 2 marqueurs au sol tout le long de la paroi en utilisant le distancemètre. Le marqueur le plus proche était à une distance de 1m50 des rochers et le deuxième à 1m50 du plan de faille. J'ai réalisé l'acquisition de gauche à droite de l'abri pour encore une fois garantir une bonne homogénéité de la couleur de la paroi. Nous avons fait de même pour le zoom et la paroi opposée le lendemain.

Pour chaque modèle, les abaques n'ont pas été entièrement suivies. Pour garantir une bonne géométrie de la paroi, des photos convergentes ont été prises toutes les 10 stations environ, ce qui a légèrement augmenté le nombre de photos. Des photos ont également été prises à une plus grande distance de la paroi pour faciliter l'alignement des images en post-traitement.

II.3. 3. Traitements Metashape

Les traitements réalisés sont ceux de la figure 5. Voici certains détails importants :
Pour les alignements moyen et haut, le premier permet de trouver la géométrie des images et de faciliter le pointage des points de contrôle une fois la détection des cibles réalisée et le second de trouver les positions des caméras optimales et d'améliorer la précision. L'alignement en Ultra Haut n'est pas pertinent pour un objectif scientifique, car un ré-échantillonnage d'un facteur 4 est effectué sur les images. Une optimisation des caméras est réalisée après l'alignement haut pour calculer les erreurs de reprojection.

La sélection graduelle permet de supprimer automatiquement les points de liaison les moins bons. 4 critères sont possibles : l'erreur de reprojection, l'erreur de reconstruction, le nombre d'images et la précision de projection. Pour automatiser cette sélection, j'ai utilisé le script de Carlson, 2023.

Pour le maillage, il est nécessaire de pouvoir personnaliser le nombre de polygones. La plupart du temps, Metashape bloque le nombre de polygones à 300 Millions indépendamment de la taille de l'objet. Il faudra donc adapter à chaque modèle ce nombre afin de garantir une précision permettant d'analyser finement le relief de la paroi du point de vue d'un géomorphologue.

La désactivation des images éloignées est importante pour éviter leur sélection à la place de celles à 1m50. L'orthoimage est réalisée sans interpolation avec la meilleure précision proposée pour ne pas créer d'aberrations.

II.4. Résultats et analyse

EMQ Modèle	En m		En pixel	
	Modèle initial	Modèle Juin 2024	Modèle initial	Modèle Juin 2024
Points D'appui				
Paroi Ornée (Nord)	0,28	0,0048	0,53	0,32
Zoom Paroi Ornée	0,46	0,0016	0,51	0,39
Paroi Sud	Pas de modèle	0,0046	Pas de modèle	0,38
Points de Contrôle				
Paroi Ornée (Nord)	X	0,00089	X	0,54
Zoom Paroi Ornée	X	0,0034	X	0,52
Paroi Sud	Pas de modèle	0,0078	Pas de modèle	0,73

Tableau 3 – Comparaison des Erreurs Moyennes Quadratiques entre modèles

Le tableau 3 montre les erreurs obtenues sur les modèles après traitements. Un gain signi-

ficatif en précision est observable, avec une EMQ de 4.8mm pour la paroi Ornée complète et 1.6 mm pour le zoom. La précision de la Paroi Nord est aussi bonne, mais reste à nuancer car il y avait nettement moins de cibles présentes. Les erreurs pixels sont bonnes car inférieures au pixel.

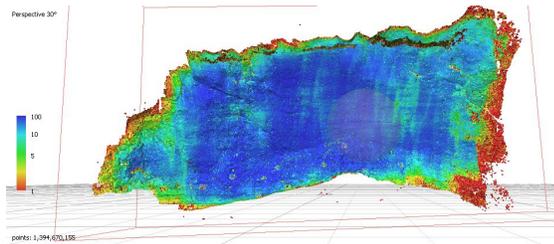


Figure 7 – Score de confiance du nuage de points

Le nuage de points produit (Figure 7) a un très haut score de confiance et est relativement homogène. L’orthoimage de la paroi ornée (Figure 8a) respecte bien la résolution théorique calculée avec une taille de pixel de 0.20 mm. Cela montre que la préparation des abaques permet de

réaliser un produit photogrammétrique de qualité. La répartition des cibles est également homogène.



(a) Orthoimage

(b) Ellipses de confiances des points d’appuis et de contrôle

Figure 8 – Orthoimage et ellipses de confiances associées du modèle de Juin 2024 de la paroi ornée

L’analyse des ellipses de confiance (Figure 8b) permet également de voir que le modèle n’a pas de zones avec des incertitudes de plus de 7.2mm, et majoritairement sur l’axe perpendiculaire à la paroi, ce qui indique une bonne géométrie. Les différents produits sont disponibles en Annexe 5 : Produits photogrammétriques.

III. L’imagerie hyperspectrale : une application novatrice

En complément de l’établissement des protocoles de photogrammétrie, j’ai réalisé une prise en mains des données hyperspectrales. Pour cela, j’ai pu approfondir mes connaissances sur le sujet

et réaliser de nombreux tests. Le lot de données disponible était conséquent, et il a d'abord fallu trier ces données et faciliter leur utilisation.

III.1. Présentation générale de l'imagerie hyperspectrale

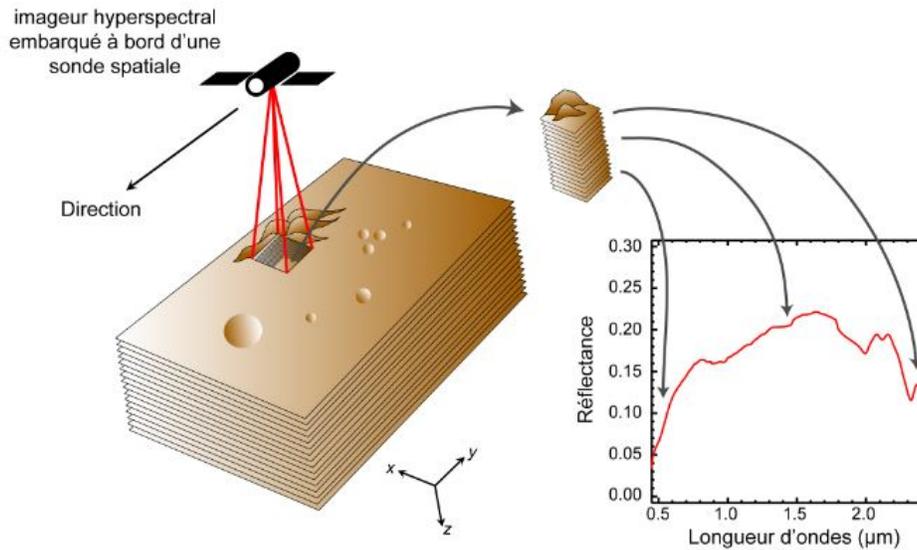


Figure 9 – Schéma explicatif du cube hyperspectral (Massé, 2010)

L'imagerie hyperspectrale est une technologie de télédétection qui combine deux techniques complémentaires : la spectrométrie et l'imagerie. La spectrométrie *"étudie l'interaction entre le rayonnement électromagnétique, émis ou réfléchi par la surface, et la matière, dans le but de déterminer les caractéristiques physiques et chimiques des matériaux en présence"* (Massé, 2010). Elle est couplée au principe d'imagerie qui permet de visualiser l'information.

Il est donc possible de décrire les cubes hyperspectraux de deux manières différentes comme montré dans la Figure 9 : pour chaque pixel de l'image, il y a un spectre continu en réflectance. Une image du cube est acquise pour chaque longueur d'onde.

Le cube hyperspectral est donc une image à 3 dimensions, x et y pour la dimension spatiale et n pour la dimension spectrale. Cette technique s'utilise principalement dans le domaine du visible et proche infrarouge (VNIR) et de l'infrarouge à courtes longueurs d'ondes (SWIR). Elle est non-invasive ce qui explique son usage de plus en plus important.

Au fil de l'évolution de cette technologie, de nombreux domaines ont pu l'utiliser (Figure

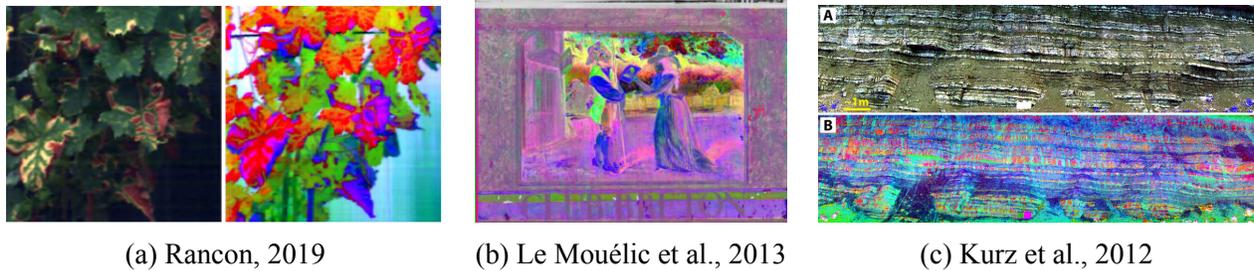


Figure 10 – Exemples de l’hyperspectral pour l’agriculture (a), l’art (b) et les géosciences (c)

10) et se rendre compte de son apport :

- Analyse de la végétation : les maladies sont identifiables facilement (Rancon, 2019).
- Dépollution des sols : les polluants du sol sont plus facilement détectés à grande échelle.¹⁴
- Les géosciences : de nombreux domaines l’utilisent comme la prospection minière, l’étude des risques naturels ...(Groupe de Synthèse Hyperspectral, 2008). L’analyse des bandes d’absorptions des minéraux permet une connaissance approfondie des sols.
- L’histoire de l’art : une analyse fine des pigments présents sur les tableaux est possible. ”*Les régions du VIS et du NIR sont utiles pour l’analyse polychromatique au moyen de l’hyperspectral.(traduit de l’anglais)*”(Cucci et al., 2016). Il est aussi possible de retracer l’historique des couches du tableau (Le Mouélic et al., 2013).

Présentation des caméras du LPG

Le LPG est équipé de deux caméras hyperspectrales¹⁵ :

1. Une caméra VNIR, l’HySpex VNIR 1600. La résolution spectrale est de 400 nm à 990 nm et un pas inter-bandes de 3.7 nm pour 160 bandes. La résolution spatiale elle, est donnée par un pas angulaire de 17° de champ de vision pour 1600 pixels de hauteur. La résolution est donc de 0.56 mm à 3 m et de 0.38 mm à 1 m.
2. Une caméra SWIR, l’HySpex SWIRe-320. Sa résolution spectrale est de 900 à 2500 nm et un pas spectral de 6 nm pour 256 bandes. La résolution spatiale est de 14° de champ de vision pour 320 pixels soit 2.3 mm par pixel à 3 m et 1.6 mm à 1 m.

Ces deux caméras sont des capteurs pushbroom, qui procèdent à l’acquisition colonne par colonne (Figure 11). A travers un jeu de lentilles et de fente, la lumière est focalisée sur un plan ou se

14. <https://tellux.fr/limagerie-hyperspectrale-pour-lanalyse-des-sols/>

15. Caractéristiques issues de la notice constructeur

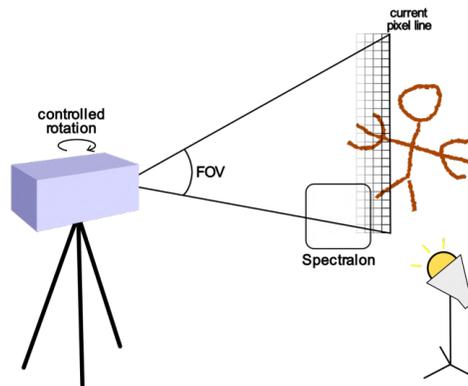


Figure 11 – Schéma explicatif de l'acquisition (Source : M. Giraud LPG)

situe le capteur. Pour acquérir une image complète, il faut donc tourner autour de l'axe de la caméra sur l'empreinte du chemin de la caméra ce qui engendre les déformations que nous cherchons à corriger..

III.2. Plusieurs campagnes d'acquisitions pour un lot de données conséquent

III.2.1. Une acquisition inhabituelle

Le site en lui même est accessible relativement facilement sans matériel malgré une montée assez abrupte dans un pierrier, mais nécessite certaines accommodations lors des différentes acquisitions d'images hyperspectrales. La configuration du site engendre un manque de lumière solaire directe et il est donc nécessaire d'utiliser des lampes halogènes. Ces lampes sont alimentées par un groupe électrogène qui doit obligatoirement se situer en dehors de l'abri et en hauteur pour ne pas faire rentrer de fumée et s'intoxiquer lors des acquisitions, mais aussi pour ne pas dégrader les peintures. Il est donc assez compliqué d'acheminer le matériel, et les missions de terrains sont prévues longtemps à l'avance pour garantir une semaine d'acquisitions (3 jours complets de mesures, 2 journées d'acheminement et d'installation / démontage).

Habituellement, les acquisitions hyperspectrales sont conduites soit dans des lieux complètement fermés et contrôlés, soit disposant d'un éclairage total par le soleil. Pour l'abri Otello, la situation est un mélange des deux possibilités. On retrouve donc contrairement aux acquisitions "types", les problèmes rencontrés dans les deux environnements en même temps et une acquisition

inhabituelle. L’abri Otello n’est ni complètement fermé, ce qui aurait rendu indispensable l’utilisation d’une source de lumière, ni complètement ouvert, ce qui pose le problème d’un manque de lumière. Cette dualité de situation a fortement compliqué les tests, car des variations d’éclairage était présente. De nombreux tests ont été nécessaires pour trouver les paramètres optimaux sur le terrain.

Ces tests ont été longs et fastidieux et pour diminuer le problème majeur de la lumière, un besoin d’un apport continu de lumière s’est posé. Le choix le plus évident serait d’utiliser un panneau LED de la même manière qu’en photogrammétrie, mais l’hyperspectral a besoin d’une source de lumière produisant un spectre continu ce qui n’est pas le cas des LED. Le choix s’est donc porté vers un spot halogène disposant de cette caractéristique. Un autre problème a été de pouvoir placer le Spectralon dans le champ d’acquisition. Étant la référence spectrale, il est nécessaire qu’il soit éclairé de façon homogène et présent dans l’image. En effet, ne pouvant pas le placer sur la paroi pour ne pas abîmer les peintures, il fallait le tenir à bout de bras. Cela a pu provoquer du flou de bougé sur certains cubes.

Une fois les données acquises, le cube hyperspectral n’est pas directement disponible. Il faut d’abord convertir les données en Luminance grâce à la calibration constructeur puis en Réflectance en utilisant le spectralon comme référence. Après la calibration en Réflectance, on obtient des valeurs situées entre 0 et 10 000 codées en 16 bits (2 octets). Les fichiers issus des caméras sont de tailles conséquentes avec en moyenne une taille de 1.8 Go pour le VNIR et 150 Mo pour le SWIR.

III.2. 2. Récapitulatif des campagnes

Les acquisitions hyperspectrales déjà réalisées vont servir de base à l’établissement d’une méthodologie et d’une chaîne de traitement. 3 campagnes ont été réalisées en 2021, 2022 et 2023 :

Campagne	VNIR	SWIR
2021	13	10
2022	9	29
2023	16	9
Total	38	48

Tableau 4 – Répartition du nombre de cubes acquis par campagne

La première campagne de 2021 a été réalisée en tant que campagne ”test”, et avait pour but

de trouver les meilleurs paramètres d'acquisitions, que ce soit pour le VNIR ou le SWIR. Les temps d'acquisitions optimaux étaient de 45 min pour le VNIR et de 3 min pour le SWIR. Pour la deuxième campagne, la méthodologie étant déjà fixée en grande partie, seulement quelques améliorations ont été apportées, comme un deuxième spot halogène pour un éclairage plus homogène de la paroi, et des tests de zooms à 1m. Une attention particulière s'est portée sur le SWIR, qui était plus novateur, mais surtout car le temps d'acquisition est plus court. L'objectif était donc de couvrir toute la paroi en infrarouge, puis de faire du VNIR sur le temps restant. Enfin pour la troisième campagne, les rôles se sont inversés avec un plus grand nombre de cubes acquis ainsi que de la réalisation de zoom en VNIR et en SWIR.

III.2. 3. Tri des données

A l'issue de ces trois campagnes, 86 cubes ont été acquis à l'échelle de paroi (nommés *ot0XX*). Au début de mon TFE, j'ai réalisé un tri au sein de ces cubes pour ne garder que les cubes utilisables. Pour cela, j'ai utilisé les logiciels ENVI de L3-Harris-Geospatial, s. d. (sous license) et Monteverdi du chercheur CNES Dinot, s. d. (Open Source gratuit) qui permettent à la fois de visualiser les cubes, mais aussi de les manipuler si besoin (recadrer, analyser, exporter ...). J'ai pu utiliser le carnet de terrain pour obtenir des informations supplémentaires concernant l'acquisition. Pour trier les données, j'ai choisi de ne pas garder les cubes qui étaient flous ou déformés, qui avaient de grosses variations créées par le passage d'un nuage ou l'arrivée du brouillard et les cubes avec une saturation importante sur le spectralon.

On retrouve après ce tri 68 cubes utilisables. Pour faciliter l'utilisation des données, j'ai réalisé un plan de situation des cubes sur la paroi en plaçant approximativement les cubes au bon endroit.

L'objectif de ce plan est d'identifier facilement les zones de recouvrement au sein de la paroi avant l'orthorectification et d'identifier les zones les plus propices sur lesquelles se concentrer. En effet, même si l'objectif est d'étudier toute la paroi et tous les cubes utilisables, il est nécessaire de se concentrer uniquement sur certains cubes pour approfondir l'analyse, qu'il sera ensuite possible d'appliquer à l'échelle de la paroi. Il n'est cependant pas précis et sera modifié après l'orthorectification.

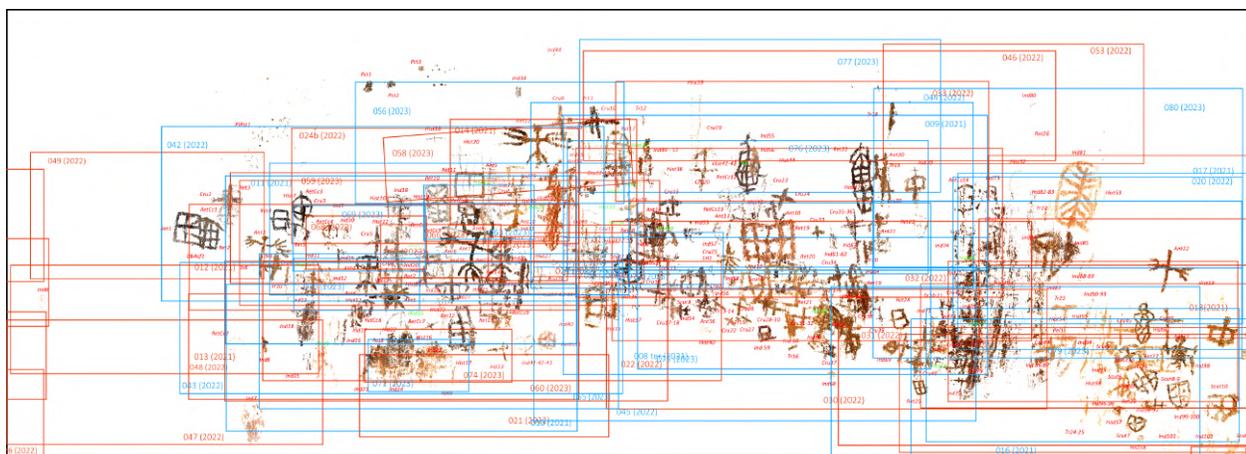


Figure 12 – Extrait du plan de situation des cubes HSI basé sur le relevé de paroi initial (Figure 3)

III.3. Une réduction des données nécessaires

L'imagerie hyperspectrale, grâce à son nombre de bandes permet comme nous avons pu le voir jusqu'à présent de voir plus de choses à l'échelle de la paroi. Cependant, ce type de données est frappée par le Phénomène de Hughes ou fléau de dimensionnalité¹⁶. Ce concept théorise que plus le nombre de données différentes augmente, plus il est difficile de traiter efficacement les données, mais surtout de discerner les informations dites "importantes" qui risquent d'être noyées dans les informations "moins importantes". Il est donc nécessaire de réduire les dimensions pour l'analyse.

Pour cela, différents outils ont été utilisés mais l'Analyse en Composante Indépendante (ICA) a été la plus utile. L'ICA est basée sur le principe des statistiques non-Gaussiennes c'est à dire que chaque données au sein de l'image sont indépendantes. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de garder les informations ayant un signal faible dans le lot initial de données, mais importantes au sein de l'analyse. Une analogie souvent donnée pour expliquer l'ICA est celle d'une pièce remplie de personnes en train de parler. Le cerveau va réussir à isoler une voix en particulier en fonction de ce que l'on veut entendre.¹⁷ Dans le cadre de l'analyse des cubes, cela permet de faire ressortir les informations importantes au sein du cube en passant de 160 ou 256 bandes à 30 bandes. Dans ces 30 bandes, une quinzaine sont en général utilisables (Figure 13) et le reste correspond au bruit. Après de nombreux tests sur le nombre de bandes en sortie (10,20,30,40,50 bandes), j'ai pu montrer que le nombre de bandes optimal était de 30 bandes (en dessous de 30,

16. *Curse of dimensionality*, Évoqué dans Mallapragada et al., 2018 et introduit par Bellman, 1957

17. Mehta, 2022

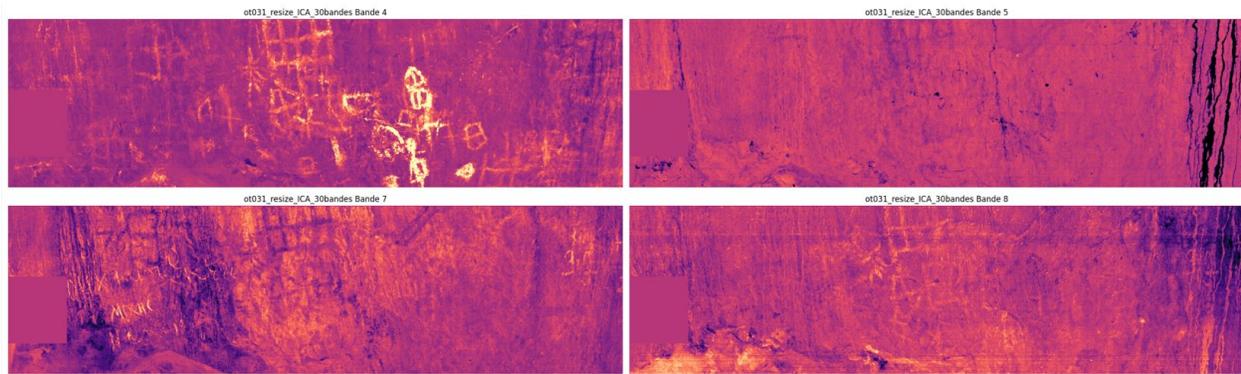


Figure 13 – Exemple des différences entre 4 bandes d’ICA (Ot31 bandes 4-5-7-8)

l’information n’est pas assez discrétisée et au dessus trop). Pour faciliter l’analyse, j’ai pu réaliser différents programmes d’automatisation des traitements. J’ai commencé par réaliser une automatisation du calcul des ICA pour un dossier complet d’image dans le langage propriétaire ENVI : IDL. Ces calculs étant conséquents (45 min / image pour le VNIR et 5 min / image pour le SWIR), cela permettait de réaliser ces calculs la nuit. Il était également facile de reproduire ces calculs ou de changer certains paramètres comme le nombre de bandes. Les bandes contenant des informations similaires n’étant pas les même entre chaque cubes, il était nécessaire de pouvoir trouver facilement les informations recherchées. J’ai donc réalisé un programme pour afficher ces 30 bandes simultanément pour faciliter la lecture (la figure 13 est issue de cet affichage). Cette visualisation va servir de catalogue au reste de l’équipe pour trouver plus facilement les informations les concernant.

III.4. Une analyse à l’échelle de la paroi compliquée

Malgré l’avantage qu’offre ces méthodes de réductions de données, le problème de la dimension spatiale est toujours présent. Les cubes bien qu’analysables indépendamment, restent difficilement analysables à l’échelle de la paroi. Comme les statistiques sont réalisées avec les données du cube, elles sont donc difficilement comparables entre elles.

L’orthorectification pourrait donc permettre un assemblage et un calcul des statistiques à l’échelle de plusieurs cubes. Cela discrétiserait ainsi mieux les différentes sources de données et permettrait de réunir plus facilement des groupes de figures entre eux.



Figure 14 – ICA issue d'un test d'assemblage manuel de deux cubes hyperspectraux

Pour voir le potentiel de cette méthode, j'ai réalisé un assemblage de deux cubes SWIR comme montré en figure 14. Cet assemblage a été réalisé manuellement sur ENVI, en alignant des informations similaires comme les coulées de calcites ou les figures. J'ai ensuite réalisé une ICA à l'échelle du cube assemblé et une meilleure discrétisation des coulures de calcites et des figures était possible. Ce-

pendant, de nombreux problèmes de géométrie sont présents comme des décalages et rendent l'analyse spatiale impossible.

IV. Orthorectification des données hyperspectrales

Les images hyperspectrales au sol, contrairement aux acquisitions aéroportées, ne sont pas connues en coordonnées. Le problème est donc que l'on ne peut pas orthorectifier les images grâce à ces paramètres. Les caméras HySpex sont également très sensibles à la distance focale en raison de la qualité des optiques, créées spécialement pour ces caméras. Les cubes étant acquis à une certaine distance du mur théorique, la rotation autour d'un axe crée une déformation des images. Ces différents facteurs combinés font qu'il est indispensable de corriger la géométrie de ces images, car l'objectif final est de réaliser une cartographie.

IV.1. Création de protocoles d'assemblages

Des protocoles d'orthorectification ont déjà été réalisés et deux types existent :

1. La pseudo-orthorectification : cela consiste à trouver des points communs dans une image de référence disposant d'une géométrie correcte et dans l'image à rectifier. Une fois ces points trouvés, on applique une fonction de déformation à l'image à corriger qui est ensuite rééchantillonnée et se retrouve dans le bon système de coordonnées.

2. L'orthorectification vraie : cette méthode, contrairement à la première, est une vraie correction de la géométrie de l'image. On retrouve le processus d'orthorectification de la photogrammétrie, qui consiste à corriger la géométrie de l'image à partir d'un modèle 3D.

La pseudo-orthorectification avait déjà été réalisée sur les caméras du LPG par Baudit, 2021, mais les points sont trouvés à la main (une centaine environ). Cela représenterait un travail trop conséquent pour les 67 cubes et n'est pas une solution viable actuellement. Elle a également été réalisée à la main dans le cadre d'étude de peintures pariétales par Bayarri et al., 2019. L'orthorectification vraie n'a été réalisée que par Bayarri et al., 2021 sans donner les détails de méthodologie.

La création de ces méthodologies a été une partie majeure de mon stage et les données de l'acquisition photogrammétrique de 2023 ont été réutilisées pour les établir. Les tests ont été effectués sur les cubes ot075 et ot076 dans le VNIR, qui avaient des conditions d'éclairagements homogènes et un bon recouvrement entre eux. Pour le SWIR, le cube ot031 a été utilisé.

IV.2. Pseudo-orthorectification des cubes existants

La pseudo-orthorectification a été la première solution trouvée pour répondre à la problématique. Le lot d'images hyperspectrales possède un défaut assez important pour une orthorectification vraie : aucune image ne fait la même dimension en pixel, et donc en recouvrement de la paroi. Pour les traitements au sein de Metashape des images ayant une dimension différente sont considérées comme des capteurs différents. Plus il y a de capteurs différents, moins Metashape sera capable d'aligner les photos, et la qualité de cet alignement sera forcément moins bon que s'il n'y avait qu'un seul capteur. Les déformations ne sont pas non plus identiques en fonction des images, car elles n'ont pas été acquises en fonction de la normale à la paroi et ne sont donc pas symétriques. Pour ces différentes raisons, une pseudo-orthorectification restait la meilleure possibilité. Une image de référence corrigée géométriquement est nécessaire pour le processus. Dans notre cas, ce sera une orthoimage de la paroi d'une taille de pixel identique à celle de l'image hyperspectrale.

IV.2. 1. Détection automatique des points communs

L'objectif a donc été de trouver une méthode automatique pour détecter des points communs entre deux images. Pour cela, il n'y a pas besoin du cube entier, seulement les 3 bandes correspon-

dants aux canaux Rouge Vert et Bleu ont été utilisées et exportées dans le format JPEG2000 (JP2). Pour garantir un affichage cohérent dans Metashape, les bandes sont converties en 8 bits et une fonction log est appliquée.

Voici le processus détaillé de la détection pour une image :

1. Ajout de l'orthoimage de référence dans le chunk Metashape
2. Spécification de la taille du pixel en mm dans les paramètres de caméra
3. Ajout de l'image RGB du cube hyperspectral dans le chunk Metashape
4. Ajout du masque correspondant (spectralon ou zones aberrantes)
5. Spécification de la taille du pixel en mm dans les paramètres de caméra
6. Alignement des images avec au minimum 20 000 points d'intérêts
7. Sélection graduelle sur l'erreur de reprojection jusqu'à obtenir le nombre de points voulus
8. Export des points en coordonnées images pour ENVI et en coordonnées terrain pour ArcMap

Pour réaliser ces opérations, j'ai du utiliser l'API Python de Metashape. L'objectif étant d'automatiser l'opération pour un jeu de données complet, j'ai rédigé un script permettant de manière itérative d'obtenir les coordonnées des cubes se trouvant dans un dossier défini et ayant les mêmes caractéristiques. La chaîne de traitement automatisée complète est disponible en Annexe 3 : Détection automatique de points d'intérêts. Ce processus a été long à réaliser, car cette utilisation n'est pas du tout l'utilisation prévue par le logiciel. L'API a donc été le seul moyen d'obtenir certaines informations (coordonnées images des points), mais également la seule façon de véritablement automatiser le processus.

IV.2. 2. Optimisation de l'orthorectification dans les logiciels associés

Une fois le processus de détection de points réalisé, il a fallu déterminer la meilleure manière de projeter l'image. Pour cela, deux logiciels ont été utilisés, Arcmap d'ESRI, s. d. et ENVI. Le premier a été utilisé pour déterminer le nombre de points optimal pour la transformation et la meilleure méthode et le second pour réaliser la projection du cube complet. J'ai décidé de me concentrer sur 5 méthodes de reprojection, à savoir la polynomiale de similarité (transformation essayant de garder le plus possible les formes d'origine), polynomiale d'ordre 1, d'ordre 2 et d'ordre

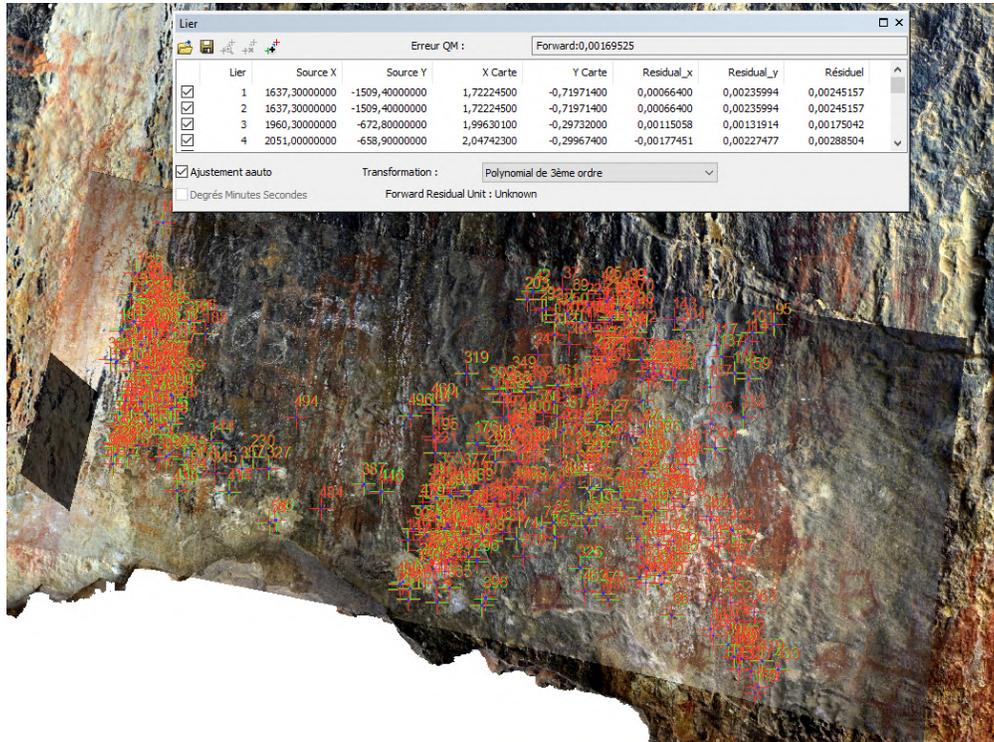


Figure 15 – Projection polynomiale 3 dans Arcmap (3000 points utilisés)

3 ainsi que la fonction projective (déformation des lignes pour les garder droites)¹⁸. Ces fonctions avaient été testées par Baudit, 2021 qui avait mis en avant la qualité de la transformation d'ordre 2 et des transformations aberrantes à partir de la polynomiale 4. Arcmap m'a permis d'obtenir pour chaque transformation et chaque nombre de points utilisés une EMQ de reprojection. Cela m'a permis d'obtenir l'évolution de la qualité de la transformation en fonction du nombre de points pour chaque méthode (Figure 16).

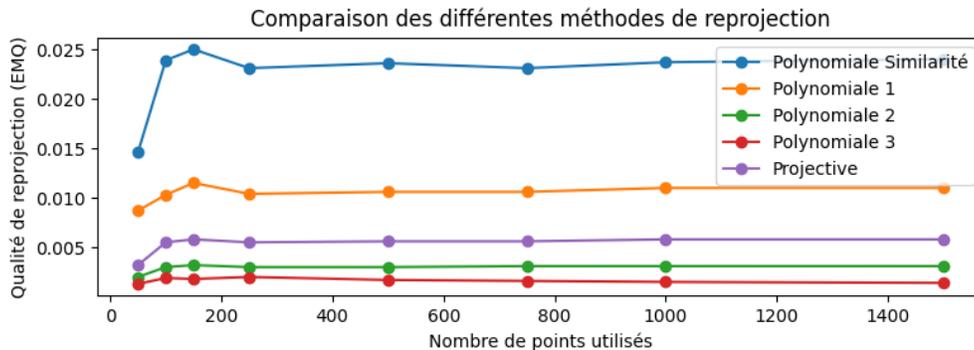


Figure 16 – Comparaison des méthodes de reprojection en fonction du nombre de points

18. Déformer (Gestion des données)—ArcMap | Documentation 2024

Cette comparaison montre que quelque soit le nombre de points, la méthode la plus juste géométriquement est la méthode polynomiale 3. Il est également possible de voir que la transformation n'évolue plus de façon significative à partir de 750 points environ.

IV.2. 3. Source d'amélioration de la méthode

Cette méthode a permis d'obtenir de façon rapide (2 min / image) et fiable (1.6 mm d'erreur de reprojection en moyenne pour la polynomiale 3) des points d'intérêts pour tout les cubes. Cependant des améliorations sur la méthode sont possibles. Premièrement, la réduction du nombre de points par la sélection graduelle ne permet pas d'obtenir le nombre de points exact souhaité (2 points d'écarts jusqu'à 1000, puis 30 jusqu'à 10 000) et n'est pas identique entre chaque images. Cela pose donc problème au niveau de la répétabilité. Deuxièmement, la sélection graduelle engendre une répartition hétérogène des points dans l'image, ce qui pose problème plus le nombre de points est bas. Les points peuvent se situer dans une même zone de l'image qui sera très bien corrigée, mais les autres zones sans points seront mal interpolées. Il faudrait donc pour un nombre de points souhaité n pouvoir diviser l'image en un certain nombre de zones m et faire une sélection en gardant $n \text{ points} / m$. Cela garantirait une homogénéité au sein de l'image. Ensuite, lorsque le nombre de points augmente, il faudrait enlever les points ayant une EMQ aberrante lors de la transformation, ce qui améliorerait la précision de la transformation.

IV.3. Orthorectification vraie des futurs cubes

L'objectif de cette méthode est d'orthorectifier directement les cubes hyperspectraux dans Metashape. J'ai pu réaliser de nombreux tests pour vérifier sa faisabilité et en ressortir certaines caractéristiques nécessaires à sa réalisation. Pour tous les tests, les traitements ont été réalisés en médium pour avoir des temps de traitements courts. Cependant, elle ne sera applicable qu'après avoir modifié la méthode d'acquisition des cubes.

IV.3. 1. Tests préliminaires

Pour les premiers tests, les mêmes cubes que la méthode précédente ont été utilisés¹⁹. Les tests préliminaires ont consisté à tester de nombreuses méthodes d'alignements, de paramètres de capteurs. Le premier test a été de trouver la meilleure méthode d'alignement. J'ai d'abord vérifié s'il était possible d'aligner les images hyperspectrales sur un projet déjà calculé ce qui n'était pas le cas. J'ai ensuite essayé d'aligner les cubes avec un petit échantillon d'images sur la zone des cubes (10 images) ce qui a fonctionné. Cependant, lorsque j'ai voulu fusionner le chunk avec cet échantillon aligné avec le chunk original, l'alignement n'était pas bon et le nuage résultant formait deux nuages sécants au niveau du plan de faille. J'ai pu réaliser ce test avec différents nombres d'images (20,30,40) mais à chaque fois, l'alignement des chunks n'était pas bon. En essayant avec une seule image VNIR et toutes les images, l'alignement a cette fois ci fonctionné. Le dernier test a été de réaliser des fausses images de même dimension, basée sur les dimensions du cube 76 et en centrant le cube 75. Des pixels noirs ont été rajoutés au images, et ont été masqués par la suite dans Metashape. L'alignement avec des images avec la même dimension était de meilleure qualité que le précédent, montrant que Metashape réalisait mieux les calculs avec un seul capteur pour le VNIR.

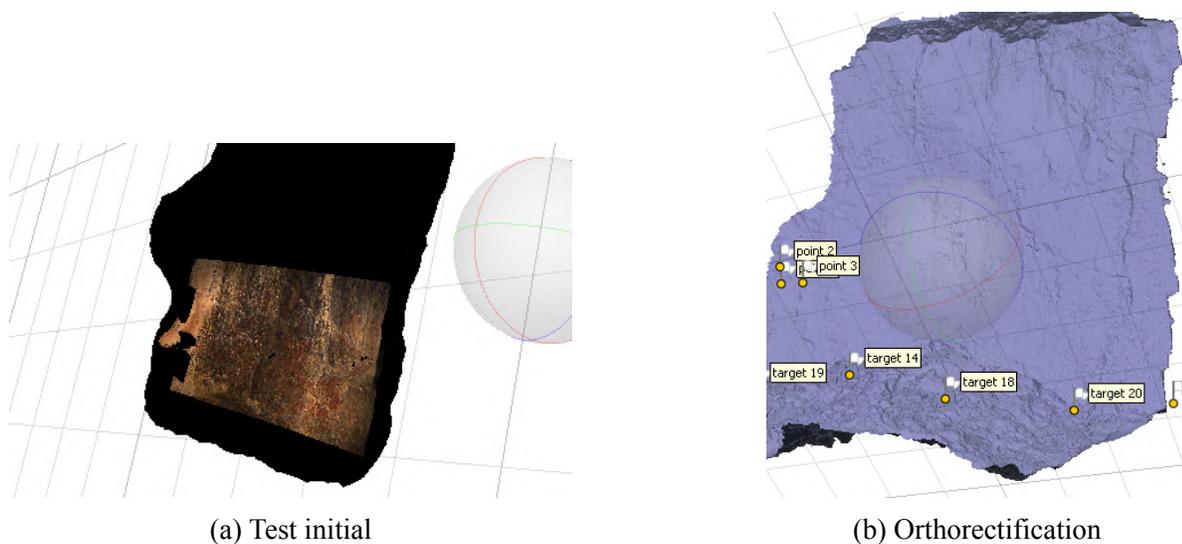


Figure 17 – Modèles de test (10 photos Nikon, 2 cubes VNIR) (a) et de l'orthorectification (b)

Depuis le début des tests, le JP2 était utilisé. L'avantage de ce format de fichiers était sa capacité à utiliser un meilleur taux de compression sans perte de qualité et donc un stockage moins

19. ot075 et ot076 avec les 3 bandes RGB en JP2

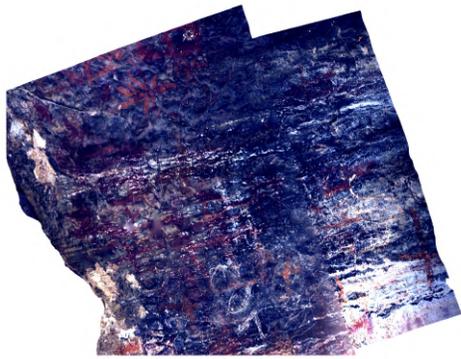
volumineux des images. L'objectif était d'utiliser les images RGB pour aligner plus facilement les images, puis de tromper Metashape en changeant la source des données pour mettre un fichier JP2 contenant l'entièreté des bandes. Cependant, après approfondissement de cette méthode, il en est ressorti que Metashape proposait un export multi-bandes de l'orthoimage uniquement pour les images au format TIFF / GEOTIFF.

IV.3. 2. Protocole final

Il a d'abord fallu recadrer les deux cubes utilisés à des dimensions identiques. Comme expliqué plus haut, les cubes n'étant pas symétriques par rapport à la normale, ils n'ont pas la même déformation géométrique. Grâce à la première méthode, j'ai pu trouver que les images restaient moins déformées au centre. je suis donc parti du principe qu'en recadrant les deux cubes au format carré (1600*1600 pixels) centré sur l'image j'obtiendrai 2 images ayant des déformations similaires. Les cubes ont été exportés au format TIFF avec toutes les bandes.

Une fois dans Metashape, j'ai utilisé le modèle complet de la paroi en ne gardant que les photos du Nikon de la zone des cubes. Une fois la taille des pixels des cubes en mm renseignée, il faut également indiquer à Metashape la bande "directrice" à utiliser. Cette bande est utilisée pour toutes les étapes de traitement et permet de ne pas traiter le cube entier à chaque fois. J'ai ensuite procédé à la construction d'un modèle classique (alignement, construction du nuage dense, création du modèle). Pour que ces étapes fonctionnent, il est nécessaire que les images soient alignées en même temps. Pour la construction de l'image orthorectifié, toutes les images sont désactivées sauf les images HSI. la seule solution pour obtenir une orthoimage correcte est de construire l'orthoimage sur le modèle. Si le nuage de point est choisi, Metashape n'arrivera pas à rectifier les images. Pour l'export de l'orthoimage, il est nécessaire de se mettre en mode Planaire et de choisir des marqueurs sur la paroi (visibles sur la figure 18b). Il est également obligatoire d'utiliser des TIFF/GEOTIFF comme fichier source, sinon l'orthoimage produite ne sera composée que de la bande directrice. Enfin, il faut désactiver l'interpolation et spécifier la taille du pixel correspondant à la taille des pixels des cubes hyperspectraux.

Le résultat final de l'orthoimage est bien composé des deux cubes hyperspectraux initiaux avec le bon nombre de bandes. Cependant, il est clair que l'assemblage n'est pas parfait et les



(a) Premier test couleur



(b) Orthoimage finale

Figure 18 – Orthoimage obtenue par le processus dans Metashape (a) et dans ENVI (b)

améliorations proposées en IV.4. permettront d’améliorer ces résultats. Il serait également possible d’automatiser ces traitements, mais en ayant réalisé un grand travail de tri auparavant pour ne garder que les cubes pouvant être assemblés entre eux.

IV.4. Une amélioration possible pour les futures acquisitions

Pour les futures acquisitions (Mars 2025), des choses peuvent être améliorées :

- Une image de même dimension pour chaque cube est nécessaire. Si l’objectif est de corriger les images ou d’en faire un assemblage, il serait optimal de disposer de fichiers ayant la même dimension. Cela facilitera les différents calculs, et il sera possible de réutiliser certains paramètres de caméras pour accélérer l’alignement.
- Une image centrée par rapport à la normale ($-n^\circ$ $+n^\circ$) permettra d’avoir des déformations similaires. L’acquisition des images étant réalisée grâce à un moteur avec des angles réglables, il est possible de régler précisément l’emprise complète de l’image grâce à la normale de la paroi. En utilisant un centrage angulaire, on s’assure de la déformation uniforme de l’image.
- Un étalonnage de la distorsion de la caméra avec un damier contribuera à mieux connaître les déformations de la caméra, et procéder à des améliorations si nécessaire.
- Une mesure de la hauteur du capteur par rapport au sol permettrait de vérifier que l’alignement s’est correctement réalisé.

Conclusion

La réalisation des modèles photogrammétriques et leurs orthoimages associées a permis de montrer que malgré le cadre d'acquisition complexe qu'était Otello, une précision submillimétrique était atteignable. Les modèles, validés par les archéologues, vont servir de socles pour le reste du projet. Avoir défini une méthodologie d'acquisition photogrammétrique détaillée à partir du matériel déjà utilisé va également permettre de produire de nouveaux modèles d'une qualité similaire dans le futur, notamment dans les abris Perret 1 (Blauvac, Vaucluse) et des Eissartènes (Le Val, Var).

Les travaux réalisés dans le cadre de ce stage ont également permis de poser les bases pour un usage de l'imagerie hyperspectrale à des fins de cartographie de paroi. Il s'agit d'une étape indispensable dans la construction d'une nouvelle méthode d'enregistrement et d'analyse des parois ornées. Elles permettront d'analyser de manière approfondie l'apport important de l'imagerie hyperspectrale pour l'étude des peintures du Néolithique, de manière simple et semi-automatique.

D'autres développements sont maintenant nécessaires pour aller plus loin dans la construction d'une nouvelle méthode d'étude des parois ornées qui permette l'analyse spatiale de l'iconographie et le croisement des données des différentes disciplines mobilisées dans le projet. L'objectif est de développer un système d'information géographique des parois ornées sous QGIS pour analyser les relations entre les différentes figures peintes, entre les figures et les morphologies du support et entre les figures et les données renseignant leur composition chimique. Un projet de doctorat est en cours de discussion pour répondre à l'ensemble de ces enjeux méthodologiques.

Le volet de la médiation scientifique devra également être étudié, car l'orthorectification des cubes permet une utilisation plus facile des données, notamment dans le cas de visite virtuelle dans le cadre d'expositions muséographiques. Il sera facile de montrer sur les modèles les analyses issues de la cartographie.

Ce stage m'a permis d'approfondir mes connaissances en photogrammétrie et surtout en manipulation de données hyperspectrales. J'ai aussi pu m'améliorer fortement en programmation et j'ai pu découvrir l'immense champ des possibles de l'API Python de Metashape. Il m'a également permis de gagner en autonomie et en organisation. Avoir découvert le domaine de la recherche scientifique était également très enrichissant et a révélé mon envie de poursuivre dans ce domaine.

Bibliographie

Ouvrages imprimés

- Bellman, R. (1957). *Dynamic programming and modern control theory*. Princeton University Press. Princeton NJ, USA. isbn : 069107951.
- Defrasne, C. (2023a). *Le gai savoir : Mélanges en hommage à Jean-Loïc Le Quellec*. Sous la dir. de d. Julien, D. Frédérique et L. Patrice. Archaeopress Archaeology. 42-52. isbn : 978-1-80327-541-3. doi : 10.32028/9781803275413. url : <https://archaeopress.com/Archaeopress/Products/9781803275413> (visité le 14/06/2024).
- Luhmann, T., S. Robson, S. Kyle et J. Boehm (2023). *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. Google-Books-ID : L1DaEAAAQBAJ. Walter de Gruyter GmbH & Co KG. 852 p. isbn : 978-3-11-102967-2.

Articles

- Bayarri, V., E. Castillo, S. Ripoll et M. Sebastián (2021). « Improved Application of Hyperspectral Analysis to Rock Art Panels from El Castillo Cave (Spain) ». In : *Applied Sciences* 11, p. 1292. doi : 10.3390/app11031292.
- Bayarri, V., M. A. Sebastián et S. Ripoll (2019). « Hyperspectral Imaging Techniques for the Study, Conservation and Management of Rock Art ». In : *Applied Sciences* 9.23. Number : 23 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 5011. issn : 2076-3417. doi : 10.3390/app9235011. url : <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/23/5011> (visité le 17/06/2024).
- Cucci, C., J. K. Delaney et M. Picollo (2016). « Reflectance Hyperspectral Imaging for Investigation of Works of Art : Old Master Paintings and Illuminated Manuscripts ». In : *Accounts of Chemical Research* 49.10. Publisher : American Chemical Society, p. 2070-2079. issn : 0001-4842. doi : 10.1021/acs.accounts.6b00048. url : <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.6b00048> (visité le 10/04/2024).
- Defrasne, C. (2023b). « The Cognitive Processus Behind Neolithic Schematic Rock Art. Archaeological Implications and Research Hypothesis ». In : *Cambridge Archaeological Journal* 33.1, p. 157-179. issn : 0959-7743, 1474-0540. doi : 10.1017/S0959774322000233. url : <https://>

www.cambridge.org/core/journals/cambridge-archaeological-journal/article/cognitive-processus-behind-neolithic-schematic-rock-art-archaeological-implications-and-research-hypothesis/948B6CC06DB8DCCA8C1A7CDC0C4CE083 (visité le 14/06/2024).

Defrasne, C. et P. Hameau (2024). « Nouvelles approches en archéologie. Du renouvellement des outils à l'identification des syntaxes graphiques ». In : *Polygraphe(s) : approches métissées des actes graphiques* 6. url : <https://shs.hal.science/halshs-04378732> (visité le 14/06/2024).

Defrasne, C., M. Massé, M. Giraud, B. Schmitt, D. Fligiel, S. Le Mouélic et E. Chalmin (2023). « The contribution of VNIR and SWIR hyperspectral imaging to rock art studies : example of the Otello schematic rock art site (Saint-Rémy-de-Provence, Bouches-du-Rhône, France) ». In : *Archaeological and Anthropological Sciences* 15.8. Publisher : Springer, p. 116. doi : 10.1007/s12520-023-01812-6. url : <https://hal.science/hal-04293291> (visité le 19/02/2024).

Grussenmeyer, P., A. Burens, L. Carozza, F. Lèveque, S. Guillemin et V. Mathé (2014). « Numérisation 3D de la grotte ornée des Fraux (Dordogne) : apport à l'archéologie et à la cartographie du champ magnétique ». In : *XYZ 138*, p. 33-41. issn : 0290-9057. (Visité le 14/06/2024).

Hameau, P. (2007). « Saint-Rémy-de-Provence – Abri Otello ». In : *ADLFI. Archéologie de la France - Informations. une revue Gallia*. Publisher : ministère de la Culture. issn : 2114-0502. doi : 10.4000/adlfi.6252. url : <https://journals.openedition.org/adlfi/6252> (visité le 04/07/2024).

Hernández Pérez, M. S. et R. Martínez Valle (2003). « L'art levantin et l'art schématique espagnols ». In : *Actes des congrès nationaux des sociétés historiques et scientifiques* 125.5. Publisher : Persée - Portail des revues scientifiques en SHS, p. 109-126. url : https://www.persee.fr/doc/acths_0000-0001_2003_act_125_1_4847 (visité le 10/07/2024).

Hoffmann, D. L. et al. (2018). « U-Th dating of carbonate crusts reveals Neandertal origin of Iberian cave art ». In : *Science* 359.6378. Publisher : American Association for the Advancement of Science, p. 912-915. doi : 10.1126/science.aap7778. url : <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aap7778> (visité le 04/07/2024).

- Krotkov, E. (1988). « Focusing ». In : *International Journal of Computer Vision* 1.3, p. 223-237. issn : 1573-1405. doi : 10.1007/BF00127822. url : <https://doi.org/10.1007/BF00127822> (visité le 06/07/2024).
- Kumar, J., F. Chen et D. Doermann (s. d.). « Sharpness Estimation for Document and Scene Images ». In : ().
- Kurz, T., S. Buckley et J. Howell (2012). « Close range hyperspectral imaging integrated with terrestrial lidar scanning applied to rock characterisation at centimetre scale ». In : *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XXXIX-B5, p. 417-422. doi : 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B5-417-2012.
- Narvekar, N. D. et L. J. Karam (2011). « A No-Reference Image Blur Metric Based on the Cumulative Probability of Blur Detection (CPBD) ». In : *IEEE Transactions on Image Processing* 20.9. Conference Name : IEEE Transactions on Image Processing, p. 2678-2683. issn : 1941-0042. doi : 10.1109/TIP.2011.2131660. url : <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5739529> (visité le 06/07/2024).

Thèses / Mémoires

- Baudit, M. (2021). « Apport des méthodes : imagerie drone, LiDAR et imagerie hyperspectrale pour l'étude du littoral vendéen ». Pages : 57. other. Université de Nantes, 2 rue de la Houssinière, 44322 Nantes. url : <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03533799> (visité le 16/04/2024).
- Daguerre, L. (2023). « Atlas d'orthoimages pour l'archivage patrimonial et la restauration des vitraux de l'Abbaye de l'Epau ». Pages : 70. other. 1 boulevard Pythagore, Campus universitaire, 72000 Le Mans - France : ESGT-CNAM. url : <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04410196> (visité le 12/04/2024).
- Massé, M. (2010). « Nature et origine des dépôts de sulfates dans les régions équatoriales et polaires de Mars. Comparaison morphologique et minéralogique entre Aram Chaos et la calotte polaire Nord. » Thèse de doct. Université de Nantes. url : <https://theses.hal.science/tel-00762257> (visité le 15/04/2024).

Rancon, F. (2019). « Imagerie couleur et hyperspectrale pour la détection et la caractérisation des maladies du bois de la vigne ». Thèse de doct. Université de Bordeaux. url : <https://theses.hal.science/tel-03140819> (visité le 08/04/2024).

Sites Web

Boivin, S. (2018). *Provoquer le flou de mouvement*. url : <https://www.lesnumeriques.com/photo/provoquer-le-flou-de-mouvement-pu122923.html> (visité le 12/06/2024).

Carlson, D. (2023). *How to Use Python to Streamline Your Agisoft Metashape Workflow : Part II*. Medium. url : <https://medium.com/@danfcarlson/how-to-use-python-to-streamline-your-agisoft-metashape-workflow-part-ii-e7e3fba8612d> (visité le 22/05/2024).

Déformer (Gestion des données)—ArcMap | Documentation (2024). url : <https://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/latest/tools/data-management-toolbox/warp.htm> (visité le 08/07/2024).

Escoffier, E. (2018). *Profondeur de champ et zone de netteté - Déclencher malin*. declencher malin. url : <https://www.declencher malin.com/reglage-appareil-photo/profondeur-de-champ-et-zone-de-nettete/> (visité le 12/06/2024).

Flou de bougé (2024). Wikipédia. Page Version ID : 213671965. url : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Flou_de_boug%C3%A9&oldid=213671965 (visité le 12/06/2024).

La formation des abris sous-roche | Les abris sculptés de la Préhistoire (2024). url : <https://archeologie.culture.gouv.fr/sculpture-prehistoire/fr/la-formation-des-abris-sous-roche> (visité le 03/07/2024).

Le Paléolithique (2016). Inrap. url : <https://www.inrap.fr/le-paleolithique-10196> (visité le 04/07/2024).

Lemercier, O. (2008). *3 : Archéologie néolithique De la Préhistoire à l'Histoire... A l'origine de nos sociétés*. url : <http://ubprehistoire.free.fr/UTB-cours%20en%20ligne-3.html> (visité le 03/07/2024).

Mehta, S. (2022). *Independent Component Analysis vs Principal Component Analysis*. Analytics India Magazine. url : <https://analyticsindiamag.com/independent-component-analysis-vs-principal-component-analysis/> (visité le 10/04/2024).

Période archéologique : Néolithique (2024). Inrap. url : <https://www.inrap.fr/periodes/neolithique> (visité le 04/07/2024).

rbaron (2020). *How to identify blurry images*. rbaron.net. url : <https://rbaron.net/blog/2020/02/16/How-to-identify-blurry-images.html> (visité le 06/06/2024).

SÉMIOTIQUE : Définition de SÉMIOTIQUE (2024). url : <https://www.cnrtl.fr/definition/s%C3%A9miotique> (visité le 04/07/2024).

Logiciels / Codes

Agisoft (2024). *Metashape Professional*. Version 2.1.1.

Dinot, S. (s. d.). *Monteverdi Orfeo ToolBox (OTB)*. Version 8.1.2. url : <https://www.orfeo-toolbox.org/tag/monteverdi/>.

ESRI (s. d.). *Arcmap*. Version 10.8.1.

Girardeau-Montaut, D. (s. d.). *Cloud Compare*. url : <https://www.danielgm.net/cc/>.

L3-Harris-Geospatial (s. d.). *ENVI*. Version 5.6.

xabierr (2023). *Extract the tie point positions (u and v)*. url : <https://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=10730> (visité le 29/04/2024).

Notices

Agisoft, M. (s. d.). *Agisoft Metashape User Manual - Professional Edition, Version 2.1*. url : <https://www.agisoft.com/features/professional-edition/>.

Leica, G. (2024a). *DISTO-transfer et extension pour le DAO*. (Visité le 28/03/2024).

— (2024b). *S910-Manuel*. Notice. url : https://shop.leica-geosystems.com/sites/default/files/2020-12/S910_808167d_fr.pdf (visité le 05/03/2024).

Annexe 1 : Calcul des abaques

Lors des acquisitions photogrammétriques rapprochées, le principe des images convergentes est utilisé. Grâce à la vision multi-image, il est possible de reconstituer la géométrie d'un objet à partir d'au moins deux images, grâce à la triangulation.

Ce principe permet grâce à des prises convergentes sur l'objet ou sur la paroi d'obtenir des informations potentiellement masquées par l'objet en lui-même (phénomène d'occlusion) mais également de permettre une meilleure reconstruction de la scène. Une acquisition idéale en visées convergentes correspond à une visée normale (perpendiculaire à l'objet), deux visées orientées à gauche et à droite de la normale puis deux visées vers le haut et vers le bas. Ces images gardent un recouvrement d'au moins 50% avec la normale.

Lorsque l'objet à reconstruire est d'une taille importante, il est important de respecter une distance homogène à la paroi pour garantir un modèle de qualité et une orthoimage avec une résolution homogène. Pour cela, l'acquisition est réalisée bandes par bandes (horizontales et verticales), en capturant des images selon une ligne parallèle à la parois. Un recouvrement compris entre 60 et 80% est recommandé (Figure 19). Il est également possible de réaliser des visées convergentes.

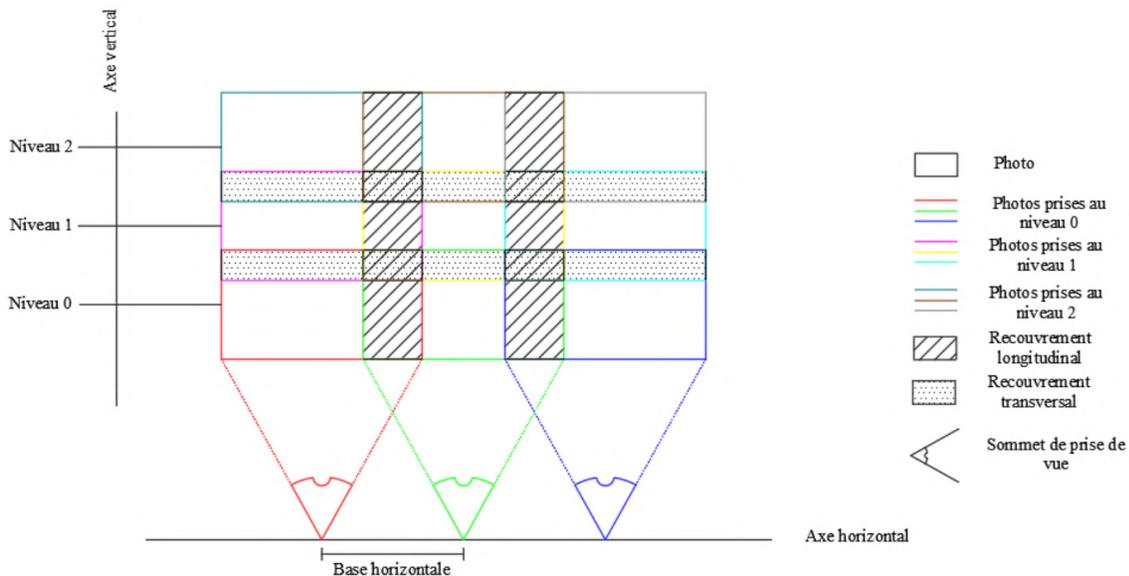


Figure 19 – Schéma explicatif de l'acquisition bandes par bandes (Daguerre, 2023)

Pour faciliter l'acquisition sur le terrain, on peut calculer des abaques pour un couple appareil photo - focale donné :

On calcule la taille du pixel au sol :

$$Tps = \frac{D}{f} \times t \quad (1)$$

Puis l'emprise de l'image L*H :

$$L = npl \times t \times \frac{D}{f} \quad (2)$$

$$H = nph \times t \times \frac{D}{f} \quad (3)$$

On calcule ensuite la base longitudinale B :

$$B = L(1 - r_x) \quad (4)$$

Puis la base transversale A :

$$A = H(1 - r_y) \quad (5)$$

Avec :

D = Distance à la paroi

f = focale utilisée,

L = Longueur de l'image en m

H = Hauteur de l'image en m

npl = Nombre de pixel en longueur

nph = Nombre de pixel en hauteur

rx = recouvrement en x en %

ry = recouvrement en y en %

Avec la longueur et la hauteur approximatives de la paroi, il est également possible de calcu-

ler le nombre de cliché estimé en calculant le nombre de bande, le nombre de stations et le nombre de cliché par stations.

$$N_{bandes} = \frac{L_{paroi}}{B} \quad (6)$$

$$N_{stations} = \frac{H_{paroi}}{A} \quad (7)$$

$$N_{cliches} = N_{bandes} \times N_{stations} \times N_{cliches/stations} \quad (8)$$

Sources : *Cours de photogrammétrie E. Simonetto et Daguerre, 2023.*

Annexe 2 : Protocole étalonnage netteté

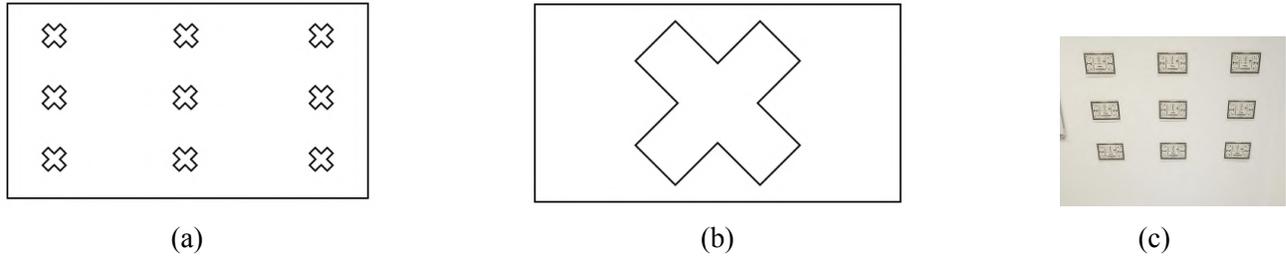
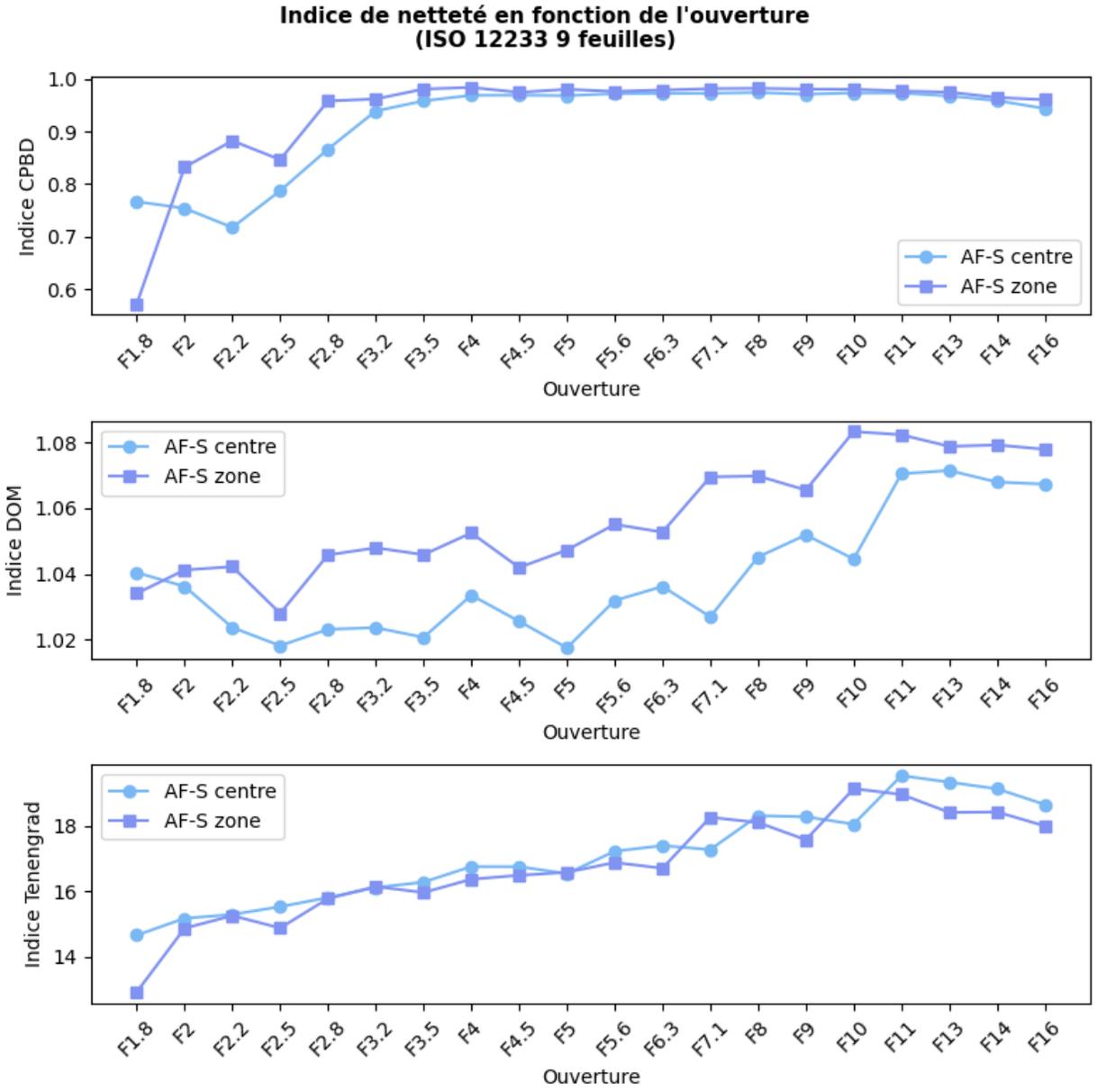


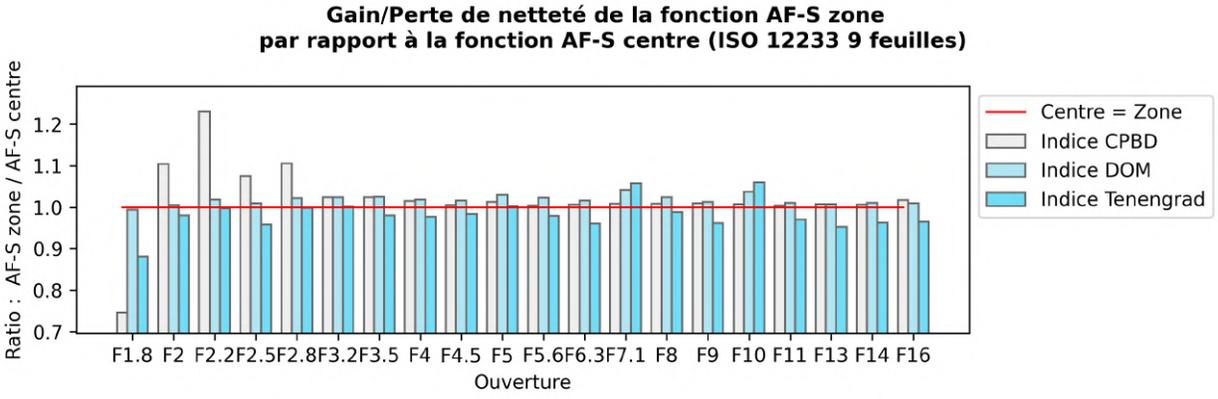
Figure 20 – Illustration du protocole 9 zones (a), 1 zone (b) et mise en situation (c)

Pour ce protocole, deux mises en situation ont été réalisées, une à 3m du mur avec 9 zones (Figure 20a, et une à 50cm du mur avec 1 zone (Figure 20b). L'objectif était donc de prendre une photo en mode priorité ouverture et de tester toutes les ouvertures disponibles pour chaque mode de mise au point (AF-S zone ou centre). Cela permettait de voir si la mise au point automatique de l'appareil photo en mode zone améliorait la netteté globale de l'image par rapport au mode centre. En théorie, on s'attend à ce que plus l'ouverture est petite, meilleure est la netteté et que le mode zone soit meilleur. Les conditions étant strictement identiques (éclairagements, paramètres de prise de vue, distance ...), la comparaison sera donc représentative. Les 3 indices utilisés sont le CPBD (Narvekar et Karam, 2011), le Difference of Median (DOM) (Kumar et al., s. d.) et le Tenengrad (Krotkov, 1988). Ces indices fonctionnent sans référence, c'est à dire qu'il n'y a pas besoin d'image de référence "nette" pour comparer. Pour le calcul de ces indices, j'ai réalisé un code python calculant les indices pour l'image correspondant à chaque ouverture. Pour transcrire ces indices en python, j'ai utilisé les codes réalisés par rbaron, 2020 pour le calcul de l'indice Tenengrad, et les bibliothèques python *pydom* et *cpbd* avec l'installateur *pip*. J'ai ensuite réalisé les graphes correspondant à l'évolution de la netteté en fonction de l'ouverture (Figure 21a et Figure 22a) et un ratio entre le mode de mise au point centre et le mode zone (Figure 21b et Figure 22b).

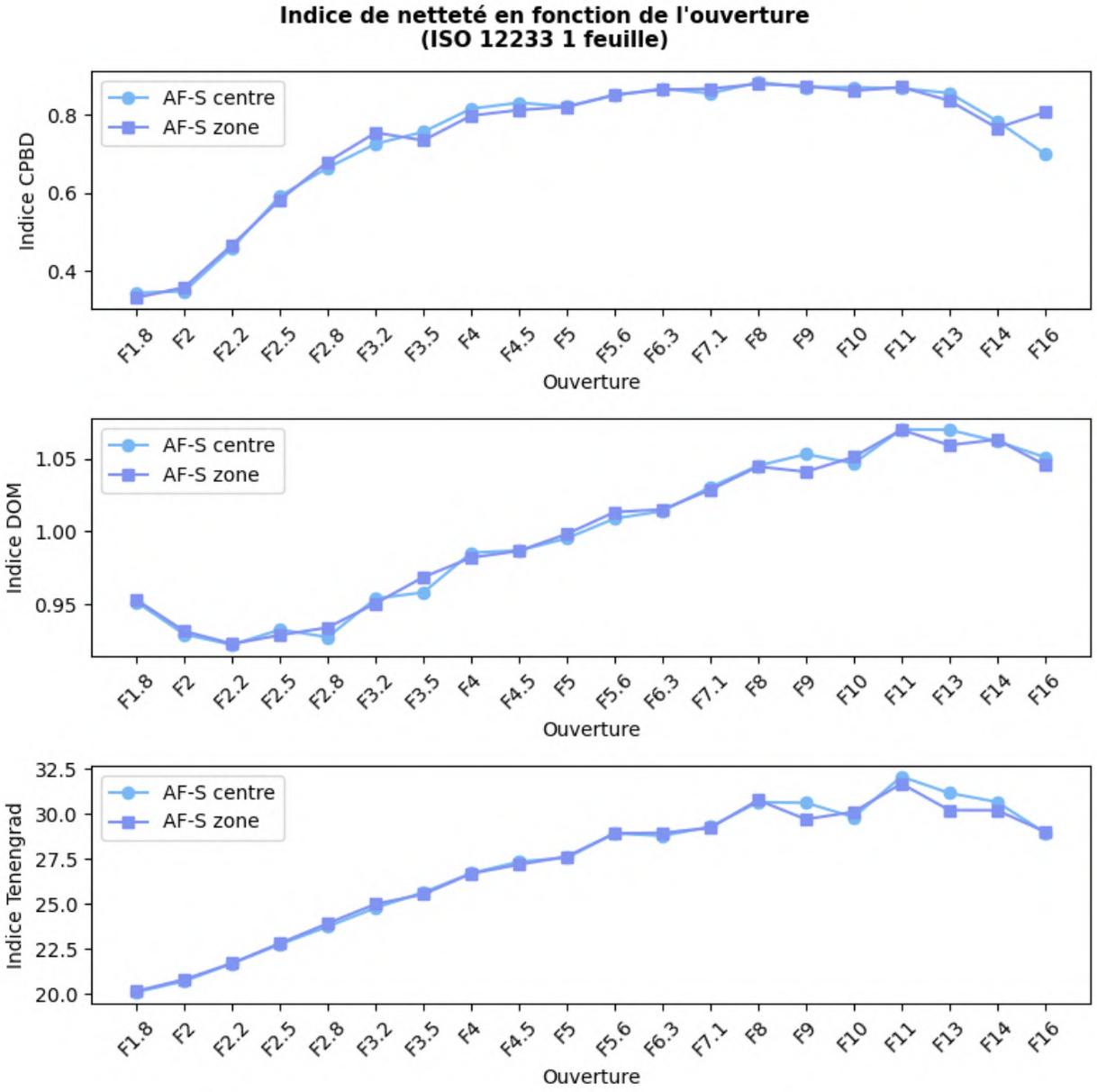
Ces deux mises en situation ont permis de montrer qu'il y avait effectivement une amélioration de la netteté à petite ouverture jusqu'à F11. Il est communément admis chez les constructeurs et les photographes que les premières et dernières ouvertures sont plus sensibles aux aberrations chromatiques et à des pertes de netteté, ce qui explique les résultats obtenus. Elles ont également permises de montrer que le mode zone apporte une meilleure netteté au sein de l'image.



(a) Graphique

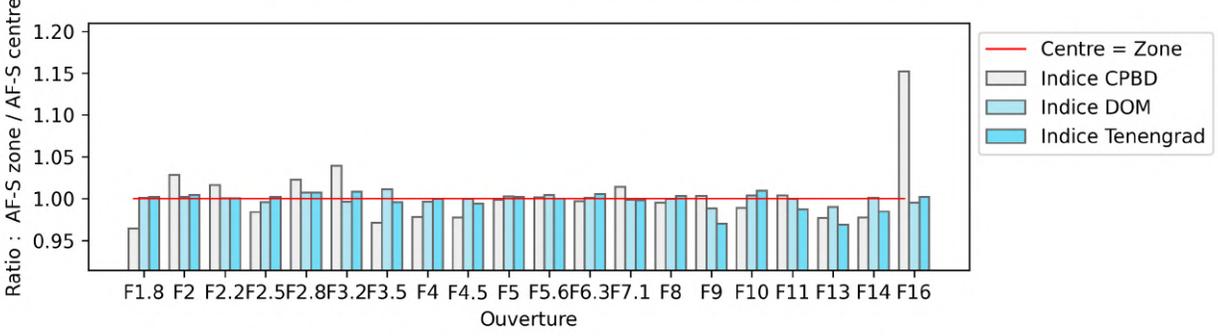


(b) Ratios



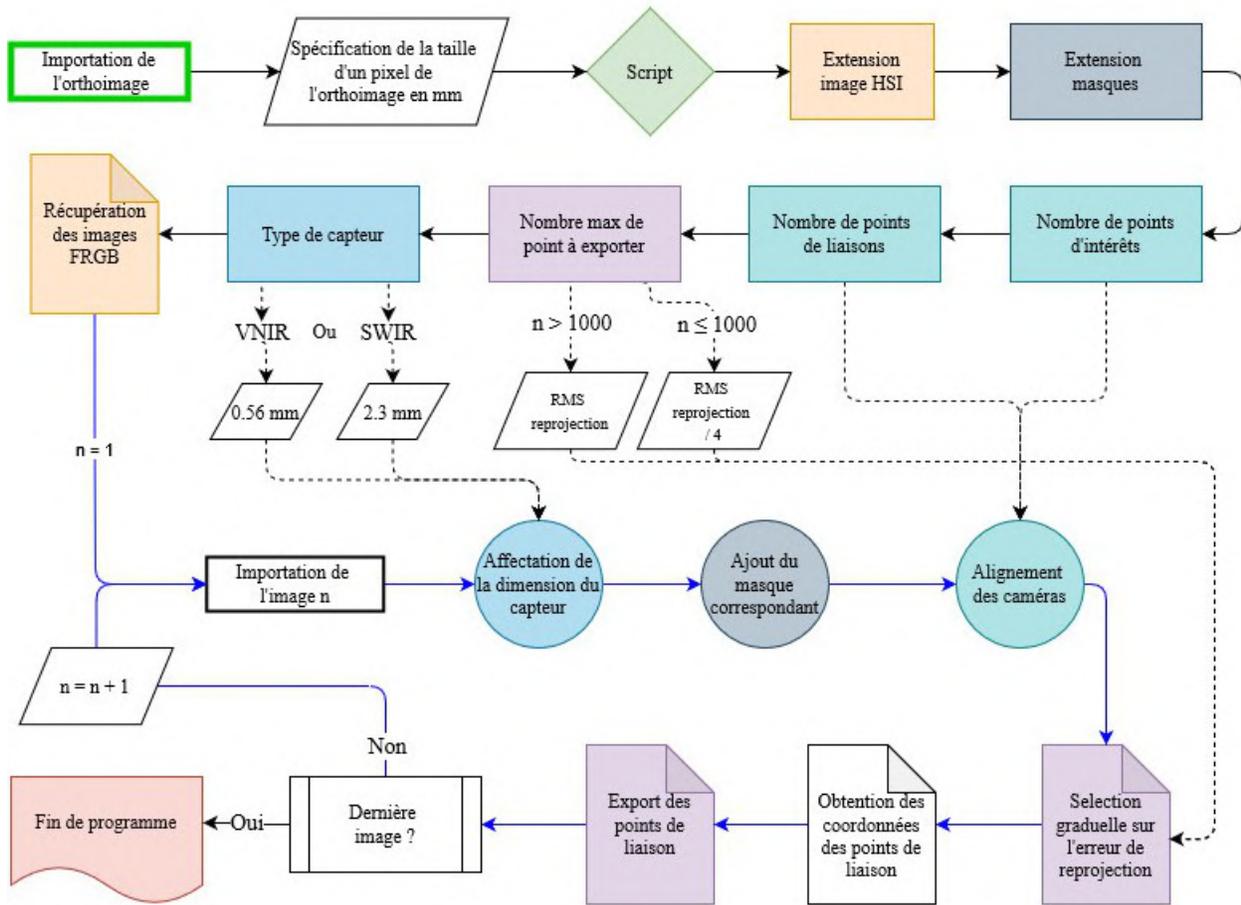
(a) Graphique

Gain/Perte de netteté de la fonction AF-S zone par rapport à la fonction AF-S centre (ISO 12233 1 feuille)



(b) Ratios

Annexe 3 : Détection automatique de points d'intérêts



Légende

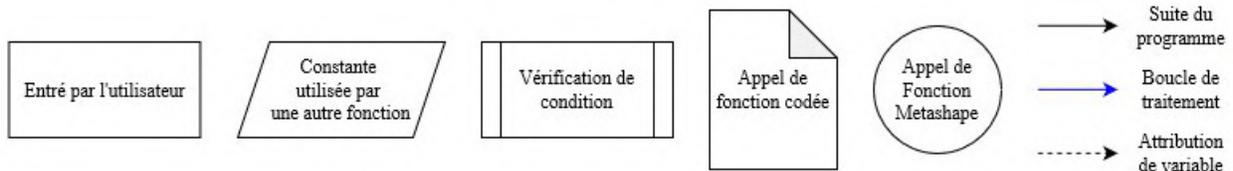


Figure 23 – Diagramme de la chaîne de traitement pour la détection et l'export de points d'intérêt

La fonction d'export de point se base sur le script de xabierr, 2023 et pour la sélection graduelle sur le script de Carlson, 2023. J'ai modifié ces deux scripts pour faire intervenir le nombre de points souhaités à sélectionner puis à exporter. Toutes les autres fonctions ont été réalisées personnellement. Un grand merci au support technique d'Agisoft pour l'aide apportée via le forum sur certaines utilisations particulières de l'API.

```

1 import Metashape
2 import math
3 import os, glob
4
5 def main():
6     ### Recuperations du projet et initialisation des variables utiles ###
7     doc = Metashape.app.document
8     chunk = doc.chunk
9     ortho = chunk.cameras[0] # Recuperation de l'orthoimage
10    if ortho.sensor.pixel_height is None or ortho.sensor.pixel_width is None :
11        Metashape.app.messageBox("La résolution de l'orthoimage n'est pas
12    spécifiée dans l'onglet Camera")
13        return 0 # Fin de programme
14
15    hsi_extension = ".jp2"
16    hsi_extension = "*" + hsi_extension
17    mask_extension = ".jpg"
18
19    kp_limite = Metashape.app.getInt("Nombre max de keypoints")
20    tp_limite = Metashape.app.getInt("Nombre max de TiePoints")
21    tp_to_export = Metashape.app.getInt("Nombre de TiePoints à exporter")
22    resol_sensor = Metashape.app.getFloat("Taille d'un pixel en mm du cube")
23
24    ### Iteration du calcul des points pour chaque image ###
25    for file in images_path:
26        chunk.addPhotos(file) # ajout de l'image
27        hsi_cam = chunk.cameras[1]
28        hsi_sensor = hsi_cam.sensor
29        hsi_sensor.pixel_size = Metashape.Vector([resol_sensor, resol_sensor])
30    # Attribution de la resolution du capteur HSI en mm
31    add_mask(mask_path, hsi_cam)
32    align_2cam(chunk, ortho, hsi_cam) # Aligement des deux images
33
34

```

```

35 # Distinction des cas de decimation des points
36     if tp_to_export <= 1000:
37         # calcul de l'erreur de reprojection et de la valeur de debut pour une
38         # convergence plus rapide
39         reproj_RMS = calc_reprojection(chunk)/4
40         # Selection graduelle avec un pas de 0.001 pour une convergence adaptée
41         TH_final,pct_left = grad_selection_RE(chunk,reproj_RMS,
42         tp_to_export,0.001)
43     else :
44         reproj_RMS = calc_reprojection(chunk)
45         TH_final,pct_left = grad_selection_RE(chunk,reproj_RMS,
46         tp_to_export,0.01)
47
48         tie_points = get_tie_points(ortho,hsi_cam,chunk) # Obtention des
49         tie_points
50         save_tiepoints_to_csv(tie_points,ortho,hsi_cam,TH_final,pct_left,
51         folder_path) # Export en CSV
52         chunk.remove(hsi_cam)
53
54     Metashape.app.messageBox("Traitement terminé")
55     return None

```

Listing 1 – Fonction de calcul des points d'intérêts (Extrait du script complet)

Annexe 4 : Présentation du matériel

Appareil photo

L'appareil photo utilisé pour le projet est un Nikon D750 avec un capteur CMOS plein format de dimension 24x35.9mm. Ce boîtier est associé à un objectif AF-S NIKKOR 50mm f/1.8G. Ce couple permet des acquisitions en conditions faiblement éclairées grâce à la taille du capteur qui est capable de capter plus de lumière qu'un capteur APS-C mais aussi grâce à la plage d'ouverture large (F1.8 à F22) qui permet de laisser rentrer plus de lumière sur le capteur à grande ouverture. Enfin, la focale fixe permet de s'assurer qu'il n'y a aucun changement lors du levé.

Distancemètre

Le distancemètre utilisé est un DISTO S910 de Leica Geosystems avec le kit de mesure d'angle FTA360-S. Cet appareil peut être utilisé avec ou sans trépied, et avec ou sans kit de mesure d'angle. L'avantage du kit de mesure d'angle spécifique au S910 est qu'il est directement dans le bon référentiel de niveau, et que la mesure d'angle est plus fine et donc plus précise grâce aux visées tournantes. La précision annoncée de cet appareil est de ± 1.0 mm pour la distance jusqu'à 10m et une précision angulaire de $\pm 0.1^\circ$ (verticale et horizontale) dans des conditions favorables (*"Cible blanche à réflexion diffuse, faible luminosité de fond et températures modérées."*) (Leica, 2024b). La précision combinée est quant à elle de 1mm/m.

Lumière

Une lampe Pro Wide de spéléologie de la marque Méandre²⁰ a été utilisée. Elle peut produire 2x 1500 lumens, ce qui garantit un bon éclairage. Elle est fixée grâce à un pas de vis 1/4 classique pour les appareils photos.

Cibles Metashapes

Metashape étant utilisé pour les traitements, les cibles codées (détectés automatiquement par le logiciel) ont été utilisés. Le LPG a fait imprimer des cibles 12 bits sur des plaques métalliques carrés de différentes dimensions (5, 15 et 25 cm) avec un revêtement mat.

20. <https://www.meandre-technologie.com/boutique/lampes-et-batteries/pro-wide/>

Annexe 5 : Produits photogrammétriques

Voici les différents produits issus de la photogrammétrie présentés dans ce mémoire.



Figure 24 – Orthoimage de la paroi ornée

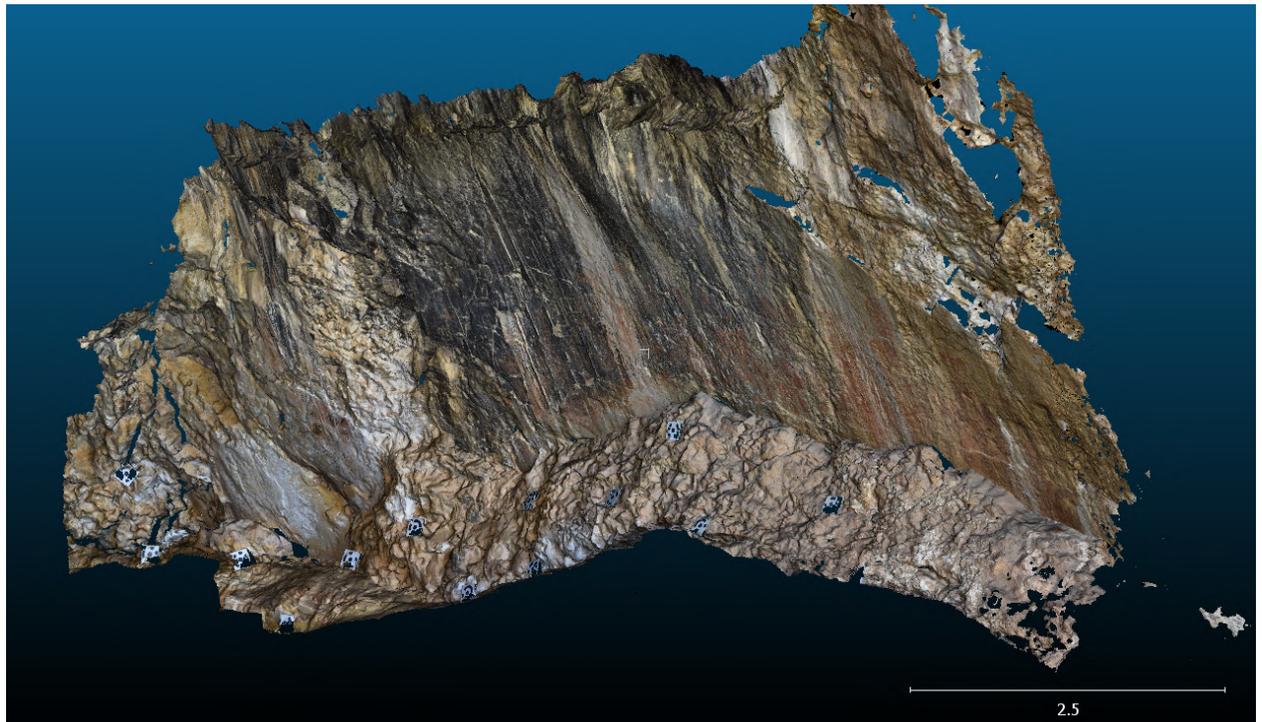
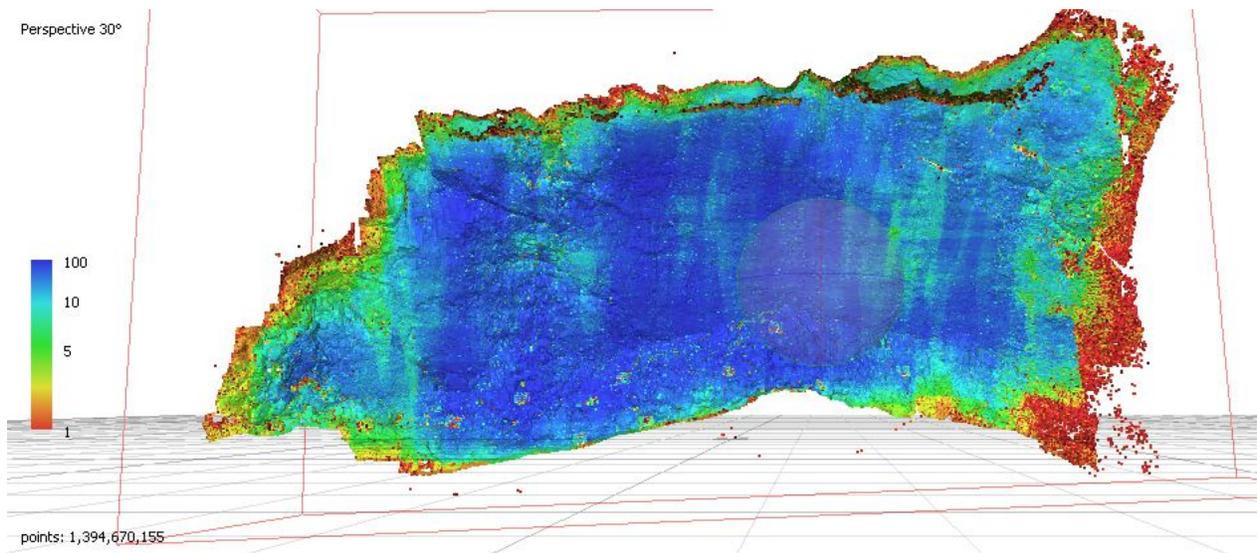


Figure 25 – Modèle 3D réalisé (version dégradée)



(a) Score de confiance du nuage de points



(b) Ellipses de confiance de la paroi ornée

Figure 26 – Produits qualitatifs associés

Table des figures

1	Peintures schématiques de l’abri Otello (a) et des Eissartènes (b)(c) (<i>source personnelle</i>)	9
2	Photo aérienne du site (SCHEMA)	12
3	Paroi Nord associée au relevé préliminaire des figures (Defrasne et al., 2023)	13
4	faux RGB ICA de nouvelles figures (a) et relevé graphique associé (b), superposition trouvée de deux figures initialement indissociable à l’oeil nu (c) (Defrasne et al., 2023)	14
5	Méthodologie mise en place pour la photogrammétrie	22
6	Modèle 3D Juin 2024	23
7	Score de confiance du nuage de points	25
8	Orthoimage et ellipses de confiances associées du modèle de Juin 2024 de la paroi ornée	25
9	Schéma explicatif du cube hyperspectral (Massé, 2010)	26
10	Exemples de l’hyperspectral pour l’agriculture (a), l’art (b) et les géosciences (c)	27
11	Schéma explicatif de l’acquisition (<i>Source : M. Giraud LPG</i>)	28
12	Extrait du plan de situation des cubes HSI basé sur le relevé de paroi initial (Figure 3)	31
13	Exemple des différences entre 4 bandes d’ICA (Ot31 bandes 4-5-7-8)	32
14	ICA issue d’un test d’assemblage manuel de deux cubes hyperspectraux	33
15	Projection polynomiale 3 dans Arcmap (3000 points utilisés)	36
16	Comparaison des méthodes de reprojection en fonction du nombre de points	36
17	Modèles de test (10 photos Nikon, 2 cubes VNIR) (a) et de l’orthorectification (b)	38
18	Orthoimage obtenue par le processus dans Metashape (a) et dans ENVI (b)	40
19	Schéma explicatif de l’acquisition bandes par bandes (Daguerre, 2023)	47
20	Illustration du protocole 9 zones (a), 1 zone (b) et mise en situation (c)	50
21	Protocole 9 zones	51
22	Protocole 1 zone	52
23	Diagramme de la chaîne de traitement pour la détection et l’export de points d’intérêt	53
24	Orthoimage de la paroi ornée	57
25	Modèle 3D réalisé (version dégradée)	58
26	Produits qualitatifs associés	59

Liste des tableaux

1	Erreur en position calculée du Disto S910	20
2	Extrait des abaques d’acquisitions calculées	21
3	Comparaison des Erreurs Moyennes Quadratiques entre modèles	24
4	Répartition du nombre de cubes acquis par campagne	29

Orthorectification d'images hyperspectrales pour l'étude de peintures schématiques du Néolithique.

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Paris 2024

RESUME

Les peintures pariétales du Néolithique sont étudiées de manière approfondie depuis leur découverte. Habituellement, les peintures figuratives font l'objet des recherches les plus nombreuses, mais de nouvelles approches cherchent à montrer l'apport des peintures schématiques pour la compréhension des sociétés du Néolithique. Ces peintures, souvent mal préservées et impliquées dans de nombreuses superpositions sont difficiles à étudier avec les technologies habituelles.

L'imagerie hyperspectrale, technologie de télédétection, s'est montrée après des tests novateurs, comme s'est révélée d'une aide inégalée dans l'étude et la compréhension des parois ornées (peintures et altérations). Elle permet notamment de révéler des peintures invisibles à l'oeil nu, mais aussi de démêler les superpositions. Cependant ces images ne sont pas justes géométriquement et ne permettent d'être utilisées pour la cartographie des peintures, étape pourtant indispensable en archéologie pariétale. Ce TFE avait donc pour objectif de résoudre cette difficulté afin de contribuer à la construction d'une méthodologie nouvelle et encore inédite.

Mots clés : Photogrammétrie, imagerie hyperspectrale, peinture, pariétale, Néolithique, orthorectification.

SUMMARY

Neolithic art is since its discovery, a widely studied subject. Figurative paintings are the main studied area, however some new ways are pursued in the form of the study of schematic art. Neolithic Schematic Art is believed to be an important source of information of Neolithic Societies. However this type of painting is difficult to analyze with current used technologies due to the numerous superpositions.

Hyperspectral imaging, a tele-detection technology, has been shown to be a really effective way to collect new informations. It allows to untangle figures and to reveal unvisibles ones. However, this images aren't correct geometrically and it doesn't allow to map this paintings. To answer this complex problem, my goal is to make a photogrammetric model of the painted wall and to create a methodology to orthorectify hyperspectral imaging using the existing model.

Key words : Photogrammetry, hyperspectral imaging, painting, parietal, Neolithic, orthorectification.