



HAL
open science

Spatialisation, fusion et enrichissement d'imagerie multimodale pour les Sciences du Patrimoine

Anthony Pamart

► **To cite this version:**

Anthony Pamart. Spatialisation, fusion et enrichissement d'imagerie multimodale pour les Sciences du Patrimoine. Sciences de l'ingénieur [physics]. HESAM Université, 2024. Français. NNT : 2024HESAE001 . tel-04766193

HAL Id: tel-04766193

<https://pastel.hal.science/tel-04766193v1>

Submitted on 4 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.

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR
Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Physiques Et Numériques (LISPEN)
Campus d'Aix-en-Provence

THÈSE

présentée par : **Anthony Pamart**

soutenue le : **16 janvier 2024**

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**

préparée à : **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

Spécialité : **Conception**

Spatialisation, Fusion et Enrichissement d'Imagerie Multimodale pour les Sciences du Patrimoine

THÈSE dirigée par :
[M. VERON Philippe]

et co-encadrée par :
[M. DE LUCA Livio]

Jury

M. Améziane AOUSSAT , Professeur, EA 3927 LCPI, Arts et Métiers	Président
M. Guillaume CARON , Maître de conférences, MIS, UPJV	Rapporteur
M. Florent LAROCHE , Maître de conférences, IPSI, École Centrale de Nantes	Rapporteur
Mme Sidonie CHRISTOPHE , Directrice de Recherche, LASTIG, U. G. Eiffel, IGN-ENSG	Examinatrice
M. Christian DEGRIGNY , Enseignant-chercheur, Conservation-restauration, H-ARC	Examineur
M. Philippe VERON , Professeur, EA 7515 LISPEN, Arts et Métiers	Examineur
M. Livio DE LUCA , Directeur de Recherche au CNRS, UPR 2002 MAP	Examineur

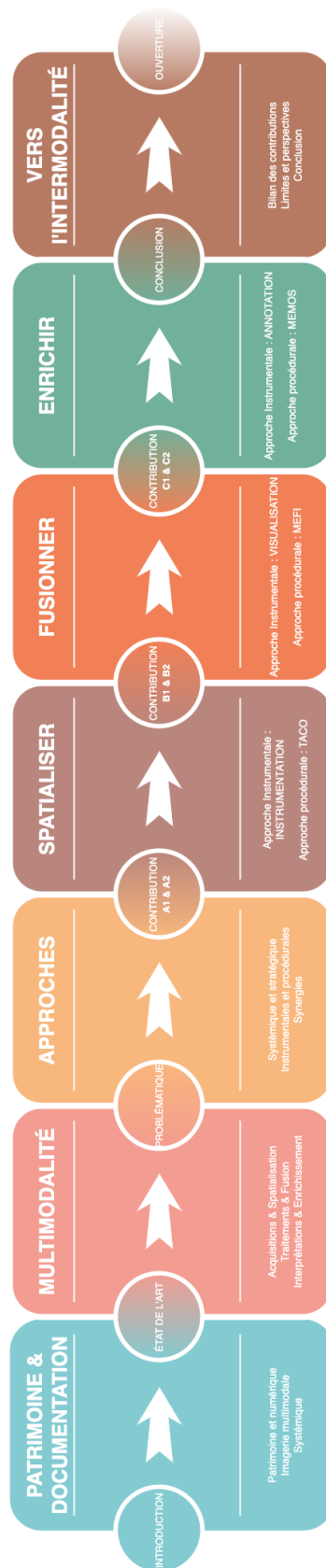


FIGURE 1 – Structure de la thèse

Table des matières

Remerciements	8
Résumé	9
Abstract	10
Notice de lecture	11
Chapitre I : Introduction	12
I Patrimoines numériques et multimodalité	12
Définition du sujet	12
1.1 Introduction générale et des composantes de l'étude	12
Contexte général	13
1.1.1 Patrimoines et numérique	13
Domaine d'application	15
1.1.2 L'imagerie en Sciences du Patrimoine	16
1.2 Première approche de la multimodalité	18
1.2.1 Étude de cas	18
1.2.2 Les multimodalités d'imagerie	19
1.3 Les pratiques de l'imagerie numérique patrimoniale à l'ère de la multimodalité	22
1.4 Méthodologie	23
1.4.1 Pensée systémique	25
1.4.2 Objectifs, apports et limites	25
1.4.3 Structure du document	28
Chapitre II/ État de l'art	30
II Revue des méthodes et pratiques actuelles en numérisation 2D/3D	30
2.1 Le prisme de la multimodalité	33
2.1.1 Historique	33

TABLE DES MATIÈRES

2.1.2	Étymologie et inscription disciplinaire	35
2.1.3	Définition proposée	36
2.2	Protocoles, instruments et outils d'acquisition et de spatialisation d'imagerie patrimoniale	38
2.2.1	Technologies de numérisation 2D/3D	39
2.2.2	Les protocoles d'acquisition	44
2.2.3	L'imagerie multimodale	46
2.2.4	Bilan des protocoles d'acquisition et de spatialisation	48
2.3	Procédures de traitement et de fusion données spatialisées	50
2.3.1	Les procédures de recalage de données	50
2.3.2	Les procédures photogrammétriques	57
2.3.3	Les procédures de fusion de données	60
2.3.4	Bilan des procédures de traitement et de fusion	70
2.4	Méthodes relatives à l'interprétation et à l'enrichissement de données patrimoniales	72
2.4.1	Méthodes relatives à l'Interprétation	73
2.4.2	Méthodes relatives à l'Enrichissement	83
2.4.3	Bilan des méthodes d'enrichissement	94
2.5	Bilan des protocoles, des procédures et des méthodes actuelles au regard des approches multimodales	95
Chapitre III/ Problématique		97
III Définition des approches pour des stratégies multimodales dédiées à l'imagerie patrimoniale		97
3.1	L'approche systémique	98
3.2	L'approche stratégique	100
3.3	Dualité des approches instrumentales et procédurales	103
3.3.1	Les approches instrumentales	103
3.3.2	Les approches procédurales	105
3.4	Mise en synergie des approches	107
3.4.1	Approches de spatialisation	107
3.4.2	Approches de fusion	108
3.4.3	Approches d'enrichissement	109
3.5	Spatialiser — Fusionner — Enrichir	111
3.5.1	Plan de travail et synthèse des contributions articulées	113

Chapitre IV : Contributions (première partie)	114
IV SPATIALISER	114
4.1 Définition des enjeux relatifs à la Spatialisation	114
4.2 Approche instrumentale de Spatialisation : Relevés et instrumentations	116
multimodales	116
Contribution A1	116
4.2.1 Premières expérimentations et approche empirique du relevé multi-	116
modal	118
4.2.2 Prototypage d'un dispositif instrumental multimodal	121
4.2.3 Retours sur expériences multimodales	125
4.3 Approche procédurale de Spatialisation : TACO	125
Contribution A2	125
4.3.1 Une procédure automatique, robuste et polyvalente pour le recalage	125
de la documentation photogrammétrique du Patrimoine Culturel	125
4.3.2 Contexte et cadre d'application	128
4.3.3 Examen de la littérature	130
4.3.4 Traitement Automatique de Calibration et d'Orientation d'images	140
4.3.5 Résultats et discussions	144
4.3.6 Vers des synergies logicielles	147
4.3.7 Conclusions et perspectives	148
4.4 Bilan des approches relatives à la Spatialisation	150
4.4.1 Bilan des contributions relatives à la spatialisation	152
Chapitre V : Contributions (seconde partie)	152
V FUSIONNER	152
5.1 Définition des enjeux relatifs à la Fusion	153
5.2 Approche instrumentale de Fusion : Spatially Oriented RTI	153
Contribution B1	161
5.3 Approche procédurale de Fusion : MEFI	161
Contribution B2	161
5.3.1 Vers un indice de fusion de données pour l'évaluation et l'amélioration	161
de la reconstruction multimodale 3D du patrimoine culturel	161
bâti	162
5.3.2 Cadre de l'expérimentation	162

TABLE DES MATIÈRES

5.3.3 Littérature associée et positionnement	165
5.3.4 Présentation du cas d'étude	170
5.3.5 Méthodologie	172
5.3.6 Résultats et discussions	180
5.3.7 Conclusions	187
5.4 Bilan des approches relatives à la fusion	189
5.4.1 Bilan des contributions relatives à la Fusion	190
Chapitre VI : Contributions (troisième partie)	192
VIENRICHIR	192
6.1 Définition des enjeux relatifs à l'Enrichissement	192
6.2 Approche instrumentale d'Enrichissement : Expérience SUMUM	194
Contribution C1 : AIOLI - SUMUM	194
6.2.1 Contexte du projet SUMUM et son corpus	194
6.2.2 Processus d'annotations d'imagerie multimodales	198
6.2.3 Des représentations numériques à haute valeur sémantique	200
6.3 Approche procédurale d'Enrichissement : MEMoS	202
Contribution C2 : MEMoS	202
6.3.1 Un système d'enrichissement des métadonnées pour la documentation des relevés par imagerie numérique multimodale	202
6.3.2 Contextualisation de l'approche	203
6.3.3 Littérature croisée et revue des progiciels	204
6.3.4 La multimodalité dans les études du patrimoine culturel numérique	209
6.3.5 MEMoS, un système de documentation multimodale avec des métadonnées enrichies	209
6.3.6 Limites et perspectives	221
6.3.7 Bilan de l'expérience MEMoS	224
6.4 Bilan des approches relatives à l'Enrichissement	225
6.4.1 Bilan des contributions relatives à l'Enrichissement	226
VII Conclusion	230
7.1 Bilan des apports	230
7.2 Bilan des contributions	232
7.3 Limites et perspectives	234
7.4 Conclusion et ouverture	238

TABLE DES MATIÈRES

Bibliographie	246
Liste des publications	247
Références	249
Table des illustrations	281
Annexes	286
A Spatialisation	287
Code source TACO	287
Code source MS2AIOLI	287
B Fusion	288
Formule de MEFI	288
Pseudocode de MEFI	292
C Enrichissement	294
Scènes 2D/3D enrichies (AIOLI → SPRITZ)	294
Revue des progiciels	296
Modèle de description MEMoS en JSON	300
D Soutenance	303
Enregistrement vidéo	303
Support de présentation	303

À Pauline et Maria ♡

REMERCIEMENTS

*À toi qui lis ces quelques lignes, pensant y figurer quelque part.
Si tu y penses, c'est sans doute le cas.
Alors évidemment, je t'adresse mes infinis remerciements ;)*

AP

RÉSUMÉ

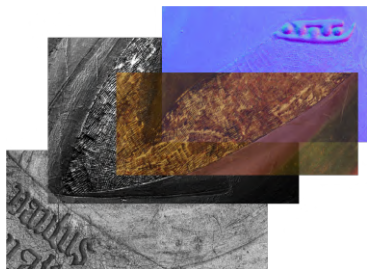


FIGURE 2 – Fusion d'imagerie scientifique

Le Patrimoine Culturel est un objet d'étude protéiforme, désormais au centre d'enjeux documentaires interdisciplinaires, dont les procédures et les technologies numériques jouent un rôle prépondérant. Le Patrimoine Numérique s'installe comme une notion en effervescence, située à l'intersection de nombreux domaines de connaissances. Les techniques d'imagerie mobilisées dans les Sciences du Patrimoine pour relever, documenter et examiner les objets patrimoniaux offrent de nombreuses perspectives

d'investigation afin d'améliorer les connaissances partagées autour d'un objet d'étude devenu hybride, à l'interface entre le Réel et le Virtuel. Pour autant, à l'heure où ce savoir-faire numérique se développe, l'ensemble des méthodes et des outils mobilisés se heurtent au défi de la multimodalité. Cette problématique, au cœur de cette thèse, se reflète par la nécessité croissante de mettre en coopération une variété de ressources numériques (provenant d'une multiplicité de capteurs, d'échelles d'observations, de couches spectrales ou temporelles) dans l'objectif de permettre une croisée des regards et des expertises. Ce travail recherche propose d'appréhender les flux de numérisation 2D et 3D par une approche systémique visant à consolider le continuum informationnel reliant les données instrumentales capturées *in-situ* aux connaissances qu'il est possible d'en extraire. Ce travail de recherche explore différentes stratégies pour faire fructifier la richesse et la diversité des scénarios multimodaux. Les contributions principales se développent autour d'une relecture de la triade Acquisition – Traitement – Interprétation, en la mettant en interaction avec des thématiques telles que la Spatialisation, la Fusion et l'Enrichissement des données. Différentes approches sont proposées afin de mieux articuler les phases d'instrumentales, computationnelles et analytiques permettant d'augmenter le potentiel informatif des modélisations 2D/3D multimodales. Les pistes explorées sont appuyées par une série de travaux et d'expérimentations faisant émerger des synergies possibles pour explorer la corrélation de données spatio-temporelles sémantiquement enrichies basées sur des numérisations multimodales.

ABSTRACT

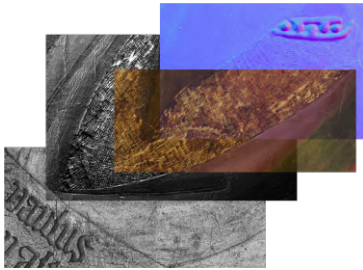


FIGURE 2 – Scientific imaging fusion

Digital heritage is becoming an effervescent concept at the crossroads of many disciplinary fields. By extension, the multi-faceted Cultural heritage asset, as an object of study, is at the center of interdisciplinary studies, essentially from digital-born documentation procedures and technologies where real-based modeling or sensing is a key feature. As a matter of fact, the imaging tools and 2D/3D digitization technologies mobilized today to survey,

document and study heritage artifacts offer many perspectives and investigation paths to improve the shared knowledge around a heritage object. However, while the need for digital knowledge and expertise is developing in kind as well as in number, the also variable methods mobilized are facing the challenge of multimodality. As a core notion of this dissertation, the multimodality is understood and justified by the overgrowing need to gather and interlink various digital resources (including multiple sensors, scales of observation, spectral or temporal layers) in order to allow a crossing of views and expertise. This work is inspired by a systemic approach where the mechanisms and the data stream, from the raw instrumental data captured in situ to the knowledge extraction and its representation are explored by re-usable strategies exploiting the richness of the multimodal scenarios. Starting from a critical review of the acquisition-processing-interpretation sequence, this PhD develops innovative ways to improve key steps such as data fusion and data provenance. A global strategy is proposed to better articulate the instrumental, computational and analytical phases toward the construction of a heritage digital twin. This research work is structured by three contributions offering at different crucial intersections of the system, so-called strategic actions, to increase the informative potential of 2D/3D multimodal modeling. The tracks explored are substantiated by a series of works and experiments that point to possible synergies for exploring the correlation of semantically enriched spatiotemporal data based on multimodal digitization.

NOTICE DE LECTURE

Initialement, cette thèse devait être présentée sous le format particulier d'une thèse sur article. Cette formule n'a finalement pas été retenue pour diverses raisons, mais il n'en reste pas moins que le travail de recherche restitué dans ce tapuscrit a été conduit et structuré sur base d'une sélection de publications scientifiques. Il semblait important d'apporter cet élément à la connaissance du lecteur en amont. Plus particulièrement pour justifier les deux points suivants.

Sur la forme, la structuration en trois chapitres de développement est une conséquence de cette formule dans laquelle la thèse devait être composée a minima de trois articles publiés ou acceptés en revue internationale. Le présent document a conservé cette organisation générale mais aussi la nécessité d'articuler les contributions en s'appuyant sur d'autres travaux ou expériences complémentaires pour établir des liaisons cohérentes entre les parties. Il a été choisi d'amorcer chacun de ces chapitres à l'aide d'expériences publiées dans des conférences internationales avec actes et comités de lecture.

Sur le fond, cela implique qu'une partie du contenu de cette thèse est repris directement de ces publications. Les amorces des chapitres [IV](#), [V](#) et [VI](#) sont constituées d'une synthèse d'articles, permettant d'articuler avec les thématiques en question, de souligner les points saillants utiles au développement et à la construction du discours. Par conséquent, ces sections [4.2](#), [5.2](#) et [6.2](#), sont du contenu original bien qu'elles se basent sur des travaux déjà publiés. Au contraire, les contributions principales [4.3](#), [5.3](#), et [6.3](#), sont des extraits¹ néanmoins traduits des articles auxquels ils font référence. Cela est rendu explicite par une mise en italique du rappel de section dans l'entête de chaque page. Des modifications mineures ont été parfois nécessaire, pour aligner la terminologie ou mettre en phase certaines partie du discours². Malgré tout, des différences rédactionnelles demeurent qu'il a été choisi de conserver et d'assumer. Cela appelle surtout à certaines mesures concernant l'éthique de la recherche et l'intégrité scientifique. Ainsi, conformément aux préconisations du comité éthique du CNRS dans sa circulaire de juillet 2018³ des mentions explicites prévenant l'autoplagiat ont été intégrées au document.

Un plan structuré des contributions est repris en fin de chapitre [3.5.1](#)(p.[113](#)).

1. Quelques troncatures ont été nécessaires pour éviter les redondances ou digression non utiles à la réflexion de cette thèse. Elles sont systématiquement mentionnées par la convention typographique [...].

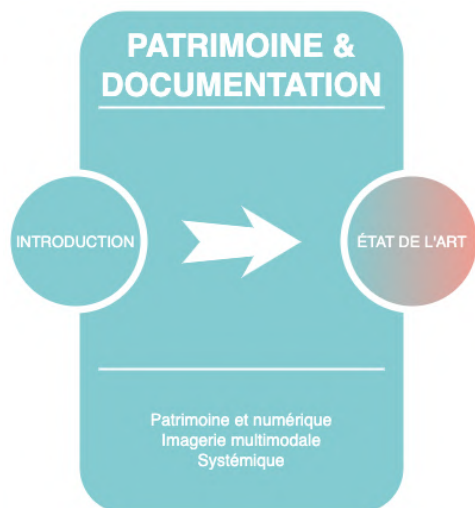
2. Celles-ci sont aussi systématiquement renseignées par une note de bas de page.

3. CNRS. (2018, juillet). Intégrité Scientifique au CNRS : Vers un dispositif pérenne de promotion des valeurs de l'intégrité scientifique au CNRS, et de traitement des allégations de manquement à l'intégrité. Consulté le 30 mai 2023, à l'adresse <https://comite-ethique.cnrs.fr>

Chapitre I

Patrimoines numériques et multimodalité

1.1 INTRODUCTION GÉNÉRALE ET DES COMPOSANTES DE L'ÉTUDE



Les techniques de numérisation 3D connaissent depuis quelques décennies un essor soutenu et continu dans le domaine d'application des Sciences, notamment celles dont les études se portent sur le Patrimoine. Les techniques de relevés numériques 2D ou 3D (lasergrammétrie, photogrammétrie ou autre imagerie scientifique), permettant de collecter les propriétés géométriques et colorimétriques, sont au cœur des développements de nouvelles méthodologies visant à améliorer ou renouveler les supports d'études et outils d'analyse du patrimoine matériel.

Ce panel de techniques d'imagerie est à compléter avec le recours à d'autres types d'outils, d'instruments ou de méthodes, permettant d'approfondir les observations et les analyses, par exemple celles menant à la caractérisation physico-chimique des matériaux, l'identification de leurs mécanismes de dégradation et leur datation. Cela induit l'élabora-

tion de protocoles à la fois complexes et variés comme premier prérequis. Pour autant, ces modes opératoires doivent être protéiformes afin de les adapter à la diversité des objets patrimoniaux, mais aussi aux conditions et aux contextes de leur mise en œuvre. Un regard critique semble aujourd'hui nécessaire dans l'objectif d'orienter et d'augmenter le potentiel analytique de la numérisation et de l'imagerie, à la recherche d'un équilibre entre performance et durabilité. Emportée par une dynamique relative à l'évolution rapide des technologies que le Patrimoine Numérique mobilise, la technicité de ce champ de recherche s'est accrue et continue de s'accroître. Une investigation certes technique, mais surtout méthodologique, des modalités par lesquelles nous exploitons l'imagerie semble aujourd'hui judicieuse et nécessaire pour faire émerger et structurer quelques scénarios reliant des phénomènes observables aux multiples ressources qui ont permis leurs observations. Le travail restitué dans cette thèse de doctorat s'inscrit plus largement dans l'objectif de construction et de consolidation du *continuum numérique* esquissé cette dernière décennie par la communauté internationale des scientifiques du patrimoine.

L'ensemble de ces données, ces modèles, représentations ou analyses numériques qui en résultent sont à l'image des flux de recherches interdisciplinaires dont ils émanent, c'est-à-dire complexes et à géométrie variable. Ce que l'on nomme Patrimoine Numérique (PN) et qui sera défini ultérieurement est le fruit d'un domaine sociotechnique à l'intersection de l'Histoire et de l'Informatique. Cette rencontre disciplinaire teinte le caractère hybride de cette étude. L'objectif de ces premières pages sera de cerner la particularité des composantes du sujet en introduisant les principales clés de lecture de la réflexion menée dans le cadre de cette thèse.

1.1.1 Patrimoines et numérique

Le concept de Patrimoine peut avoir de nombreuses définitions qu'il convient dès à présent de délimiter, avec une première précision. L'objet d'étude est le Patrimoine Culturel (PC) — et essentiellement matériel — or celui-ci peut être accepté de différentes façons¹.

1. « Premièrement, le "patrimoine culturel" en tant que référence à l'héritage culturel abstrait d'un territoire politique ou de l'humanité en général. Deuxièmement, le "patrimoine culturel" en tant que catégorie concrète de biens culturels tangibles (comme "propriété" et "objet"). Troisièmement, le "patrimoine culturel" en tant que catégorie concrète capable de combiner toutes les valeurs culturelles, des biens culturels matériels aux biens culturels immatériels ». [\[Ferrazzi, 2021\]](#) (p.765)

1.1.1.1 L'objet et le fait patrimonial

Sa particularité réside tout d'abord dans son caractère à la fois singulier et pluriel, caractérisé à la fois par la richesse et la diversité de chacun des objets, par définition uniques, qui le composent. À l'instar des scientifiques du patrimoine, il servira d'objet de focalisation, capable de concentrer les regards comme les analyses. Cette recherche s'éloignera cependant de toutes considérations sur la « valeur universelle exceptionnelle » des biens patrimoniaux et de l'impact des apports technologiques sur le processus de patrimonialisation abordés par d'autres travaux [Zunjic, 2017, Jeanson, 2020]. Malgré les positions franches de Françoise Choay [Guillaume, 2011]², on s'appuiera plutôt sur la thèse développée dans « L'allégorie du patrimoine ». Celle-ci définit notre rapport au Monument Historique, et plus largement du Patrimoine, comme est une notion vivante, influencée par de grandes thématiques et des idéologies sociétales voir politiques. De nos jours, le fait de s'intéresser, et dans le contexte présent d'étudier, un élément du passé renforce autant sa valeur cognitive (connaissance et signification mémorielle) qu'artistique (affect, sensibilité esthétique de celui qui le regarde). Cela revient à accepter, l'existence d'un *fait patrimonial*³, dans lequel l'objet patrimonial né de l'intérêt qu'on lui porte.

1.1.1.2 L'Objet Patrimonial Numérique

L'intérêt de cette étude se porte principalement sur la capacité de l'Objet Culturel ou de l'Objet Patrimonial⁴ à muter en tant qu'objet de recherche⁵. Il convient ensuite d'étendre le regard et la réflexion sur celle du Patrimoine Numérique (PN). Les liens entre numérique et patrimoine peuvent aussi englober différentes compréhensions. La fabrique du PN telle qu'abordée dans [Musiani and Schafer, 2016] qui émerge d'un contexte sociotechnique serait en quelque sorte une mise en abyme du sujet. En effet, le PN dont il est question est relatif à un objet patrimonial numérisé ou représenté sous une forme

2. Qui pourrait faire une critique acerbe des Sciences du Patrimoine, en vertu de son regard les pouvoirs politiques et institutionnels, de sa position sur la restauration ou des dérives de l'hégémonie ce qu'elle nomme l'« électro-télématique ».

3. Jadé, M. (2011). Définition du fait patrimonial. Carnet de recherche Hypothèses : Le fait patrimonial. Consulté le 16 octobre 2023, à l'adresse : <https://faitpat.hypotheses.org/articles/702-2>

4. « Le terme *objet* ne suggère aucun lien avec le droit de la propriété. En outre, il n'y a même pas de référence cachée au principe de la tutelle *aut similia* (sic). Il s'agit en fin de compte de la terminologie la plus neutre dans le domaine juridique. Son utilisation est donc en soi incontestée ». Traduit depuis [Ferrazzi, 2021] (p.765)

5. « Cette définition ouvre la voie à la reconnaissance de l'importance historique et scientifique des biens culturels et de leur rôle comme source d'information et objet de recherche scientifique ». [Francioni, 2007] (p.239)

digitale et non un objet numérique quelconque pouvant avoir une valeur patrimoniale⁶. D'après [Albuerne et al., 2018], il est aussi possible de les discerner en faisant référence soit aux données en tant que patrimoine (*Data as Heritage*) ou alors aux données à propos du patrimoine (*Data about Heritage*). Cette étude porte sur les deux tant qu'elle concerne un objet patrimonial, sans pour autant établie de distinction entre celles issues d'une numérisation et celles provenant d'un patrimoine nativement numérique⁷.

L'objet de cette recherche sera donc celui de l'Objet Patrimonial Numérique (OPN) naissant des nombreuses interrelations entre la composante patrimoniale et celle numérique. Ce dernier peut être auréolé d'un caractère complexe et variable. Cette thèse explore au fil des développements, non seulement la multiplicité des formes de l'OPN mais aussi leur coexistence, leur mises en dialogue et leur enrichissement mutuel.

1.1.1.3 Objet Patrimonial Augmenté VS Double Numérique

La promiscuité entre l'OPN et la numérisation du patrimoine impose de se pencher sur le cas des jumeaux, doubles ou parfois clones dits numériques. Ce concept n'apparaît pas suffisamment consensuel,⁸ y compris dans le domaine d'application ciblé, pour être placé au cœur de cette étude. Par exemple, il pourrait s'assimiler à l'Objet Patrimonial Augmenté poursuivi dans le cadre du projet Equipex ESPADON sous l'égide de la Fondation des Sciences du Patrimoine (FSP) tout comme au paradigme H-BIM⁹ pour les cas d'études architecturaux. Cependant, il paraît évident que ce travail interroge des éléments qui leur sont fondamentaux. À l'instar de bien d'autres domaines [Jones et al., 2020, VanDerHorn and Mahadevan, 2021, Charrier et al., 2023], la sphère patrimoniale se saisit, sans encore s'accorder sur une acception partagée, d'un Double Numérique Patrimonial [De Luca and Lievaux, 2023, Niccolucci et al., 2023]. Cette étude sera quant à elle circonscrite à des représentations numériques issues de modélisations multimodales du réel. Des notions telles que la *complétude* et la dimension *chronique* des données et des informations seront développées en filigrane en tant que conditions pour construire et enrichir un modèle numérique patrimonial.

6. p. Ex. l'initiative [SoftwareHeritage].

7. « Le patrimoine né numérique (ou nativement numérique) évoqué précédemment, et que les Anglo-Saxons appellent le *Born Digital Heritage*, a fait l'objet d'une plus faible attention de la part des chercheurs que le patrimoine converti sous forme numérique ». (Id. p.5)

8. « De nombreuses définitions dans la littérature combinent une définition avec des caractérisations spécifiques des jumeaux numériques qui sont propres au(x) cas d'utilisation qu'elles décrivent ». Traduit depuis [VanDerHorn and Mahadevan, 2021]

9. cf. Liste des acronymes p. 243.

1.1.2 L'imagerie en Sciences du Patrimoine

Ce travail naît de l'observation d'un objet de recherche hybride entre Patrimoine et Numérique. Les observations seront menées par le biais de processus digitaux qui en renforcent la composante numérique. Avant d'introduire ci-après le rôle de l'imagerie et de la numérisation, il convient d'introduire le contexte général de leurs applications patrimoniales.

1.1.2.1 Science-s du Patrimoine

Le domaine d'application ciblé est celui des « Sciences du Patrimoine » (SP) quoique cette expression ne possède pas encore de définition définitive malgré sa formalisation datant de 2006^[10]. On rassemble sous cette dénomination les disciplines scientifiques dont l'objet d'étude comprend un « fait » patrimonial (culturel ou naturel), tel qu'introduit précédemment, sans distinction de ses aspects tangibles ou intangibles. Il s'agit selon l'ICCROM d'un « terme générique qui englobe toutes les formes de recherche scientifique sur les œuvres humaines, et les œuvres combinées de la nature et des humains, qui ont une valeur pour les personnes »^[11]. Les SP ont pour principal objectif d'« améliorer la compréhension, l'entretien, l'utilisation durable et la gestion du patrimoine matériel et immatériel » (ibid.). Elles s'appuient, toujours selon la même source, sur diverses disciplines des Sciences Humaines et Sociales (SHS) et des Sciences pour l'Ingénieur. Il s'agit d'un secteur émergent de recherche tant fondamentale qu'appliquée, par ailleurs souvent mis en relation avec les Sciences de la Conservation et de la Restauration, les Sciences Archéologiques ou encore les Humanités Numériques. Les études en SP incluent naturellement celles du Patrimoine Numérique, dont une représentation multi-domaines est proposée (cf. Fig. I.1). Ses formes plurielles et singulières sont acceptées et utilisées, sans distinction, tant qu'elles correspondent à la définition suivante :

La Science du Patrimoine est l'étude de l'interprétation et de la gestion des preuves matérielles de l'humanité.^a

a. Adapté depuis [Strlič, 2018](#) (p.7260)

10. <https://www.e-rihs.eu/prof-strlic-introduces-heritage-science-means/>

11. Source : ICCROM. (2023). Sciences du Patrimoine : Les Sciences du Patrimoine visent l'avenir. Consulté le 20 juin 2023, à l'adresse : <https://page.hn/a47oov>

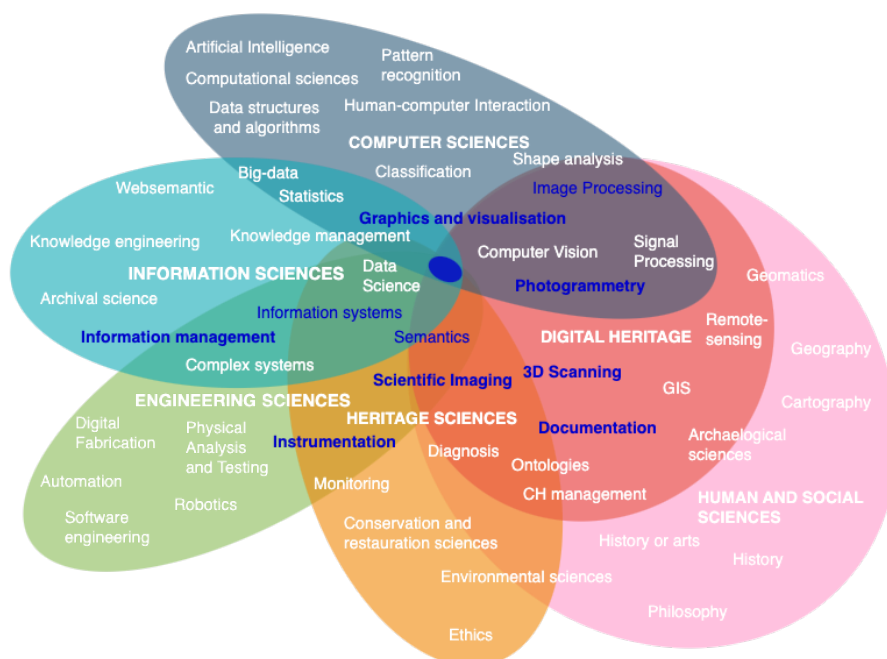


FIGURE I.1 – Représentation schématique des Sciences du Patrimoine au sein des domaines scientifiques et des champs disciplinaires associés (en bleu, la position de cette étude et ses principales thématiques).

1.1.2.2 L'imagerie scientifique appliquée au patrimoine

Pour continuer de préciser le contexte de cette étude, il faut interroger le rôle de l'imagerie pour les SP, et plus encore précisément celles issues des techniques dites de numérisation 2D/3D. L'imagerie dite scientifique réunit deux grandes familles, l'image photographique et l'imagerie¹² qui se rassemblent de nos jours, sur le fait de générer une documentation nativement numérique. Malgré l'intérêt de la question et par esprit de synthèse, la photographie scientifique ne sera pas détaillée¹³, ni d'un point de vue technique (id.), ni sémiotique [Dondero, 2010]. Cela conduit à la notion d'imagerie multimodale utilisée dans de nombreux domaines tels que la médecine, l'astronomie, ou la télédétection : c'est-à-dire, celle obtenue par l'usage conjoint ou la fusion de différentes modalités d'imagerie et qui sera au cœur de cette recherche. Pour autant, il est possible que ce concept de *multimodalité*, en se combinant avec les aspects multidisciplinaires du domaine d'application sélectionné, dépasse le simple spectre de l'imagerie. Celui-ci fera l'objet de la troisième et dernière composante nécessaire à l'introduction du contexte de cette étude.

12. Lissalde, C. (2001). L'image scientifique : Définitions, enjeux et questions (Bulletin des bibliothèques de France, Éd.). Consulté le 20 juin 2023, à l'adresse : <https://bbf.enssib.fr/consulter/bbf-2001-05-0026-003>

13. « Sont a priori scientifiques des photos prises ou dirigées par un scientifique ». (id. p.27).

1.2 PREMIÈRE APPROCHE DE LA MULTIMODALITÉ

1.2.1 Étude de cas

La multimodalité sera introduite en prenant appui sur un exemple concret. L'illustration ci-dessous (cf. Fig. [I.2](#)) est issue d'une opération menée avec le Centre Interdisciplinaire de Conservation et de Restauration de Marseille. Le CICRP accueillait au moment de l'expérience cette peinture sur bois représentant une scène de crucifixion pour des travaux de restauration. À l'instar d'autres retables de la même période (1512) et du même artiste (Ludovico Brea), son support comme sa couche picturale sont sujets à diverses altérations. Deux sont retenues car utiles au propos à la mise en exergue : des détachements de la couche picturale et des microdéformations de sa structure en bois. En parallèle aux interventions des restaurateurs, une campagne d'imagerie a été conduite pour documenter son état de conservation. Cette documentation avait un second enjeu sous-jacent, celui de l'investigation des mécanismes de dégradation observables par le biais de l'imagerie. L'expérimentation consistait donc à appliquer et à mettre en cohérence des modalités d'imagerie permettant de qualifier ou de quantifier les altérations et de suivre leur évolution. On distingue pour cet exemple trois les sous-ensembles suivants :

- **En rouge**, un relevé orthophotogrammétrique multispectral dans le domaine du visible et de l'infrarouge sur une zone déterminée comme sensible.
- **En bleu**, des points de vue macro sur des altérations constatées et soulignées par l'usage d'imagerie de réflectance (RTI).
- **En vert**, un relevé photogrammétrique convergeant en lumière directe pour reconstruire la géométrie de l'œuvre.

Cette expérience a impliqué la mise en coopération de plusieurs experts faisant des choix techniques sur l'usage de différents capteurs utilisés pour relever des phénomènes à diverses échelles et bandes spectrales (cf. Tableau [I.1](#)). Chacun des sous-ensembles d'imagerie est dédié à la mise en relief d'un phénomène et la spatialisation des images qui les composent permet de les rassembler au sein d'un espace d'observation commun. Cet exemple est représentatif des scénarios mettant en œuvre des approches d'imagerie multimodales telles qu'étudiées dans cette thèse. Dès lors, il est possible de considérer qu'une modalité d'imagerie (c.-à-d. chaque ligne du Tableau [I.1](#)) se compose de différents facteurs qui sont détaillés ci-après.

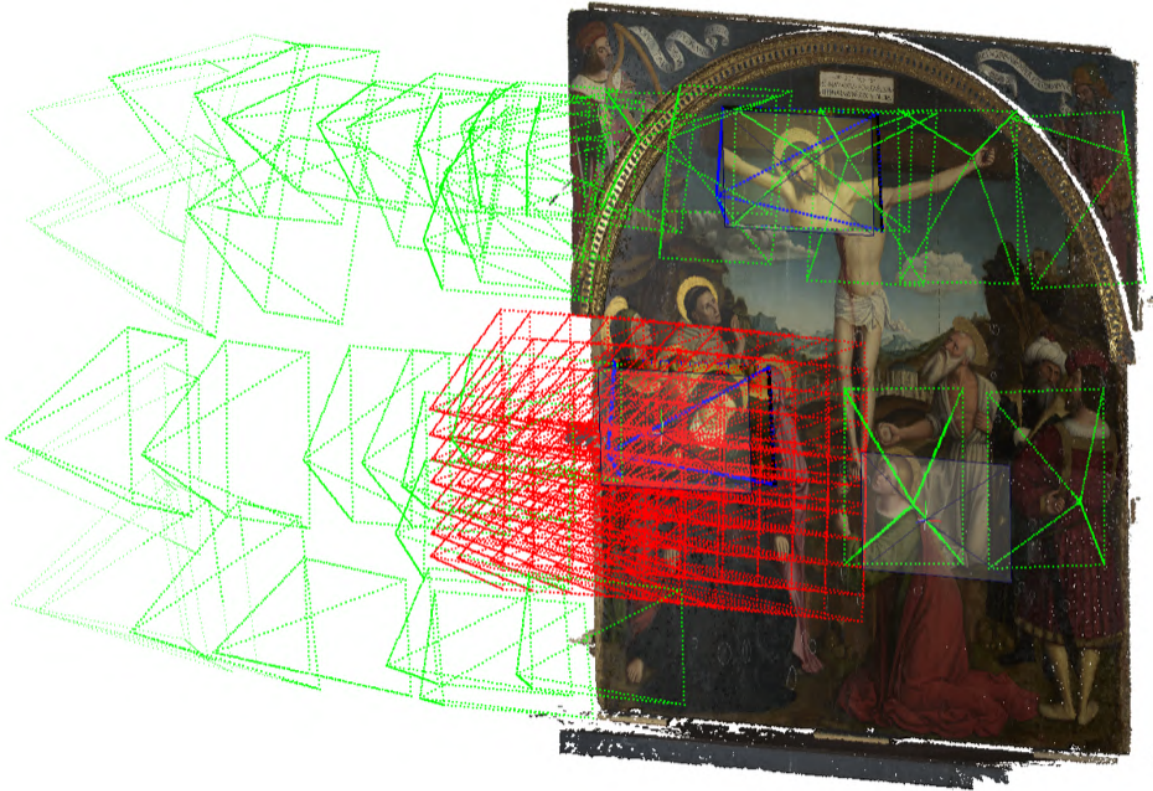


FIGURE I.2 – Exemple d’approche d’imagerie multimodale en Science du Patrimoine.

Modalité imagerie	Technique	Protocole	Nb. capteur	Couche spectrale	Résolution spatiale ^(mm)	Positions capteur	Nb. images	Experts
Vert	PTG	Convergent	1	VIS	$\pm a$	i	i	AP+OG+EH
Rouge	PTG	Ortho	2	VIS IR	$0.b$	j	$2*j$	AP+OG+EH+NB
Bleu	RTI	Multi-vue	1	VIS	Var	k	$k*64$	AP+NB
Synthèse	2	3	4	2	Var	$i + j + k$	Tot	4

TABLE I.1 – Détails et synthèse des modalités d’imagerie mis en œuvre dans la Fig. I.2

1.2.2 Les multimodalités d’imagerie

Une majorité de travaux et pratiques actuelles mobilisent la *multimodalité* souvent sans avoir besoin de la nommer ni de la définir. Elle est tacitement acceptée dans les domaines ayant recours à diverses techniques d’imagerie (Sciences du Patrimoine incluses), comme la pluralité ou la combinaison des modalités de mesure ou d’observation basées sur différentes sources d’images. Les approches multimodales sont identifiables par la variation accumulée ou simultanée de ces différents facteurs que l’on peut approfondir comme tels :

- **L’aspect multi-capteur** consiste à la mobilisation lors d’une campagne d’imagerie de différents types de capteurs, qu’ils soient actifs (laser), passifs (photo) ou hybrides. Au-delà des différences technologiques permettant la captation des données, cela implique aussi une variabilité de résolution, de précision ou d’incertitude et pouvant faire varier le format et l’encodage informatique des données en termes de volume et de complexité. Les sciences patrimoniales faisant appel à de nombreuses techniques, ces données brutes sont généralement éparses et hétérogènes.
- **L’aspect multi-scalaire** consiste non seulement à la gestion des différences dimensionnelles propres à la résolution native des capteurs ou des modalités d’acquisitions, mais aussi aux échelles de représentation ou d’observation permises par chaque technique d’acquisition. Les applications patrimoniales imposent une variabilité plus généralement entre le millimètre et le mètre, qualifiée ainsi de mésoscopique (c’est-à-dire dans le domaine des phénomènes observables sans instrument). Dans certains cas, les applications peuvent s’étendre vers des échelles microscopiques (jusqu’au nanomètre) ou macroscopiques (au-delà du kilomètre).
- **L’aspect multi-spectral** consiste à l’intégration de données radiométriques capturées au-delà des longueurs d’onde du domaine visible. Il permet la considération de phénomènes dans un contexte multispectral (tranches discontinues du spectre électromagnétique) ou hyperspectral (continuité dimensionnelle sur une plage d’ondulations). L’imagerie scientifique dans son application patrimoniale s’installe entre les domaines proches du visible (UV-A jusqu’à IR-A) pour les techniques basées sur la photographie, mais peuvent s’étendre pour certaines technologies, de la radiographie sous rayons X jusqu’à la spectroscopie térahertz.
- **L’aspect multi-temporel** est relatif à la prise en compte des différentes temporalités du flux de production de données permettant, par répétition, par complétion ou par consolidation pour garantir le suivi des altérations et des dégradations des zones relevées. Certains domaines géospatiaux (dont la télédétection, l’astrophysique) préfèrent la dénomination « multi-époque » pour qualifier les observations et les études longitudinales. L’analyse diachronique des couches temporelles varie en fonction de l’objet patrimonial, soumis à un vieillissement naturel ou artificiel, dont la ligne temporelle et la granularité nécessitent la gestion de données et ressources passées, contemporaines ou futures.

1.2. PREMIÈRE APPROCHE DE LA MULTIMODALITÉ

Ces aspects découlent de considérations techniques et matérielles faisant que ces approches sont parfois regroupées sur l'appellation de structures multi-couches, multi-calques ou encore multi-facettes. En outre, l'interdisciplinarité des SP impose la prise en considération d'un facteur contextuel supplémentaire :

- **L'aspect multi-acteur** résulte de pratiques multi-disciplinaires et consiste à la prise en compte de la nature intrinsèquement collaborative des études menées sur un objet patrimonial. *A fortiori* lorsque celles-ci mobilisent des supports, des outils ou des technologies numériques. Cet aspect induit le dialogue et la mise en synergie de connaissances et de compétences provenant parfois de disciplines éloignées, tant sur le plan technique, méthodologique que terminologique. Il offre l'opportunité de rassembler les savoirs, les expertises et les observations, sur un objet isolé ou issu d'une collection.

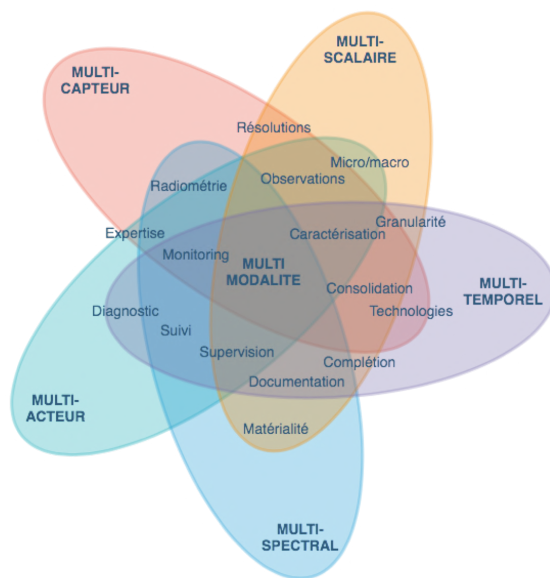


FIGURE I.3 – Diagramme de la multimodalité dans le patrimoine culturel.

approche « empirique » de la multimodalité, est complétée et approfondie infra (cf. section 2.1 p.33) afin de mieux cerner cette notion et proposer une acception élargie pour les études patrimoniales.

Cependant, il est important d'entrevoir ces différents facteurs de la multimodalité au-delà de leurs considérations purement techniques en les envisageant plus largement à l'échelle de la construction de l'OPN. D'autres cas concrets montrent qu'une couche multimodale n'est restreinte à la phase d'acquisition de données, mais peut très bien intervenir ou être mobilisée à d'autres étapes. En effet, une acquisition instrumentale peut avoir un caractère multi-temporel, tout comme un traitement peut nécessiter un recalage multispectral au même titre qu'une annotation peut permettre une observation multi-scalaire, le tout étant intégré dans un scénario collaboratif donc multi-acteur. Cette première

1.3 LES PRATIQUES DE L'IMAGERIE NUMÉRIQUE PATRIMONIALE À L'ÈRE DE LA MULTIMODALITÉ

Après avoir défini les composantes de cette thèse et interrogé certaines de leurs relations, il convient de se pencher sur celles entretenues par le numérique et la multimodalité. L'usage des technologies de relevé numérique en contexte patrimonial s'appuie sur une chaîne opératoire bien établie par le biais d'une séquence ordonnée en trois thématiques majeures : **l'acquisition, le traitement, et l'interprétation**.

Les pratiques de la numérisation 2D ou 3D demeurent des processus fonctionnant dans un flux informatique conventionnel d'*entrée et sortie*, globalement linéaire ou séquentiel. L'introduction de la multimodalité n'est pas sans impact sur la chaîne opératoire — allant de la collecte à l'archivage — ainsi que sur l'ensemble des étapes qu'elle contient. Ceci impose en premier un regard sur la méthodologie qui la sous-tend et induit que l'on se penche sur sa redéfinition. En effet, l'accroissement et la diversification des pratiques multimodales de l'imagerie, fait poindre un défi majeur relatif aux limites de nos capacités à gérer, interpréter et donc rendre utile une volumétrie de données hétérogènes dont la croissance sera certainement exponentielle. Les pratiques actuelles desquelles émergent tout Objet Patrimonial Numérique proviennent de l'imbrication des processus techniques et humains [Musiani and Schafer, 2016]¹⁴. La question à se poser est la suivante :

Nos pratiques et approches actuelles s'orientent-elles vers une fabrique des ressources stable et organisée ou ressemblent-elles plus à un « vrac numérique^a » ?

a. [Chabin, 2020] (sic p.152).

Il appartient à chacun de positionner ses travaux sur ce curseur et de ce qu'il induit vis-à-vis de leur portée. Cette étude estime que certaines lacunes subsistent et qu'une marge de progression existe pour consolider nos approches. L'objectif poursuivi sera la mise en place d'approches stratégiques synthétisées par une chaîne opératoire idéale (cf. Fig. I.4) proposant une décomposition multimodale (explicitée infra). Celle-ci fait apparaître une stratification permettant de renforcer le continuum informationnel nécessaire à la documentation numérique du patrimoine comme à la documentation du patrimoine numérique. Cette restructuration permet de redéfinir — d'un point de vue méthodologique — la chaîne opératoire sous l'angle d'un processus cyclique (cf. Fig. I.5). En guise de centre

14. « L'imbrication entre processus techniques et humains qui constituent la fabrique du patrimoine nativement numérique peut être perçue comme un facteur de déstabilisation au sein du monde des archives, des organisations ou encore de la recherche ». (Id. p.5)

1.4. MÉTHODOLOGIE

névralgique et point de pivot se trouvent de potentielles stratégies multimodales permettant de mettre en articulation les phases d'acquisition, de traitement et d'interprétation afin d'explorer le potentiel des croisements et intersections entre les modalités. Cette visée stratégique permet de renforcer la portée des approches multimodales constituant le principal objectif de cette thèse.

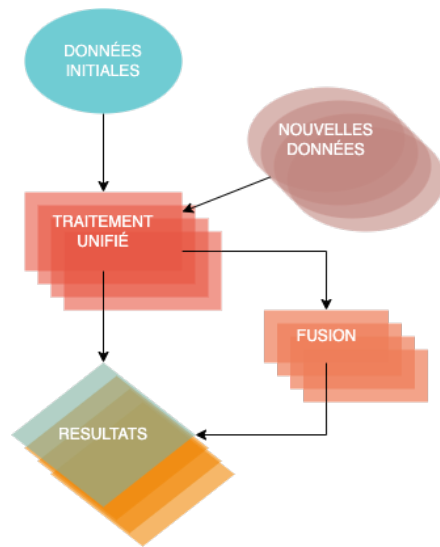


FIGURE I.4 – Diagramme d'une chaîne opératoire multimodale idéale.

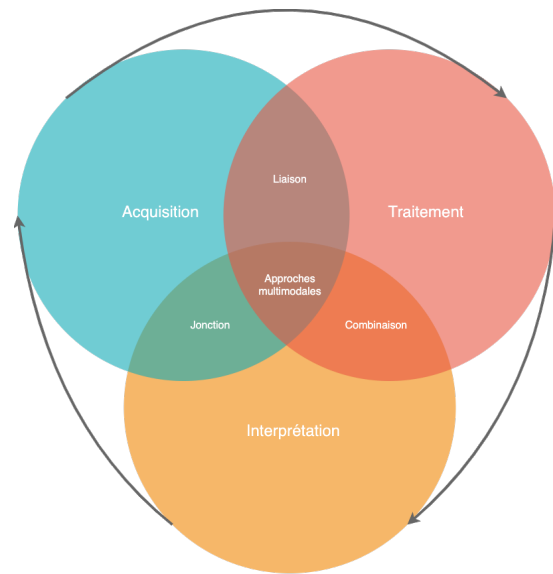


FIGURE I.5 – Représentation de la chaîne opératoire sous la forme d'un système cyclique.

1.4 MÉTHODOLOGIE

Le repositionnement des éléments de la triade formée par l'acquisition, le traitement et l'interprétation fait émerger un besoin de mise en synergie des différentes étapes pour générer un flux commun et continu. Cette réarticulation permet d'ébaucher une stratégie théorique pouvant s'exprimer comme telle :

- La définition de protocoles d'acquisition de données aide,
- l'optimisation des processus de traitement et d'extraction des informations, qui favorisent,
- l'interprétation des ressources contenues ou dérivées du modèle numérique pour consolider ou générer de nouvelles connaissances.

Enfin, idéalement et dans une portée plus prospective, il faudrait que

- les savoirs transversaux capitalisés lors de cette expérience puissent servir et en nourrir de nouvelles.

1.4. MÉTHODOLOGIE

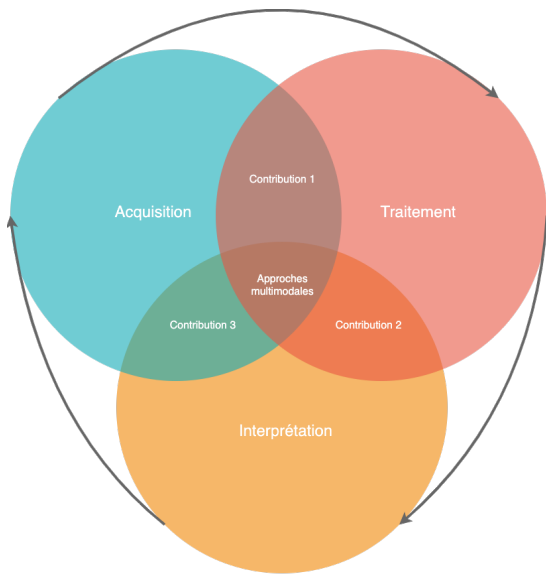


FIGURE I.6 – Méthodologie générale et placement des contributions.

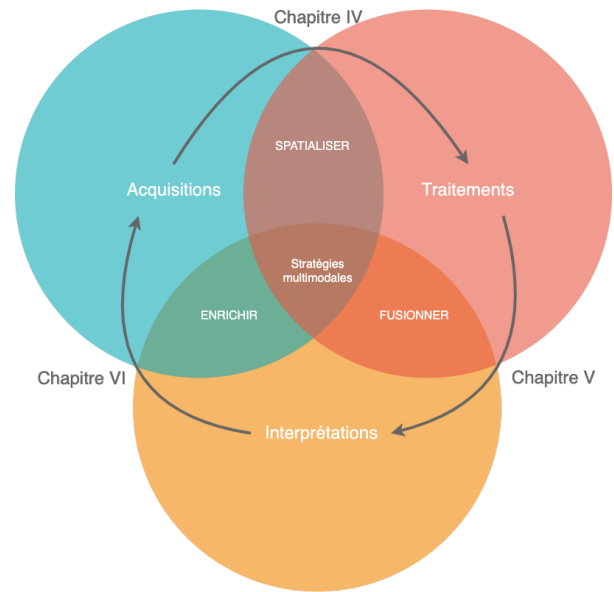


FIGURE I.7 – Structure globale de la thèse.

La méthodologie de travail mobilisée par cette recherche consiste à transposer la reformulation de la chaîne opératoire pour traiter et articuler chacune des thématiques contenues au sein de ces étapes majeures. Comme énoncé dans la stratégie ci-dessus, le principal enjeu réside dans la mise en relation des étapes conséquemment abordées par des contributions placées aux intersections de celles-ci (cf. Fig. [I.6](#)). Ces zones d'interaction font émerger de nouvelles thématiques relatives à l'apport de la multimodalité que sont : **la spatialisation, la fusion, et l'enrichissement** qui feront pour chacune l'objet d'un chapitre (cf. Fig. [I.7](#)). À cette échelle méthodologique, la structure proposée s'apparente à un *système* dont les éléments de définition ci-dessous suffisent pour commencer à l'appréhender comme telle.

« Dans plusieurs Sciences, ensemble d'éléments divers formant un tout dont toutes les parties sont liées » ou encore « ensemble structuré d'éléments abstraits, ensemble de concepts présentés sous une forme ordonnée »^a.

a. Source CNRTL : <https://www.cnrtl.fr/definition/syst%C3%A9me>.

Cette notion de *système* apparaît à la fois opportune et pertinente pour traiter les problèmes de cette étude. Elle ne se suffit cependant pas à elle-même pour guider et structurer la globalité de nos travaux. Pour cela, il faut se rapprocher d'une approche dont elle découle.

1.4.1 Pensée systémique

Les préceptes de la *pensée systémique* telle qu'exposée par [Cambien, 2008]¹⁵ serviront de socle méthodologique. Elle peut se définir par ses relations entretenues avec à d'autres approches (cf. Fig. I.8 ci-contre) dont celle analytique (qui détaille) ou synthétique (qui englobe). La systémique se révèle parfaitement adaptée à l'étude de la complexité et d'autres questions abordées par la suite. Afin de s'approprier et appliquer cette démarche, il convient d'en introduire quelques principes généraux, à commencer par ceux permettant d'explicitier la méthodologie de ce travail.

Approche analytique	Approche systémique
Isolé : se concentre sur les éléments.	Relie : se concentre sur les interactions entre les éléments.
Considère la nature des interactions.	Considère les effets des interactions.
S'appuie sur la précision des détails.	S'appuie sur la perception globale.
Modifie une variable à la fois.	Modifie des groupes de variables simultanément.
Indépendante de la durée : les phénomènes considérés sont réversibles.	Intègre la durée et l'irréversibilité.
La validation des faits se réalise par la preuve expérimentale dans le cadre d'une théorie.	La validation des faits se réalise par comparaison du fonctionnement du modèle avec la réalité.
Modèles précis et détaillés, mais difficilement utilisables dans l'action (exemple : modèles économétriques).	Modèles insuffisamment rigoureux pour servir de base aux connaissances, mais utilisables dans la décision et l'action (exemple : modèles du Club de Rome).
Approche efficace lorsque les interactions sont linéaires et faibles.	Approche efficace lorsque les interactions sont non linéaires et fortes.
Conduit à un enseignement par discipline (juxta-disciplinaire).	Conduit à un enseignement pluridisciplinaire.
Conduit à une action programmée dans son détail.	Conduit à une action par objectifs.
Connaissance des détails, buts mal définis.	Connaissance des buts, détails flous.

FIGURE I.8 – Approche analytique et systémique d'après J. de Rosnay, 1975, extrait de [Cambien, 2008] p.20.

Un système (y compris complexe) peut s'observer selon trois aspects complémentaires, respectivement ; structural, fonctionnel et historique, formant le dénommé « triangle systémique ». On retiendra la mise en place d'un observateur dont le rôle est d'étudier et de comprendre les mécanismes de liaisons entre les parties d'un système ou d'un sous-système. Le principe du « découpage systémique » permet de réduire une observation en sous-problèmes de complexité moindre. Suite à cette brève introduction, un approfondissement de cette approche systémique sera discuté en section 3.1 et articulé avec d'autres types d'approches développées lors du chapitre III.

1.4.2 Objectifs, apports et limites

Les contributions de ce travail s'inscrivent au sein de différentes thématiques telles que reprises dans le système proposé supra (et mises en relief infra). Elles seront découpées au gré du document, mais pour autant mises en interaction et dirigées vers un objectif commun, la définition de stratégies d'imagerie multimodale.

15. Ceux-ci induisent « la double nature de la systémique conçue à la fois comme un courant de pensée, un paradigme scientifique et comme une méthode, une démarche intellectuelle ». (id. p.9)

1.4. MÉTHODOLOGIE

Afin d'éviter un phénomène de dispersion et de disparité des sources qui limitent la portée actuelle des approches de l'imagerie multimodale appliquée au patrimoine, l'objectif est de contribuer aux enjeux compris dans les questions suivantes :

- Comment garantir et renforcer les apports naissant de la mise en coopération de plusieurs sources d'imagerie ?
- Comment harmoniser et évaluer leur contributions propres et combinées au sein de processus de documentation numérique qui tendent à se complexifier ?
- Comment rendre les représentations numériques et les connaissances tacites qu'elles comportent utiles aux investigations scientifiques d'aujourd'hui et de demain ?

Objectifs : La méthodologie décrite précédemment permet de décomposer les approches multimodales, au cœur de ce travail de recherche. Leur mise en synergie sera assurée par des travaux jouant sur différents champs d'actions et d'interactions. Par application au découpage systémique, les objectifs suivants seront poursuivis successivement.

Au niveau des thématiques générales :

- La mise à jour de protocoles d'**acquisition** et d'instrumentation multimodale.
- La robustesse et la reproductibilité des flux de **traitement** de données.
- L'accroissement du potentiel d'**interprétation** d'une documentation multi-source.

Au niveau des thématiques multimodales :

- L'augmentation des capacités en matière de **spatialisation** des ressources provenant de l'imagerie multimodale.
- L'exploration de la **fusion** de données et d'informations sur le plan géométrique et sémantique.
- L'investigation des méthodes d'**enrichissement** les ensembles documentaires ainsi que les pratiques multimodales dont ils résultent.

Apports et portée : Grâce à une approche systémique, ce travail de thèse a l'ambition d'apporter une vision globale des modes opératoires et des *savoir-faire* propres à la numérisation 3D multimodale. Ce travail pourrait constituer un apport général à la gestion des données, informations ou connaissances patrimoniales. En complément, l'ambition est de contribuer aux déblocages de certains verrous thématiques par une série d'expérimentations à la portée plus technique relatifs à l'imagerie multimodale. Au-delà

1.4. MÉTHODOLOGIE

de la portée générale de travaux présentés, des apports spécifiques seront proposés, une nouvelle fois en mobilisant le découpage systémique, pour chacune des thématiques :

- Renouvellement et harmonisation des protocoles d'**acquisition** pour augmenter le potentiel des instrumentations multimodales.
- Élaboration et généralisation de procédures permettant de **spatialiser** des ensembles de données multimodales.
- Évaluation d'outils de **traitement** et de visualisation avancés opérant sur des sources d'imagerie orientées dans l'espace.
- Exploration des moyens permettant de **fusionner** des données pour enrichir leurs voies d'interprétation.
- Investigation des processus d'annotations sémantiques spatialisées pour l'**interprétation** de documentations multimodales.
- Définition d'un système permettant d'**enrichir** des ressources multimodales par le biais des métadonnées.

Bornes et limites : La méthodologie mobilisée est inspirée de la systémique et non une analyse strictement systémique. D'une part, car cela appartient au domaine l'Ergonomie, d'autre part, car cela nécessiterait, avant toute étude, de définir un tel système avec un niveau de précision dépassant du cadre de cette recherche. Concernant les cas d'études ou le terrain d'expérimentation, bien que certains objets font l'objet de plusieurs expériences, aucune typologie ou catégorie d'objets patrimoniaux spécifiques ne cadrera cette étude. Les expérimentations sont basées sur les terrains et objets d'études issus du laboratoire MAP, avec une légère tendance au patrimoine bâti. Les méthodes proposées n'intéressent pas une application patrimoniale précise, au contraire celles-ci sont démontrées sur un corpus élargi de cas d'études concrets ou potentiels. Cela implique que les SP ne seront pas abordées sous le prisme des nombreuses disciplines qu'elles rassemblent. Néanmoins, toutes les investigations pouvant mobiliser une numérisation multimodale pourraient trouver au sein de cette thèse des éléments de réflexion applicables dans différents contextes. Enfin, il reste à exprimer une limite technique, voire technologique relative au spectre d'imagerie scientifique inclus dans nos travaux. Cette étude sera portée sur une panoplie restreinte des techniques d'imagerie, reposant principalement sur l'utilisation d'un capteur de type photographique. Ce point sera discuté en début de section [2.2](#), et étendu plus tard à la notion d'instrument qui fera l'objet d'une réflexion dédiée lors du chapitre [3.4.1](#). Des pistes seront cependant proposées au fil du document pour échapper à certaines limites qui viennent d'être exposées.

1.4.3 Structure du document

Chapitre II : Suite à ces propos introductifs, le chapitre à venir est consacré à un état de l'art. Il commence par une lecture approfondie de la *Multimodalité*, prisme par lequel sera étudié l'ensemble des thématiques précédemment énoncées. La structure tripartite est reprise pour aborder des couples thématiques proches en commençant par ceux de l'« acquisition et de la spatialisation » (cf. section 2.2 p.38), puis du « traitement et de la fusion » (cf. section 2.3 p.50) et enfin de l'« interprétation et de l'enrichissement » (cf. section 2.4 p.72).

Chapitre III : Ce chapitre expose et discute les différents types d'approche dite systémique (cf. section 3.1 p.98), stratégique (cf. section 3.2 p.100), instrumentale (cf. section 3.3.1 p.103), procédurale (cf. section 3.3.2 p.105) et enfin synergique (cf. section 3.4 p.107) qui seront mobilisées et articulées ultérieurement en guise de contributions. Une synthèse servant d'annonce de plan détaillé est proposée en fin de chapitre (p.113) pour faciliter la lecture et la navigation dans le document.

Chapitres IV à VI : Les trois chapitres suivants constituent les travaux et développements de cette thèse. Ils sont organisés selon le trio thématique précédemment exposé dans lesquels des stratégies multimodales sont explorées par deux types d'approches complémentaires, instrumentales et procédurales. Le chapitre IV aborde la thématique de la *spatialisation* d'abord par le biais du relevé (cf. section 4.2 p.116) puis par une procédure basée sur la photogrammétrie (cf. section 4.3 p.125). Le chapitre V interroge le thème de la *fusion*, en commençant par le rôle de source d'imagerie orienté dans l'espace (cf. section 5.2 p.153) puis en s'ouvrant sur un indicateur de fusion multimodale (cf. section 5.3 p.161). Le chapitre VI opère un virage franc vers l'*enrichissement* amorcée par une expérimentation basée sur l'annotation sémantique spatialisée (cf. section 6.2 p.194), suivie d'une proposition utilisant les métadonnées pour améliorer la traçabilité de la documentation multimodale (cf. section 6.3 p.202).

Chapitre VII : Ce chapitre rassemblera des éléments de bilan des contributions et des apports (cf. section 7.2 et 7.1 p.232 et p.230), des limites et perspectives (cf. section 7.3 p.234) et d'une ouverture (cf. section 7.4 p.238) pour conclure cette thèse. Enfin, le document sera clos par un glossaire (cf. section 7.4 p.245), une liste de publications personnelles, la bibliographie (cf. section 7.4 p.249), la table des illustrations (cf. section 7.4 p.281) et les annexes reprises dans l'ordre de citation (cf. section 7.4 p.286).

1.4. MÉTHODOLOGIE

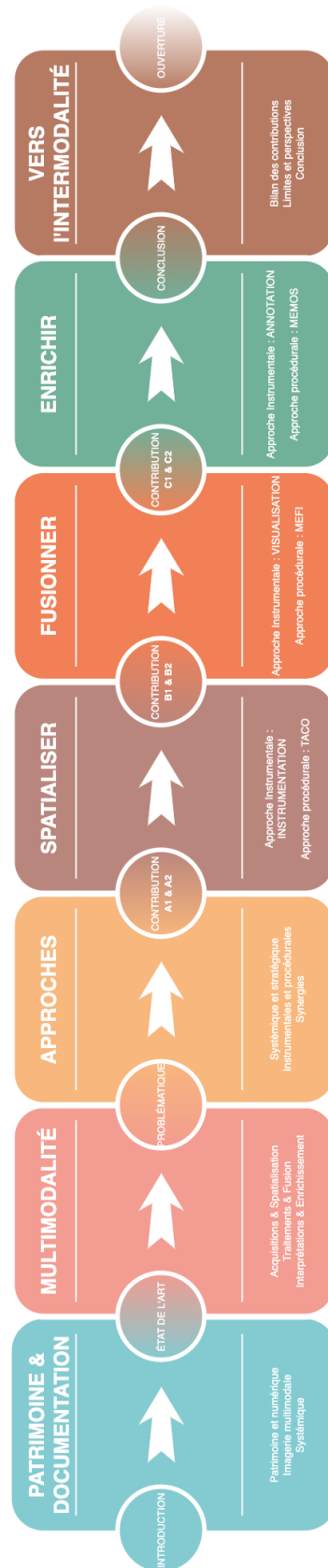
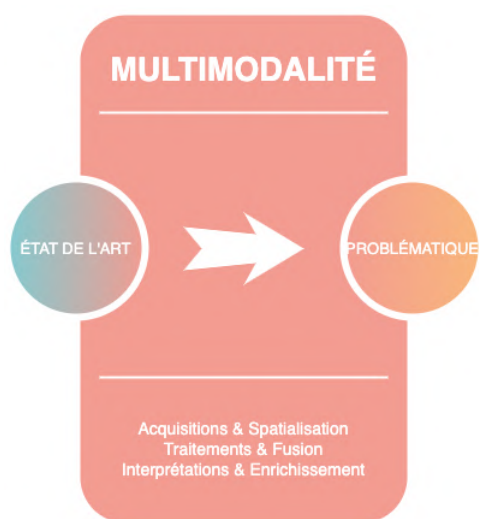


FIGURE I.9 – Structure de la thèse

Chapitre II

Revue des méthodes et pratiques actuelles en numérisation 2D/3D



L'imagerie scientifique et les relevés numériques sont orchestrés par une phénoménologie en trois actes « acquisition - traitement - interprétation ». Cette chronologie qui correspond à la majorité des études patrimoniales sera reprise pour faire un état des lieux des pratiques et des savoirs relatifs à ces étapes clés. Cette structuration assez conventionnelle sera agrémentée de nouvelles thématiques « spatialisation - fusion - enrichissement » issues de la méthodologie de travail introduite auparavant. Cette évolution semble nécessaire pour porter un regard critique et se nourrit de travaux récents qui interrogent

les approches multimodales. Ce chapitre est une tentative de saisir l'essence et les facteurs d'émergence de ce type d'approche qui sont au cœur de cette recherche. Partant du constat que toute étude patrimoniale actuelle se présente et se conduit sous la forme d'un problème complexe, l'exercice sera celui de l'intégration de connaissances et d'expertises provenant de la combinaison de plusieurs domaines ou disciplines. Ce chapitre tente donc, par une lecture croisée de la littérature scientifique, d'établir les liens et les interactions entre ces thématiques pour renforcer la transversalité nécessaire à la mise en place de stratégies multimodales.

Annnonce de plan

Telle qu'énoncée dans la structure du plan de travail (cf. section Fig. [I.7](#) p.[28](#)) chaque sous-chapitre est composé d'une double thématique. À noter que des renvois sont proposés pour approfondir certains éléments d'état de l'art, directement au sein des chapitres de développement. L'ensemble des thématiques seront abordées et interrogées sous le prisme de la *multimodalité*, dont il est primordial de développer une compréhension et une acception en accord avec le cadre de cette recherche.

En préambule à l'état de l'art, un examen du terme de **Multimodalité** (cf. section [2.1](#) p.[33](#)) est proposé en dépassant les limites propres à notre domaine, afin de développer une réflexion cohérente avec sa terminologie et son étymologie.

Une seconde partie traitera donc des modalités d'acquisitions, mais aussi plus généralement des enjeux de **Spatialisation** (cf. section [2.2](#) p.[38](#)) qui sous-tendent la mobilisation de dispositifs multimodaux de numérisation 2D/3D.

Une troisième partie sera dédiée aux procédures de traitements des données tout en mettant l'accent sur la nécessité de **Fusion** (cf. section [2.3.3.1](#) p.[60](#)) succédant aux méthodes de recalage de données issues de numérisations 2D/3D (cf. section [2.3](#) p.[50](#)). Une sous-partie approfondira la fusion de données, telle que décrite dans le domaine de l'ingénierie et pouvant s'articuler avec le cadre d'application patrimonial .

Une dernière partie sera axée sur le volet de l'interprétation et de son articulation avec les méthodes et les enjeux de l'**Enrichissement** (cf. section [2.4](#) p.[72](#)) . Cette section permettra notamment de faire le point sur les scénarios d'annotation, la gestion des métadonnées descriptives ou plus largement sur le défi des données ouvertes et liées.

Un bilan général est proposé en fin de chapitre (cf. section [2.5](#) p.[95](#)) ainsi qu'à la fin de chacune d'une thématiques suivantes : protocoles d'acquisition et de spatialisation (p.[48](#)), procédures de traitement et de fusion (p.[70](#)), des méthodes relatives à l'interprétation (p.[82](#)) et à l'enrichissement (p.[94](#)).

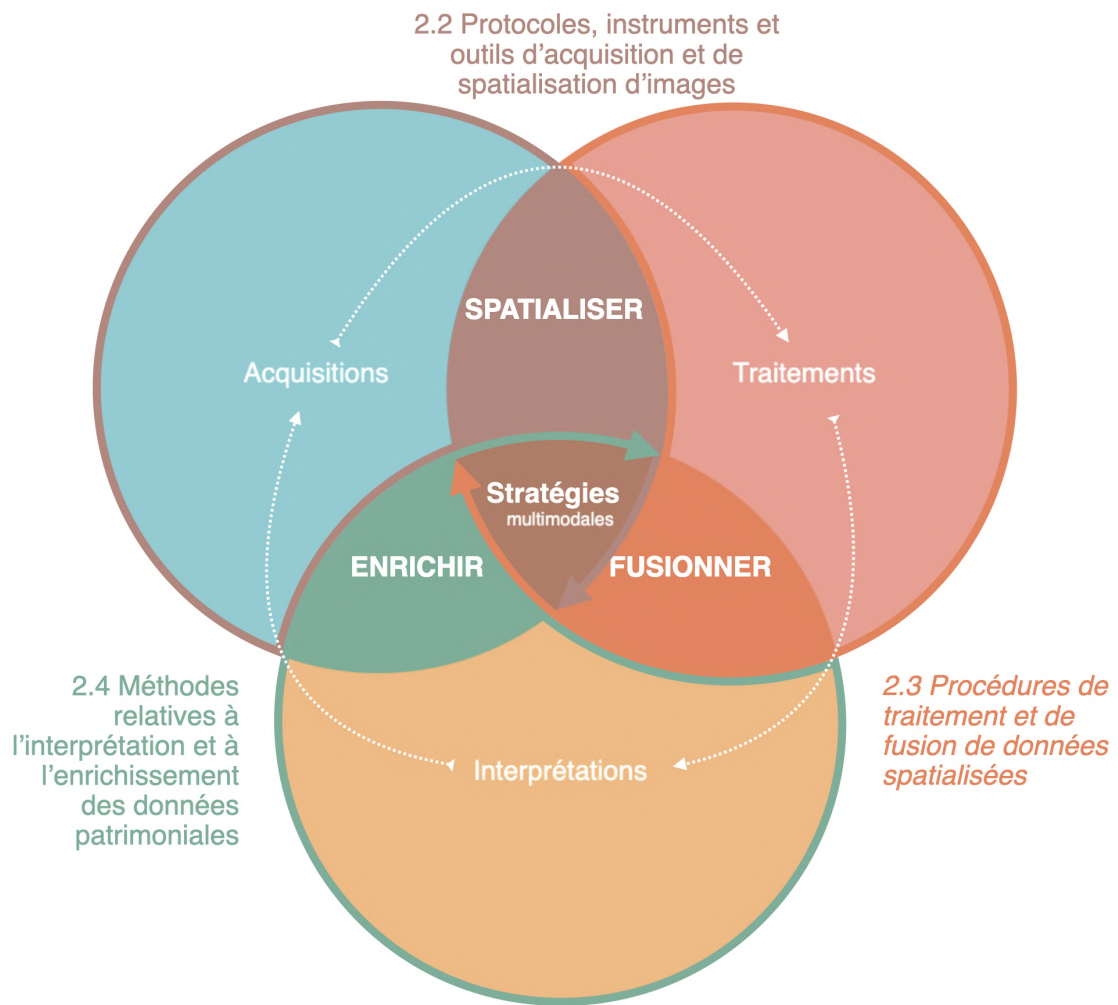


FIGURE II.1 – Schéma d'ensemble de la structure de ce chapitre.

2.1 LE PRISME DE LA MULTIMODALITÉ

À l’instar du concept de jumeaux numérique, le terme de « multimodalité » est depuis un certain temps couramment usité dans des recherches portant sur le Patrimoine Numérique, sans pour autant que l’on puisse lui attribuer dans ce contexte d’application une définition claire et précise. Cette section restitue un tour d’horizon de la littérature scientifique interrogeant la multimodalité pour mieux en cerner ses enjeux et ainsi tenter d’y contribuer avec acuité. Afin de dissiper le flou autour de ce terme, il semble, pour commencer, intéressant de se pencher sur l’acceptation de celui-ci dans d’autres disciplines.

	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010-18
Multimodal (e) multimodalité	0	0	0	10	77	328	560
Multimodal (ity)	1	18	221	703	2400	10600	25400

FIGURE II.2 – Occurrence des termes multimodal(ité)/multimodal(ity) (sic) depuis 1950 d’après [Azaoui, 2019].

2.1.1 Historique

La notion de multimodalité est abondamment abordée dans le monde académique depuis le milieu des années 90 (cf. Fig. II.2). Elle concerne de nombreux domaines, des sciences humaines ou appliquées. Cet usage exponentiel prenant sa source à partir des années 1950 dénote d’une tendance, voire un effet de mode épistémologique, tel que remarqué cette étude [Azaoui, 2019]. Historiquement, ce concept provient initialement de la Linguistique (plus précisément de la Sémiologie). Il a été introduit par F. De Saussure au début du 20^{ème} siècle dans le contexte de l’analyse du langage et de la communication [Jewitt et al., 2016]. La notion est ensuite reprise conjointement en Psychologie Cognitive et en Sciences de l’Information, pour étudier respectivement les effets sur l’apprentissage et les comportements ou les Interactions Homme - Machine (IHM)¹. Alors que ces considérations provenant des SHS pourraient s’éloigner de nos préoccupations pour les Sciences du Patrimoine, on observe à l’inverse des accointances. Un glossaire de la Multimodalité fait mention d’*approches multimodales*, traduites en ces termes :

1. cf. exemple du Modèle du Processeur Humain de Card, 1983 et taxonomie des modalités de représentations élaborée par [Bernsen, 1994]

2.1. LE PRISME DE LA MULTIMODALITÉ

« Les approches multimodales ont fourni des concepts, des méthodes et un cadre pour la collecte et l’analyse des aspects visuels, sonores, physiques et spatiaux de l’interaction et des environnements, ainsi que des relations entre ces aspects »². Ailleurs et dans la même ressource³, on relève aussi une certaine convergence sur les objectifs mêmes de la recherche.

2.1.1.1 Approche contemporaine

Plus récemment, la multimodalité est aussi abordée dans un champ d’application plus proche de cette étude, le traitement d’image. En effet, ce qui est défini dans ce champ comme « imagerie multimodale », est aussi explorée dans les trois domaines de recherches que sont : la Vision par Ordinateur [Turk, 2014], l’imagerie médicale [Louie, 2010], mais aussi la télédétection — dans lequel cette étude s’inscrit. Il apparaît alors de moins en moins décontextualisé d’utiliser le terme de multimodal tel que l’on tente de l’englober pour cette étude. En effet, pour l’ensemble des domaines repris ci-dessus, l’imagerie multimodale est corollaire ou reliée à la problématique de recalage et de fusion de données [Brown, 1992]. La définition de Brown du « recalage multimodal » s’applique bel et bien dans ce contexte (cf. Fig. II.3 ci-dessous).

MULTIMODAL REGISTRATION
<i>Class of Problems:</i> Registration of images of the same scene acquired from different sensors
<i>Typical Application:</i> Integration of information for improved segmentation and pixel classification
<i>Characteristics of Methods:</i> Often use sensor models, need to preregister intensities, image acquisition using subject frames and fiducial markers can simplify problem
<i>Example 1</i>
<i>Field:</i> Medical Image Analysis
<i>Problem:</i> Integrate structural information from CT or MRI with functional information from radionuclide scanners such as PET or SPECT for anatomically locating metabolic function
<i>Example 2</i>
<i>Field:</i> Remotely Sensed Data Processing
<i>Problem:</i> Integrating images from different electromagnetic bands, e.g., microwave, radar, infrared, visual or multispectral for improved scene classification such as classifying buildings, roads, vehicles and type of vegetation

FIGURE II.3 – Extrait de Problèmes de recalage d’après [Brown, 1992] dont les lignes, Classe de problèmes, Application et les Caractéristiques des méthodes, s’appliquent à cette étude.

2. Source : National Centre for Research Methods. (2013, 25 février). Multimodality. Glossary of multimodal terms. Consulté le 17 mars 2023, à l’adresse <https://multimodalityglossary.wordpress.com/multimodality/>

3. cf. alinéas 2 et 3

2.1.2 Étymologie et inscription disciplinaire

La multimodalité, au sens étymologique, combine le préfixe *multi* qui signifie «plusieurs» et *modal* dérivé de *mode*, entendu au sens large du terme comme « une façon de faire quelque chose ». Le terme « multimodal » peut par conséquent être utilisé pour décrire tout processus qui utilise plus d'une façon de faire les choses pour atteindre un objectif. Dans sa forme plurielle, cette définition de *modalité* renseigne aussi sur les « conditions particulières selon lesquelles une chose est exécutée, réalisée »⁴. À retenir, la multimodalité peut avoir une signification particulière ou quelques points de ressemblances, en fonction de son contexte d'utilisation et provenant de trois domaines principaux i) la Sémiologie ii) la Psychologie et iii) l'Informatique. Bien entendu, il semble logique d'approfondir en priorité cette dernière acception qui se rapproche cette étude. Le regard et l'analyse doivent alors se porter vers le domaine interdisciplinaire des Interactions (ou des Interfaces) Homme-Machine (IHM).

2.1.2.1 La multimodalité en IHM

Pour ce faire, les travaux de Nigay et Coutaz sont précieux d'enseignements pour appréhender cette notion complexe, en revenant tout d'abord sur la distinction ou plutôt la conjonction entre le *mode* et la *modalité* [Nigay and Coutaz, 1993, Nigay and Coutaz, 1996]. « Il n'est donc pas surprenant que les termes mode et modalité soient l'un et l'autre employés pour qualifier une action »(id. p.3). Ce passage à l'action se complète du fait qu'« au sens large, une modalité est assimilée à une technique d'interaction, une manière d'interagir avec le système »(id. p.5). Cette appropriation est évidemment propre et pertinente au domaine de l'IHM, mais introduit les notions de *système* et d'*utilisateur* ultérieurement utiles à cette étude (cf. Fig. II.4 a). D'un point de vue informatique, cette interaction est permise notamment par le biais de processus, assimilable à des ensembles de données entrantes et sortantes⁵ (cf. Fig. II.4 b). C'est l'orchestration et le l'interaction entre l'ensemble de ces éléments qui définissent un système multimodal mais aussi et surtout ses performances.

4. Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL). (s. d.). MODALITÉ : Définition de MODALITÉ. Lexicographie. Consulté le 17 mars 2023, à l'adresse : <https://www.cnrtl.fr/definition/modalit%C3%A9>

5. « Par exemple, Martin [MAR 95] définit une modalité comme un processus (informatique) d'analyse ou de synthèse défini sur des ensembles de données d'entrée et de sortie ». (id. p.5)

2.1. LE PRISME DE LA MULTIMODALITÉ

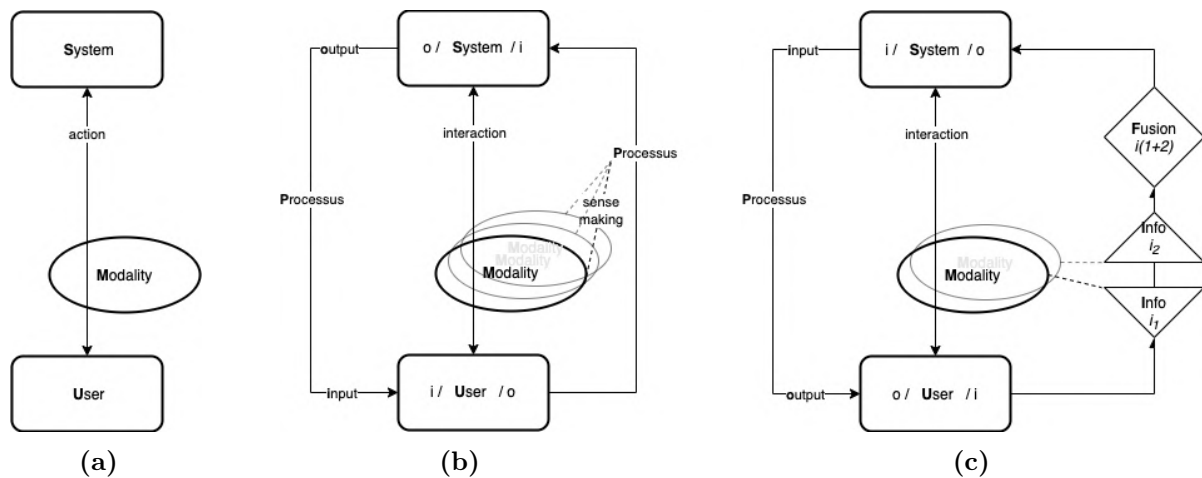


FIGURE II.4 – Synthèse graphique de la *multimodalité* selon l'étude de [Nigay et Coutaz, 1996].

2.1.3 Définition proposée

Il subsiste encore deux analogies entre la *multimodalité* au sens IHM et celle vers laquelle cette étude essaye de tendre. La première provient du fait que la multimodalité ne se justifie que si elle est porteuse de sens (Ibid.), autrement dit, si et seulement si les processus qui la sous-tendent impliquent une fusion de données ou d'informations (cf. Fig. II.4 c). L'aspect cyclique du flux de données, ou même la notion de traitement incrémental qui est mobilisée ici, rentre en résonance avec l'objectif de fusion : « que l'usage soit synergique ou alterné, il y a émergence de sens par suite d'une fusion d'informations. Ce phénomène se produit lorsque des modalités entretiennent une relation de *complémentarité* : chaque modalité véhicule une partie d'information qui, prise isolément, est insuffisante pour faire sens » (Ibid. p.25).

La seconde analogie provient de la corrélation étroite de la multimodalité avec les sphères sémantiques, qui seront bien entendu explorées dans cette thèse. En considérant qu'un système puisse s'enrichir de plusieurs modalités — par opposition à un système multimédia — on peut s'appuyer sur le fait que ; « un système multimodal a la faculté d'abstraire, donc de comprendre ce qui est reçu ou émis via ses dispositifs d'entrée/sortie. Un système multimédia n'a pas ces capacités. Du point de vue technique, le multimodal et le multimédia se distinguent par la capacité à modéliser la sémantique des informations échangées avec l'utilisateur » (Ibid. p.7). Dans ce cas, on peut projeter un tel système, comme une boucle fermée et vertueuse, orchestrant des processus informatiques qui mettent en interaction un système et un utilisateur par le biais de modalités dont la fusion permet de faire émerger de nouvelles connaissances.

2.1. LE PRISME DE LA MULTIMODALITÉ

En raison de la conformité d'acceptation de la *multimodalité* avec le contexte spécifique de cette étude, on acceptera pour la suite de celle-ci la définition proposée par Nigay et Coutaz :

« La multimodalité est alors définie par la **coopération** entre plusieurs modalités ou processus ». [Nigay and Coutaz, 1996] (p.27)

2.1.3.1 Portée et limite de la définition proposée

Il reste cependant à rappeler que dans certains cas, l'usage de *multimodal* est ancré au sens IHM du terme demeurant imprégné à celui de la psychologie cognitive et du monde de la perception sensorielle. Il est vrai que le cas présent, où le système multimodal est orienté vers un écosystème numérique et virtuel, la « modalité » du fait de la nature des outils de captation reste essentiellement bornée au domaine visuel. Cela peut être une limite de la définition et de l'usage de la multimodalité vers laquelle tend cette étude, bien que des travaux récents repris dans le développement de cette thèse ouvriront des portes vers d'autres dimensions perceptives (en l'occurrence acoustique, cf. Fig. II.8 b1-3). Enfin, il convient de compléter ces propos avec les liens possibles entre les systèmes IHM et les systèmes de captation du réel — propres à cette étude — par le biais de la fusion multimodale en développement au sein des dispositifs de Réalité Entendue, et déjà abordée dans plusieurs travaux [White et al., 2007, Abergel, 2020, Grazioso et al., 2020, Bekele et al., 2021]. Nous le verrons par la suite, cette notion de **mise en coopération** semble être le chaînon manquant de la réflexion mettant la multimodalité au cœur des enjeux et de la visée stratégique de ce travail de recherche.

L'étendue de cette discussion était nécessaire pour cerner cette notion de multimodalité afin d'élargir et de préciser le spectre d'une possible définition (pour le domaine d'étude ciblé). Cela permet de dépasser son acception « basique », généralement adjointe à l'étape d'acquisition ou restreinte à l'imagerie ou l'instrumentation. Il apparaît que la multimodalité peut avoir une emprise à la fois plus large et plus complexe sur le patrimoine numérique. En effet, nous venons de le voir, des procédures de traitement, des méthodes de fusions, jusqu'aux voies d'enrichissement sémantique peuvent aussi intégrer ce facteur multimodal.

2.2 PROTOCOLES, INSTRUMENTS ET OUTILS D'ACQUISITION ET DE SPATIALISATION D'IMAGERIE PATRIMONIALE

L'acte de relevé est un élément fondateur pour toute étude dite numérique du patrimoine, non pas qu'il revête d'une importance capitale ou supérieure vis-à-vis du reste du cycle de vie des données, mais parce qu'il en marque logiquement la genèse. De plus, les conditions dans lesquelles et par lesquelles il s'effectue prédéfinissent un gage de qualité, dont l'intégralité de l'étude héritera. Il peut aussi revêtir un aspect épistémologique, par le rapport entretenu entre les questionnements de l'opérateur en phase de levé, et celles soulevées par son site d'étude, comme l'appuie Fulvio Cairoli Giuliani [Coppola, 1990]⁶. Or le relevé, tel que défini par Jean-Paul Saint-Aubin [Saint-Aubin, 1992] dans son application architecturale, est un processus cognitif complexe⁷ peut-être trop peu remis en question à notre époque. Les campagnes d'acquisitions constituent une étape fondamentale pour la documentation du patrimoine dont le virage numérique, basé sur les méthodes actuelles de numérisations, fut source de nombreux questionnements [Rouger, 1994, Fuchs, 2006]. Il convient de prendre appui sur la nécessité d'interroger cet acte autour d'une « préoccupation donnée »⁸. Or, la multimodalité devrait nécessairement changer notre façon de relever, car elle fait varier à la fois les instruments, les méthodes, mais aussi les objectifs de ce dernier. Par extension, ce serait par une meilleure définition des objectifs du relevé qu'il serait possible d'en améliorer ses qualités et son interprétation. Puisqu'il s'agit d'aborder cette notion clé sous le prisme multimodal, le relevé est aussi un lieu et un moment propice à la mise en *coopération*, non pas des capteurs, mais des opérateurs qui les orchestrent. La multidisciplinarité, corollaire de la multimodalité, se nourrit, d'échanges et de discussions entre différents experts. Ces derniers appliquent ou expérimentent des techniques de relevés en répondant à des modes opératoires qui leur sont spécifiques. Les campagnes d'acquisitions multimodales nécessitent par conséquent une attention particulière dans la mesure où le champ de potentiels ne s'opère qu'à l'interstice des différentes contraintes et limites imposées par chaque méthode de relevés, que l'on

6. Le relevé archéologique est considéré comme un travail de documentation (tel est le titre du livre) intimement liée aux autres opérations menées sur un site.

7. Qui « conduit à dresser, par l'intermédiaire de la représentation, le constat daté de la forme effective du bâti, avec comme référence constante, l'objet : ses imperfections rendent compte de l'insuffisance des techniques, des outils et des hommes ; ses remaniements racontent son histoire et ses usages ; ses défaillances comme ses déformations en annoncent l'état sanitaire ». (Ibid. p.16)

8. [Abergel, 2020] (p.14)

tentera de cerner ci-après.

2.2.1 Technologies de numérisation 2D/3D

Parmi les nombreuses technologies utilisées dans le domaine du patrimoine, cet état de l'art est intentionnellement limité aux systèmes permettant de générer du contenu 3D. L'imagerie 2D/3D acquiert *de facto* un rôle primordial pour la spatialisation de données [Degriigny et al., 2016]. D'autres types d'imageries demeurent utilisées⁹, celles-ci seront documentées lorsqu'une mention en sera faite¹⁰. Faisant le constat, qu'il n'existe pas (à ma connaissance) de véritable taxonomie de l'imagerie en SP, une enquête récente diffusée largement au sein des institutions culturelles et scientifiques européennes a servi de base de travail.

2.2.1.1 Inventaire et taxonomie

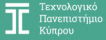
L'enquête discutée ci-après représente un instantané des pratiques au sein de notre domaine [VIGIE, 2022]. Le sondage et les résultats sont intéressants, dans le contenu comme dans la critique que l'on peut en faire. Sur le seul titre des technologies d'acquisitions de données, voici les principaux enseignements. D'une part, il apparaît que le spectre technologique fait état d'une vaste diversité, mais aussi que malgré l'effort de recensement préalable, cette liste demeure soit incomplète ou imprécise.

La figure II.5 ci-après reprend les réponses fournies (à titre personnel) pour ce sondage, et définissent les bornes de la présente étude (ou du moins aux techniques déjà mises en pratique en contexte professionnel). *Primo*, sans critique négative du travail de fond de cette enquête, il est étrange d'avoir eu à rajouter la thermographie infrarouge. *Secundo*, elle dénote d'un manque de précision, ne sachant pas où placer la photographie technique (ou photographie multispectrale) ou les nombreuses variantes de la photographie computationnelle (stéréophotométrie, RTI, empilement de mises au point...). Il est possible que celles-ci soient englobées dans la case « photographie 2D », ce qui dénote d'un cruel manque de profondeur et de granularité. *Tertio*, l'analyse des résultats du sondage (cf. Fig. II.6) reflète la prédominance des techniques mobilisées dans cette étude, et donc par extension de l'impact potentiel des contributions qui seront développées dans cette thèse.

9. « Répertoire des techniques d'examen et d'analyse des œuvres du patrimoine culturel citées dans ce numéro », *Technè* [En ligne], 43 | 2016, mis en ligne le 19 décembre 2019, consulté le 28 septembre 2023. URL : <http://journals.openedition.org/technè/568>; DOI : <https://doi.org/10.4000/technè.568>

10. Les techniques rencontrées à l'échelle du laboratoire MAP sont reprises dans la l'illustration II.7 ci-après p.42.

2.2. PROTOCOLES, INSTRUMENTS ET OUTILS D'ACQUISITION ET DE SPATIALISATION D'IMAGERIE PATRIMONIALE



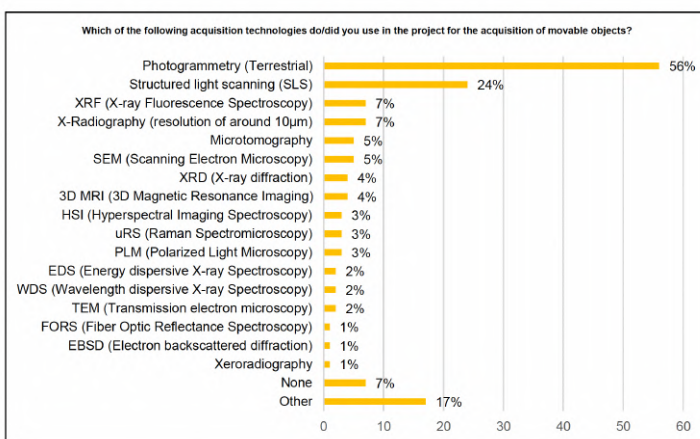
[Resume later](#) [Exit and clear survey](#)

Satellite Remote Sensing (10-1000 km2)
 Aerial Remote Sensing (10-100 km2)
 UAV – RPAS (0,1-100 km2/ to a maximum of 150m of altitude)
 Airborne laser scanning (LiDAR)
 GNSS
 Tacheometry
 Topographic Methods
 Tactile Methods
 Interior Structural imaging
 SEM (Scanning Electron Microscopy, up to 0.2µm)
 EDS (Energy dispersive X-ray Spectroscopy, down to 1µm)
 X-Radiography (resolution of around 10µm)
 XRF (X-ray Fluorescence Spectroscopy, as low as 10µm)

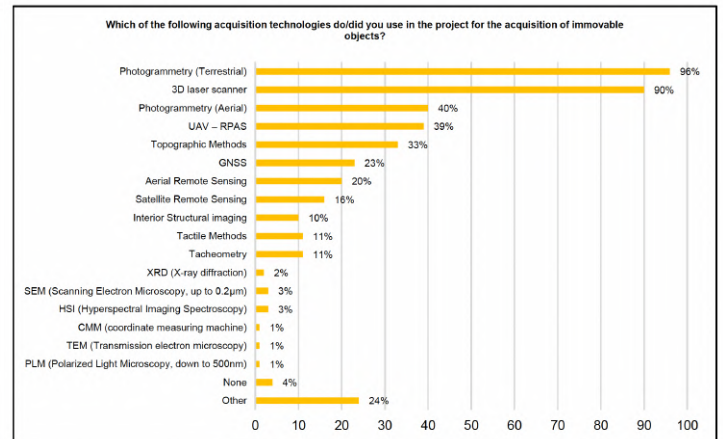
HSI (Hyperspectral Imaging Spectroscopy, resolution of around 10nm)
 PLM (Polarized Light Microscopy, down to 500nm)
 WDS (Wavelength dispersive X-ray Spectroscopy, 50-100ppm)
 Neutron Tomography
 Beta or electron Radiography
 Xeroradiography
 Stereography
 uRS (Raman Spectromicroscopy)
 TEM (Transmission electron microscopy)
 EBSD (Electron backscattered diffraction)
 HPLC (High performance liquid chromatography)
 ICP-MS (Inductively Coupled plasma-mass spectrometry)
 SIMS (Secondary ion mass spectrometry)

XRD (X-ray diffraction)
 CMM (coordinate measuring machine)
 3D laser scanner (time-of-flight)
 3D laser scanner (Triangulation)
 Structured light scanning (SLS)
 Photogrammetry (Terrestrial)
 Photogrammetry (Aerial) (from 200m of altitude)
 360-degree imagery
 Orthographic imagery
 2D photography
 None
 Other:

FIGURE II.5 – Inventaire des technologies d'acquisitions tel que proposé dans l'enquête VIGIE (sont cochées celles concernées par cette étude).



(a) Technologies d'acquisition utilisées dans les projets relatifs aux objets mobiliers.



(b) Technologies d'acquisition utilisées dans les projets relatifs aux objets immobiliers.

FIGURE II.6 – Résultats du sondage extrait du rapport final VIGIE.

2.2. PROTOCOLES, INSTRUMENTS ET OUTILS D'ACQUISITION ET DE SPATIALISATION D'IMAGERIE PATRIMONIALE

Avec circonspection, il est aussi possible de s'interroger, sans en remettre en cause sa valeur et son intérêt, sur plusieurs biais de cette étude.

D'une part, l'absence et l'imprécision de techniques pourtant assez couramment utilisées interrogent la pertinence des résultats. D'autre part, l'écart significatif entre les techniques peut mettre en doute la diversité des experts sondés, tant certaines de ces techniques sont assez représentatives du domaine des SP (imagerie hyperspectrale, radiographie, tomographie, spectroscopie ou microscopie). L'explication pourrait venir du fait que le panel d'expert sondés ne soit pas assez représentatif de ce domaine émergent.

2.2.1.2 Éléments de classification

Définir une classification taxonomique semble hors de portée pour cette étude, même si un rappel des principales façons de catégoriser ces technologies de relevés 2D/3D est de vigueur. La première distinction fondamentale est reliée au type de capteurs utilisés, et pouvant être soit actif (active-sensing), soit passif (passive-sensor) et permet d'opposer les deux grandes familles du relevé numérique 3D qui sont représentées respectivement par la lasergrammétrie et la photogrammétrie [Verykokou and Ioannidis, 2023]. Généralement, les techniques de Modélisations Basées Laser (MBL) permettent des mesures directes là où les Modélisations Basées Image (MBI) ne permettent qu'après des procédures de traitement d'image, des mesures indirectes^[11]. Cependant, ces deux grands ensembles peuvent se rejoindre sous l'appellation des Modélisations Basées sur le Réel (MBR) et appartiennent au domaine de la Télédétection (remote-sensing) des méthodes dites sans contact. Ceci fait état d'une terminologie protéiforme à la laquelle on peut rajouter les classifications par classe dimensionnelle (2D-2.5D-3D) dont on distingue les méthodes surfaciques (radar) ou volumiques (radiographie, tomographie) ou par sous-famille de capteurs (photographie, microscopie, spectroscopie, thermographie) voir du type de captation (optique) ou d'émission (acoustique) ou d'ondes (électromagnétique).

Techniques dites invasives ou destructives

Pour compléter et parfaire la description des techniques mobilisée dans cette étude, il reste à spécifier qu'elles appartiennent aux techniques de Contrôle Non Destructif. Elles sont plus couramment appelées NDT^[12] et dont l'acception est déjà transposée en SP [Elias et al., 2011, Vallet et al., 2013, Moropoulou et al., 2013] mais aussi caractérisée par l'usage

11. cf. Classification of Methods of Measurements (Metrology). (s. d.). Consulté le 21 mars 2023, à l'adresse : <https://what-when-how.com/metrology/classification-of-methods-of-measurements-metrology/>

12. Provenant de l'anglais Non-Destructive Techniques.

2.2. PROTOCOLES, INSTRUMENTS ET OUTILS D'ACQUISITION ET DE SPATIALISATION D'IMAGERIE PATRIMONIALE

de sources d'imagerie non invasive [Brunetti et al., 2016, Chaban et al., 2019, Albertin et al., 2021]. Il faut comprendre la nature de ce dernier élément de classification dans son contexte, celui de l'imagerie médicale¹³, dont l'appréciation est modulable dans le contexte des sciences de la conservation et relative à la nature des matériaux. Il est par exemple admis, en fonction de la caractérisation et de la fragilité des matériaux, de considérer certaines techniques¹⁴ comme micro-invasives ou minimalement invasives [Macchia et al., 2022]. La compréhension et la pertinence d'une classification sont donc mises à rude épreuve à l'égard de l'expansion des pratiques multimodales. De plus, la confrontation interdisciplinaire fait que l'une ou l'autre technique peuvent être classifiées différemment en fonction du domaine de provenance de chaque expert.

Ainsi la Fig. II.7 ci-dessous propose une structuration des techniques d'acquisition de données propre à notre usage (à l'échelle du laboratoire MAP) et qui servira de base pour la documentation des activités de relevés numériques au sein de nos projets de recherches. Celle-ci vise à combler les lacunes de classification entrevues précédemment concernant les techniques d'imagerie utilisant des capteurs passifs.

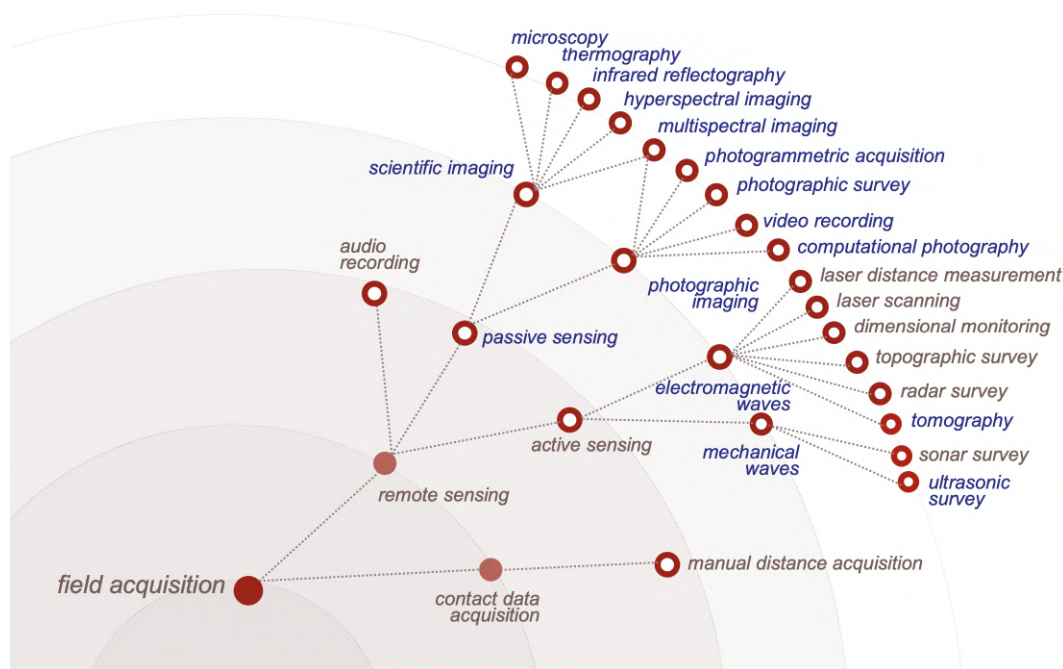


FIGURE II.7 – Proposition de classification des techniques au sein de la roue d'activités du SI MEMORIA (en bleu les éléments ajoutés ou modifiés et restants à implémenter).

13. id est. d'une invasion pouvant altérer, modifier ou détruire l'intégrité de l'échantillon au niveau cellulaire.

14. p. ex. la thermographie dite active qui nécessite l'excitation d'une surface par une source d'énergie (chaleur) ou la photographie UV qui expose des matériaux qui sont sensibles à ce type de rayonnements.

2.2.1.3 Les avancées en Modélisations basée Image × Laser

Concernant la numérisation 3D, il faut prendre pour acquis le rapport dichotomique et complémentaire entre les MBI et MBL très largement discuté, de façon récurrente (voire redondante) dans la littérature au fil des décennies [Baltsavias, 1999, Guarnieri et al., 2006, Mengiste et al., 2022, Verykokou and Ioannidis, 2023]. Il convient plutôt de considérer cet épiphénomène comme un constat de l'ancrage de la multimodalité au sein des pratiques afin de la mettre en perspective avec l'évolution constante et rapide des technologies de numérisations. Les MBI, dont la photogrammétrie, semblent prédominantes vis-à-vis de la lasergrammétrie qui souffre d'un manque de flexibilité, d'un coût plus élevé et d'une technicité plus importante dans leur manipulation [Georgopoulos and Stathopoulou, 2017]. Ce rapport de force entre laser et photo tend à s'équilibrer, de nos jours l'évolution technologique se dirige vers l'hybridation des instruments. En effet, les solutions à l'état de l'art sont des capteurs dits intégrés [Briard et al., 2023], dans le sens où les technologies combinent nativement plusieurs capteurs. Deux exemples montrent le rapport symétrique de cette hybridation : dans un sens, par l'intégration de solution de stéréophotogrammétrie embarquée au sein d'instruments télémétriques [Ospina-Bohórquez et al., 2023], dans l'autre sens, par le couplage de module de microcaméra à temps de vol dans des appareils mobiles [Catharia et al., 2023]. Ces deux exemples témoignent du terrain gagné par la multimodalité. Les avancées technologiques en matière de miniaturisation des capteurs et des composants électroniques permettent l'intégration de modules de capture et de traitement au sein des instruments de relevé faisant poindre de nouvelles perspectives multimodales.

Portabilité et flexibilité

Cela induit un développement de l'ultra-portabilité notamment vis-à-vis des applications dédiées aux appareils mobiles (p. ex. smartphones, tablettes) [Barbero-García et al., 2018, Teppati Losè et al., 2022]. Concernant la MBI on observe un virage vers les dispositifs immersifs inhérent au développement de Metavers, comme en témoigne l'usage croissant de caméras omnidirectionnelles destinées aux Réalités Étendues (Caméras dites 360°). La littérature abonde en travaux qui exploitent ce type d'appareils [Barazzetti et al., 2018, Gottardi and Guerra, 2018, Pepe et al., 2022, Masciotta et al., 2023] ou qui les intègrent au sein de systèmes multi-caméras [Teppati Losè et al., 2018]. Ces recherches dénotent de l'évolution et l'assimilation rapide de ces dispositifs vers des acquisitions multimodales. Par extension, cela témoigne d'un tournant vers l'ultra-flexibilité de l'acquisition de données 3D par la combinaison de capteurs.

Vélocité et instantanéité

La vélocité n'est pas en reste et on s'oriente vers le développement de systèmes et outils en temps-réel. La reconstruction 3D par photogrammétrie quasi instantanée, anticipée par [Gruen, 1988, Gruen, 1998] a été présentée par NVIDIA en 2017 (cf. [Photogrammetry Visualizer]¹⁵). L'émergence de telles méthodes combinées aux techniques d'odométrie issues du domaine de la robotique (de type SLAM ou LiDAR)¹⁶ sont à ce jour à un stade avancé et crédible pour aboutir à une quasi-instantanéité de la numérisation [Menna et al., 2022]. C'est généralement par ce type d'approche combinant plusieurs familles de capteurs (passifs et actifs) semblables aux blocs rigides photogrammétriques (couple stéréo ou multistéréo) que sont développées les méthodes d'assistance à l'acquisition. Ceci est devenu le domaine des algorithmes dits de *Next-Best View planning* basés sur l'analyse de réseau de connectivité [Jia and Lichti, 2018] et de reconnaissance de la scène 3D à des fins de complétion [Border et al., 2018] ou d'amélioration [Morreale et al., 2019]. Ces outils permettent une reconnaissance de la scène, couplée à un positionnement plus ou moins précis des zones d'acquisitions. Leurs avancées permettent en outre d'envisager des acquisitions pré-contrôlées [Fan et al., 2016], entièrement autonomes [González-de Santos et al., 2018], voire embarquées [4]. L'ensemble de ces technologies et leur hybridation auront certainement un impact sur les stratégies multimodales de demain.

2.2.2 Les protocoles d'acquisition

Si la sophistication avancée des méthodes d'acquisitions se poursuit comme discuté ci-dessus, il convient d'envisager plusieurs effets de bord. La numérisation 2D/3D repose de nos jours en quasi-intégralité sur des méthodes « automatiques » telles que définies dans cet article [Lo Buglio and De Luca, 2011]. Cette étude révèle que l'automatisation, en l'occurrence du processus de modélisation géométrique, va de pair avec une dévaluation de son apport cognitif. En effet, les capacités de relevés exponentielles permises par les instruments actuels, a conduit à un appauvrissement de la remise en question des protocoles d'acquisitions. Ceci est évidemment corollaire à l'accroissement des capacités de calculs (détaillée ci-après section 2.3.2), faisant que l'on assiste à une vulgarisation progressive du mode opératoire (autant pour l'acquisition et le traitement des données). Cela conduit à un risque de démesure ou d'application déraisonnable des moyens de numérisation.

15. Prémices des champs de radiance neuronaux dits NeRF (Neural Radiance Field) .

16. Respectivement Simultaneous Localization And Mapping et Light Detection And Ranging.

2.2.2.1 Automatisation VS savoir-faire

Dans cette quête de la numérisation dite massive [Malik and Guidi, 2018], [Bianchini and Russo, 2018], De Luca et Lo Buglio [De Luca and Lo Buglio, 2014] mettent en interrelations trois notions ; la *complexité*, la *multiplicité* et l'*intelligibilité*. Ce constat est toujours valable de nos jours, pis le volume s'accroît et la nature des données collectées se diversifie. Cette surcharge des données se doit d'être (re)discutée et mise en perspective au regard de la multimodalité. En complément on observe une désuétude progressive des publications qui formalisent ou questionnent d'un point de vue méthodologique la phase de collecte pourtant primordiale [Roncella et al., 2012], [Alsadik et al., 2012], [Wenzel et al., 2013], [Nocerino et al., 2014]. Le cas de la photogrammétrie fait office d'exception par quelques travaux sporadiques saisissant cette question des protocoles d'acquisitions de façon analytique [Nony et al., 2012], [Martin-Beaumont et al., 2013] ou synthétique [Barsanti et al., 2014]. Depuis les règles « 3X3 » du CIPA actualisées en 1994 [Waldhäusl and Ogleby, 1994], un ensemble de préconisations sont néanmoins reprises dans la littérature scientifique. Elles peuvent être focalisées sur un ensemble de techniques [Remondino and El-Hakim, 2006], sur des applications particulières [Mallison and Wings, 2014] ou problématiques spécifiques [Nicolae et al., 2014], [Antinozzi and Fiorillo, 2022]. D'autres travaux incluent un plus vaste panel de techniques [Remondino and Stylianidis, 2016], [Georgopoulos, 2018]. De nos jours, le savoir-faire relatif à la phase d'acquisition est affaire d'expérience (et de formation) ou formalisées parfois de façons inégales au sein de guides de bonnes pratiques édictés par diverses communautés (Historic England, Cultural Heritage Imaging, Archaeology Data Service, FADGI, Charisma, etc.). Récemment, l'adaptation méthodologique des protocoles d'acquisitions a fait l'objet de quelques travaux de thèse pour l'application à des problématiques archéologiques [Samaan, 2016] ou plus globalement au relevé du patrimoine matériel [Alsadik, 2014], [Chatzifoti, 2016]. Cependant, si la photogrammétrie et la lasergrammétrie montrent un certain essoufflement sur ces questionnements, une autre méthode à le vent en poupe. La *Réflectance par Transformation d'Images* (RTI) bénéficie d'une littérature plus abondante sur la phase d'acquisition [Ciortan et al., 2016], [Pintus et al., 2016], [Giachetti et al., 2017], [Siatou et al., 2022].

Modus operandi multimodal

Il est possible d'observer par le biais des travaux cités une spécification des protocoles d'acquisitions relatives à des techniques, selon des typologies d'objets ou des contextes d'études. Aucun ne s'adresse spécifiquement aux approches multimodales alors qu'elles comptabilisent, aujourd'hui, une majorité des applications. La notion de mise en coopéra-

tion, en tant que moteur de la multimodalité, semble délaissée sur le plan du relevé. Elle semble se heurter à des limites méthodologiques pour qui pourraient se compenser par d'autres approches approfondies dès le sous-chapitre suivant.

2.2.3 L'imagerie multimodale

Les composantes multimodales de l'imagerie en SP sont au cœur de nombreuses initiatives européennes récentes (COST-COSCH [Bentkowska-Kafel and MacDonald, 2017], SCAN4RECO [Dimitriou et al., 2016], ITN-CHANGE [Degriigny et al., 2020]). Elles n'en constituent pas un objectif, mais bel et bien un point de départ. Les finalités s'orientent quant à elle vers la création d'un outil décisionnel pour guider le choix des modalités à mettre en œuvre [Karmacharya et al., 2018, Maietti et al., 2018]. On verra ultérieurement que ce genre de système se heurte à de nombreuses difficultés faisant qu'aucune de ces solutions n'a encore été délivrée en phase opérationnelle. En lieu et place d'approches stratégiques, l'imagerie multimodale se déploie par le biais de différents aspects introduits auparavant (cf. section 1.2) faisant l'objet de travaux de recherche dédiés aux contextes : multi-capteurs [Adamopoulos et al., 2017, Erenoglu et al., 2017], multi-échelles [Spanò et al., 2018, Vurpillot et al., 2019], multispectral [Godding et al., 1993, Uueni and Hiiop, 2017, Hedeard et al., 2019, Mathys et al., 2019], multi-temporels [Peteler et al., 2015, Rodríguez-Gonzálvez et al., 2018] et multi-acteurs [Nocerino et al., 2017]. Au sein de ces travaux, la photogrammétrie est une base solide pour construire des approches multimodales, notamment multibandes [Van der Perre et al., 2016, Nocerino et al., 2018, Grifoni et al., 2018, Rahrig et al., 2023]. La multimodalité se compose aussi avec d'autres sources d'imagerie, [Adamopoulos and Rinaudo, 2019, Adamopoulos and Rinaudo, 2021] y compris non visuelles [Bianchi et al., 2018, Vu et al., 2018]. À noter que d'autres travaux seront référencés et discutés au fil du document. Les MBR apparaissent de façon générale comme des méthodes prédisposées à la fusion de données multimodales [Hess et al., 2015]. C'est du moins ce que révèlent les travaux cités dans cette section, dans lesquels la photogrammétrie se démarque comme une technique à la fois résiliente et versatile dans différents contextes multimodaux. Elle se positionne en parfaite articulation avec d'autres types d'imagerie (de la 3D à la 1D). L'apport de la photogrammétrie est à mettre en perspective avec d'autres paradigmes de spatialisation qui s'apparentent à des Systèmes d'Information Géographique (SIG) [Wolf et al., 2014, Gaiani et al., 2015] ou des systèmes de visualisation spatio-temporelle avancés [Vurpillot et al., 2019, Christophe and Brédif, 2019] qui seront présentés au fil du chapitre.

2.2.3.1 Mono et bimodalité

En science du patrimoine, l'instrumentation s'apparente à la conception, l'adaptation, l'automatisation et à l'optimisation matérielle des divers instruments mobilisés pour le relevé. Pour la numérisation 2D/3D, on retrouve parmi ces systèmes d'assistance à l'acquisition, des solutions mono-instrumentales [Gaiani et al., 2015], tels que les tables tournantes photogrammétriques [Gattet et al., 2015, Menna et al., 2017] et les dômes RTI [Kinsman, 2016, MacDonald et al., 2016, Porter, Samantha Thi, 2016]. Dès lors qu'il convient de combiner les sources d'acquisitions, la voie instrumentale est généralement le premier moyen déployé pour favoriser la fusion des capteurs. La télédétection dite multi-capteurs couvre largement ce sujet. Le cas développé dans ce travail (cf. section 5.2 p.153) est celui de l'instrumentation mixte photogrammétrie et RTI mobilisant deux paradigmes de relevés différents [Cantó et al., 2022]. L'un multi-vues (selon un éclairage fixe) et l'autre multi-lumières (selon une position fixe), permettent de combiner la modélisation de la géométrie et de l'apparence [Tetzlaff and Meyer, 2016]. La divergence des contraintes photogrammétriques et photométriques est telle que ce verrou scientifique perdure depuis les premières expérimentations de Marc Levoy en 1996¹⁷. Aucun dispositif *ad hoc* récent [Kohler et al., 2013, Gattet, 2017] n'a abouti à une technologie assez mature au-delà des murs de son laboratoire d'incubation. L'autre élément saillant qui ressort des exemples cités jusqu'ici concerne la prédominance de la contrainte d'échelle, ces dispositifs ne permettant la numérisation que d'objets patrimoniaux mobiliers (avec des limites fortes quant à leurs dimensions).

Les vecteurs aériens

Pour réduire cette contrainte d'échelle, il faut nommer les véhicules aériens sans pilote généralement indiqués pour le relevé d'objets patrimoniaux immobiliers. Les drones (de l'anglais « unmanned aerial vehicles » ou UAV), se sont naturellement installés comme un vecteur pour l'automatisation du relevé de plusieurs techniques. Ses applications concernent aussi bien la lasergrammétrie [Krátký et al., 2021] que la photogrammétrie [4] ou encore l'Imagerie par Transformation de Réflectance [Krátký et al., 2020]. Ils peuvent aussi servir des approches multimodales (cf. Fig. II.8 a1-3). En effet, de nombreuses solutions proposent des combinaisons de la photogrammétrie avec capteurs actifs (Tof ou LiDAR), de la thermographie infrarouge [Van Dongen et al., 2022] ou de l'imagerie multispectrale [Erenoglu et al., 2017].

17. Voir Stanford Spherical Gantry à l'adresse : https://graphics.stanford.edu/projects/gantry/?fbclid=IwAR2WNxRFGLsfGC6L8HPwFg2mdcICJAuvfu2FwpMqXGS_2kwmQqL6qHk7U5I

2.2.3.2 L'instrumentation multimodale

De nombreuses applications de l'imagerie multimodale puisent leur source dans les capacités des instruments [Webb et al., 2018] ou des systèmes d'instruments [Cosentino, 2015] qu'elles mobilisent. En reprenant pour exemple la rencontre de la modélisation de la géométrie et avec celle de l'apparence, on s'aperçoit que ce défi est abordé par le prisme de l'instrumentation, voire de la robotisation [Chane et al., 2013b, Crombez et al., 2018, Luxman et al., 2022] (allant de pair avec l'automatisation discutée en amont). La photogrammétrie semble une technique propice aux développements de dispositif d'acquisitions multimodaux [Karaszewski et al., 2013, Hastedt et al., 2018, Ramm et al., 2022, Menna et al., 2022]. C'est avec cet objectif de dépassement des limites de la mono-modalité, que le Fraunhofer a initié, réalisé et continu aujourd'hui d'étoffer les capacités des dispositifs de numérisation du CultLab3D [Santos et al., 2020]. L'ensemble de ces dispositifs se maintient en développement de nos jours, malgré la dépendance des exemples cités dans cette section à des catégories ou corpus d'objet difficilement extensible¹⁸. De ce fait, il serait possible d'aborder et de proposer la définition et le prototypage de dispositifs instrumentaux de numérisation multimodale comme une problématique de recherche en soi.

2.2.4 Bilan des protocoles d'acquisition et de spatialisation

Cette lecture des approches actuelles relatives au relevé et au référencement spatial des capteurs ou sources d'imagerie a permis de faire émerger des éléments saillants, pour l'introduction et la gestion des pratiques multimodales. Bien que cette étude soit restreinte ou plutôt focalisée sur l'intérêt de la MBI et des méthodes compatibles avec une articulation photogrammétrique, au fil du document, la discussion sera élargie vers les MBR 2D et 3D. Pour autant, la démultiplication des modalités d'imageries mobilisées *in situ* s'accompagne d'une surcharge de données à traiter en laboratoire. La tension et la pression qui s'exercent sur les flux de production peuvent, à défaut de se doter d'approches plus raisonnées et stratégiques dans la gestion des données, avoir un impact négatif sur la maîtrise de la qualité des ressources. Pour ces raisons, il est essentiel d'orienter les nouvelles pratiques vers des enjeux relatifs à la fusion ou à l'enrichissement de données.

18. Exemple : <https://rigsters.com/arago/>

2.2. PROTOCOLES, INSTRUMENTS ET OUTILS D'ACQUISITION ET DE SPATIALISATION D'IMAGERIE PATRIMONIALE

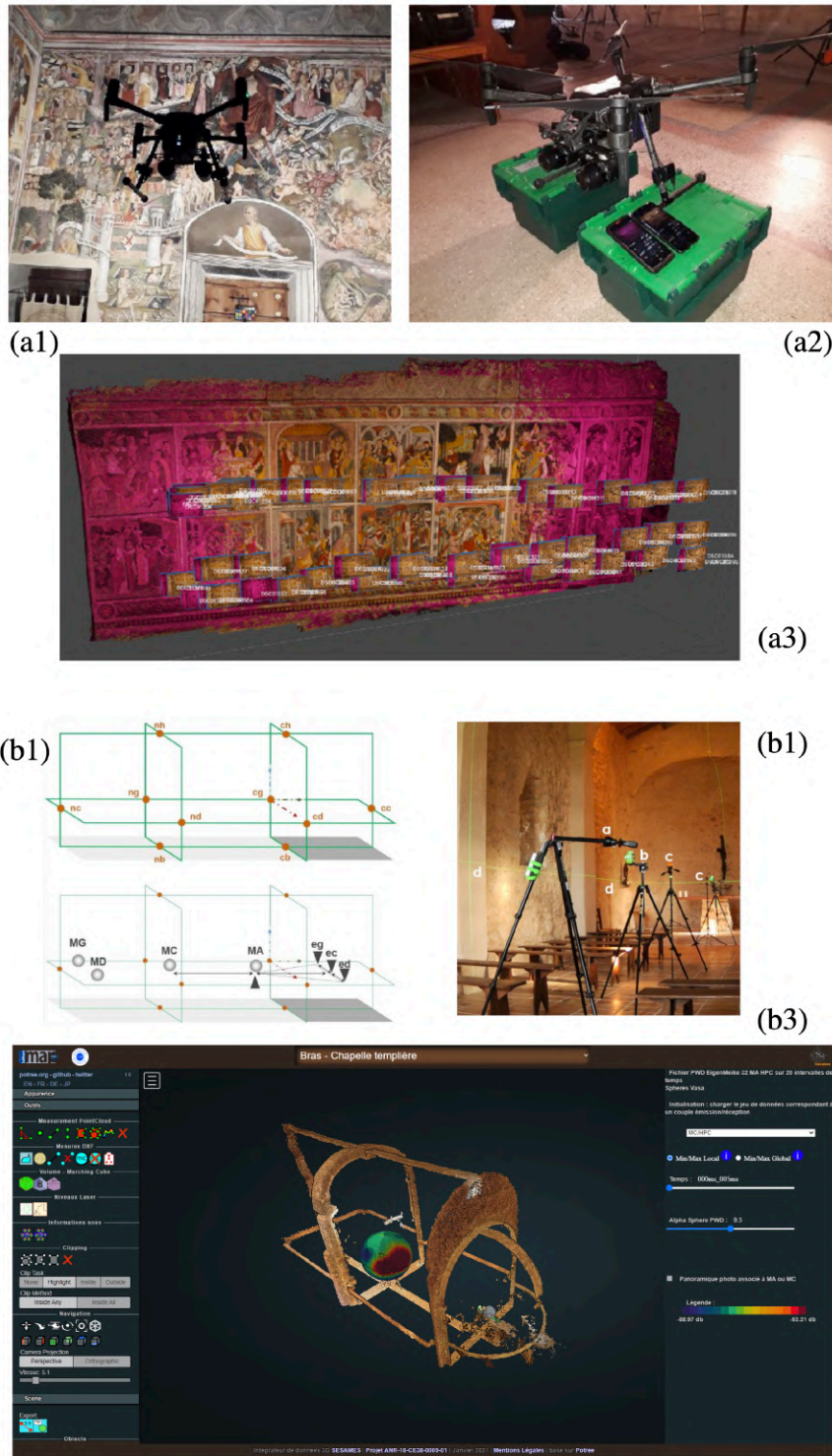


FIGURE II.8 – (a) Protocole d'acquisition VISIR embarqué dit PHORYAVER (b) Protocole d'acquisition multimodal spatio-acoustique dit SESAMES.

2.3 PROCÉDURES DE TRAITEMENT ET DE FUSION DONNÉES SPATIALISÉES

La multimodalité induit le recalage des capteurs et des données afférentes au sein d'un référentiel spatial commun afin de rendre possible leur fusion. Cette mise en cohérence des données est un élément essentiel et peut être abordée de diverses façons qui font l'objet de cette section. De nos jours, certaines méthodes font partie intégrante de la boîte à outils concernant le traitement de données 2D et/ou 3D. Sans revenir sur les contre effets de l'automatisation [Lo Buglio and De Luca, 2011], les outils actuels permettent de traiter une masse croissante de données dont le défi réside aujourd'hui à la mise en cohérence spatiale de sources de documentation diverses. La revue des méthodes et des outils proposés dans cette section aura pour objectif de mieux situer leurs apports afin de guider leurs usages pour des stratégies de recalage puis de fusion multimodale. Malgré les nombreuses méthodes actuellement disponibles pour mettre en cohérence deux ou plusieurs sources dans un référentiel spatio-temporel commun, il semble subsister une lacune pour exploiter ou simplement rendre exploitable par des approches véritablement cumulatives. On distinguera la superposition de deux sources par recalage au sein d'une première section (cf. 2.3.1 p.50), qui ne peut s'apparenter à la fusion de données telle que définie dans la section (cf. 2.3.3.1 p.60). Entre-temps, la méthode choisie pour faciliter la transition de l'une à l'autre sera détaillée par le biais des procédures avancées de traitements photogrammétriques (cf. 2.3.2 p.57).

2.3.1 Les procédures de recalage de données

Les résultats de spatialisation des capteurs et des données collectées interrogent intrinsèquement, d'une part, les flux de traitements de données issues de leurs techniques respectives (MBI ou MBL) et d'autre part les différentes méthodes de recalage 3D et 2D. On prendra comme acquis les différences de traitement de données propres à chaque type de capteur — permettant une prise de mesure directe, si actif — ou passif, pour lequel les attributs spatiaux des données sont la résultante de procédés plus ou moins complexes. La définition retenue du recalage est celle provenant de l'imagerie médicale¹⁹, à savoir l'optimisation de la mise en correspondance spatiale par transformation de deux (ou plusieurs) sources d'imagerie représentée par la formule suivante :

19. Source : Isabelle Bloch. Recalage et fusion d'images médicales. <https://perso.telecom-paristech.fr/bloch/P6Image/recalageImMed.pdf>. Dernière consultation le 24 mai 2023.

$$\min_{t \in T} f(I1, t(I2))$$

dans laquelle,

- $I1$ et $I2$ images à recaler (ou informations extraites de ces images)
- t : transformation
- T : ensemble des transformations possibles / admissibles
- f : fonction représentant la distance (ou par équivoque la similarité $\Rightarrow \max f$).

La qualité du recalage peut varier en fonction la nature de la transformation (t et son domaine de définition T)²⁰, les attributs utilisés (sur lesquels portent t et f), le critère de similarité f ou les méthodes d'optimisation utilisées. Les caractéristiques peuvent être extrinsèques, comme c'est le cas des marqueurs ou des calibrations provenant du dispositif d'acquisition, ou intrinsèques, c'est-à-dire contenues ou extraites de l'image (points, coins, intensités, gradients, arêtes, régions, etc.). Il existe des modèles locaux, mais les modèles globaux (s'appliquant à la totalité de la source sans la découper en différentes parties) sont plus courants dans nos applications. Ce qui est entendu par recalage de données consiste donc en l'application de méthodes de calculs (transformations d'ordre géométrique) permettant le référencement des données 3D ou 2D, dans un système de coordonnées commun, en utilisant la relation projective de caractéristiques communes (2D/2D ; 2D/3D-3D/2D ; 3D/3D). Parmi les différentes façons d'aborder le problème du recalage, on distingue trois types d'approches, uniquement parmi celles utilisées dans cette étude ;

- i. les solutions matérielles basées sur le recalage des capteurs,
- ii. les solutions intermédiaires qui permettent de recaler les données et les capteurs par le support de marqueurs ou cibles et enfin,
- iii. les solutions logicielles basées sur le recalage des données entre elles.

20. On distingue les transformations rigides, affines, projectives, mais elles seront généralement non déformables dans nos applications.

i) Le recalage guidé par le matériel

Le recalage des capteurs et par extension de leurs données peut être assisté par le biais de différentes techniques permettant d'intégrer ou de guider le repositionnement spatio-temporel des données. On distingue les méthodes basées sur des capteurs intégrés ou couplés aux dispositifs d'acquisitions, dont le plus fréquent est le GPS. Cependant, ses limites en termes de positionnement fin imposent de s'orienter vers l'Ultra Large Bande (ULB) [Masiero et al., 2018a, Masiero et al., 2018b], notamment en intérieur [Khoury and Kamat, 2009], dont l'utilisation est généralement conjointe à des capteurs d'Unités de Mesure Inertielle (IMU) [Aron et al., 2006] ou géomagnétique pour définir l'orientation spatiale. Cette méthode est considérée comme autonome contrairement à celle basée sur la détection de cibles. Cette approche consiste donc à intégrer des repères et des caractéristiques spatiales, de façon plus ou moins synchrone, à la collecte des données. Bien que la précision de ce recalage soit généralement approximative, elles sont par conséquent très intéressantes en prérecalage.

ii) Le recalage intermédiaire entre les solutions matérielles et logicielles

L'utilisation de caractéristiques extrinsèques à la source d'imagerie, notamment le recours aux marqueurs (optiques ou fiduciaires) nécessite une action/interaction sur la scène ou sur l'objet, mais aussi l'intégration d'une étape de détection basée sur du traitement d'images. Il existe là aussi des techniques s'appliquant dans des contextes 4D/3D ou 3D/2D. On peut tout d'abord mentionner les systèmes de *tracking* ou de capture du mouvement (*Id Est Motion-Capture*) de nos jours largement utilisés dans le domaine la Vision par Ordinateur [Lepetit et al., 2005] et plus précisément dans leurs applications pour la robotique [Smith and Singh, 2006] ou les environnements virtuels [Jankowski and Hachet, 2013] avec des offres uniquement commerciales et très concurrentielles (telles que *Vicon*, *OptiTrack*, *PhaseSpace...*). Ces systèmes sont basés sur la détection de cibles sphériques dites SMR (*Id est Spherically Mounted Retroreflector*) elles-mêmes dérivées du principe des réflecteurs angulaires (*Id est Corner Cube Reflector*) issus des domaines de la métrologie et de la photonique. À noter que l'utilisation de cibles ou de marqueurs est un moyen privilégié pour le recalage spatial de nombreuses techniques utilisées dans le domaine des SP, notamment pour la thermographie infrarouge [Usamentiaga et al., 2014] ou l'imagerie multi-spectrale [Chane et al., 2013a]. L'utilisation de marqueurs dits optiques est intrinsèquement liée à la pratique de la photogrammétrie dont les méthodes de calibration autonome (*Id est Self-Calibration*) sont plus récentes [Remondino and Fraser, 2006, Stamatopoulos and Fraser, 2014]. Les marqueurs « photogrammétriques » permettant

2.3. PROCÉDURES DE TRAITEMENT ET DE FUSION DONNÉES SPATIALISÉES

d’obtenir des points d’appui métriques sont à ce jour intégrés aux méthodes de *SfM* [DeGol et al., 2018] et leur importance d’un point de vue métrologique est indiscutable [Nocerino et al., 2014] au-delà de l’optimisation du réseau de connectivité des poses [Fraser, 1984]. L’utilisation de cibles codées [Ahn and Schultes, 1997, Calvet et al., 2016] s’est répandue grâce à leur robustesse. Elles se sont imposées au fil du temps comme solution pour les méthodes de recalage, de localisation et de cartographie simultanées (dites SLAM). Ces approches intermédiaires peuvent se combiner avec celles du précédent point, notamment dans le cas SLAM-visuel et ses déclinaisons [Taketomi et al., 2017, Menna et al., 2022] qui ont déjà été abordées infra en sous-section 2.2.1.3. Elle est particulièrement intéressante pour créer de façon artificielle des repères communs à différentes modalités. Elles ne sont, par contre, pas résilientes au relevé diachronique et imposent une intervention sur ou autour de la zone de relevé, ce qui est parfois impossible en cas réel.

iii) Le recalage logiciel basé sur les données

Le dernier type d’approche est donc celui du recalage basé sur les données elles-mêmes. Si elles ne nécessitent pas de supports externes (capteurs, marqueurs, etc.), elles requièrent des modèles tridimensionnels et/ou d’images bidimensionnelles avec un certain seuil de comparabilité. Ces approches sont plus couramment utilisées dans notre domaine, car elles offrent plus de flexibilité et d’adaptation dans leurs usages. Elles seront par conséquent développées dans les sous-sections suivantes. On observe cependant une distinction notable — par ailleurs valable pour les approches ci-dessus — entre deux familles de méthodes. Un cas simple ou mono-modal est par exemple celui du recalage *image à image* d’un couple stéréo-photogrammétrique dans le domaine du visible ou le recalage *nuage à nuage* de deux stations lasergrammétriques terrestres d’une même séquence de relevé. L’assimilation de blocs multimodaux est plus complexe, car elle fait rentrer en ligne de compte la variation simultanée de plusieurs paramètres (capteurs, résolutions, temporalités, sauts d’échelle, dérives radio-colorimétriques). Ce dernier cas relève d’un défi autrement stimulant et concerne plus particulièrement cette étude, car il reflète les pratiques et les besoins actuels.

2.3.1.1 Approches 2D/2D

Le recalage 2D/2D est assuré par la détection et la mise en correspondance de caractéristiques communes à une paire ou à un ensemble d’images. Il existe de nombreuses méthodes issues du traitement d’image numérique [Zitova and Flusser, 2003] dont plusieurs sont déjà appliquées en numérisation 3D. La méthode de l’Information Mutuelle (*Id est Mutual Information*) permet d’extraire une mesure de similarité provenant des sciences

2.3. PROCÉDURES DE TRAITEMENT ET DE FUSION DONNÉES SPATIALISÉES

statistiques pour aligner les images [Viola and Wells III, 1997, Caron et al., 2012]. À noter que la *MI* est aussi utilisé, et avec des résultats probants pour le recalage 2D/3D [Palma et al., 2010]. Une implémentation récente [Caron et al., 2014] lui permet de substituer aux traditionnelles méthodes basées sur la détection de zones d'intérêt (*features detection*) parmi les algorithmes *SIFT*, *A-SIFT*, *PCA-SIFT*, *SURF*, *FAST*, *ORB*, *BRIEF*, *BRISK*, *FREAK*, *A-KAZE* pour l'appariement et l'estimation de poses photogrammétriques [Apollonio et al., 2014]. Certaines méthodes développées récemment permettent de dépasser les limites de ces descripteurs classiques ; le MSD (*Id Est Maximal Self-Dissimilarities*) permet notamment une extension dans le domaine spectral [Tombari and Di Stefano, 2014] ; la méthode *SIRF* [Chen et al., 2015] propose un format adapté à la fusion de données ; ou encore *POP-SIFT* [Griwodz et al., 2018] propose une implémentation GPU du robuste algorithme de Lowe pour des applications en temps-réel.

Méthodes traditionnelles VS méthodes basées sur l'apprentissage machine

Plus récemment, ce problème connaît un regain d'intérêt avec l'essor des réseaux de neurones profonds qui se révèlent particulièrement efficaces pour cette tâche. Les algorithmes ci-dessus sont désormais catégorisés en tant que méthodes traditionnelles ou artisanales par opposition à celles basées sur l'apprentissage machine [Stathopoulou and Remondino, 2023]²¹. Cette publication compare l'algorithme le plus usité, *SIFT*, à ses concurrents survitaminés à l'intelligence artificielle (*HP*, *DISK*, *LoFTR*, *SuperGlue*, *LightGlue*, etc). Les méthodes traditionnelles ne sont pas obsolètes, même si elles peuvent être surclassées dans certains cas marginaux pour nos applications (p. ex. mise en correspondance de photographies de jour et de nuit). Une initiative telle que PhotoMatch [Ruiz de Oña et al., 2023] qui propose un outil Open Source pour la mise en correspondance d'images multi-vues et multimodales basées sur les caractéristiques intrinsèques semble plus adaptée. Bien qu'elle fut publiée trop tardivement pour être incluse et mise à l'essai dans cette étude, PhotoMatch représente une piste de premier choix pour des travaux futurs. Cet apport récent de l'intelligence artificielle pour le recalage de données ne concernent pas seulement les approches 2D. D'autres applications seront citées ultérieurement lors d'un paragraphe dédié aux méthodes d'apprentissage automatique (p. 83).

21. Le renouveau de compétition scientifique portant spécifiquement sur ce défi témoigne de cet engouement : (https://www.kaggle.com/competitions/image-matching-challenge-2023/overview?fbclid=IwAR11zsGVUjYzuR_forXDa3VIPI_fyNc0xaVSPXFvHtMpQn2oJcErrPjKzgw)

2.3.1.2 Approches 3D/3D

Il est possible d'assimiler la problématique du recalage de données 3D/3D aux travaux sur le recalage de cartes de profondeurs permettant *in fine* la reconstruction d'un modèle 3D [Chen and Medioni, 1992]. L'extension de la méthode au cas des nuages de points est résolue par un algorithme de point proximal itératif²² (*Id est Iterative Closest Point* ou ICP) [Besl and McKay, 1992] permettant de calculer la transformation affine entre deux ensembles de points par la minimisation de la distance entre un échantillonnage de points de correspondances. Cet algorithme a donné lieu à de nombreuses variantes [Rusinkiewicz and Levoy, 2001] évaluées pour leur résistance au bruit, à la variabilité de densité de points et leur robustesse face aux surfaces quasi planaires [Low, 2004]. D'autres travaux ont plus précisément abordé l'utilisation de l'ICP dans le cadre de la corrélation multi-stéréoscopique [Zhang, 1994] et de leur applicabilité sur les données acquises par numérisation 3D [Pomerleau et al., 2013]. Pour autant, les méthodes basées sur l'ICP, ne sont pas intégralement automatiques, car elles nécessitent une première estimation, même très approximative : positionnement du capteur, hypothèse sur le recouvrement ou précalage manuel. Ce sous-problème est abordé soit par la réduction dimensionnelle, qui consiste soit à utiliser la multiplicité de vues 2D qu'il est possible d'extraire d'un modèle 3D [Huber and Hebert, 2003], soit à exploiter la corrélation sphérique [Makadia et al., 2006]. Une alternative se base sur l'extraction de 4 points coplanaires et congruents [Aiger et al., 2008], par ailleurs implémentée pour la consolidation automatique de station laser [Theiler et al., 2014]. À l'instar de son homologue SIFT, l'algorithme d'ICP n'est pas obsolète malgré ces faiblesses, qui ont pour mérite d'être connues et reconnues. Son utilisation couvrira encore de nos jours la majorité des cas concrets d'utilisation. Il n'y a pas eu besoin, tout du moins lors des expérimentations menées, d'avoir recours à une méthode alternative et/ou plus « sophistiquée ».

2.3.1.3 Approche 2D/3D

À cause du saut dimensionnel entre les types de données, la problématique du recalage 2D/3D semble plus complexe, d'autant plus qu'elle peut être abordée de façon bilatérale ; 2D vers 3D, en ajoutant à l'image une spatialisation dans un espace tridimensionnel ou 3D vers 2D, en réduisant un modèle tridimensionnel dans un plan image. L'approche 3D/2D est principalement utilisée dans le domaine de l'analyse de formes (*Id est Shape Analysis*) pour lequel la sélection des meilleures vues ou des représentations 2D [Dutagaci

22. Aussi appelé principe de recalage itératif basé sur la recherche du point le plus proche dans l'espace.

2.3. PROCÉDURES DE TRAITEMENT ET DE FUSION DONNÉES SPATIALISÉES

[et al., 2010], [Pratikakis et al., 2010] pouvant être extraites d'un modèle 3D est exploitée à des fins de reconnaissance de formes et de classification [Biasotti et al., 2015]. Une partie de ces travaux sont par ailleurs logiquement réinvestis dans les algorithmes de *Next Best-View planning* évoqués dans une sous-section précédente (cf. section 2.3). Une autre partie sera abordée dans la section suivante de l'état de l'art (cf. section 2.4.2.1 p.84), car ces méthodes ont largement exploré les descripteurs morphologiques, géométriques et l'enrichissement sémantique. L'approche inverse, dite 2D/3D, consiste d'une façon générale au référencement spatial d'image au sein d'une scène 3D. Il existe tout d'abord des procédés manuels qui nécessitent la manipulation coordonnée de l'image et d'une scène 3D [De Luca et al., 2010a] afin de satisfaire approximativement la relation homographique. Les procédures semi-automatiques ou automatiques sont quant à elles l'apanage de la photogrammétrie, et plus récemment de la Vision par Ordinateur.

L'aérotriangulation

Il convient de distinguer les méthodes basées uniquement sur la résection spatiale [Shih and Faig, 1988] nécessitant un ensemble de points de contrôles dont les coordonnées 2D et 3D sont connues pour appliquer un calcul de Transformation Linéaire Directe dit *DTL* (*Id est Direct Linear Transformation*) [Abdel-Aziz, 1971]. Cette méthode nommée *Résection Spatiale* en photogrammétrie a été transposée en Vision par Ordinateur en « estimation de pose » [Quan and Lan, 1999] et pour laquelle de nombreuses solutions alternatives au problème dit « P3P » (pour *perspective-3-point*) ont été proposées plus récemment [Zhang and Hu, 2005], [Rieck, 2012], [Ke and Roumeliotis, 2017]. Cette méthode reste globalement efficace pour calculer l'orientation (calibration externe) mais son principal inconvénient réside dans son manque de précision et de robustesse pour la correction ou compensation des paramètres de calibration interne (déformation et distorsion de l'image) [Paiz-Reyes et al., 2020]. Une procédure de recalage 2D/3D complète se doit donc d'intégrer donc une étape de calibration d'image généralement empruntée parmi les méthodes telles *Faugeras-Toscani*, *Zhang*, ou *Tsai* dont il faut adapter l'utilisation en fonction du type de données [Salvi et al., 2002]. La combinaison des calculs de calibration externe et interne s'opère au sein d'un algorithme dit d'*ajustement de faisceaux* (*Bundle-Ajustement*) [Triggs et al., 1999] qui réside sur une minimisation itérative de l'erreur de reprojection appliquée par paires, triplettes ou blocs d'images. Le recalage 2D/3D par traitement photogramétrique a été la méthode favorisée, par sa flexibilité et sa précision relative, dont il semble possible d'en exploiter le potentiel y compris en contexte multimodal.

2.3. PROCÉDURES DE TRAITEMENT ET DE FUSION DONNÉES SPATIALISÉES

Cependant, l'introduction de la multimodalité au sein d'un système photogrammétrique est source d'altération, d'imprécision et d'accroissement de l'incertitude de reconstruction des poses comme de la géométrie²³. Les outils photogrammétriques fortement mobilisés, si ce n'est au centre de cette recherche, font l'objet du prochain paragraphe de cet état de l'art. Sans revenir sur les fondamentaux, les approfondissements nécessaires et le regard critique sont apportés ci-après pour une potentielle utilisation en tant que moyen de spatialisation et de fusion de données multimodales.

2.3.2 Les procédures photogrammétriques

Les outils et les processus de traitements photogrammétriques modernes sont aujourd'hui si bien définis et documentés dans la littérature qu'il paraît inutile de retracer plus en détail l'historique et ses principes fondamentaux. Des articles de synthèse reprennent les diverses approches et variations algorithmiques de cette technique [Remondino et al., 2014], du moins pour des pratiques monomodales.

2.3.2.1 Un problème pour deux communautés

Il est important de noter qu'il subsiste une distinction historique²⁴ entre les méthodes strictement photogrammétriques et celles de *Structure from Motion* (SfM) provenant de la vision par ordinateur [Hartley and Mundy, 1993]. De nos jours, il convient d'envisager leur convergence vers une méthode unique et hybride [Nocerino et al., 2020]. Celle-ci pourrait combiner les bénéfices du contrôle des paramètres photogrammétriques avec la flexibilité des outils de *Structure from Motion*, tel que déjà exposé par certains travaux récents [Aicardi et al., 2018]. On observe à ce titre, une redéfinition des méthodes destinées affiner différentes étapes ou modèles de calculs photogrammétriques [Giang et al., 2017, Calantropio et al., 2018, Wang et al., 2018a]. Les algorithmes de SfM sont quant à eux intéressants pour repousser les limites des approches non structurées (sur base de collections d'images fortement hétérogènes). Celles-ci pourraient être utiles en contexte multimodal, avec le défaut qu'elles n'abordent que la reconstruction dite éparsée, limitant ainsi leur utilisation pour du référencement précis (*in fine* de la fusion de données). L'avantage des méthodes SfM est d'avoir repoussé significativement les limites du traitement incrémental pour l'aérotriangulation [Schönberger and Frahm, 2016] ou la reconstruction dense [Mouragnon et al., 2006] par des approches globale [Moulon et al., 2013], semi-globale [Hirschmuller,

23. Simplement, car la multimodalité apporte un des principaux obstacles de la photogrammétrie, l'hyper-variation des paramètres.

24. Discussion approfondie en section 4.3.3 p. 129.

2.3. PROCÉDURES DE TRAITEMENT ET DE FUSION DONNÉES SPATIALISÉES

[2005], hiérarchique [Toldo et al., 2015] ou multi-étapes [Shah et al., 2014]. Le développement exponentiel de ces méthodes s'illustre parfaitement par leur capacité à résoudre le problème de traitement massif des centaines de milliers [Agarwal et al., 2009] à des centaines de millions d'images [Zhu et al., 2018] en moins d'une décennie.

2.3.2.2 Le monde libre et les boîtes noires

La communauté SfM est indubitablement plus productive ces dernières années, comme en témoigne le nombre des librairies mises à disposition en Open Source ; *VisualSfM* (2011), OpenMVG (2013), Theia et OpenSfM (2015), COLMAP (2016) et dernièrement AliceVision/Meshroom (2018). À noter que leur démultiplication constitue un frein à leur utilisation²⁵. De plus, il est difficile de s'appropriier ces outils dans le temps du fait de leur relative volatilité²⁶. Enfin, leurs performances sont parfois intégrées de façon exclusive au sein de solutions commerciales [Jancosek and Pajdla, 2011, Jancosek and Pajdla, 2014] tels que *Reality Capture*. Les alternatives qui subsistent pour la photogrammétrie souffrent d'un manque d'accessibilité et d'intuitivité qui nuisent à l'expérience de l'utilisateur et donc à leur adoption plus large. Le parfait exemple reste l'initiative méconnue (GRAPHOS) [Gonzalez-Aguilera et al., 2018] qui, malgré la présence d'une interface graphique, d'une accessibilité multiplateforme et de l'intégration interopérable de plusieurs codes sources, n'a pas connu le succès escompté²⁷. Seule une poignée d'irréductibles chercheurs résiste encore et toujours à cette hégémonie des solutions commerciales. Les raisons du choix MicMac [Rupnik et al., 2017] comme l'une des seules alternatives du monde libre, et provenant de la géomatique, seront développées plus bas.

2.3.2.3 Évolutions récentes

Des comparaisons logicielles jalonnent fort heureusement la littérature scientifique. On y trouve des cas d'application génériques [Remondino et al., 2014], des confrontations aux outils libres [Remondino et al., 2012, Caradonna et al., 2018], dédiées à la numérisation massive [Remondino et al., 2017] ou à des contextes d'acquisitions divers [Sona et al., 2014, Jaud et al., 2016]. À noter que la littérature est plus florissante en ce qui concerne la photogrammétrie aérienne par comparaison aux approches terrestres ou rapprochées.

25. Car cela induit des difficultés de suivi et d'intégration de ces avancées différentielles au sein des procédures de traitements de données pour le patrimoine.

26. Exemple de l'algorithme SURE, aujourd'hui exploité commercialement par la société nFrames GmbH

27. C'est aussi un parfait exemple d'un problème sous-jacent, à savoir la difficulté de créer une communauté d'utilisateurs/développeurs pour suivre et maintenir une solution logicielle libre.

2.3. PROCÉDURES DE TRAITEMENT ET DE FUSION DONNÉES SPATIALISÉES

Peu à peu, des corpus de données (cf. ISPRS Benchmarks) pour banc d'évaluation et de comparaison sont rendus publics [Nex et al., 2015, Marelli et al., 2023]. En parallèle des évolutions concernant la photogrammétrie, s'est développée la tendance à l'automatisation du traitement de données [Barazzetti et al., 2009] parallèlement à celle du calcul déporté ou dans le nuage [Grussenmeyer et al., 2002, Nilsson et al., 2007, Heller et al., 2015, Alliez et al., 2017, Nocerino et al., 2017] aussi adopté (et démocratisé) par la plupart des éditeurs de logiciels (AutoDesk, 3DFLOW, CapturingReality, Agisoft). À noter que cela est souvent orchestré par des hébergeurs tiers (Azure, AWS) et/ou rendu accessible par virtualisation. Ces services dits *SaaS*²⁸ (GeoCloud, Altizure, etc.) apportent de graves lacunes sur le plan de la souveraineté des données. De plus, si le fonctionnement en boîte noire des solutions photogrammétriques commerciales est problématique pour garantir une traçabilité et une reproductibilité des résultats d'un point de vue scientifique ; le transfert et/ou l'hébergement sur des serveurs privés devraient être rédhitoires pour la plupart des applications patrimoniales.

2.3.2.4 Du choix de la photogrammétrie par MicMac

En développement continu depuis 2007, le choix s'est porté sur MicMac [Rupnik et al., 2017] en guise de la solution idéale pour transformer les routines photogrammétriques en moteur de spatialisation d'imagerie multimodales. Une présentation plus approfondie est donnée en section 4.3 au cours de laquelle elle sera mise à contribution. La chaîne de traitement classique de la photogrammétrie est constituée de trois étapes fondamentales ; la mise en correspondance des images, la calibration interne et externe, et la corrélation dense. MicMac en offre un fonctionnement alliant finesse et modularité, permettant à l'utilisateur averti de paramétrer avec une grande précision l'ensemble des étapes de calcul. Cela permet et d'optimisation nécessaire à la gestion et l'intégration incrémentale d'éléments « exogènes » induit par la multimodalité. Néanmoins, quelques limites se dressent pour l'utilisation de cette solution réputée exigeante et ne faisant aucun compromis qualitatif [Jaud et al., 2016] sauf à condition d'être en mesure de parfaire toutes les composantes de l'acquisition de données [Toschi et al., 2014]. Ceci est un obstacle majeur du fait que la photogrammétrie multimodale induit des sources de natures et de qualités variables. De plus, elle manque de vélocité pouvant s'avérer un frein au calcul de données complexes et comporte quelques goulets d'étranglement. Au-delà de ces éléments, le laboratoire MAP en possède une expérience solide de longue date et demeure par conséquent un outil de confiance pour y déléguer et y consacrer une partie de nos développements.

28. Software as a Service.

2.3.3 Les procédures de fusion de données

L'ensemble des étapes et des procédures vues précédemment se doivent d'être mises en problématique avec la fusion de données. Contrairement aux domaines de la télédétection ou de l'imagerie médicale qui jouissent d'une littérature plus abondante, les applications et les spécificités de la fusion pour l'imagerie patrimoniale sont encore peu étudiées (cf. Fig. II.9). La difficulté à traiter ce problème s'explique par la grande diversité des objets patrimoniaux, de leurs environnements et des contextes de leur relevé, rendant difficiles, voire impossibles, la mise en place et la reproductibilité de méthodes de fusion automatisée. La fusion de données dans le domaine du patrimoine constitue de fait un défi de taille pour lequel il convient avant tout de définir puis d'étudier les principaux obstacles. Elle sera abordée d'abord plus largement dans le contexte de l'imagerie (cf. section 2.3.3.1 p.60) puis par une lecture critique de la littérature qui traite de ce sujet dans le domaine ciblé (cf. section 2.3.3.2 p.66).

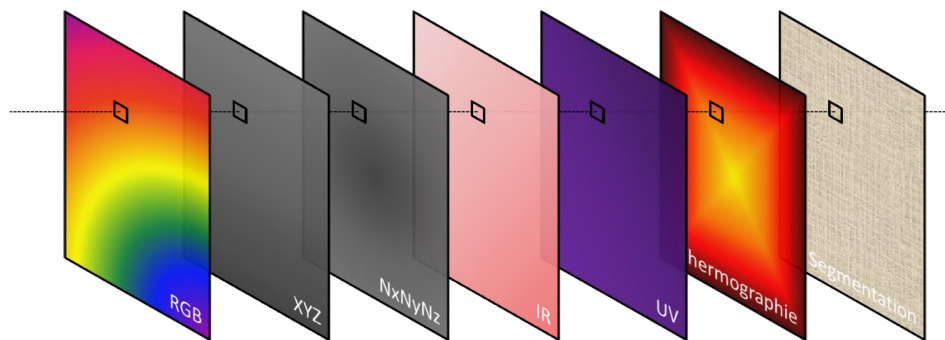


FIGURE II.9 – ,
Représentation schématique de données recalées propice à une fusion de données multimodale, d'après [Manuel, 2016].

2.3.3.1 La fusion dans tous ses états

Malgré les similarités entre plusieurs domaines et le nôtre en termes de technologies, de méthodes et d'objectifs, les procédures de fusion sont fortement contraintes fortement à la nature des données qu'elles traitent et ne peuvent faire l'objet d'approches transversales. De ce fait, la fusion est rarement transposable, y compris au sein d'un même domaine d'application. Elle semble confronter à de nombreuses limites techniques et technologiques notamment induites par le cumul des variabilités multimodales (écart de résolution, différentiel radiométrique, changements spatio-temporels, multiplicité des échelles de représentations ou d'observation).

2.3. PROCÉDURES DE TRAITEMENT ET DE FUSION DONNÉES SPATIALISÉES

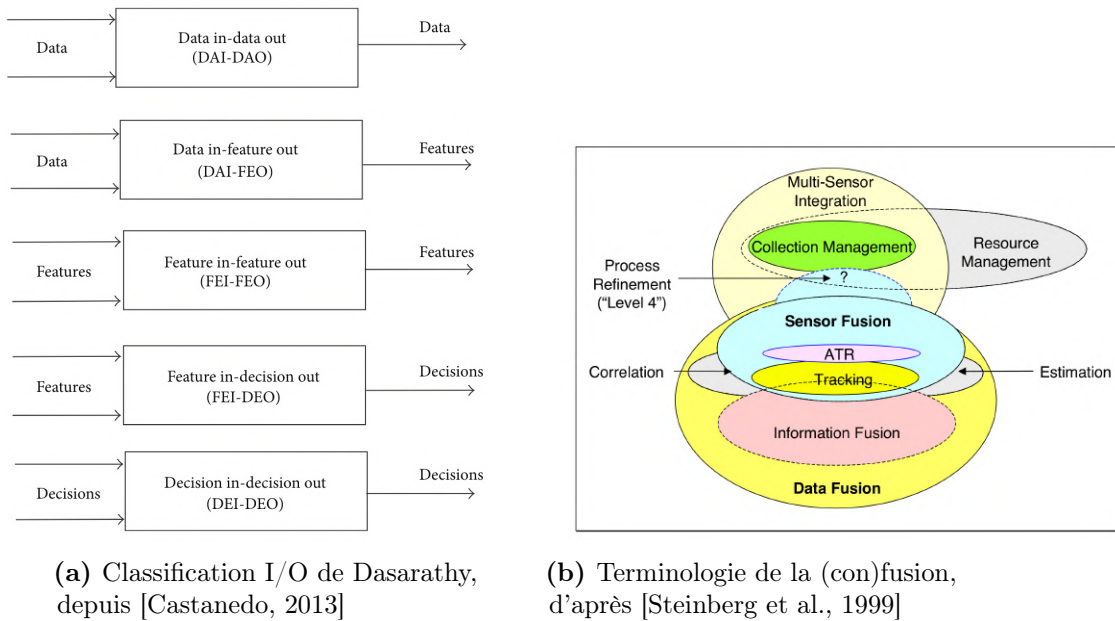


FIGURE II.10 – Complexité du concept de Fusion et de la classification de ses algorithmes.

Définitions

La fusion de données « apparaît dans la littérature dans les années 60 comme un modèle mathématique pour la manipulation de données » [Esteban et al., 2005]. C'est un domaine conjointement étudié dans les sciences de l'ingénieur et des sciences informatiques avec de nombreuses applications dans la robotique, la métrologie, le traitement d'image ou encore l'intelligence artificielle. On distingue tout d'abord les travaux qui se basent sur différents cadres méthodologiques [Castanedo, 2013] pour aborder le processus de fusion, de ceux proposant la construction de modèle de fusion *ad hoc*. Plusieurs classifications coexistent parmi lesquelles celles de Whyte (cf. Fig. II.11a), de Dasarathy ou du JDL Data Fusion Group [Steinberg et al., 1999] bien que ce dernier consortium relate lui-même la (con)fusion terminologique autour de cette notion (cf. Fig. II.10b). Parmi les nombreuses définitions,²⁹ dont celle de l'ISPRS³⁰, il subsiste cependant une ambiguïté de taille entre la fusion de capteurs, de données et d'informations. Dans la suite de ce travail, on mobilisera le concept de *Fusion* sans y attribuer une distinction particulière sur sa destination, retenant ainsi la proposition suivante :

29. Source : <https://net.cs.uni-bonn.de/de/wg/sdf/what-is-it/sdf-definitions/>

30. « La fusion de données constitue un cadre formel dans lequel s'expriment les moyens et techniques permettant l'alliance des données provenant de sources diverses ».

2.3. PROCÉDURES DE TRAITEMENT ET DE FUSION DONNÉES SPATIALISÉES

La fusion de données et/ou d'informations est l'étude des méthodes efficaces pour la transformation de sources variables en représentations utiles afin d'en accroître leurs significations.^[a]

a. D'après [Boström et al., 2007] (p.5) et [Wald, 2002] (p.24).

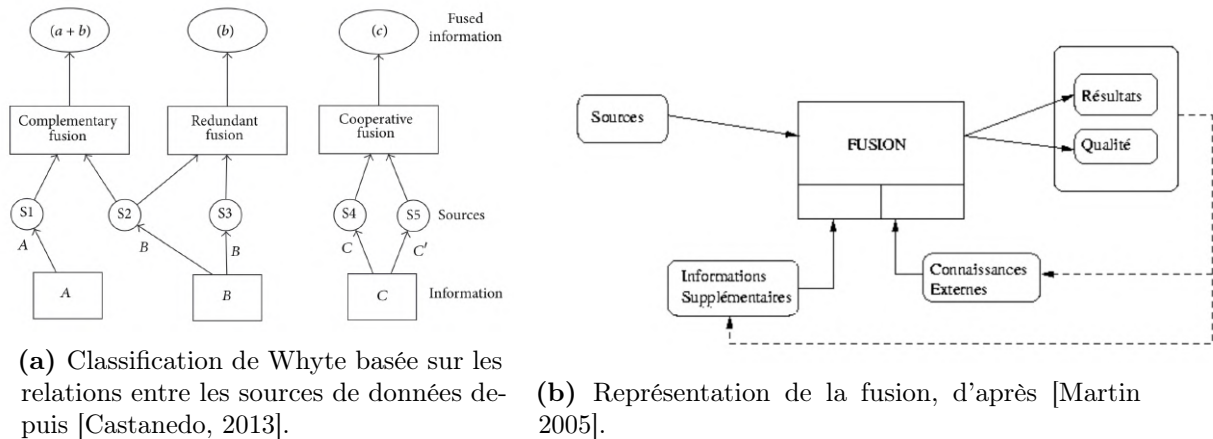


FIGURE II.11 – Classification et représentation de la Fusion au sein d'un système quelconque.

Objectifs et obstacles

Qu'elle se destine aux capteurs, aux données ou autres, la Fusion est cependant une notion convergente sur les objectifs poursuivis. D'après [Martin, 2005], ceux-ci sont plus univoques ; « en effet, il s'agit ici d'améliorer la connaissance du monde observé pour le décrire du mieux possible tel qu'il est. Nous ne cherchons donc pas ici à fusionner [...] pour que le monde devienne tel que nous le souhaitons, ou tel qu'il devrait être »^[31]. Ces propos mettent en exergue le gain ou les relations de la fusion avec des couches sémantiques (cf. Fig. II.11b). On insistera ici sur le lien tenu entre la multimodalité et la fusion de données, car si la fusion de données implique nécessairement des sources multimodales, la relation est réciproque. Comme vu en section 2.1, il y a émergence de sens dans un système multimodal, si et seulement s'il y a une fusion de données ou d'informations. Cette plus-value inhérente à la fusion de données peut avoir trois visées :

- i. la reconnaissance (détection, identification d'informations saillantes),
- ii. l'estimation d'un paramètre obtenu par la combinaison de valeurs issues de différentes sources,
- iii. l'association (par approche combinatoire de *i.* et *ii.*).

31. Source : Martin, A. (2005). La fusion d'informations. Polycopié de cours ENSIETA-Réf, 1484, 117. <http://people.irisa.fr/Arnaud.Martin/Doc/fusion.pdf>. Consulté le 25 mai 2023. (p.9).

2.3. PROCÉDURES DE TRAITEMENT ET DE FUSION DONNÉES SPATIALISÉES

De nombreux aspects des données influencent les processus de fusion (cf. Fig. II.12). On retrouve dans cette étude [Khaleghi et al., 2013], une liste des nombreux obstacles pouvant altérer la valeur ajoutée d'un processus de fusion dont sont repris ci-après ceux rencontrés ou prévisibles en contexte patrimonial :

- l'imperfection des données
- les valeurs aberrantes ou erronées
- les données conflictuelles
- la modalité des données
- le degré de corrélation des données
- l'alignement et le recalage des données
- la dimensionnalité des données
- le degré d'association des données
- leur processus de traitement
- leur durée d'exploitation
- les phénomènes statiques vs dynamiques

Les métriques de la fusion

L'auteur propose une catégorisation des algorithmes de fusion basée sur la formulation de deux indicateurs permettant d'évaluer un processus de fusion. L'évaluation de la performance d'une fusion de données est déterminée par deux facteurs en amont et en aval de son processus. En entrée, la qualité des intrants est estimée ou calculée, par un Degré de Confiance (DoC)³². Il caractérise la fiabilité et la crédibilité des sources par le biais d'un système de notation (score, classement, etc.). En sortie, l'efficacité de la fusion doit aussi être évaluée, ce qui impose de disposer d'outils et de métriques pour la Mesure de la Performance (MoP). Des domaines d'applications spécifiques sont dotés de boîtes à outils spécifiquement dédiés à cette tâche (par exemple la Fusion Performance Analysis [FPA] Tool développée par Boeing).

Limites de la fusion

La fusion demeure une notion résolument complexe que l'on peut néanmoins simplifier par l'adage aristotélicien, « *le tout est plus que la somme de ses parties* ». De façon plus concrète, cela permet de faire ressortir la limite principale de la fusion. Cela est clairement exposé par David L. Hall dans un couple d'articles très enrichissants par leur dimension critique et leurs titres révélateurs³³. Hall et al., exposent la théorie selon laquelle dans la plupart des cas, pour toute fusion — sans traitement spécial — les capteurs, les données ou les informations ne se combinent pas pour produire un résultat amélioré. On y retrouve une série d'écueils dont on ne peut faire l'impasse de transcrire tel quel :

32. Acronymes anglophones pour Degree of Confidence et supra Measure of Performance.

33. Respectivement : « Les pièges de la fusion de données (et comment les éviter) » [Hall and Garga, 1999] et « Les secrets cachés de la fusion de données multicapteurs » [Hall and Steinberg, 2001].

2.3. PROCÉDURES DE TRAITEMENT ET DE FUSION DONNÉES SPATIALISÉES

- *Il n’y a pas de substitut à un bon capteur* : aucune fusion de données ne peut remplacer un seul capteur précis qui mesure les phénomènes que vous souhaitez observer.
- *Le traitement en aval ne peut pas compenser les erreurs (ou les défaillances) du traitement en amont* : le traitement par fusion de données ne peut pas corriger les erreurs de traitement (ou l’absence de prétraitement) des données individuelles des capteurs.
- *La fusion de capteurs peut donner lieu à des performances médiocres si des informations erronées sur les performances des capteurs sont utilisées* : [...] L’absence de modélisation précise des performances des capteurs entraînera une altération des résultats de la fusion.
- *Il n’existe pas d’algorithmes de fusion de données magique ou générique* : malgré les affirmations contraires, il n’existe pas d’algorithmes parfaits qui soient optimaux dans toutes les conditions. [...]
- *Il est difficile de quantifier la valeur d’un système de fusion de données* : l’un des défis des systèmes de fusion de données consiste à quantifier l’utilité du système au niveau de la mission. Alors que des mesures de performance peuvent être obtenues pour les capteurs ou les algorithmes de traitement, les mesures d’efficacité générales sont difficiles à définir.
- *La fusion n’est pas un processus statique* : mais plutôt un processus dynamique itératif qui cherche à affiner en permanence les estimations concernant une situation observée.³⁴

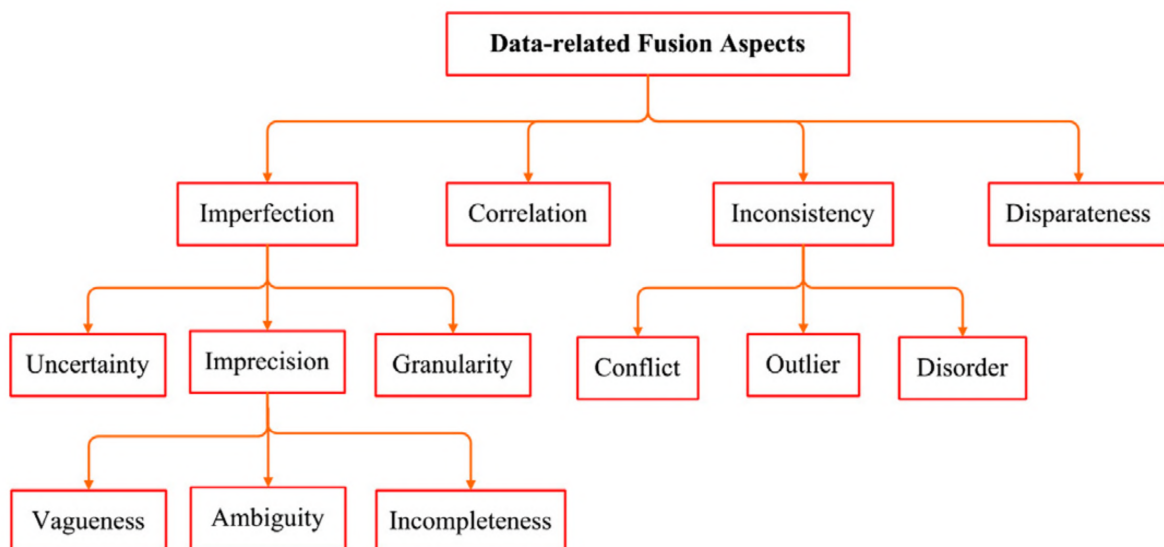


FIGURE II.12 – Taxonomie de la fusion selon la spécification des problèmes relatifs aux données tels que : l’imperfection des données, la corrélation des données, l’incohérence des données et la disparité. D’après [Khaleghi et al., 2013].

34. Traduit et adapté depuis (Ibid. p.12).

Défis relatifs à la fusion

On pourrait penser que ces limites sont désuètes, il apparaît au contraire qu'elles sont toujours d'actualité selon l'avis de Khaleghi et al., une décennie plus tard³⁵. Si les chercheurs de ce domaine constatent des biais si profonds, il convient dès lors de mesurer et calibrer les ambitions relatives à la fusion de données patrimoniales avec la plus grande précaution. Enfin, il faut retenir en conclusion de cette étude qu'elle attire le regard sur des défis sous-explorés concernant l'évaluation des pratiques de la fusion de données, synthétisés en trois points qui semblent primordiaux à prendre en compte pour cette recherche :

- a. L'importance outre mesure des données de vérités terrains.
- b. L'aspect multi-factoriel de la fusion (ou de son évaluation) qui devrait prendre en compte la quantité d'efforts et de ressources consacrés à sa réalisation.
- c. Un indicateur juste de la performance de la fusion doit pouvoir être adapté au fil du temps ou en fonction de l'évolution du contexte ou de la situation.

Données douces et données dures

La conclusion tirée est que la fusion, en dépit de ses nombreuses applications, demeure un domaine très théorique. Même les meilleurs algorithmes sont performants uniquement sur des simulations, des données synthétiques ou des tests non réalistes vis-à-vis des cas d'utilisation pratiques. En dernier lieu, ce paragraphe apporte un moteur de réflexion majeur qui sera mobilisé dans cette recherche. En effet, la citation suivante est un écho quasi parfait d'une des questions majeures de cette thèse :

« Les données de fusion peuvent être fournies sous différentes formes, c'est-à-dire sous une ou plusieurs modalités, et être générées par des capteurs physiques (données dures) ou des opérateurs humains (données douces) ». ^a

a. Source : (Ibid. p.4)

35. « Après avoir analysé plus de 50 documents connexes, il a été démontré que seul un très petit nombre (environ 6%) des travaux de recherche étudiés traitent le problème de l'évaluation de la fusion d'un point de vue pratique. En effet, il est démontré que la plupart des travaux existants sont axés sur l'évaluation dans des environnements de simulation ou de test non réalistes, ce qui est très différent des cas pratiques ». (op. cit. p.13)

2.3. PROCÉDURES DE TRAITEMENT ET DE FUSION DONNÉES SPATIALISÉES

Encodage et format de données pour la fusion

À partir du problème de la complexité des ensembles de données et d'informations fusionnées se pose celui de leur encodage ou formatage. L'accroissement du volume de sources hétérogènes au sein d'une représentation fusionnée fait poindre un véritable défi technique pour leur agrégation puis leur exploitation. Il convient de distinguer deux cas. Dans le premier, les données (dures et douces) peuvent être contenues dans une représentation unique (p. ex. images 2D, modélisation 3D) dès lors abordée par des approches dites multicouches [Jaspe-Villanueva et al., 2021] ou multicanaux [Chen et al., 2022]. Elles offrent aussi un cadre efficace pour la mise en relation de données dures/douces par le biais d'annotations [Radanovic et al., 2021, Roussel and De Luca, 2023]. Le second cas s'affaire aux données, dont la nature et/ou le domaine différent est abordé par des approches *ad hoc* [Dandolo et al., 2019]. Le problème demeure entier lorsque les deux approches doivent être combinées en complément d'une fusion de données dures/douces, pour lesquelles deux pistes sont proposées. Le format HDF5 (Hierarchical Data Format Version 5) est conçu pour permettre une structuration hiérarchique de grands ensembles et sous-ensembles de données. Il intègre nativement les métadonnées et offre la possibilité d'énoncer explicitement au sein même du fichier les données à mettre en relation. Il est utilisé dans différents domaines pour le partage et l'exploitation de données massives et complexes. L'usage patrimonial est sporadique, bien qu'utilisé en modélisation BIM [Mahdavi and Wolosiuk, 2019, Krijnen and Beetz, 2020]. L'alternative consiste à exploiter la structure Datacube³⁶ dans laquelle des données multidimensionnelles sont référencées par le biais de repères spatio-temporels. Cette modélisation des données provenant du domaine géospatial, est déjà utilisé en domaine patrimonial [Thwaites, 2013] pour l'assemblage de couches multi [Bianco et al., 2013] et hyperspectrales [Picollo et al., 2020], avec une aptitude récemment explorée pour gérer des données sémantiques [Escobar et al., 2020].

2.3.3.2 La fusion de données patrimoniales

La motivation de cette section n'est pas de savoir si et pourquoi la fusion de données est nécessaire ou utile pour la documentation patrimoniale, mais comment la mettre en œuvre. En tirant parti des enseignements de la section ci-dessus, il convient tout d'abord de distinguer les travaux qui évoquent la fusion, mais qui n'en sont pas, et ceux qui ne la mentionnent pas, mais qui traitent ce sujet en corrélation avec la définition que convenue dans cette section. Cela permettra de filtrer les approches de fusion de données trop peu

36. <https://www.opendatacube.org/about>.

explicites. Il s'agit par exemple du cas devenu courant d'un transfert d'attributs entre deux sources de même dimension ou de même nature. Cela concerne notamment la colorisation d'un nuage de points laser sur base d'un autre nuage obtenu par photogrammétrie. La notion de fusion est discutable pour ce cas précis, en effet le résultat améliore les données (le nuage), mais n'apporte *stricto sensu* aucune nouvelle information que celles déjà contenues dans l'autre nuage. En ce sens, il convient de distinguer les approches de fusion mono-source telle que [Frohlich et al., 2018] des approches multi-sources qui feront l'objet de la section à suivre.

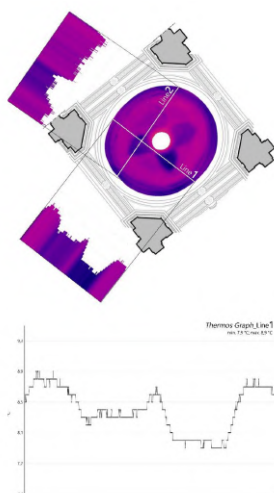


FIGURE II.13 – Fusion par la représentation graphique du comportement thermique d'un dôme, extrait de [Cera, 2022].

Des applications à la théorie

Dans la catégorie des mentions explicites à la fusion, l'approche applicative proposée par [Cera, 2022] (cf. Fig. ci-contre) est orientée vers le diagnostic et démontre une réelle plus-value de la mise en coopération de différentes modalités, et reste l'exemple le plus abouti trouvé dans la littérature. Si cela constitue un exemple d'application, peu d'informations et de solutions d'ordres méthodologiques sont proposées ou restituées au travers de cette publication. À l'opposé, on trouve des approches conceptuelles [Stal et al., 2013] qui intègrent la fusion de données dans un système plus complexe, sans apporter d'éléments tangibles pour une application concrète. L'ambition est de développer une approche intermédiaire à ces deux extrêmes. C'est-à-dire en démontrant une application sur cas concret et représentatif tout en permettant une reproductibilité de la méthode.

Ensuite, une lecture critique de l'étude du premier article de synthèse abordant la fusion de données patrimoniales [Ramos and Remondino, 2015] sera proposée. Cet article doit être remis dans son contexte, car ce sujet a connu des évolutions substantielles depuis 2015. En effet, la finalité de la documentation numérique qui y est exposée ne semble plus d'actualité³⁷. D'une part, car l'état actuel de la documentation multimodale dépasse le caractère strictement géométrique pour être applicable aux problématiques des SP (propriété des matériaux, analyses physico-chimiques). D'autre part, car il est important

37. « The main goal in CH geometric documentation is to generate a complete, photo-realistic and accurate 2D (e.g. maps, orthos, plans, etc.) or 3D (dense point cloud, polygonal model, etc.) product ». (Id. p.360)

2.3. PROCÉDURES DE TRAITEMENT ET DE FUSION DONNÉES SPATIALISÉES

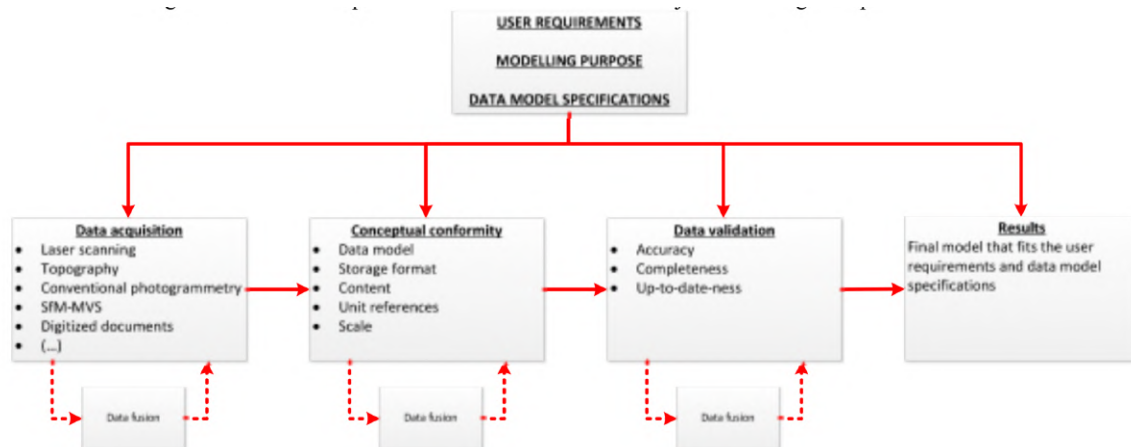


FIGURE II.14 – Représentation schématique du flux de travail pour la modélisation d’objets et la fusion de données spatiales (selon la méthode AGILE) proposée par [Stal et al., 2013].

de considérer les scénarios actuels dont les multiples finalités dépassent bien heureusement le seul cas du modèle 3D texturé photoréaliste. En reprenant la liste d’obstacles proposés supra, ils confirment l’aspect multifactoriel de la fusion de données et, sans la nommer, de la complexité de sa mise en application pour l’imagerie patrimoniale multimodale. Les auteurs proposent une classification en différents niveaux de fusion (issus de [Klein, 2004]) en distinguant ceux relatifs :

- i. au stade d’intervention (bas niveaux, niveaux intermédiaires, hauts niveaux)
- ii. aux dimensions des données (3D/3D, 2D/3D, 2D/2D)
- iii. aux caractéristiques des données utilisées pour la fusion (points, caractéristiques, surfaces...) ^a

^a. Les points i) et iii) sont plus élégamment synthétisés dans la classification de Dasarathy (cf. Fig. II.10a p.61)

En guise de conclusion, les auteurs exposent, en d’autres termes, la nécessité de bien connaître les caractéristiques de chaque modalité pour que la fusion soit porteuse de sens. Enfin, ils préconisent de prendre en compte les objectifs de fusion dès les phases d’acquisition, en soulevant le fait que la fusion automatique et opérationnelle des données reste un défi complexe. Dans le cadre de cette recherche, la taxonomie suivante est proposée (cf. Fig. II.15) en s’inspirant des classifications exposées au fil de cette section.

2.3. PROCÉDURES DE TRAITEMENT ET DE FUSION DONNÉES SPATIALISÉES

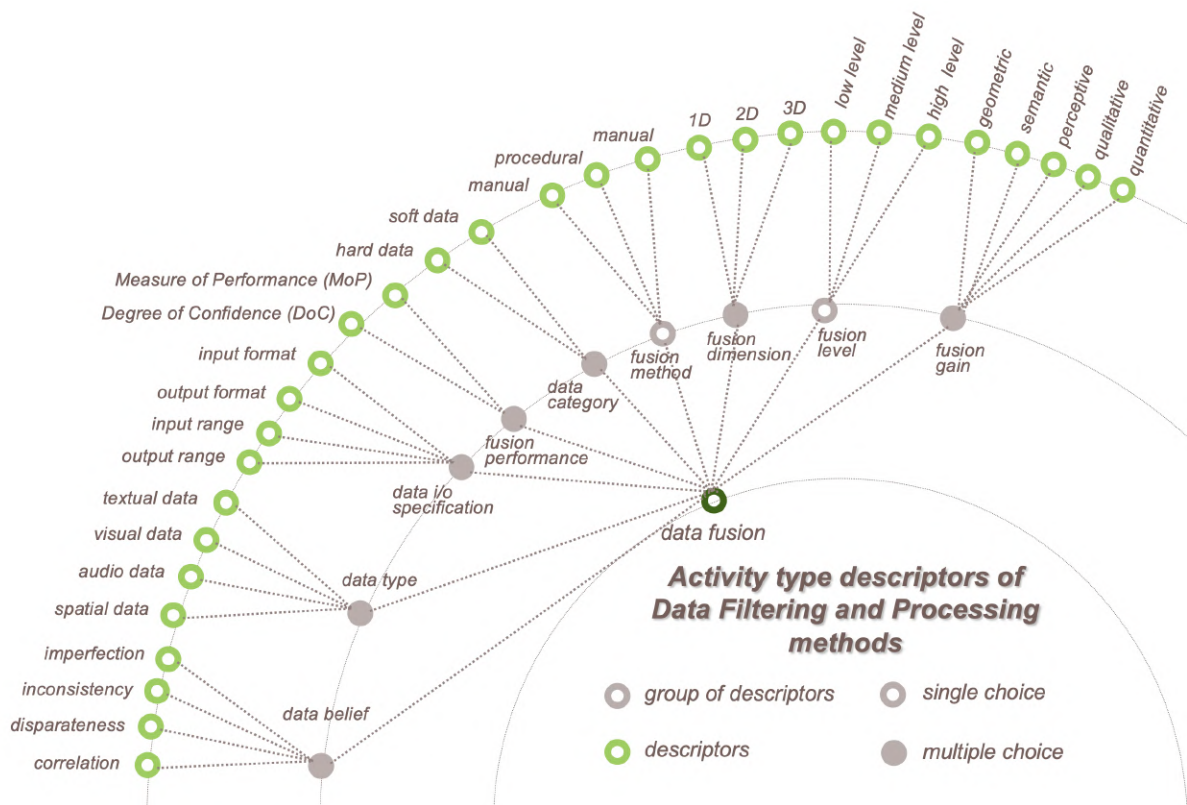


FIGURE II.15 – Proposition de structuration des descripteurs pour documenter des activités de Fusion relatives aux activités de traitement et de filtrage de données au sein du SI MEMORIA [Pamart, 2023].

La fusion appliquée ou opérationnelle

Depuis 2019, deux chercheurs poursuivent un travail de fond restituant, dans des articles de synthèse [Adamopoulos and Rinaudo, 2019], [Adamopoulos and Rinaudo, 2021], l'état des travaux et des pratiques de fusion multimodale pour le Patrimoine Culturel et les SP. Une lecture approfondie de leur travail apporte un regard nouveau et structuré en se basant sur un panel des expériences représentatives de la richesse des combinaisons multimodales mises en œuvre par les scientifiques du patrimoine. Parmi un ensemble de combinaisons techniques³⁸, cette étude démontre et confirme le rôle des MBL et plus largement des MBI dans leur capacité à se coupler à d'autres sources d'imageries. Plusieurs enseignements permettent de mettre en perspective la présente recherche. Premièrement, ce que est considéré à première vue comme multimodal, ne consiste en pratique et en

38. Incluant la photogrammétrie et la lasergrammétrie, mais aussi la thermographie infrarouge, l'imagerie multispectrale, le géoradar, des tests par ultrasons ou de la tomographie à rayons X.

2.3. PROCÉDURES DE TRAITEMENT ET DE FUSION DONNÉES SPATIALISÉES

majorité qu'à des approches bimodales. L'extension vers des systèmes multimodaux plus complexes est mentionnée comme une orientation critique pour la recherche future. De plus, le couplage de deux modalités relève généralement d'un lien de subordination entre elles : l'une se trouve être au service de l'autre. Cela dénote pour la plupart des pratiques actuelles, d'une approche « modalicentrique », dont les apports se concentrent autour d'une modalité principale. Le second point saillant de cette étude est la destination de ces approches qui au-delà de la fusion doivent servir à enrichir nos capacités d'*interprétations*. Les auteurs font émerger le concept d'*approches « interprétationnelles »* que l'on tentera de développer par la suite.

Cela offre une amorce et une transition avec la thématique de la prochaine section de l'état de l'art. Comme vu en amont (p. 62), la fusion est nécessairement et logiquement orientée vers un objectif prédéfini. Dans les domaines d'application cités auparavant, la fusion est un outil d'aide à la décision [Girao et al., 2009, Klein, 2004]. Pour notre domaine d'application, la perspective de déléguer la prise de décision à quelconque système automatisé est encore lointaine [Oussama Meski and Furet, 2021], ainsi il convient de placer une étape en amont de cet objectif. Dans cette optique, l'*interprétation* permettrait de replacer l'observateur au centre des préoccupations.

2.3.4 Bilan des procédures de traitement et de fusion

À défaut de résoudre dans le cadre de cette thèse le problème complexe de la fusion au sein du domaine d'application ciblé, les méthodes étudiées dans cette section permettent de l'aborder de façon pragmatique et structurée pour esquisser des stratégies de fusion prenant en compte les aspects suivants :

- La *fiabilité des sources*^a est faible et discriminante dans le cas des données hétérogènes (et donc patrimoniales) sur la qualité de la fusion.
- Le *non-déterminisme des données* d'entrée est un élément hautement problématique (qui nécessiterait des méthodes de fusion adaptative hors de portée au stade actuelle de cette recherche).
- La complexité d'opérer la fusion sur la *dualité des données douces et dures*.

a. De l'anglais « belief reliability ».

2.3. PROCÉDURES DE TRAITEMENT ET DE FUSION DONNÉES SPATIALISÉES

Il est possible d'entrevoir une piste consistant à aborder la question de la fusion de données par le prisme du recouvrement entre les modalités. Dans l'idéal, une procédure de fusion dédiée à l'imagerie multimodale patrimoniale devrait prendre en compte ces éléments :

- Degré de confiance (données sources) définie par ses qualités :
 - Intrinsèques (propre à l'instrument) : performance du capteur (du système optique), résolution et réglage de l'appareil (compression, etc.)
 - Extrinsèques (fonction de l'utilisation faite de l'instrument) prenant en compte les contraintes :
 - Techniques : optimisation des paramètres de prise de vues (triangle d'exposition, colorimétrie, compression d'image, etc.)
 - Opératoires : optimisation du protocole d'acquisition (recouvrement, éclairage, assistance)
 - Contextuelles : condition du relevé (météorologique), adéquation de l'objet à la méthode de mesure. L'ensemble de ces éléments sont difficilement quantifiables a priori, mais peuvent se révéler *a posteriori* (qualité de reconstruction, comparaison vérité terrain)
- Mesure de Performance (données fusionnées) aussi définie par ses qualités :
 - Intrinsèques (propres à l'algorithme de traitement) : performances algorithmiques des logiciels utilisés
 - Extrinsèques (propres à la méthode de traitement) : traitement initial des sources, méthode de recalage et fusion.

Cependant, il convient de relever que le nombre et la variabilité d'éléments à prendre en considération soulèvent un défi majeur en ce qui concerne la traçabilité des flux de données par lesquels elles sont obtenues et modifiées.

2.4 MÉTHODES RELATIVES À L'INTERPRÉTATION ET À L'ENRICHISSEMENT DE DONNÉES PATRIMONIALES

La spatialisation puis la fusion d'imagerie multimodale 2D/3D impliquent la gestion de bases de données, de systèmes d'information ou de connaissance à la fois hétérogènes et complexes. Bien qu'ils soient d'une grande aide, ces systèmes sont contraints et limités à notre capacité réelle d'en faire usage³⁹. L'augmentation du nombre de sources n'enrichit guère nos aptitudes à les interpréter et à les corrélérer. Cette section fera l'objet d'une investigation raisonnée de principales voies d'enrichissements mobilisées dans cette recherche. La discussion portera sur les relations entre l'interprétation et l'enrichissement, en considérant qu'interpréter, contribue à enrichir les données, ou inversement, assimiler l'enrichissement comme aide à l'interprétation. Faisant l'objet d'une définition tacite en SP — qui diverge du versant mercantile des sciences des données — l'*enrichissement* pour la suite du discours sera compris comme tel :

« L'enrichissement des données est un terme général qui se réfère aux processus utilisés pour renforcer, affiner, ou améliorer de diverses façons des données brutes ».^a

a. Traduction et adaptation depuis : Stitch. (s. d.). What is Data Enrichment ? | Data Enrichment Tools. Consulté le 26 mai 2023, à l'adresse : <https://www.stitchdata.com/resources/glossary/data-enrichment/>

Le but à terme de l'enrichissement de données est de fournir des informations qualitatives, complètes et les plus exhaustives possibles⁴⁰. Cela permet d'installer l'ajout de métadonnées, la description sémantique d'un contenu, la liaison avec d'autres ressources, le renseignement d'éléments contextuels comme autant de vecteurs d'enrichissement puisque aidant à la compréhension et l'interprétation des données. Dans notre domaine d'application, il est de coutume de distinguer trois catégories d'enrichissement provenant respectivement d'un gain au niveau d'attributs visuels, géométriques ou sémantiques (cf. Fig. II.16).

39. « À n'en pas douter, ces systèmes ont rendu, rendent et rendront encore de grands services. Mais ils ont également montré leur limites : il suffit ainsi de considérer les masses d'informations stockées et disponibles, et d'évaluer leur utilisation réelle pour se rendre compte de la puissance limitée de l'information en tant que telle ». [Varet-Pietri, 2000] (p.142)

40. D'après Duval, L. (2022, 28 février). Data Science : l'importance de l'enrichissement des données. InformatiqueNews.fr. Consulté le 26 mai 2023, à l'adresse : <https://www.informatiquenews.fr/data-science-des-donnees-importance-de-enrichissement-des-donnees-86091>

2.4. MÉTHODES RELATIVES À L'INTERPRÉTATION ET À L'ENRICHISSEMENT DE DONNÉES PATRIMONIALES

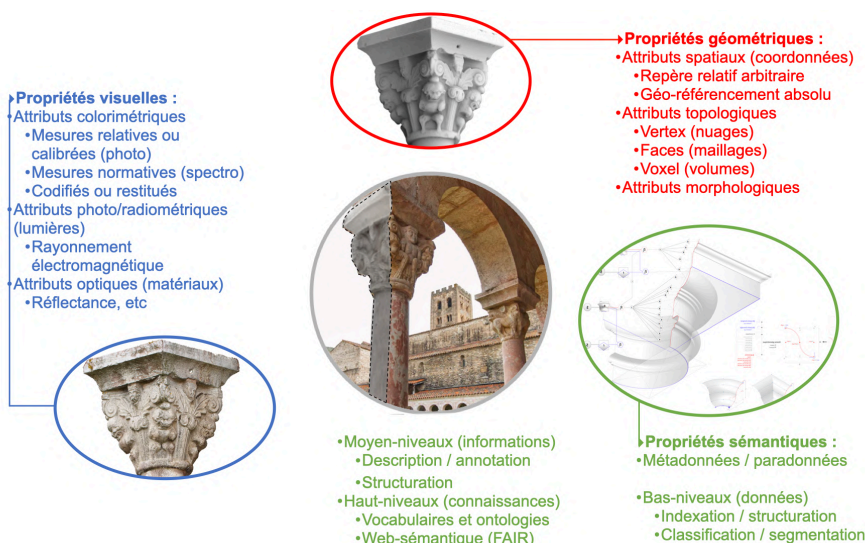


FIGURE II.16 – Les trois catégories d’attributs donnant lieu aux voies d’enrichissements visuels, géométriques et sémantiques [Pamart, 2023].

Approches descendantes VS ascendantes

Le lien entre la géométrie et la sémantique fait partie intégrante des thématiques de recherche du laboratoire MAP [De Luca and Lo Buglio, 2014], dont les travaux ont exploré deux approches distinctes. La première piste mène aux approches *descendantes ou par le haut* (dites *top-down*) visant à aligner des connaissances théoriques sur les modèles et données. Face à de nombreuses limites, celles-ci furent complétées par des approches *ascendantes ou par le bas* (dites *bottom-up*) basées sur l’hypothèse que le traitement méthodique et raisonné de données massives permettrait d’en révéler leurs structures sémantiques. La thèse de [Lo Buglio, 2016] détaille, questionne et met en perspective la combinatoire de ces deux approches. La présente étude poursuit la piste que les pratiques actuelles, non seulement appuient et justifient la coexistence des deux approches, mais aussi favorise l’émergence d’une approche hybride.

2.4.1 Méthodes relatives à l’Interprétation

L’interprétation d’ensemble de données et d’informations est une étape analytique cruciale. Bien qu’elle soit inhérente aux études patrimoniales numériques, peu lui consacre une attention particulière [Adamopoulos and Rinaudo, 2019]. Elle sera englobée au sein des activités relevant de l’analyse (voir Fig. II.17) en s’appuyant sur une nomenclature d’activités proposée au sein du Système d’Information MEMORIA, qui sera présenté ultérieurement [Dudek et al., 2022], dans lequel ce champ d’activité est défini comme tel :

2.4. MÉTHODES RELATIVES À L'INTERPRÉTATION ET À L'ENRICHISSEMENT DE DONNÉES PATRIMONIALES

« Examiner des données brutes pour en tirer des conclusions. L'analyse des données ou des informations consiste à les examiner de manière à révéler les relations, les modèles, les tendances, etc. qui peuvent y être trouvés. L'interprétation consiste à expliquer la signification ou à présenter une opinion sur la signification de l'information ».^a

a. Traduction depuis (Id. p.156)

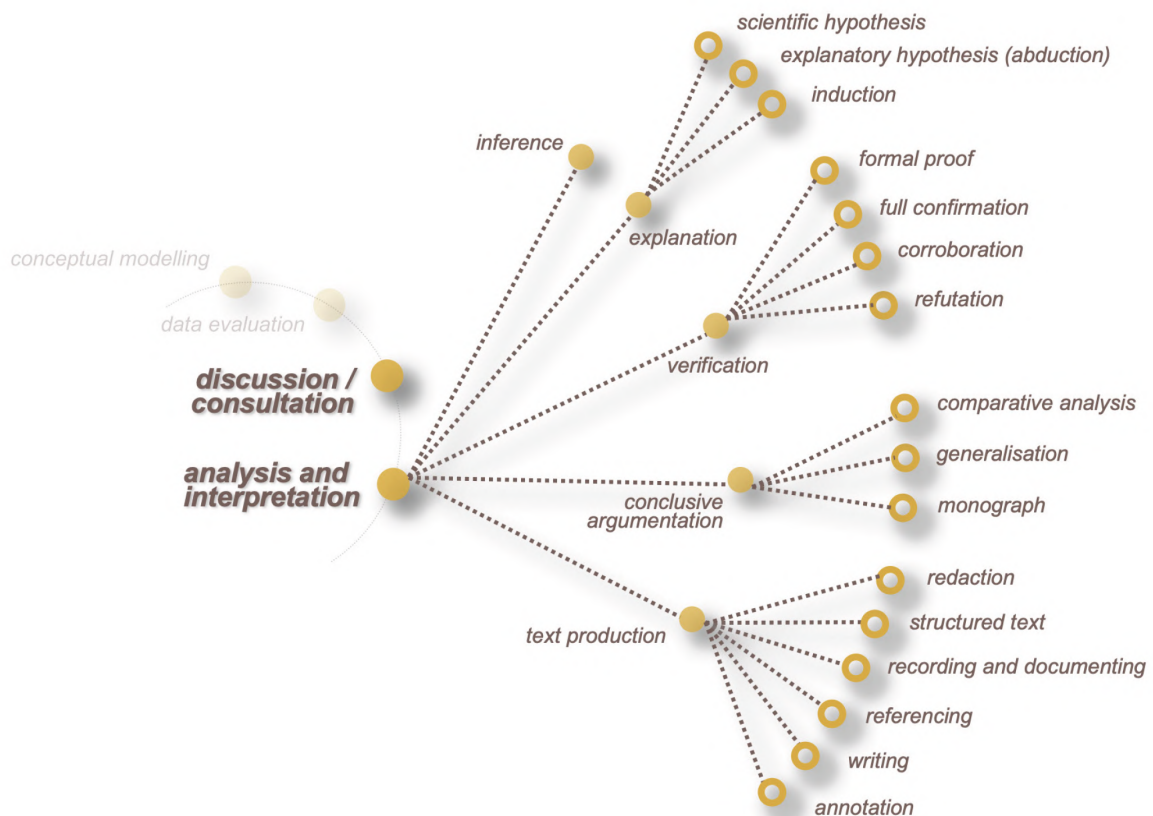


FIGURE II.17 – Nomenclature et roue des activités associées à l'analyse et à l'interprétation des données, extrait de [Dudek et al., 2022].

D'après [Carboni, 2020] l'interprétation peut faire l'objet d'une approche phénoménologique appliquée aux études patrimoniale, que l'on peut assimiler à un système de communication⁴¹. Pour autant, en domaine patrimonial l'interprétation est généralement une activité asynchrone du fait de l'écart temporel entre celle-ci et le moment de collecte

41. « Tant la communication que l'interprétation reposent, en fait, sur la production de codes pour l'attribution de sens au sein d'une communauté ». (Id. p.71)

2.4. MÉTHODES RELATIVES À L'INTERPRÉTATION ET À L'ENRICHISSEMENT DE DONNÉES PATRIMONIALES

des sources. Cela induit que les sources⁴² d'interprétations peuvent être aux mieux améliorées, dérivées, instanciées, au pire altérées, voire détruites. La traçabilité ou la provenance des données s'imposent comme autant de questions à aborder au fil de cette section. Cela implique un effort dans l'usage de significations et de structurations, à la fois contrôlées et partagées, pour lequel la communauté des scientifiques du patrimoine construit peu à peu un écosystème informatique et sémantique commun.

« Pour parvenir à ce résultat, il est essentiel de s'appuyer sur des outils et des méthodologies capables de prendre en compte un système de données sémantiques et distributif s'appuyant sur un cadre partagé pour décrire les différents niveaux d'interprétation visuelle » (Id. p.108). L'objectif des sections suivantes sera justement de dresser un état des lieux des initiatives actuelles allant dans ce sens.

2.4.1.1 Les approches « intégrées »

Les prochaines sections ne feront que confirmer le constat que les approches et études dédiées au patrimoine sont complexes, dans chacune de leurs étapes, mais aussi dans les relations qui les sous-tendent. Des travaux essaient d'englober cette complexité par le biais de métaprojets de plus en plus représentés dans la littérature [Soler et al., 2017], [Bertacchi et al., 2018], [Cerreta and Savino, 2020], [Boutsi et al., 2023], [Münster, 2023] et poursuivent généralement l'idéal du double numérique [Juarez et al., 2021]. Ces approches sont dites intégrées, sont plus majoritairement combinatoires que véritablement intégratrices même si elles articulent différents apports tels que l'analyse des systèmes, la modélisation (autant spatio-temporelle que conceptuelle) ou les scénarios collaboratifs interdisciplinaires riches et variés. En tâchant de ne pas être caricatural, voici quelques ingrédients types de ces approches holistiques :

- la gestion d'un monument complexe et/ou d'un corpus d'objets issus de numérisations massives
- Intégration d'un plan de gestion des données optimisé incluant des méthodes d'apprentissage à différents niveaux
- Création ou alignement avec des modèles sémantiques standardisés (métadonnées, modèles conceptuels, ontologies)
- Interfaces d'exploration et de visualisation avancées de données en ligne
- Diffusion en LOD et valorisation par des scénarios muséographiques ou d'exposition virtuelle de double numérique enrichi

42. En faisant l'abstraction que ces données « brutes » sont issues de relevés pouvant inclure une part interprétative, soit par le choix de l'opérateur dans l'usage de son instrument, soit par l'instrument ou divers processus de traitement.

2.4. MÉTHODES RELATIVES À L'INTERPRÉTATION ET À L'ENRICHISSEMENT DE DONNÉES PATRIMONIALES

Sous couvert d'aborder ces points un à un, ces projets macroscopiques représentent en quelque sorte une synthèse des approches actuelles et demeurent sources d'enseignements. Ils témoignent de la richesse et de la complexité du fait patrimonial, mais aussi et surtout de la construction sociotechnique de ce champ de recherche [Livingstone, 2007]. Ces expériences au long cours renouent avec une inertie temporelle nécessaire au déblocage de verrous technologiques ou scientifiques. À l'instar de l'acceptation faite de la multimodalité (cf. 2.1.3), ces approches se distinguent par la nécessité de renforcer les articulations et le chaînage des opérations. Elles restent cependant une mise en application dans un cadre unique, avec la contrepartie de n'être — malgré des intentions inverses — que peu ou difficilement reproductibles par d'autres et dans d'autres contextes. Malgré l'instrumentation des principes FAIR [Capurro and Verheul, 2023], les méthodes sont exposées dans des articles dispersés ou des rapports techniques factuels. Les outils matériels ou logiciels généralement développés *ad hoc* ne sont par contre que très rarement accessibles et sinon maintenus⁴³.

Même si ces approches font parfois office de démonstration tautologique, elles appuient l'importance des systèmes à partir desquels elles se développent. Les données manipulées quelles soient nativement digitales ou non imposent un lignage entre sa création et son interprétation, sa valorisation ou sa diffusion. Cela est nécessairement soutenu et tissé par de nombreux outils voire des écosystèmes informatiques complets, abordés ci-après, permettant de stocker, traiter et moissonner les documents et ressources du Patrimoine.

2.4.1.2 Bases de Données, Systèmes d'Informations et de Gestion des Connaissances

Dans le meilleur des cas, des ensembles de documentation patrimoniale sont stockés, structurés et mis en relation entre eux dans des Bases de Données (BD) pouvant aussi servir de support à la documentation des flux de données [Al-Barakati et al., 2014]. Il existe différents paradigmes de gestion et de modélisation des BD, qu'elles soient hiérarchiques, relationnelles, orientées objet, sur graphes, qui sont toutes utilisées en contexte patrimonial à différents desseins. Elles sont des outils mobilisés dans cette thèse et non des objets de développement, au même titre que les Systèmes d'Information (SI) qui les exploitent. Ces derniers agissent en surcouche ou en tant qu'interface pour explorer et rendre un service opérationnel — autre que la consultation — aux données qu'elles contiennent [Colace et al., 2013]. L'un des SI mobilisés dans cette thèse, MEMORIA [Dudek and Blaise, 2023], utilise une BD relationnelle (SQL), quand l'autre, AIOLI [1], opte pour une BD orientée

43. On parle bien ici de code Open Source ou d'Open Hardware.

2.4. MÉTHODES RELATIVES À L'INTERPRÉTATION ET À L'ENRICHISSEMENT DE DONNÉES PATRIMONIALES

documents (NoSQL). Au-delà de toutes considérations techniques, ces BD et probablement une large majorité de celles mobilisant des ressources patrimoniales sont des bases de données documentaires⁴⁴. Du moins, elles y seront assimilées du fait qu'elles contiennent effectivement des informations, sur différentes ressources documentaires. Il convient aussi d'accepter « la dualité du document, à la fois *contenant* et *contenu*, entité physique et informative »⁴⁵ permettant d'attribuer une valeur documentaire au fichier informatique d'un média (p. ex. textes, pistes sonores, images, nuages de points...) et à la substance informative qu'il contient. La liaison entre la documentation et les connaissances sont d'après [Croce, 2022] multifacettes (cf. Fig. II.18) et il relève du domaine de l'ingénierie des connaissances d'exploiter ces mécanismes [Varet-Pietri, 2000]. De nombreux systèmes coexistent et l'absence d'interopérabilité demeure un frein à leur mise en synergie. Par conséquent, malgré certains travaux [Dragoni et al., 2017], [Oussama Meski and Furet, 2021], [Nova et al., 2023], la mise à disposition de Système de Gestion des Connaissances (KMS)⁴⁶ semble lointaine pour notre domaine d'étude d'un point de vue applicatif.

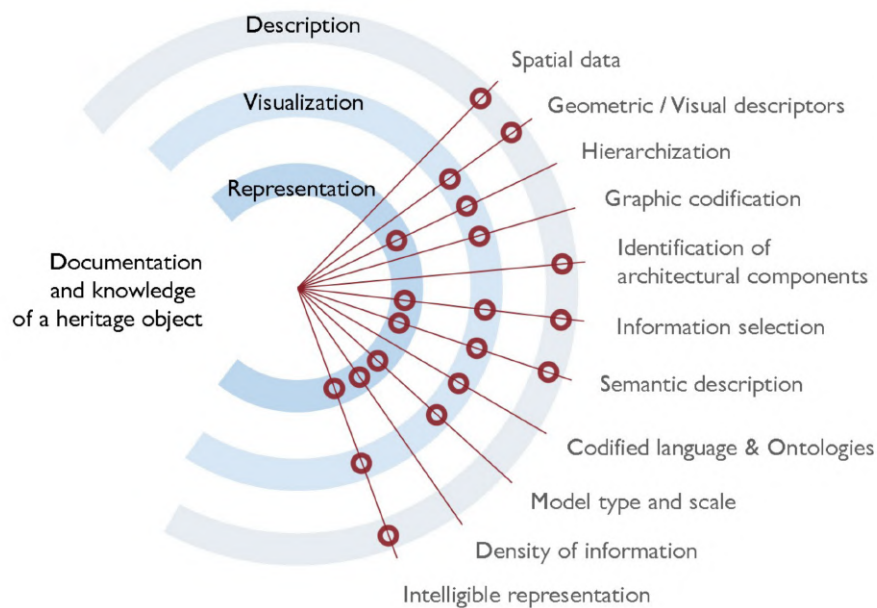


FIGURE II.18 – Connaissances et documentation des artefacts du patrimoine en tant que processus combinant la description, la représentation et la visualisation, extrait de [Croce, 2022].

44. Source : « Une base de données documentaire est une base de données qui contient de l'information sur des documents, c'est-à-dire au sujet de documents. » Marcoux, Y. (2000). Scénario type de création d'une base de données documentaire (Par Université de Montréal, EBSI). Consulté le 12 juin 2023, à l'adresse : <https://page.hn/hd2iv8>

45. [Varet-Pietri, 2000] (p.279)

46. Pour Knowledge Management System.

2.4. MÉTHODES RELATIVES À L'INTERPRÉTATION ET À L'ENRICHISSEMENT DE DONNÉES PATRIMONIALES

2.4.1.3 Des vocabulaires aux ontologies

Cette partie sera abordée par le biais d'une analogie au langage, en s'appuyant sur des éléments de l'ordre du lexique ou de la syntaxe. En premier ordre se trouvent les dictionnaires, les glossaires, les vocabulaires contrôlés, ou les thésaurus utilisés pour s'accorder et partager une terminologie. Les ontologies⁴⁷ appartiennent quant à elle à l'ordre syntaxique, dont un sens additionnel d'une structuration de termes (c.-à-d. d'un ensemble de mots à une phrase). Dans leur mise en œuvre, les ontologies formalisent un domaine de connaissance en se basant d'une part sur une terminologie contrôlée, d'autre part en spécifiant les types de relations possibles entre l'ensemble des concepts. Une nouvelle fois, ces outils seront évoqués mais ne constituent pas le cœur des développements de cette thèse. Leur conception et leur implémentation informatique sont l'apanage de spécialistes. Ainsi sont restitués ci-après uniquement les principes utiles à cette étude.

Les approches lexicales

Les instruments « lexicaux » se réfèrent à toute initiative visant à contrôler une terminologie. En SP elles sont aussi éparées que les domaines de connaissances de ces sciences comportent. Il s'agit d'une entreprise aussi vaste que de s'accorder sur une définition d'une technique, d'un objet patrimonial, de ses composants et ses matériaux, tout comme d'un système de datation ou de localisation spatio-temporelle ou encore des opérations nécessaires à contrer les effets de mécanismes de dégradation. La liste non exhaustive proposée ci-après reprend les vocabulaires rencontrés durant ce travail de thèse et représentatifs de la variété sémantique de ces initiatives :

- AAT / (Art & Architecture Thesaurus) pour la description des typologies d'objets relatives au bâti patrimonial.⁴⁸
- TAPAC / pour faire référence à certaines techniques d'examen et d'analyse utilisées en SP.⁴⁹
- ICOMOS-ISCS / Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre.⁵⁰
- EwaGlos / Glossaire européen illustré des termes relatifs à la conservation des peintures murales et des surfaces architecturales.⁵¹
- PACTOLS / Vocabulaire contrôlé, normalisé et multilingue pour l'archéologie, depuis la préhistoire jusqu'à la période contemporaine et pour les sciences de l'Antiquité sous tous leurs aspects.⁵²

47. Définition proposée supra p.⁷⁹

48. <https://www.getty.edu/research/tools/vocabularies/aat/>

49. <https://journals.openedition.org/techne/568>

50. <https://page.hn/jr0tvs>

51. <http://openarchive.icomos.org/id/eprint/1706/>

52. <https://pactols.frantiq.fr/opentheso/>

2.4. MÉTHODES RELATIVES À L'INTERPRÉTATION ET À L'ENRICHISSEMENT DE DONNÉES PATRIMONIALES

Deux éléments sont prépondérants pour l'application des terminologies contrôlées. Le premier est la gestion multilingue des termes et de leurs définitions, sans laquelle la portée et la diffusion d'un vocabulaire demeurent restreintes. Le second est le format du document source, qui peut être variable et parfois non digital. Tel est le cas du dictionnaire « Architecture : méthode et vocabulaire » dont les quelques 2159 concepts sont extraits de l'ouvrage [Pérouse de Montclos, 1972] (cf. note 54). Si certains sont accessibles en ligne ou consultables en format PDF, il convient idéalement d'avoir à disposition ces ressources au format SKOS⁵³ pour une utilisation autre que consultative. Ce format d'échange facilite notamment l'alignement de termes au sein du gestionnaire de thesaurus multilingues OpenTheso. Cet outil Open Source a notamment été utilisé au sein de l'écosystème NDame⁵⁴ pour agréger, harmoniser et aligner l'usage de différents glossaires thématiques. À noter qu'il existe aussi des outils pour stabiliser la dénomination d'attributs géographique (GeoName), de couverture temporelle (PeriOdo) ou d'identité (IdRef, NAF, etc.)⁵⁵. L'ensemble des outils nommés jusqu'ici permet *in fine* d'attacher des identifiants pérennes (URI, ARK, Handle) aux données pour décupler leur potentiel informatif.

Les approches syntaxiques

Elles formalisent les références faites à des concepts ainsi qu'aux relations qu'ils entretiennent. Cette normalisation est nécessaire pour dériver par cooccurrence et inférence vers des modèles de raisonnement ou d'aide à la décision découlant aux ontologies, dont on verra quelques exemples de développement spécifiques à notre domaine et cadre d'application. On distingue deux familles principales d'ontologies. Celles dites de niveaux supérieurs⁵⁶ qui fournissent un cadre abstrait pour la modélisation de concepts fondamentaux (p. ex. le temps, l'espace, l'action, la qualité, la quantité, etc.) et de leurs relations universelles générales de façon plus ou moins indépendante à un domaine prédéfini. Des autres ontologies dites opérationnelles⁵⁷ décrivent les relations de concepts spécifiques appliqués à un domaine ou un contexte d'utilisation précis⁵⁸. Comme dans toute classification, il existe des nuances parmi lesquelles on range notamment les ontologies de domaines qui peuvent inclure ou s'appuyer sur des ontologies de plus haut niveau.

53. Système Simple d'Organisation des Connaissances (Simple Knowledge Organization System) est un format intermédiaire entre le XML et le RDF proposé et développé par le W3C.

54. <https://frollo.notre-dame.science/opentheso/?idt=th18>

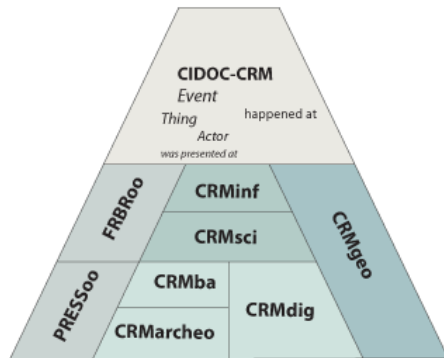
55. IdRef (<https://www.idref.fr/>), NAF (<http://id.loc.gov/authorities/names>)

56. Aussi appelées Top-level Ontology, Upper Model ou Foundation Ontology.

57. Parfois appelées de niveaux inférieurs ou spécialisés.

58. « Selon Grüber [Gruber T. R., 1993], une ontologie générique ou de domaine est "une spécification explicite et formelle d'une conceptualisation partagée" ». [Messaoudi, 2017] (p.111)

2.4. MÉTHODES RELATIVES À L'INTERPRÉTATION ET À L'ENRICHISSEMENT DE DONNÉES PATRIMONIALES



(a) Pyramide des modules et sous modules CIDOC-CRM.

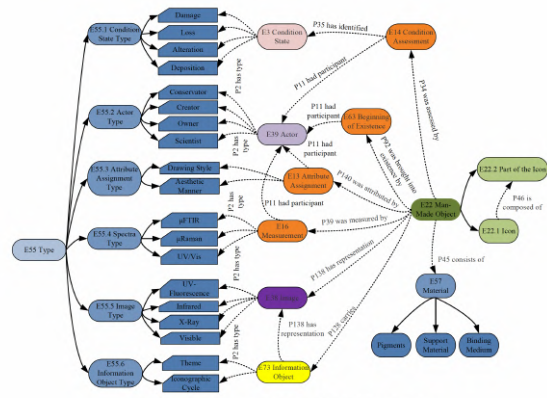


Figure 4: The basic concepts of the CIDOC-CRM based ontology

(b) Modélisation avancée utilisant des concepts de base de l'ontologie CIDOC-CRM, d'après [Karagiannis et al., 2009].

FIGURE II.19 – Modèles et modélisations conceptuelles avec CIDOC-CRM.

Le CIDOC-CRM

La description du fait patrimonial et de l'ensemble de ses concepts peut être modélisée à l'aide du CIDOC [Bruseker et al., 2017]. Ce modèle conceptuel de référence est composé de plusieurs sous-modules (cf. Fig. II.19a) dédiés à la description de processus spatio-temporels (CRMgeo), aux observations scientifiques (CRMsci) ou ainsi qu'aux multiples opérations nativement numériques (CRMdig)⁵⁹. Ce dernier s'attache plus particulièrement à la traçabilité et à la provenance des ressources numériques, incluant les flux de numérisations et sera par conséquent mobilisé plus tard dans cette étude. « Ce modèle sémantique constitue une *ontology* de l'information relative au patrimoine culturel [...] (et s'impose comme) un standard aidant à intégrer l'information culturelle issue de différentes sources dans un seul environnement »⁶⁰. Cela lui confère un rôle d'appui incontournable pour les perspectives multimodales de cette étude (cf. modélisation avancée d'une acquisition multi-sources Fig. II.19b). Néanmoins deux compléments semblent nécessaires. *Primo*, il n'est pas prescriptif, puisqu'aucun standard ou norme dans les structures ou les terminologies utilisées n'est imposé, bien que l'ancrage sur des concepts pérennes et partagés en renforce son potentiel. *Secundo*, il est indépendant de tout développement informatique, mais il peut tout aussi bien se greffer à des implémentations ontologiques ou être exprimé en langage naturel ou par le biais de diagrammes. De ce fait, il sert d'interface avec

59. À noter qu'une extension CRMcr relative au champ de la Conservation Restauration est en cours de formalisation [Niang et al., 2017].

60. Source : Biblissima, E. P. (Dernière mise à jour 2022, 25 octobre). Introduction au CIDOC CRM - Documentation Biblissima+. Consulté le 13 juin 2023, à l'adresse https://doc.biblissima.fr/_archives/introduction-au-cidoc-crm/

2.4. MÉTHODES RELATIVES À L'INTERPRÉTATION ET À L'ENRICHISSEMENT DE DONNÉES PATRIMONIALES

le web sémantique, et cadre de modélisation pour des ontologies plus applicatives, au sein des exemples donnés ci-après⁶¹. On introduira ici un autre modèle conceptuel, dit W7 [Liu and Ram, 2017] (cf. Fig. II.20), plus générique, dédié à la provenance des données, qui sera mobilisé et plus amplement discuté lors du chapitre de contribution 6.3 (cf. section 6.3.5.1 p.211).

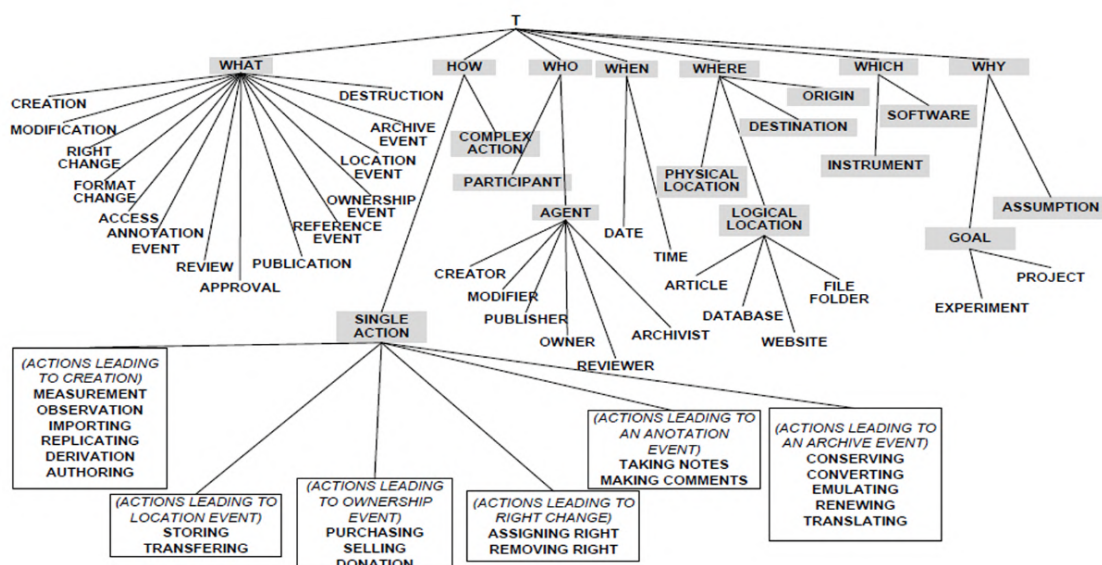


FIGURE II.20 – Hiérarchie des types du modèle W7, d'après [Liu and Ram, 2017].

Les ontologies applicatives

Elles permettent un bref tour d'horizon des problématiques de l'enrichissement de données issues de stratégies de numérisation. À commencer par COSCH^{kr} qui est une ontologie dédiée aux acquisitions spatiales et spectrales visant à guider sous la forme d'un arbre de décision le choix d'une stratégie instrumentale. Cette approche pertinente de représentation des connaissances (KR pour Knowledge Representation), issue du projet éponyme, ne sera jamais implémentée ni rendue accessible dans une ontologie opérationnelle. L'enrichissement par segmentation qui sera abordée plus tard (p.84) a aussi fait l'objet de travaux s'appuyant des ontologies, l'une adaptée à la segmentation de nuage de points [Poux and Ponciano, 2020], l'autre exploitant le potentiel des annotations spatialisées [Messaoudi et al., 2018]. Certaines s'attachent à la description des ressources par le biais des métadonnées [Goy et al., 2020], d'autres au lexique de l'architecture (SHART-SHARC)⁶² ou encore à la modélisation des connaissances propres à la conservation-restauration [Niang et al., 2017]. On retrouve aussi une ontologie pour l'organisation et la représentation visuelle liées

61. À l'exception des travaux de [Goy et al., 2020].

62. <http://anr-sesames.map.cnrs.fr/onto/shart/index.html>

2.4. MÉTHODES RELATIVES À L'INTERPRÉTATION ET À L'ENRICHISSEMENT DE DONNÉES PATRIMONIALES

aux œuvres iconographiques [Carboni and De Luca, 2019]. Enfin, dans une approche plus holistique de la numérisation patrimoniale — de l'acquisition à la diffusion de modèles sémantiquement enrichis — ce travail est le plus exemplaire et abouti [Ponciano et al. 2021] (cf. Fig. II.21).

2.4.1.4 Bilan des méthodes d'interprétation

Les ontologies, au même titre que les approches intégrées, sont intéressantes dans leur démarche, mais on observe un fossé entre l'intention et les résultats, sur le point de la reproductibilité. Elles représentent pour l'heure un travail de niche, insuffisamment déployé dans les pratiques quotidiennes par le biais d'outils opérationnels de type KMS contrairement au DB et SI plus usités. De manière générale, on dénote manque de formalisme et des lacunes des considérations minimales sur des éléments de vocabulaire (thesaurus, etc.) ou de syntaxe (modèle conceptuel, représentation des connaissances, ontologie). C'est dans cette optique d'amorce de dialogue avec des structurations sémantiques ascendantes ou descendantes qui orienteront les développements de cette thèse.

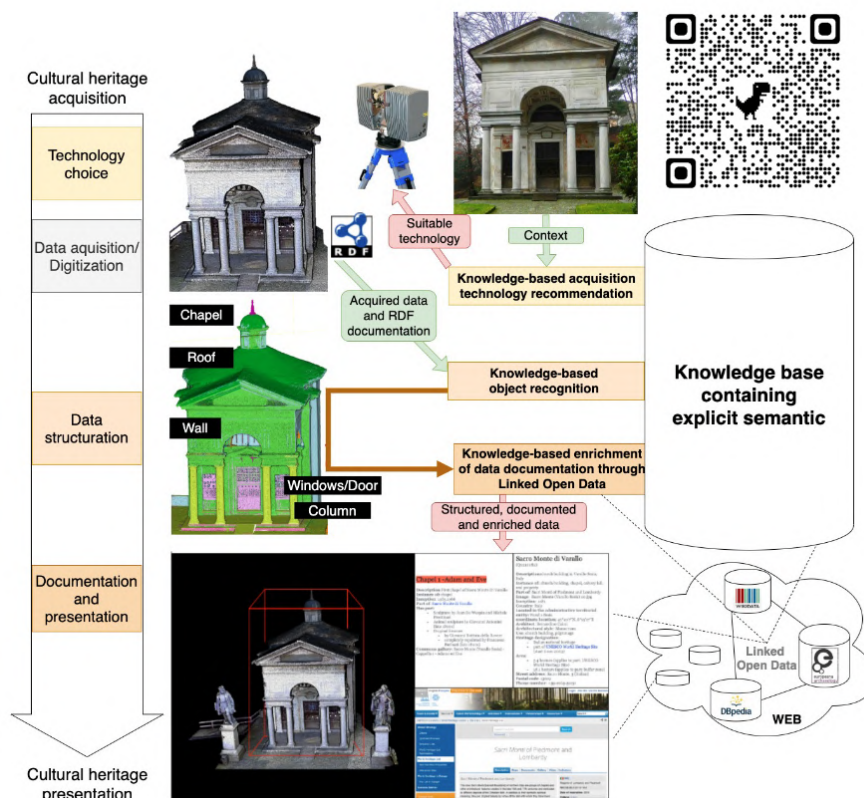


FIGURE II.21 – Aperçu de la méthode proposée par [Ponciano, 2021]. Accessible l'adresse : <https://page.hn/cviqgc> | *Flashez le QR code pour accéder à la visualisation en ligne.*

2.4. MÉTHODES RELATIVES À L'INTERPRÉTATION ET À L'ENRICHISSEMENT DE DONNÉES PATRIMONIALES

2.4.2 Méthodes relatives à l'Enrichissement

Comme dit en amorce, l'enrichissement des données peut concerner différents aspects visuels, géométriques et évidemment sémantiques qui focalisent la majorité des recherches actuelles. On distingue deux grandes familles qui permettent des analyses pilotées par l'humain ou bien par la technologie⁶³. On peut aussi les opposer respectivement sur un curseur allant des méthodes automatiques jusqu'à celles manuelles, voire artisanales. Généralement, les premières correspondent à des approches *par le bas* et les secondes *par le haut*. On établira facilement le lien avec la pensée computationnelle censée unifier, un jour, nos capacités cognitives et de raisonnement avec des intelligences artificielles pouvant les reproduire, les compléter, voire les dépasser. Dans la suite de cette section, les différentes voies permettant d'enrichir les données patrimoniales mobilisées dans cette étude seront abordées dans le même ordre. En commençant en guise d'exception par un aparté sur les méthodes d'apprentissage machine, sans lesquelles la présente étude serait déconnectée des tendances actuelles.

Un point sur l'apprentissage machine

Cette question sera abordée pour mieux s'en éloigner. L'idée étant ici de pointer ses potentiels et surtout d'en dresser, à l'heure actuelles, ses limites. Les applications de ces méthodes, qu'elles soient *supervisées*, *non supervisées* ou encore *profondes*, couvrent un très large spectre d'applications et bien au-delà de domaine concerné ici⁶⁴. Il y a cependant un cas particulier, car pour en permettre leurs (sur)performances, ces modèles nécessitent des données d'entraînements massives, à une échelle autre que celle attribuable pour les SP⁶⁵. Au-delà d'une volumétrie inadéquate, la variété des données patrimoniales est synonyme d'hétérogénéité, surtout seule une infime partie est visible et accessible, leur véracité est autrement problématique. Cependant, la multimodalité sera un élément fondateur en amont de la construction de tels modèles [Akkus et al., 2023]. Malgré le manque de recul sur ces méthodes, on peut relever qu'elles s'adressent à de nombreuses problématiques relatives au sujet traité. Elles concernent, par exemple, le traitement d'image [Fernandez et al., 2019], le traitement d'ensembles de données multi-vues [Kniaz et al., 2019, Stathopoulou and Remondino, 2019, Condorelli et al., 2021, Mazzacca et al., 2023, Croce et al., 2023a],

63. De l'anglais *human-driven* versus *technology-driven* (parfois *computer-driven* selon les domaines).

64. Ne sont cités infra que les articles reliés au patrimoine ou susceptibles d'avoir un apport pour notre domaine de recherche ou cette étude plus particulièrement.

65. Le « Big Data » répond à la règle des 4V, pour Volume, Visibilité, Variété et Véracité (cf. Fig. II.22). Source : Bouzeghoub, M. (2014). Mastodons : Une approche interdisciplinaire des Big Data. Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT). Consulté le 29 juin 2023, à l'adresse : <https://www.irit.fr/IMG/pdf/MastodonsIRITNov2014.pdf>

2.4. MÉTHODES RELATIVES À L'INTERPRÉTATION ET À L'ENRICHISSEMENT DE DONNÉES PATRIMONIALES

ou multi-lumières [Dulecha et al., 2020, Ju et al., 2022], la fusion [Zhang et al., 2018a, Gao et al., 2020, Zhao et al., 2023], la classification [Lamas et al., 2017, Croce, 2023], la segmentation [Matrone et al., 2020, Pavoni et al., 2022, Grilli et al., 2023], le rendu [Eslami et al., 2018, Garozzo et al., 2021] ou les ontologies [Karagiannis et al., 2009]. Au delà du spectre de l'imagerie et des données spatiales, il convient aussi de noter l'expansion de l'utilisation de modèles de fondation en traitement automatique du langage naturel (NLP) [Quantin et al., 2016] et plus particulièrement des grands modèles de langage (LLM) pour la structuration de ressources textuelles.

Il n'en reste pas moins un défi majeur que de nourrir ces méthodes sur bases de données d'entraînement au plus proche des données réelles, par opposition aux données synthétiques couramment utilisées pour consolider les modèles actuels. Si cette étude ne poursuit pas directement cet objectif, elle pourrait contribuer à la création de jeux de données utiles à l'entraînement des modèles.

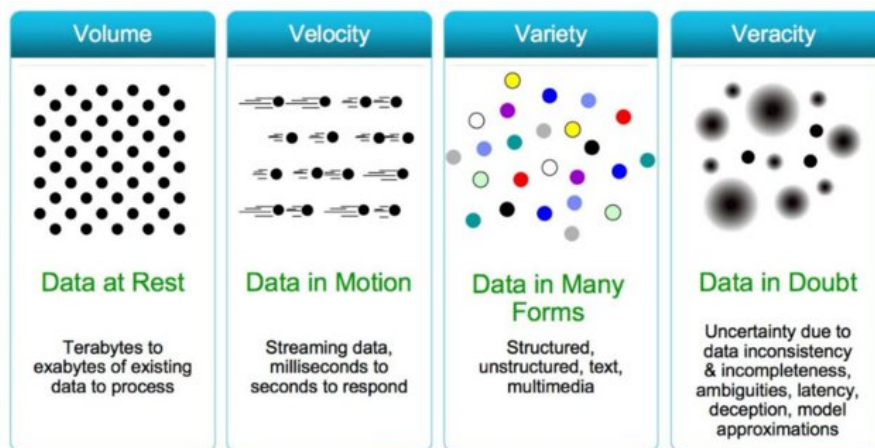


FIGURE II.22 – Les 4V du Big Data d'après [Bouzeghoub, 2014].

2.4.2.1 Les descripteurs géométriques

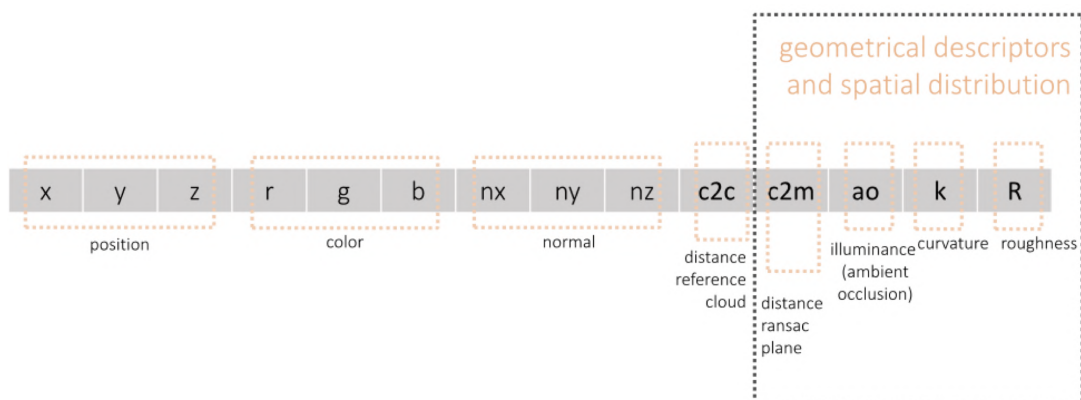


FIGURE II.23 – Liste structurée des attributs présents dans un nuage de points suivis de descripteurs géométriques, d'après [Nespeca, 2015].

2.4. MÉTHODES RELATIVES À L'INTERPRÉTATION ET À L'ENRICHISSEMENT DE DONNÉES PATRIMONIALES

Une géométrie peut s'assimiler à des ensembles de surfaces qu'il est possible de représenter au sein d'espace 2D ou 3D [Verhoeven et al., 2021]. Une photographie est par exemple composée de trois couches (Rouge/Vert/Bleu) issues de la superposition de trois matrices de mêmes dimensions, restituant une image numérique en couleur [Verhoeven, 2016]. Au niveau informatique, une image peut être lue et interprétée par diverses opérations ayant, pour seule base, des valeurs numériques qu'elle contient. Des méthodes mathématiques permettent d'appliquer des transformations sur ces valeurs pour en extraire des caractéristiques (p. ex. motifs, intensité, gradient) [Verhoeven et al., 2016]. Ces méthodes de calculs en provenance du traitement d'image se nomment des *descripteurs de formes* :

« Les descripteurs (de formes) mobilisés dans l'analyse d'images sont des outils mathématiques permettant de décrire certaines caractéristiques des formes qui y sont contenues, comme les contours, les régions de pixels uniformes, etc ». [Lo Buglio, 2016] (p.20)

Ce principe est transposable aux modèles tridimensionnels pour en révéler des caractéristiques latentes. Au-delà des coordonnées XYZ exprimées dans un repère cartésien, d'autres attributs peuvent compléter la description d'un point dans l'espace tels que sa couleur en $[RGB]$ ou ses normales $[Nx;Ny;Nz]$ (cf. Fig. II.23). Ce sont des descripteurs « géométriques » du fait qu'ils traitent une série d'attributs spatiaux servant à décrire une géométrie dans l'espace 3D. Les descripteurs calculent de nouveaux attributs, permettant de décrire ou d'augmenter une caractéristique spatiale [Ioannou et al., 2012]. Les principaux descripteurs utilisés sur des nuages de points issus de numérisations (cf. Fig. II.24a) ont été développés pour classifier [Hackel et al., 2017] des nuages en vue de leur segmentation ou leur analyse [Croce, 2023]. Ils peuvent aussi être utilisés pour guider des processus de fusion de données [Farella et al., 2019a] ou d'enrichissement [Nespeca and De Luca, 2016]. L'illustration II.24b reprend les descripteurs de formes implémentés au sein du logiciel CloudCompare qui sera mobilisé en chapitre 5.3.

Les descripteurs géométriques segmentent le contenu de représentations 2D ou 3D et permettent *in fine* de leur attacher de façon implicite un attribut sémantique [Adrian et al., 2014, Buglio et al., 2015]. Cette voie d'enrichissement, que l'on peut qualifier d'ascendante, est basée sur les données et leurs attributs. Elle se complète par une approche opposée dans laquelle on segmente une représentation sur base d'une observation sémantisée des données/attributs qui est celle de l'annotation, faisant l'objet de la section suivante.

2.4. MÉTHODES RELATIVES À L'INTERPRÉTATION ET À L'ENRICHISSEMENT DE DONNÉES PATRIMONIALES

Feature name	Expression
Linearity	$L_\lambda(\varrho) = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1}$ (5-4)
Planarity	$P_\lambda(\varrho) = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_1}$ (5-5)
Sphericity	$S_\lambda(\varrho) = \frac{\lambda_3}{\lambda_1}$ (5-6)
Omnivariance	$O_\lambda(\varrho) = \sqrt[3]{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}$ (5-7)
Eigenentropy	$E_\lambda(\varrho) = - \sum_{i=1}^3 \lambda_i \ln(\lambda_i)$ (5-8)
Surface variation	$SV_\lambda(\varrho) = \frac{\lambda_3}{\sum_{i=1}^3 \lambda_i}$ (5-9)
Sum of eigenvalues	$\Sigma_\lambda(\varrho) = \sum_{i=1}^3 \lambda_i$ (5-10)
Anisotropy	$A_\lambda(\varrho) = \frac{\lambda_1 - \lambda_3}{\lambda_1}$ (5-11)
Verticality	$V_\lambda(\varrho) = 1 - ([0 \ 0 \ 1], \mathbf{e}_3) $ (5-12)

(a) Liste et formules des descripteurs géométriques d'après [Hackel et al., 2017] extrait de [Croce, 2022].



(b) Liste des descripteurs géométriques disponibles dans CloudCompare.

FIGURE II.24 – Synthèse des descripteurs géométriques.

2.4.2.2 Annotations

Le lien tenu entre la segmentation et l'annotation vient d'être introduit. En effet, d'après Carboni, « le terme *annotation* dans le domaine de la 3D est flou et peut décrire deux activités différentes : (i) la segmentation sémantique et (ii) l'annotation par l'utilisateur »⁶⁶. Cette complémentarité a d'ailleurs été explorée dans une thèse récente, dans laquelle les deux approches se servent réciproquement de supports [Croce, 2022]. En effet, une forme de segmentation résulte de l'annotation, au même titre que la segmentation engendre une forme d'annotation du moment que l'on y adjoint une couche sémantique quelconque. L'annotation se situe donc au carrefour entre les approches ascendantes et descendantes. Cette section est consacrée à l'annotation sémantique du fait d'un utilisateur enrichissant un corpus par étiquetage, bien que des travaux récents du laboratoire MAP aborde une posture hybride [Réby et al., 2023].

Méthodes d'annotations

Les méthodes d'annotations sont généralement classifiées par type de support (Texte/2D/3D) et/ou par niveaux d'automatisation. L'annotation 3D [Ponchio et al., 2020], se décline qu'elle s'applique sur la surface, la texture, le volume ou sur une base hybride (cf. Fig. II.25). Cette étude concerne une approche 2D/3D manuelle, ou semi-automatique,

66. [Carboni, 2020] (p.54).

2.4. MÉTHODES RELATIVES À L'INTERPRÉTATION ET À L'ENRICHISSEMENT DE DONNÉES PATRIMONIALES

développée d'après la thèse de [Manuel, 2016]⁶⁷ désormais accessible au sein de la plateforme AIOLI. La méthode implémentée dans cet outil est considérée comme hybride à plusieurs titres (cf Fig. II.25 et II.27). D'une part, car l'annotation établie sur une représentation 2D (donc basée image) puis projetée en 3D (sur un nuage de point) est dite multi-supports. D'autre part, car même si l'annotation source est généralement manuelle, elle est automatiquement propagée sur l'ensemble des images orientées autour du nuage.

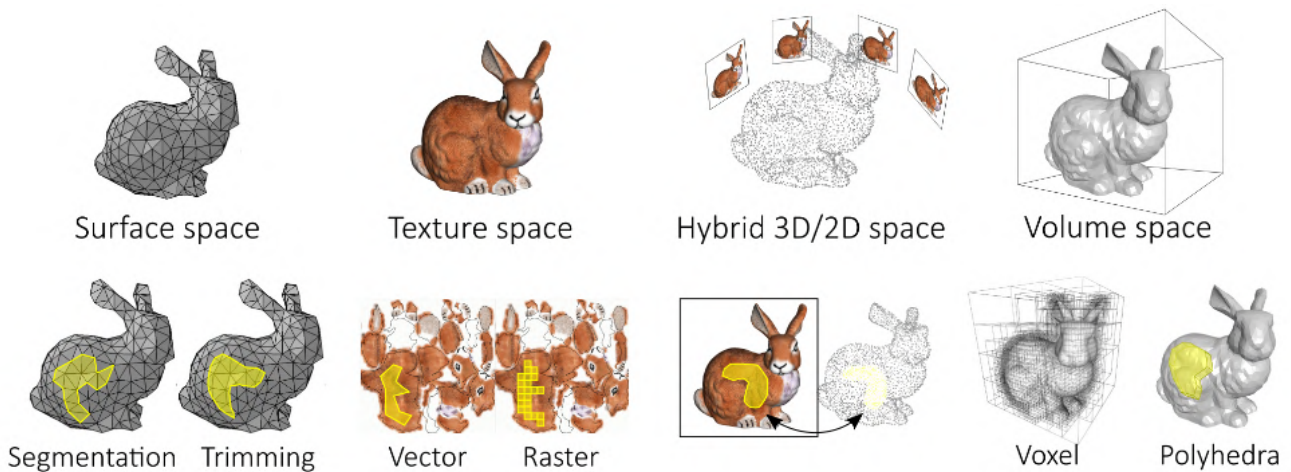


FIGURE II.25 – Représentation graphique des différentes approches d'annotation 2D/3D, d'après [Ponchio et al., 2020].

Scénarios d'annotations

L'annotation est un moyen privilégié pour l'enrichissement sémantique, contribuant à des approches de segmentation et de classification [Grilli et al., 2021, Kharroubi et al., 2021, Deligiorgi et al., 2021]. Des travaux l'intègrent au niveau ontologique pour l'aide au raisonnement et à l'analyse [Soler et al., 2017, Messaoudi et al., 2018]. De nos jours, l'annotation est une fonctionnalité qui s'interface à un SI [Apollonio et al., 2018] [1], à des progiciels destinés aux experts patrimoniaux [Wang et al., 2018b, Roussel and De Luca, 2023] ou à des applications grand public [Comino Trinidad et al., 2020]. En l'assimilant à des masques, elle peut aussi guider et optimiser le traitement d'image [Stathopoulou and Remondino, 2019]. Les scénarios d'annotations reflètent une vaste palette d'activités, dont les articulations fines avec les études patrimoniales sont encore en voie d'exploration. Dans le cas présent, l'intérêt porte sur le rapport qu'elle peut entretenir avec la multimodalité, et pour l'aborder, il faut approfondir le processus d'annotation en tant que tel.

67. Les méthodes automatiques, tirant du côté de la segmentation par le biais d'approches probabilistes, de classification ou d'apprentissage (Id.pp.54-61) dépassent du cadre de cette étude.

2.4. MÉTHODES RELATIVES À L'INTERPRÉTATION ET À L'ENRICHISSEMENT DE DONNÉES PATRIMONIALES

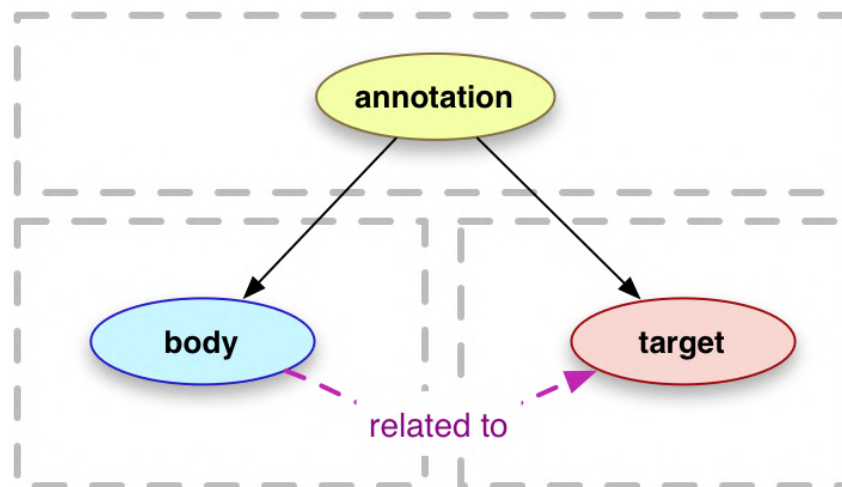


FIGURE II.26 – Modèle d'annotation web du W3C.

Le modèle d'annotation W3C

Malgré le nombre croissant de recherches qui la mobilisent, l'annotation est protéiforme et ne s'appuie de façon directe sur aucun standard. Néanmoins, l'adoption du modèle d'annotation W3C⁶⁸ semble en bonne voie. Une annotation y est composée de trois entités atomiques [Sanderson et al., 2013].

« Le modèle de données des annotations Web fournit un cadre pour exprimer la relation entre une triade de ressources connectées : **l'annotation**, **sa cible** et **son corps**. L'**annotation** est définie comme une **déclaration d'intérêt**, une manière dont un élément d'information est lié à un sujet. Le sujet est dans cette triade, la **cible**, soit une **ressource numérique** soumise à l'annotation. La troisième partie de la triade est le **corps** soit le **contenu** de l'annotation, l'information qui est liée à la cible ». ^a

a. D'après [Carboni, 2020](p.145).

Ce modèle combine plusieurs avantages. D'une part, il est en adéquation et facilement alignable, avec le triplet *sujet – prédicat – objet* constituant une ressource en web sémantique⁶⁹. D'autre part, il est assez flexible pour englober différentes méthodes d'annotations, y compris dans une perspective multimodale.

68. Issu du groupe de travail Web Annotation Data Model (cf. <https://www.w3.org/TR/annotation-model/>).

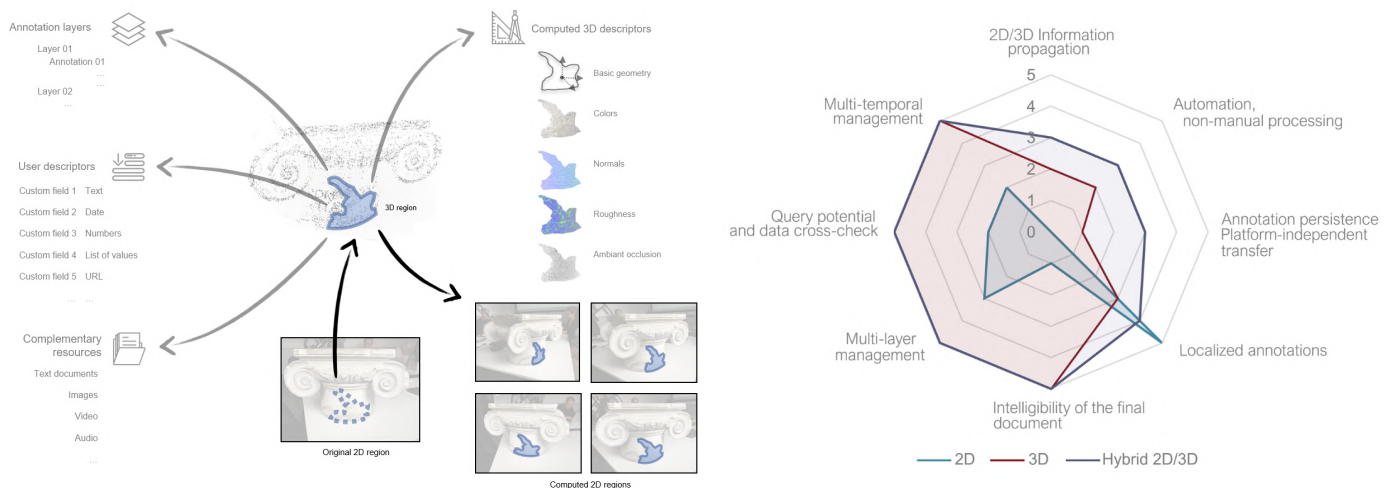
69. Il ne s'agit pas d'un concours de circonstances puisque le W3C est aussi à l'origine de la formalisation du Resource Description Framework (RDF).

2.4. MÉTHODES RELATIVES À L'INTERPRÉTATION ET À L'ENRICHISSEMENT DE DONNÉES PATRIMONIALES

Annotation et multimodalité

Par exemple, ce modèle accepte une annotation sans corps, dans ce cas l'annotation est un simple pointeur vers une partie de la ressource (en ce sens très proche d'une segmentation). Surtout, il anticipe l'existence d'annotations avec de multiples relations entre les corps et les cibles et devient ainsi compatible avec les quatre typologies d'annotations (par tags, attributs, relations et ontologies) selon [Andrews et al., 2012]. Cela implique qu'une annotation unique peut agréger différents niveaux ou couches d'informations, possiblement utiles en scénario multi-acteur et multi-temporel. Enfin, cela induit la possibilité d'une annotation avec ancrages variés (p. ex. points, lignes, régions, volumes) sur plusieurs cibles (c.-à-d. sources d'imagerie, échelles d'observation, états temporels, instances d'un même modèle numérique).

L'annotation, n'étant plus nécessairement attachée à une ressource, elle gagne en autonomie, voire en indépendance, jusqu'à acquérir sa propre raison d'être et de devenir potentiellement un objet d'étude à part entière. En effet, « ... de plus en plus de systèmes les considèrent non seulement comme des informations utiles sur l'objet, mais aussi comme des informations utiles en elles-mêmes [...] Leur enregistrement en guise qu'entité différente de l'objet permet à une annotation d'être annotée, ainsi que d'être étudiée et préservée en tant qu'objet social »⁷⁰.



(a) Schéma, principe et structure d'une annotation sémantique spatialisée au sein d'AIOLI, d'après [Abergel et al., 2023].

(b) Comparaison graphique entre les approches d'annotation 2D, 3D et hybride 2D/3D, d'après [Croce, 2022].

FIGURE II.27 – Système et paradigme d'annotation hybride 2D/3D.

70. Traduit depuis [Carboni, 2020] (p.59).

2.4. MÉTHODES RELATIVES À L'INTERPRÉTATION ET À L'ENRICHISSEMENT DE DONNÉES PATRIMONIALES

2.4.2.3 Métadonnées

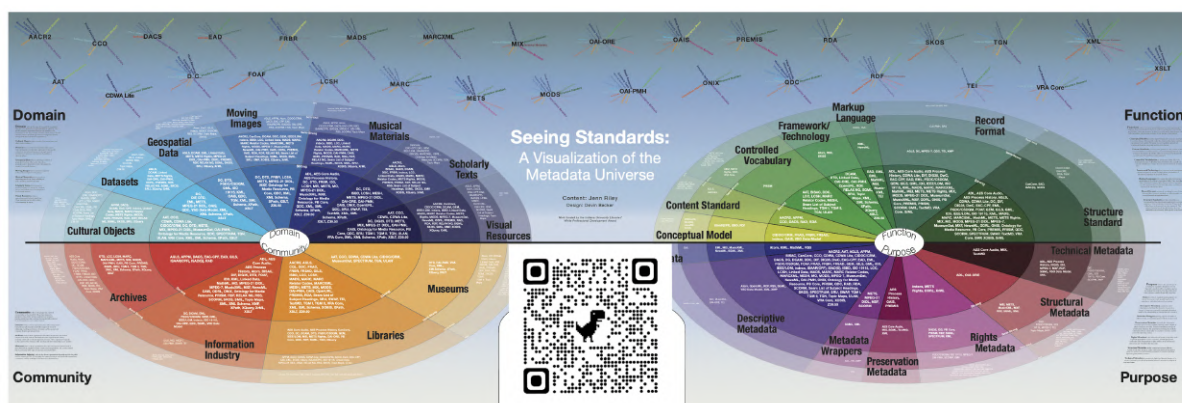


FIGURE II.28 – Infographie sur l'univers des métadonnées, d'après [Riley, 2018] | *Flashez le QR-CODE au centre de l'image pour accéder à la ressource en ligne en pleine résolution.*

Cette notion essentielle est introduite ici de façon synthétique et sélective, car sa complexité du point de vue des sciences de l'information dépasse très largement l'usage qu'il en sera fait (cf. Fig. II.28) [Greenberg, 2005]⁷¹. À ce titre, l'introduction proposée ici est complétée par une lecture plus fine en chapitre 6.3 (p.211). La gestion des métadonnées reste cependant une question cruciale du moment que l'on s'intéresse aux données, au sens de ressource numérique. Au-delà de toutes discussions possibles [Furner, 2020], on acceptera sa définition la plus simple et suffisante à la portée de cette étude ;

Les métadonnées sont des données utilisées pour décrire et fournir des informations sur d'autres données.

Schémas et domaines d'application

On les retrouve généralement sous une forme textuelle et structurée (voire normalisée), par association ou intégration à d'autres fichiers pour en décrire ou utiliser leur contenu. On distingue plusieurs catégories de métadonnées, parmi lesquelles celles dites techniques ou descriptives, qui intéressent cette étude. L'usage des métadonnées est généralement régi par des modèles normatifs, définis par des schémas de métadonnées. Ces schémas sont nombreux et formalisent de façon intentionnelle un cadre d'application spécifique à un type de données

71. Source image : Riley, J. (2018). Seeing Standards : A Visualization of the Metadata Universe. Consulté le 6 juin 2023, à l'adresse <https://jennriley.com/metadatamap/>. Source jeu de données : Riley, Jenn, 2018, « Seeing Standards : A Visualization of the Metadata Universe », <https://doi.org/10.5683/SP2/UOHPVH>, Borealis, V3, UNF :6 :gWl/jicj8wtJm4Grmph7TQ== [fileUNF].

2.4. MÉTHODES RELATIVES À L'INTERPRÉTATION ET À L'ENRICHISSEMENT DE DONNÉES PATRIMONIALES

pour un usage adapté à un domaine d'étude : parmi lesquels le Dublin Core [Sugimoto et al., 2002], le METS [Cundiff, 2004], le LIDO [Coburn et al., 2010], l'EAD [Skinner, 2014], le CARARE [D'Andrea and Fernie, 2013], le STARC [Hermon et al., 2012] ou le MIDAS⁷². Y compris au sein des GLAM⁷³, plusieurs schémas co-existent, voire tendent à se multiplier (cf. Fig. II.29). Il est commun de s'appuyer et de faire dialoguer plusieurs schémas, permettant chacun d'apporter un niveau de spécification et de granularité adapté aux ressources. Cela se traduit par des alignements (mapping) des termes comme dans cet exemple baptisé CHDE (Cultural Heritage in Digital Environment) [Chiranthi and Shigeo, 2018] basé sur le schéma Europeana Data Model (EDM) destiné à la documentation d'objets patrimoniaux matériels et immatériels.

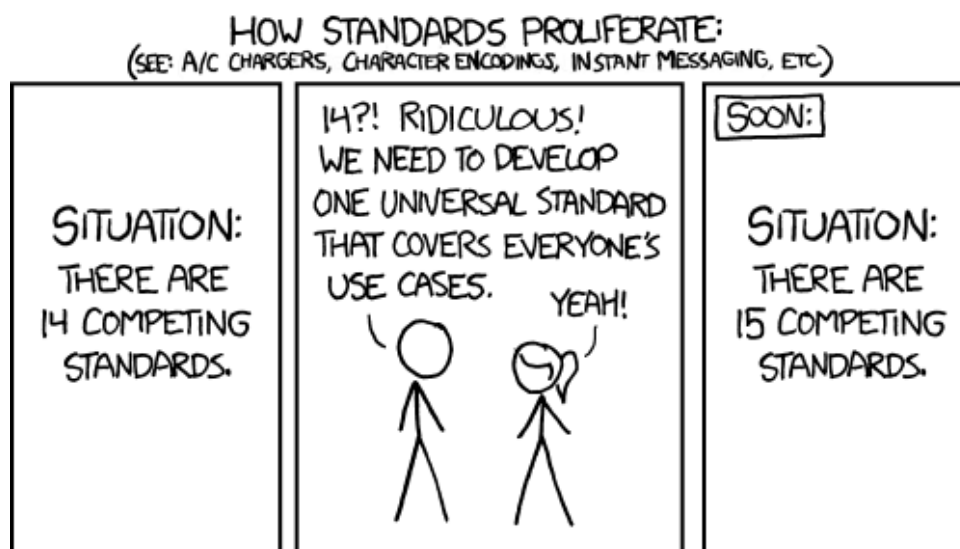


FIGURE II.29 – Même sur la prolifération des standards, d'après <https://xkcd.com/927/>.

En pratique, chaque schéma est délimité par un périmètre d'action le rendant plus ou moins approprié pour un objectif visé, rarement transposable à d'autres domaines (par exemple la norme DICOM [Daffara et al., 2018]). Celui de cette étude, concerne la provenance des données et dans ce cas précis, des sources d'imagerie multimodales [Rei et al., 2023]. Aucun schéma n'existe pour ce contexte spécifique, et au-delà des modèles cités plus haut, d'autres normes relatives à l'image et à la photographie (EXIF, XMP et IPTC) sont décrites infra (cf. chapitre 6.3 p.211).

72. <https://www.dcc.ac.uk/resources/metadata-standards/midas-heritage>

73. Acronyme anglophone pour désigner les institutions publiques chargées de la collecte d'éléments du patrimoine culturel et historique (Galleries, Libraries, Archives and Museums).

2.4. MÉTHODES RELATIVES À L'INTERPRÉTATION ET À L'ENRICHISSEMENT DE DONNÉES PATRIMONIALES

Les paradonnées

Ces réflexions permettent d'entrevoir un seul versant, disons technique, de la question des métadonnées, faisant unanimement ressortir l'élément fondateur des métadonnées, à savoir le contexte. Cette lacune de contextualisation des données et métadonnées se vérifie à l'échelle macroscopique du domaine d'application ainsi que des approches citées ci-avant. Pourtant cela semble primordial pour documenter et tracer les données au sein de leur flux de production. C'est le concept des paradonnées proposé par [Couper, 2017] :

« Les paradonnées sont des données recueillies en parallèle d'un dispositif de collecte et qui en décrivent le processus, là où les métadonnées décrivent les données collectées ». ^a

a. Source : Brunel, V. (2021). Des métadonnées et paradonnées pour mieux exploiter des données d'enquêtes pour la recherche. Consulté le 6 juin 2023, à l'adresse <https://hal.science/hal-03432005v1> (p.110).

Cette question, corollaire à celle des métadonnées, a fait l'objet de travaux récents [Hu-
vila, 2013], [Apollonio and Giovannini, 2015] qui se heurtent une fois de plus aux difficultés inhérentes à la standardisation ⁷⁴.

2.4.2.4 Données liées et ouvertes pour le web sémantique

Ce point d'ouverture sera introduit brièvement en qualité de défis sociétaux qui influence la sphère scientifique. La position défendue consistera à prendre des dispositions pour s'aligner sur ces perspectives ⁷⁵. L'enrichissement des données partage la même connotation en Science des Données qu'en Web Sémantique. « Aujourd'hui, les technologies du Web sémantique et du Big Data promettent de faciliter plus directement l'analyse des données, la classification des informations, la conceptualisation sémantique et l'automatisation de la gestion des contenus multimodaux » ⁷⁶. Ce faisant, toute approche d'enrichissement sémantique devrait nécessairement être orientée vers une exploitation à large échelle et d'archivage à long terme [Quantin et al., 2023]. Certains prérequis abordés dans cette section permettent une transition douce des données vers les principes dits FAIR ⁷⁷ énoncés selon 4 × 4 recommandations (cf. Fig. II.30a) stipulant que les données doivent être :

74. « Un frein important à la publication des paradonnées, c'est l'absence de standard pour décrire de façon structurée les paradonnées. De la même façon que les données primaires ont besoin de métadonnées, les paradonnées ont besoin de métadonnées ! » (Op.Cit. [Brunel, 2021] p.120)

75. Au même titre que les aspects relatifs aux vocabulaires contrôlés et aux ontologies.

76. Traduit depuis [Dimoulas, 2022] (p.1).

77. <https://www.go-fair.org/fair-principles/>

2.4. MÉTHODES RELATIVES À L'INTERPRÉTATION ET À L'ENRICHISSEMENT DE DONNÉES PATRIMONIALES

- **Facile à trouver**, par la description des données par des métadonnées riches et en favorisant l'utilisation d'identifiants pérennes
- **Accessible**, par la mise à disposition des données sur des plateformes libres et durables
- **Interopérable**, en utilisant des langages et des formats ouverts facilitant l'échange, le partage et le moissonnage des données à large échelle
- **Réutilisable**, en garantissant le lignage des données et en leur attribuant des licences libres ou permissives.

FAIR × LOD

C'est en suivant cet ensemble de préconisations, valables bien au-delà de notre champ de recherche, qu'est né le néologisme de « fairisation » des données. À noter qu'une autre dénomination coexiste, il s'agit des *Données Ouvertes Liées*⁷⁸ qui correspondent peu ou prou à la même démarche, mais par un système de classification d'une à cinq étoiles (cf. Fig. II.30b). Une matrice proposée par [Hasnain and Rebholz-Schuhmann, 2018] permet de positionner ses données sur les deux échelles (cf. Fig. II.30c).

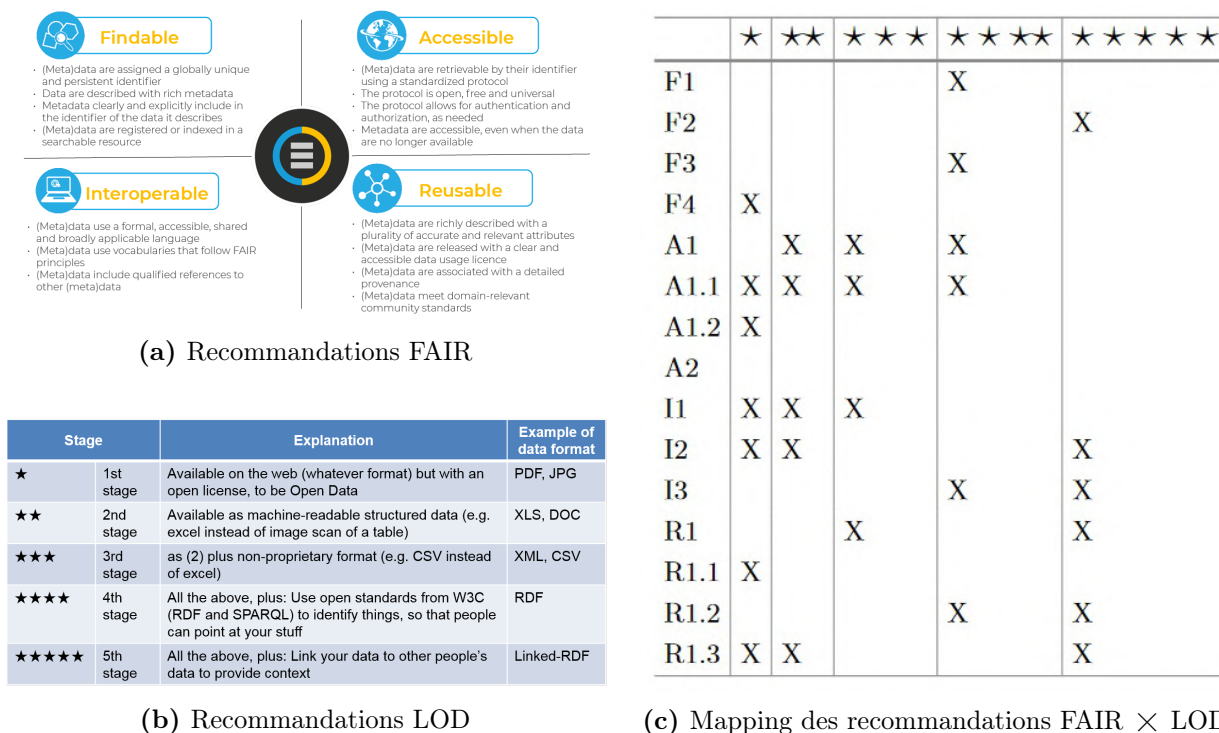


FIGURE II.30 – Paradigmes des données ouvertes et liées. Sources (cf. Table des illustrations p. 281).

78. De l'anglais Linked Open Data (LOD).

2.4. MÉTHODES RELATIVES À L'INTERPRÉTATION ET À L'ENRICHISSEMENT DE DONNÉES PATRIMONIALES

Applications aux données patrimoniales

Le Patrimoine Numérique et plus largement les Humanités Numériques sont évidemment concernés, à commencer par la nécessité de transparence des flux de recherche [Vavliakis et al., 2020, Davis and Heravi, 2021]. La gestion des métadonnées (et des paradonnées) [Mi and Pollock, 2018] apparaît comme point de rencontre du continuum informationnel et de la de traçabilité des flux de production de données scientifiques [Carboni et al., 2016, Schroer and Mudge, 2017]. Cela nécessite cependant des systèmes de visualisation avancés⁷⁹ encore à l'état embryonnaire. Néanmoins, quelques exemples de moissonnage à plus large échelle sont cités [Dragoni et al., 2017, Kesäniemi et al., 2022, Jeanson et al., 2019] en s'appuyant sur des modélisations sémantiques exprimées en CIDOC-CRM. Dans la pratique, la mise en synergie de ces composants pour un domaine spécifique est opérée par le biais de profils d'application⁸⁰. L'absence de profil d'application dédié au patrimoine culturel impose aux experts de notre domaine de développer leurs propres méthodes [Guillem et al., 2023].

2.4.3 Bilan des méthodes d'enrichissement

Comme vu dans cette dernière section de l'état de l'art différentes voies d'enrichissement peuvent être intégrées aux approches actuelles mobilisant des activités de numérisation. Autant sur le plan technique que sémantique, cela induit d'aller vers plus d'interopérabilité des données pour favoriser l'exploitation du contenant (format de fichier) et du contenu informationnel des ressources numériques (terminologie, métadonnées, annotations). Alors que la problématique de l'enrichissement émerge « en bout de chaîne », l'anticipation de certaines de ces composantes pourrait être une clé stratégique de cette étude. L'amorce d'un dialogue avec les couches sémantiques a été introduit soit sur base d'approches de segmentation du contenant (p. ex. descripteur géométrique et annotations) ou d'augmentation du contenu (p. ex. annotations et métadonnées). Différentes pistes visant un enrichissement précoce des données ont été exposées par des approches ascendantes (descripteur géométrique), descendantes (annotations), hybrides (métadonnées) ainsi la plus-value potentielle issue de leur mise en synergie. Enfin, le défi proposé par les données liées et ouvertes permettra d'appréhender les flux de données et de connaissances issus de documentations multimodales au sein de leurs cycles de vie respectifs [Laroche, 2017].

79. <https://projectmirador.org/>

80. Il énonce des spécifications pour adapter les principes et les normes des données liées aux besoins d'un domaine d'application, en fournissant des directives pour la modélisation, la description et l'interconnexion des données au sein de ce domaine. Par exemple Le Linked Art Data Model, fait office de référence pour la sphère artistique (cf. <https://linked.art/model/>).

2.5 BILAN DES PROTOCOLES, DES PROCÉDURES ET DES MÉTHODES ACTUELLES AU REGARD DES APPROCHES MULTIMODALES

Après avoir proposé une définition étendue et contextualisée de la multimodalité (cf. section 2.1), cette notion a été interrogée puis mise en perspective au sein de l'ensemble de la chaîne de numérisation 2D/3D patrimoniale. À la rencontre de chacune des thématiques, allant de l'acquisition jusqu'à l'enrichissement des données, il apparaît que la multimodalité, même si elle ne révolutionne pas les Sciences du Patrimoine — qui la mobilisait déjà peut-être sans la nommer ainsi — présente quelques verrous récurrents qui seront approfondis lors du chapitre suivant. Cette première approche de la littérature aura apporté les ressources nécessaires pour mettre en exergue les questions et les pistes de recherches développées ci-après. Pour rappel, le positionnement de ce travail vis-à-vis de l'état de l'art est aussi complété dans chacun des chapitres de contribution, apportant parfois un regard plus précis sur des éléments saillants insuffisamment étudiés jusqu'ici.

2.5. BILAN DES PROTOCOLES, DES PROCÉDURES ET DES MÉTHODES ACTUELLES AU REGARD DES APPROCHES MULTIMODALES

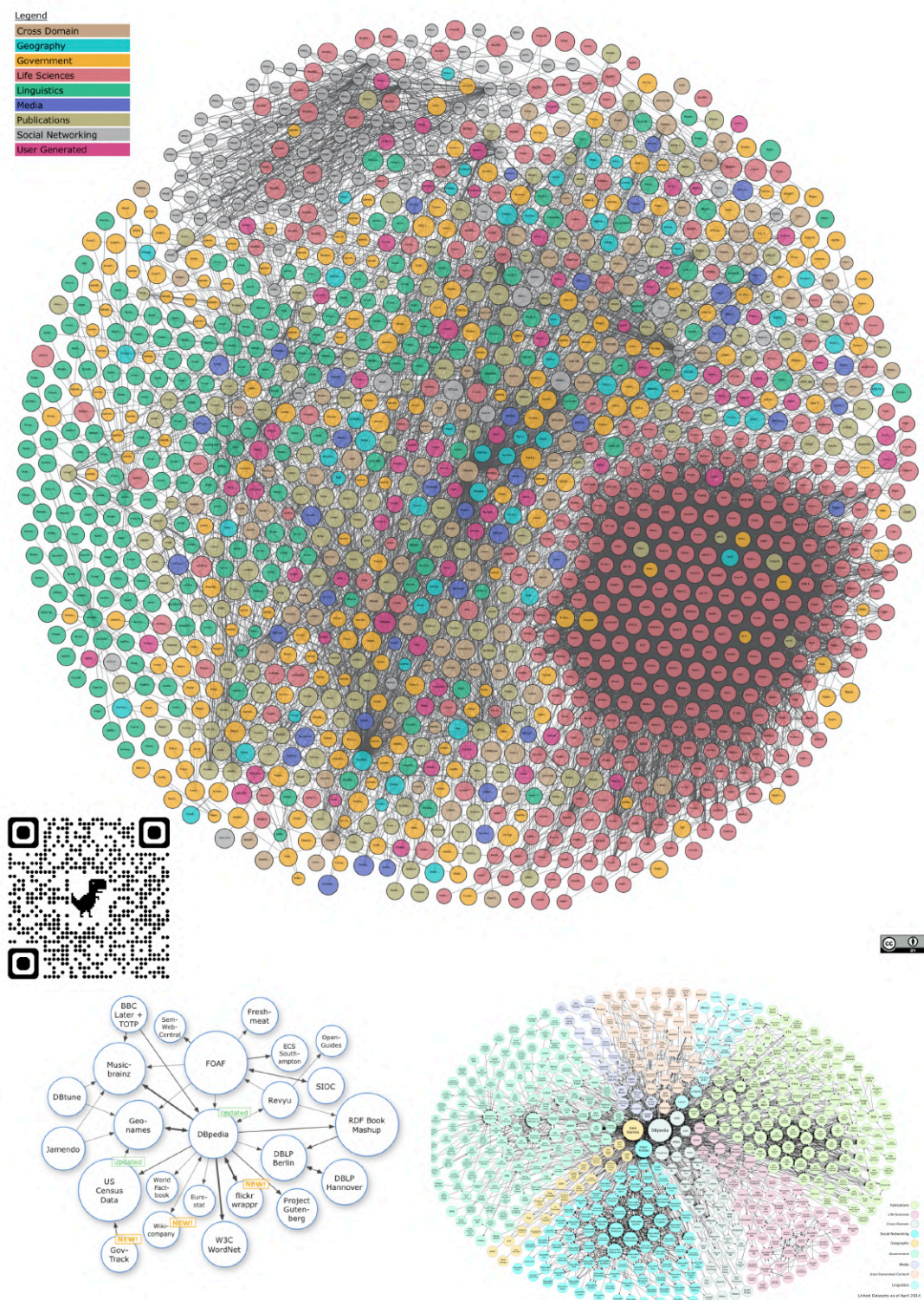
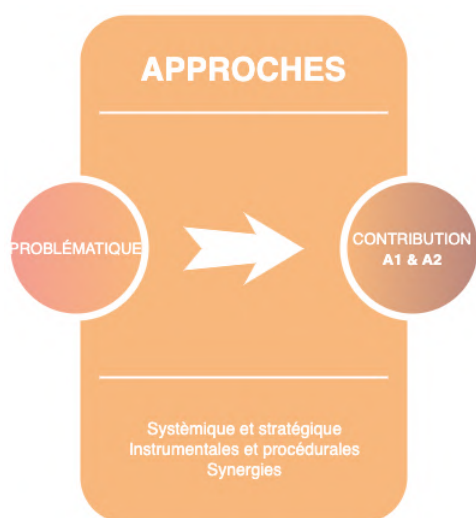


FIGURE II.31 – Évolution du nuage des Données Ouvertes Liées entre 2007 (en bas à gauche), 2014 (en bas à gauche) et 2023 (en haut). Source : <https://lod-cloud.net/>

Accessible en ligne en flashant le QR Code intégré à l'illustration.

Chapitre III

Définition des approches pour des stratégies multimodales dédiées à l'imagerie patrimoniale



La lecture critique de l'histoire récente des technologies dites de numérisation — au prisme des Sciences du Patrimoine — a permis dans les chapitres précédents de justifier et de borner les bénéfices de potentielles approches multimodales. Pour autant, les stratégies à élaborer impliquent de nombreux questionnements faisant l'objet de ce chapitre. La discussion de ce chapitre porte sur les relations fines entre différentes composantes de l'étude selon l'axiome *acquisition – traitement – interprétation* et recadrées sur la question centrale de la multimodalité, telle que définie auparavant (cf. sections [1.2](#)

et [2.1](#)). Ce chapitre introduit et développe les différents types d'approches qui seront mobilisées dans la suite pour présenter et articuler les contributions. Les grandes lignes des stratégies y seront exposées pour appréhender les problématiques en matière de *spatialisation, de fusion et d'enrichissement* d'imagerie multimodale.

3.1 L'APPROCHE SYSTÉMIQUE

Le rôle de la systémique pour aborder les questions de recherche ayant été introduit (cf. section 1.4.1 p.25) cette section tentera d'appliquer cette démarche au sujet de l'étude. Le système qui est observé ici (au sens repris dans l'encadré p.24) mêle plusieurs composantes telles que le *Patrimoine*, le *Numérique* et l'*Imagerie*. Pour rappel, chacun de ces éléments et quelques unes de leurs articulations ont été discutés en introduction (cf. section 1.1.1 et 1.1.2 pp.13-16). Les problématiques induites par l'ajout de la *Multimodalité* ont aussi été introduit auparavant (cf. section 1.2 p.18). Selon la définition donnée (cf. section 2.1.3 p.36) il semble opportun de s'interroger sur la mise en coopération de ces composantes.

À la rencontre de ces composantes émerge en quelque sorte des sous-système comme celui du Patrimoine Numérique (PN), lequel peut contenir ou associer celui de l'Imagerie Multimodale (IM). Ces derniers héritent de caractéristiques communes, faisant par exemple que la numérisation du patrimoine n'est ni standardisée et ni universelle ; disons la protéiforme. Effectivement, en dépit de l'arsenal technologique à disposition des scientifiques du patrimoine, l'objet d'étude patrimonial, qu'il soit artéfact, collection ou site monumental, requiert une posture à géométrie variable pour en permettre son relevé comme son analyse. La *fragmentation* des pratiques qui en résulte est à l'origine de nombreuses problématiques. Cette dernière s'accompagne d'un facteur de *subjectivité*, dont on retrouve y compris de nos jours des marqueurs prégnants et persistants pour l'acte de relevé [Saint-Aubin, 1992], et ce malgré l'automatisation et la sophistication des dispositifs de numérisation. Sur base de considérations d'ordres descriptives [Abergel, 2020] ou cognitives [Lo Buglio, 2016], des études récentes convergent d'ailleurs sur le rôle d'observateur ou la posture analytique nécessaire entre l'opérateur et son instrument de mesure. Ce point semble primordial à l'heure où les experts du patrimoine font un usage croissant de l'imagerie scientifique et dont les technologies de numérisation s'inscrivent peu à peu comme une source de documentation de premier ordre, voire incontournable. Le problème eut été différent, si tel objet patrimonial pouvait être invariablement documenté par tel expert, avec telle méthode et tels instruments, à tel instant donné. En lieu et place d'un tel système uniforme et hermétique, les SP foisonnent d'expertises plurielles et variées. À partir du relevé jusqu'à son étude, le patrimoine devient un objet de recherche ou de connaissance faisant partie d'un plus vaste système (de connaissances). L'objet patrimonial réel et digital s'hybride au sein d'un système complexe d'ingénierie des connaissances [Varet-Pietri, 2000] pour la plupart ineffable.

3.1. L'APPROCHE SYSTÉMIQUE

À l'égard de différents domaines, systèmes et observateurs sont deux notions interdépendantes. En posant l'hypothèse de travail que cette étude porte bel et bien sur un système composé d'un ensemble de sous-systèmes ($PN \times IM$), l'absence de deux éléments saillants surgit. D'une part, les éléments d'un système se doivent d'être en *liaison* et d'autre part, ceux-ci, ainsi que leurs relations, doivent être *structurés ou ordonnés*¹. Deux questionnements émanent de cette réflexion, en supposant que chaque élément de chacun des systèmes est déjà connu avec suffisamment de précision.

Que sait-on sur les liaisons qui sous-tendent le *Patrimoine Numérique* et l'*Imagerie Multimodale* ?

Que connaît-on des mécanismes et interactions permettant de structurer les relations entre les éléments clés de tels systèmes ?

À priori, peu de choses, d'où la nécessité de proposer au sein de cette thèse des éléments de réponse. *In extenso*, se doter d'une connaissance structurelle et maîtriser les articulations entre ses parties devrait permettre d'améliorer le fonctionnement du ou des systèmes observés.

De nos jours, les tenants et aboutissants de la multimodalité rendent cette tâche encore plus complexe. En effet, ses pratiques font varier divers composants à l'échelle du système (c.-à-d. expertises, capteurs, dimensions spatiales, spectrales ou temporelles, etc.). La multimodalité a pour effet de bord de multiplier les sources sans directement accroître leur potentiel. De plus, elle fait émerger des problématiques latentes en matière de spatialisation, de fusion ou d'enrichissement qui se dressent comme autant de verrous pour que les procédures de documentation actuelles soient synonymes et vectrices de nouvelles connaissances. C'est dans cette optique que cette thèse s'inspire d'une analyse dite systémique, visant *in fine* à maximiser les performances du système. Il faudrait pour cela définir avec précision ledit système au risque de diverger sur des considérations trop ou pas assez contextualisées. Il apparaît plus mesuré et raisonnable d'invoquer le principe d'une approche systémique des questions recherches soulevées dans cette thèse.

1. Cf. Définition donnée en p.24 ou glossaire p.245.

3.2 L'APPROCHE STRATÉGIQUE

La section précédente a souligné la présence de différents systèmes que l'on peut qualifier de « complexes »². En tout logique, leur rencontre en augmente l'ordre de complexité, et comme mentionné, la multimodalité participe aussi à cet engrenage. Cette *complexité* est constatée et déjà étudiée par de nombreuses recherches du domaine, au même titre que la surcharge de données qui en découle [Lo Buglio, 2016]. « La problématique de complexité témoigne d'abord de l'incapacité de la numérisation (données massives) à exprimer un domaine de connaissances » (*idem*). On notera ici les connivences, d'une part, entre la notion de domaine et celle de système de connaissances introduites plus haut [Ermine, 2000], d'autre part du fossé créé entre la massivité des données et leur potentielle plus-value informative ou cognitive. Cette composante a priori inhérente au domaine d'étude aboutit à de nombreux verrous, dont certains furent levés par ces mêmes travaux (*op. cit.*). Cela permet à la complexité de se déployer comme un moteur de recherche et d'innovation³. Si la complexité des numérisations conventionnelles est devenue un champ d'investigation, leurs applications multimodales offrent un terrain fertile dont ce travail de recherche en propose l'exploration. S'il est commun d'aborder un problème complexe par la systémique⁴, la résolution d'un tel problème nécessite avant tout une approche stratégique. La proposition faite ci-dessus de raisonner en tant que système ou ensemble de systèmes en interaction constitue une première stratégie, d'ordre méthodologique. Surtout, elle permet de décomposer et d'œuvrer à la résolution de problèmes à des sous-échelles, disons d'ordres mésoscopiques, plus facilement maîtrisables⁵.

Le rapprochement entre l'approche systémique et stratégique s'opère et se justifie aussi par la proximité sémantique de leurs définitions respectives. L'usage du terme *stratégie* sera compris pour cette étude en tant que :

2. Tel que défini et discuté dans la référence : Galarreta, D., Charrel, P. J. Les points de vue en conception des systèmes complexes : entre méthodologie et épistémologie. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=bf953eb38f485253ea64f723e9ab1f998636dee3>. Dernier accès le 21 mai 2023.

3. « Au sens courant, réducteur et inexact de complication, le terme « complexité » servait d'excuse au manque de théorie et d'explication. De justification, il est devenu problème, lui-même objet d'étude. La complexité a évolué dans le contexte scientifique et épistémologique contemporain et a pris, dans les sciences sociales, une ampleur considérable » [Abdelmalek, 2004]

4. Cf. (*idem*).

5. Il semble plus raisonnable que de l'aborder frontalement et directement à l'échelle macroscopique.

3.2. L'APPROCHE STRATÉGIQUE

« Ensemble d'actions coordonnées, d'opérations habiles, de manœuvres en vue d'atteindre un but précis »

et

« Manière d'organiser, de structurer un travail, de coordonner une série d'actions, un ensemble de conduites en fonction d'un résultat »^a

a. Source CNTRL : <https://www.cnrtl.fr/definition/strat%C3%A9gie>.

Au-delà des appuis sur des racines étymologiques partagées, on dénote une sorte de complémentarité. En effet, là où le *système* est un élément organisationnel abstrait régissant en quelque sorte un « champ des possibles », la *stratégie* introduit « l'action » et sa mise en œuvre dans une sphère concrète. Métaphoriquement parlant, si la musique est un système, la stratégie peut être représentée par la figure du chef d'orchestre⁶. Ainsi il est possible d'envisager que sans nécessairement être un faux problème⁷, la complexité inhérente à la multimodalité pourrait être un problème mal-posé. Bien que faisant face à des systèmes complexes, dont les forces et les mécanismes peuvent parfois paraître opposés, Lo Buglio⁸ a fait notamment poindre de façon perspicace le rôle ou l'idée d'un nouveau rôle des modalités en énonçant la piste suivante :

« il s'agit donc d'envisager les *modalités* permettant de rendre explicites les observations et opérations analytiques conduites sur la numérisation tout en conservant la richesse et la complexité du jeu de données ».

Cela conduit le raisonnement à une situation intéressante rendant possible de considérer la (multi)modalité à la fois comme le problème et une partie de la solution.

Fragmentation VS Standardisation

Il va de soi que la multimodalité apporte son lot de complications, en premier lieu celui de la *fragmentation*, à mettre en écho avec les propos précédents sur la pluralité du patrimoine et de ses numérisations. Dans ce contexte, la multimodalité complexifie, au-delà des données, la possibilité d'approches « standardisées » applicables à la somme des

6. On pourrait filer la métaphore, jusqu'à développer l'idée que cette thèse explore des partitions numériques pour mettre en musique le patrimoine.

7. « Les sciences humaines et sociales utilisent, de plus en plus couramment, la notion de « complexité ». Cependant, la signification est loin d'être claire et donne lieu, le plus souvent, à de faux problèmes. » [Abdelmalek, 2004] (*Idid.*).

8. (*ibid.* p.133).

3.2. L'APPROCHE STRATÉGIQUE

systèmes étudiés. Cela se vérifie par l'absence de consensus sur un ensemble de points (plan de gestion des données, schémas de métadonnées, traçabilité et démarche qualité, interopérabilité, etc.). Cela amène à penser que cette hétérogénéité n'est pas résultante du système patrimonial, mais tout simplement structurelle⁹. Le défi semble bel et bien de tirer parti de cette hétérogénéité, au lieu d'en subir les conséquences. Pour cela, il faut prendre ses distances avec un idéal poursuivi de longue date par la communauté scientifique. Celui-ci ne concerne pas la définition d'un *Continuum Informationnel* (entre la capture de données sources et l'exploitation des connaissances) qui au contraire apparaît comme primordial pour exploiter les approches multimodales. Il convient cependant de se dégager de la contrainte de le rendre généralisable, en toute circonstance (c'est-à-dire à tout objet d'étude et à tout instant). Premièrement, car la fragmentation des pratiques, faisant la richesse des approches multimodales, ne peut s'exprimer pleinement au sein de démarches trop standardisées. Secondement, car l'uniformisation des approches que ces dernières imposent lisserait ou annihilerait leur potentiel.

Notre stratégie globale consiste à intégrer de nouvelles perspectives temporelles. Cela s'opère autant par des postures autant anticipatives que rétrospectives permettant de renforcer les relations transversales entre les modalités. La phénoménologie cyclique proposée, par ailleurs plus conforme à l'observation d'un système articulé, dessine une boucle, sans début ni fin. Cela dessine la possibilité d'un cercle non plus vicieux, mais vertueux, dans lequel des connaissances issues de numérisations multimodales pourraient enrichir et servir des expériences en cours ou à venir. Ce retour de la sémantique en phase de relevé est non seulement stimulant, mais fait aussi écho à la notion de *subjectivité* introduite en début de chapitre. En effet, la multimodalité réintroduit l'importance du choix dans les stratégies de relevés et offre par conséquent un premier regard analytique sur l'objet d'étude. Par extension, il est possible que la multimodalité puisse constituer ou contribuer à la richesse sémantique, non plus pour la seule phase d'acquisition, mais en tout point du système. C'est-à-dire en renforçant le rôle de la multimodalité aussi en étape de traitement ou au moment de l'interprétation, par le biais d'approches et stratégies spécifiquement dédiées (cf. Fig. I.6 p. 24).

9. Du fait que cette hétérogénéité se décline à l'instar de cette étude [Visser et al., 1997] à différents niveaux du système sémantique (Contenu, Ontologie, Langage et Paradigme).

3.3 DUALITÉ DES APPROCHES INSTRUMENTALES ET PROCÉDURALES

Il est commun face à une situation complexe de réduire sa portée en décomposant le problème. Le principe invoqué ici est celui du *découpage systémique* pour le développement de nouvelles stratégies multimodales. Ce paragraphe a pour objectif de distinguer et d'articuler deux types d'approches, définies tel que :

Les approches qualifiées d'*instrumentales* se concentrent sur l'utilisation d'outils et de techniques spécifiques pour résoudre un problème.

Les approches dites *procédurales* se focalisent quant à elles sur les méthodes et les étapes nécessaires pour résoudre un problème, sans nécessairement se concentrer sur un outil spécifique.

Les résultats provenant de ces deux approches constituent deux éléments de réponse à un problème commun. Il est apparu que leur complémentarité est particulièrement cohérente pour interroger le versant tantôt instrumental, tantôt procédural des pratiques de numérisation multimodales appliquées au Patrimoine. Pour approfondir leur définition et leurs apports respectifs, il faut comme cela a été fait auparavant pour la multimodalité, regarder au-delà du domaine d'étude présent.

3.3.1 Les approches instrumentales

Le domaine de l'ergonomie¹⁰ apporte un nouveau regard sur les corrélations possibles entre le concept d'*instrument* et l'approche *systémique*. Notre point d'entrée sera la notion de *système d'instruments* découlant elle-même de la théorie des systèmes, telle que décrite par [Bourmaud, 2007] et caractérisée comme suit :

10. Ce rapprochement avec cette discipline n'est pas fortuit, mais au contraire pertinent avec le cadre de l'étude. Ci-après la définition récente donnée par l'IEA (International Ergonomics Association) de cette discipline; « L'ergonomie (ou Human Factors) est la discipline scientifique qui vise la compréhension fondamentale des interactions entre les humains et les autres composantes d'un système, et la profession qui applique principes théoriques, données et méthodes en vue d'optimiser le bien-être des personnes et la performance globale des systèmes – Les praticiens de l'ergonomie, les ergonomes, contribuent à la planification, la conception et l'évaluation des tâches, des emplois, des produits, des organisations, des environnements et des systèmes en vue de les rendre compatibles avec les besoins, les capacités et les limites des personnes ».

- i. Un système d'instruments est lié aux objectifs de l'action poursuivis par le sujet et doit permettre l'atteinte d'un meilleur équilibre entre les objectifs d'économie et d'efficacité ;*
- ii. un système d'instruments organise de vastes ensembles d'instruments et de ressources de nature hétérogène ;*
- iii. un système d'instruments présente comme caractéristiques des complémentarités et des redondances de fonctions ;*
- iv. un système d'instruments est différent d'un opérateur à un autre et est structuré en fonction de son expérience et de ses compétences ;*
- v. dans un système d'instruments, un instrument joue un rôle particulier d'organisateur, de pivot pour les autres instruments.*

La filiation entre ces *systèmes d'instruments* et les moyens mobilisés pour la numérisation multimodale notamment pour le Contrôle Non Destructif (cf. section 2.2.1 p. 41) suffisent à la mise en relief du propos. Les travaux de Bourmaud s'inscrivent dans la continuité des recherches de Rabardel proposant en 1995 une étude complète du concept d'*instrument*, au sens ergonomique de terme. Celle-ci se fonde sur la nécessité d'établir la distinction avec l'outil (l'objet technique) et ses schèmes (façons d'en faire usage) [Rabardel, 1995]. À cette époque, Rabardel énonce la théorie de la genèse instrumentale dans laquelle l'*approche instrumentale* provient de deux processus distincts : l'instrumentation (un outil approprié par un utilisateur) et l'instrumentalisation (l'utilisateur attribue, transforme ou détourne la fonction d'un outil). Les préceptes de l'*approche instrumentale* de Rabardel s'accordent avec la portée et les motivations de cette étude. Ce concept fut d'abord recentré sur l'instrument au sens physique, puis étendu au sens immatériel, en l'occurrence au cas d'application de la CAO [11]. Dans une recherche commune, les deux auteurs précédemment cités explorent cette informatisation des systèmes d'instruments [Rabardel and Bourmaud, 2003]. Ils y énoncent, d'une part, les principes d'une activité (appelée *schème*) médiée par les instruments, mais aussi ceux d'approche dite développementale [12]. En lieu et place de cette dénomination, on préférera une variante assez proche [13]. L'introduction du prochain type d'approche, nécessite aussi de se rapprocher du domaine de l'informatique.

11. Faisant un lien direct avec notre domaine dans lequel la modélisation du patrimoine était à l'avant-poste des procédés actuels de numérisation.

12. « Nous pensons que les approches développementales sont essentielles pour l'analyse des instruments et des systèmes d'instruments. » Traduit depuis *Ibid.* (p.689)

13. De plus, l'approche développementale a une connotation péjorative en psychologie clinique.

3.3.2 Les approches procédurales

L'*approche procédurale* telle qu'empruntée aux Sciences Informatiques est plus proche de la définition proposée plus haut (cf. encadré p. 103). Selon les propos de Muetzelfeldt, 2004, on distingue le déclaratif au procédural¹⁴, respectivement relatif au « savoir que » (knowing that) et au « savoir comment » (knowing how). Il évoque la différenciation entre la donnée en tant que représentation déclarative d'un jeu d'informations descriptives et le programme qui décrit pour sa part la marche à suivre ou la procédure en vue d'atteindre un objectif précis. D'après Mutanen, 2007, le « savoir comment » fait aussi référence au savoir non linguistique, autrement dit l'ensemble des connaissances tacites (c.-à-d. schèmes). On retiendra aussi qu'une approche procédurale reste une proposition *prescriptive* (par opposition à *descriptive*). On acceptera ainsi en tant que « procédural », un ensemble de processus (semblables aux instructions aussi présentent en Fig. III.1) dont l'organisation et l'orchestration permettent de réaliser une opération complexe¹⁵.

L'approche *procédurale* se recouvre au sens large avec celle d'une :
« Méthode utilisée pour réaliser une opération complexe, une expérience ou une recherche, manière de conduire une analyse philosophique, un raisonnement »^a
Ou bien, au sens informatique s'agissant d'un
« Ensemble de consignes à appliquer pour effectuer un travail ou atteindre un objectif ».^b

a. Source CNTRL : <https://www.cnrtl.fr/definition/proc%C3%A9dural>.

b. Source CNTRL : <https://www.cnrtl.fr/definition/PROCEDURE>.

Les approches procédurales décrivent un certain mode opératoire, autant qu'elles indiquent une direction vers laquelle orienter la recherche et proposent une façon de l'aborder. Elles s'apparentent ainsi à la notion de « schème » telle qu'introduite ci-dessus (cf. section 3.3.1), même si elles s'affranchissent de l'usage d'instruments et se focalisent sur le *savoir comment* résoudre une tâche. Les approches procédurales, telles qu'elles seront développées, pourront le cas échéant mobiliser des instruments, voire des systèmes d'instruments, mais ces derniers y auront un rôle secondaire.

14. Il est intéressant de noter ces attributs, tant déclaratif que procédural, peuvent s'appliquer au sens informatique à l'action de programmation comme à celle modélisation, que le Patrimoine Numérique mobilise à parts égales.

15. Pour accepter la définition à suivre, il faut assimiler les notions de processus et de procédures, dont les nuances pourraient être plus amplement discutées.

3.3. DUALITÉ DES APPROCHES INSTRUMENTALES ET PROCÉDURALES

Declarative	Procedural
Describes what is	Says what to do
Data	Program
Requires separate problem solvers	Solves a specific problem
Can be manipulated and reasoned with	Can be executed
What	How
Sequence of statements (generally) not important	Sequence of statements is critical
Facts, concepts	Skills
Examples include databases, logic programming languages (e.g Prolog), functional programming languages (e.g. Haskell), designs, spreadsheets, models built in visual modelling environments, XSLT	Examples include programs written in conventional programming languages (Basic, Fortran, C, C++), control files for statistical packages
"diameter = 6.28*radius" defines a functional relationship between diameter and radius	"diameter = 6.28*radius" means " <i>calculate 3.14*radius, and assign the result to the variable called diameter</i> "
In humans, declarative knowledge is generally conscious, and expressed as words	In humans, procedural knowledge is generally automatic and subconscious, and expressed in actions
Declarative memory: facts, knowledge, events.	Procedural memory: how to do actions.

FIGURE III.1 – Comparaison des caractéristiques des approches déclaratives et procédurales d'après [Muetzelfeldt, 2004].

Approches Instrumentales × Procédurales

Les chapitres de contributions seront abordés en s'appuyant de consorts sur ces deux types d'approches pour résoudre des problèmes d'un tel système de numérisation multimodale. Cela apparaît opportun du fait que ce dernier implique autant l'exploitation de systèmes d'instruments que le développement de nouvelles de façons d'articuler les programmes et les données patrimoniales. Ainsi, chacun des développements à suivre, et visant l'émergence de stratégies multimodales, sera composé de ces deux approches dont les discussions espèrent faire ressortir des enseignements complémentaires.

3.4 MISE EN SYNERGIE DES APPROCHES

Les principaux éléments du système ainsi défini ont permis de soulever quelques problèmes fondamentaux et esquisser certaines approches à l'échelle de la méthodologie. Il n'en reste pas moins que nombre d'obstacles et de verrous subsistent pour la mise en application de ces stratégies. L'introduction de la multimodalité au sein du système de numérisation du patrimoine se fera au moyen de synergies entre les composants de la triade, **spatialiser** — **fusionner** — **enrichir** à partir de laquelle on peut définir la liste d'objectifs suivante :

- Être en mesure de **spatialiser** une variété et un volume croissant de modalités d'imagerie,
- se doter de procédures permettant de **fusionner** diverses sources et produits d'imagerie pour renforcer leurs synergies,
- améliorer les capacités d'exploration et d'exploitation du potentiel des numérisations multimodales pour **enrichir** les pratiques autant que les objets patrimoniaux qu'elles concernent.

3.4.1 Approches de spatialisation

Axes de recherche

Nous venons de voir l'effet de la multimodalité sur la complexité et la fragmentation imputables aux instruments comme aux schèmes ainsi qu'aux données qu'ils produisent. Alors que nos capacités sont croissantes en matière d'acquisition et de traitement, la part de données inexploitées ou inexploitable s'accroît de façon proportionnelle, voire exponentielle. Cela soulève un problème de fond, à savoir que ces aptitudes à produire des données sont décorréélées des objectifs poursuivis. Malgré les avancées en termes d'automatisation, il manque des outils et des méthodes pour mieux contrôler ce flux incessant de données. Il en découle une incapacité de spatialiser l'ensemble des données ou des informations qui sont en mesure d'être collectées. L'articulation entre l'étape d'acquisition et de traitement des données sera mise en exergue par des stratégies de *spatialisation*. On mobilisera la notion d'« instrument pivot » introduite plus haut (cf. encadré p. 104) par ailleurs mise en relief par des travaux récents [Adamopoulos and Rinaudo, 2021] insistant sur le rôle particulier de la modélisation basée laser (lasergrammétrie) et image (photogrammétrie) pour l'imagerie multimodale en SP.

Annnonce des contributions

L'approche instrumentale de ce chapitre de *spatialisation* sera dédiée au rôle du relevé (cf. section 4.2). Les premières pièces de stratégies multimodales *ad hoc* seront initiées par l'hybridation des protocoles d'acquisition ou par la création de dispositifs instrumentaux. Ces premiers apports serviront d'introduction à la problématique de la reproductibilité pour spatialiser des sources variables par procédure de traitement photogrammétrique. Cette réflexion sera étendue au sein de l'approche procédurale, dédiée à l'implémentation d'une méthodologie de traitement versatile et robuste aux variations induites par les données multimodales (cf. section 4.3). La procédure ainsi que les résultats de TACO (Traitement Automatisé de Calcul d'OrientatIon d'images) seront détaillés sur des cas complexes. Ces premières contributions mettront en exergue les potentiels, mais aussi les limites des approches orientées temps.

3.4.2 Approches de fusion

Axes de recherche

Nous avons statué que la multimodalité est affaire de coopération entre différentes parties d'un système, aussi complexe soit-il. Or notre capacité à générer des données spatiales ou spatialisées n'est pas alignée ni à celle de mettre en cohérence des sources diverses de façon structurée ni à celle de maintenir celle-ci dans le temps. La fusion est une étape critique, à l'interstice des processus de traitement de données dont elle fait partie, tout étant un vecteur potentiel d'enrichissement et pour obtenir un résultat propice à l'interprétation. Les modélisations aussi fragmentées que celles qui résultent des schèmes multimodaux actuels extrapolent les difficultés pour les experts extraient du sens des approches combinatoires. On accumule dorénavant des modèles aux sources et aux qualités variables, alors que l'inintelligibilité des modélisations basées sur le réel persiste. Certaines composantes de la fusion de données énoncées lors du chapitre II seront stratégiquement intégrées lors des expérimentations. La fusion n'intervenant pas de façon uniforme et en un point unique du système, cela permettra de à l'épreuve différents scénarios tels que sommairement décrits et classifiés dans la littérature (cf. Taxonomie de la Fusion pour le SI MEMORIA, Fig. II.15 p.69). La réflexion sera étendue au défi émergent de fusion des données douces et dures précédemment introduit (cf. section 2.3.3.1 p. 65), pour commencer à orienter les travaux vers la thématique de l'enrichissement. Les données patrimoniales offriront par nature un cadre idéal et concret pour se confronter aux nombreux obstacles qu'elles contiennent.

Annnonce des contributions

L'approche instrumentale sera présentée par le biais d'une expérimentation utilisant la plateforme AIOLI pour essayer d'étendre un prétendu système d'instruments vers un autre paradigme de modélisation. Cette expérience fera ressortir le concept de modalité spatialement orientée (cf. section 5.2), en l'occurrence appliquée aux données de réflectance (RTI). L'hypothèse d'attribution du rôle d'instrument pivot au capteur photographique sera testé par le biais de l'hybridation des approches multivues et multilumières. Le potentiel de la relation bijective 2D-3D établie par la photogrammétrie sera mis en exergue au même titre que les limites d'une méthode de fusion dite imparfaite ou incomplète, car indirecte. Ce chapitre sera complété en section 5.3 par une approche procédurale s'opérant sur un autre élément fondateur de tout système de numérisation patrimoniale, le nuage de points. Partant d'une masse conséquente de données 3D issues de plusieurs campagnes de numérisation d'un même objet d'étude, on cherchera à réduire sa complexité tout en conservant la richesse sous-exploitée de modélisations multisources. Ce sous-chapitre développera une contribution dirigée vers la définition d'un indice de fusion multimodale (MEFI)¹⁶ permettant d'enrichir un nuage dense avec son propre historique de composition. L'introduction et l'exploitation des fiches de métadonnées décrivant des modalités fusionnées - en guise de données douces - servira d'amorce le chapitre suivant.

3.4.3 Approches d'enrichissement

Axes de recherche

Ce chapitre portera sur la valeur et la portée sémantique que l'on confère au Patrimoine Numérique en tant que domaine de connaissance. Le développement d'un système d'enrichissement sophistiqué exploitant un double numérique synchronisé en quasi « en temps réel » sera cependant tenu à distance. D'une part, car certains travaux mentionnés ou non dans cette thèse y ont déjà contribué partiellement¹⁷. D'autre part, car les balbutiements de l'enrichissement automatique à large échelle s'inscrivent à long terme. Enfin, cet objectif sera trop anticipé vis-à-vis des constats faits relatifs aux nombreuses lacunes pour soutirer, relier et mettre à disposition les informations contenues ou dérivées des numérisations d'hier et d'aujourd'hui. La première piste de travail exploré sera celle qui confère au

16. Pour Multimodal Enhancement Fusion Index.

17. En rapport au travaux du laboratoire MAP et de sa contribution à l'écosystème numérique NDame et que certaines sources qualifient de « clone virtuel le plus avancé technologiquement jamais dévoilé pour une icône du patrimoine mondial » (Source : Platt, K. H. (2021, 16 février). Notre-Dame rescue is buttressed by digital wizardry. Financial Times. Consulté le 22 juin 2023, à l'adresse : <https://www.ft.com/content/3ed013f9-4f01-4a34-a05d-e117b9797ce6>

modèle 3D le rôle de portail d'accès aux savoirs relatifs à l'objet qu'il représente. Cette piste n'est pas nouvelle ni originale, elle est inscrite en filigrane des approches basées sur les technologies SIG ou BIM, mais dans son extension au fait patrimonial, elle est présente dans l'ADN des recherches de notre unité depuis au moins deux décennies [Dudek and Blaise, 2002, Blaise et al., 2004]. Cependant, s'il n'y a plus à démontrer si et comment la modélisation et plus récemment la numérisation patrimoniale peuvent être chargées de différents niveaux de valeurs sémantiques, la multimodalité peut constituer un goulet d'étranglement. Elle est un élément hautement entropique (Cf. notion de « vrac numérique » p. 22)¹⁸. En seconde piste, seront explorées les possibilités promouvant la néguentropie au sein d'un tel système, c'est-à-dire par antonymie, en proposant des approches qui favorisent l'organisation et le partage des attributs sémantiques.

Annonce des contributions

Une nouvelle fois, l'approche instrumentale qui amorcera ce chapitre sera consacrée à l'exploitation de la plateforme AIOLI en focalisant cette fois-ci sur les processus d'annotation sémantique d'éléments de collections multimodales complexes. Les potentiels et les limites des données douces seront explorées par la transcription de rapports de restauration sous forme d'observations structurées et spatialisées sur des modalités d'imageries fusionnées. Cette expérience sera révélatrice de la capacité d'intégration des données et des informations au sein d'une représentation 2D/3D, mais aussi sur des lacunes à rendre explicite et exploitable de multiples couches de documentations. Par défaut d'anticipation de certains préceptes des approches FAIR, ces représentations, bien qu'issues de stratégies multimodales, souffrent de discontinuités sur le plan de la traçabilité, de la provenance et donc de perspectives de réutilisation. Ce chapitre s'adossera à une ultime approche procédurale sur le cas (épineux) des métadonnées et constituant le second versant des données douces et porteuses de valeurs sémantiques. À cette occasion sera introduit en guise de contribution un Système de documentation Multimodale Enrichi par les Métadonnées (MEMoS)¹⁹ visant à documenter au fil de l'eau les modalités d'imagerie mises en œuvre dans les projets de numérisations. Au-delà de la suggestion d'un schéma de métadonnées, MEMoS établit un pont entre la collecte et la potentielle exploitation de cette ressource en données ouvertes et liées. Il ouvre aussi un champ des possibles pour une exploration sémantique des sources de numérisations multimodales.

18. Ou qui démultiplie l'entropie déjà présente dans la numérisation du patrimoine. Pour précision, l'entropie est entendue au sens donné dans le glossaire (p. 245).

19. Pour Metadata Enriched Multimodal dOcumentation System.

3.5 SPATIALISER — FUSIONNER — ENRICHIR

C'est par cette stratégie globale tripartite définissant les axes de travail que cette recherche a été conduite. Comme vu précédemment, la multimodalité est vecteur d'entropie au sein des systèmes de numérisation patrimoniale, susceptible à l'état actuel d'en brider leur potentiel pour les SP. Toute la difficulté pour le développement d'approches multimodales réside dans les compromis à effectuer pour juguler les phénomènes de complexité et de fragmentation, tout en conservant ce qui en constitue la force et la richesse [Jeanson et al., 2019]. Depuis l'essor et l'appropriation des technologies numériques dans la sphère patrimoniale, un des objectifs partagés par de nombreuses recherches était de créer et d'exploiter un continuum informationnel capable de transformer l'objet d'étude en objet de connaissance. À différentes échelles du système observé, au-delà de manipuler des données, des informations ou des connaissances^[20], les scientifiques manipulent des *modèles* (géométriques, conceptuels, de bases de données voir d'ontologies et plus récemment d'apprentissages). Or, on sait que, « dans ce sens, un modèle qu'il soit analogique ou numérique doit contenir dès son élaboration la structure des informations capables de le représenter »^[21]. Une première chose est de se demander si la structure et les informations essentielles à une modélisation multimodale sont bien connues. Ensuite, à défaut de savoir comment représenter de tels modèles, est-on en mesure de structurer ces informations ? C'est dans cette optique que l'approche systémique semble particulièrement opportune pour apporter des éléments de réponses. Face à la complexité constatée à différentes échelles du système, l'entropie engendrée par la multimodalité se révèle autrement problématique du fait que ; « l'entropie mesure, d'une part, l'absence d'organisation au sein d'un système physique, mais aussi d'autre part, l'absence d'information d'un observateur sur le système qu'il considère »^[22]. L'approche développée est fondée sur deux piliers fondamentaux du système, le modèle (voire les processus de modélisation) et l'observateur (acteur ou simple utilisateur), agissant de consort en guise de sources de connaissances.

La mise en synergie des approches, positionnées en articulation à des éléments clés du système semble une méthode pragmatique et raisonnée pour contribuer à la définition de stratégie multimodale pour les études patrimoniales. La réduction du périmètre d'expérimentation de certaines pistes autour des pratiques d'imagerie par numérisation 2D/3D

20. Sans faire nécessairement référence au *modèle* DIC qui est volontairement tenu à l'écart de cette étude.

21. [Blaise et al., 2004] (p.3).

22. [Varet-Pietri, 2000] Chapitre III Connaissance et information. Sous-chapitre 3 La quête du Graal de l'information. (p.160).

est un moyen de viser des contributions appliquées. L'ambition est que les scientifiques du patrimoine puissent s'en saisir pour spatialiser et fusionner leurs approches d'imageries multimodales et ainsi enrichir l'état des connaissances sur leur objet d'étude et leur propre discipline.

Les approches et les stratégies proposées visent à mieux articuler et ainsi à mettre en synergie les apports de l'imagerie multimodale pour renforcer le potentiel informatif et cognitif des études patrimoniales basées sur la numérisation.

La suite de ce travail, tâchera d'apporter des éléments de réponses ou de discussions par le biais d'une série de travaux mobilisant, par intention ou par extension, des cas concrets provenant de projets de recherche du laboratoire MAP. Pour faciliter la compréhension et la navigation au sein de la structure du document, l'arborescence développée ci-après exprime les articulation entre les différentes publications présentées et discutées dans cette thèse.

3.5.1 Plan de travail et synthèse des contributions articulées

A SPATIALISER — Chap. **IV** p.**114**

A.1 Approche instrumentale : Protocoles et dispositifs d'instrumentations multimodales — Section **4.2** p.**116**

Basée sur les articles de conférence internationale avec acte **9** : Pamart, A., Guillon, O., et Al. (2016) Toward a multimodal photogrammetric acquisition and processing methodology for monitoring conservation and restoration studies. 14th EUROGRAPHICS Workshop on Graphics and Cultural Heritage, Eurographics, Oct 2016, Genova, Italy <http://dx.doi.org/10.2312/gch.20161409>.

et **8** Pamart, A., Guillon, O., Gattet, E., et Al. (2017) Multispectral Photogrammetric Data Acquisition and Processing Forwall Paintings Studies, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W3, 559–566, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-559-2017>

A.2 Approche procédurale : Méthodologie de recalage photogrammétrique versatile et robuste de jeux d'images multimodales (TACO) — Section **4.3** p.**125**

Traduction de l'article de revue internationale **10** : Pamart, A., Morlet, F., De Luca, L., Veron, P. (2020) A Robust and Versatile Pipeline for Automatic Photogrammetric-Based Registration of Multimodal Cultural Heritage Documentation. Remote Sensing. 2020 ; 12(12) :2051. <https://doi.org/10.3390/rs12122051>.

B FUSIONNER — Chap. **V** p.**152**

B.1 Approche instrumentale : Expérimentation sur l'orientation spatiale de ressources RTI — Section **5.2** p.**153**

Basée sur l'article de conférence internationale avec acte **11** : Pamart, A., Abergel, V., Alaoui M'Darhri, A., M., Morlet, F., et Al. (2019) A Complete Framework Operating Spatially-oriented RTI in a 3D/2D Cultural Heritage Documentation and Analysis Tool, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W9, 573–580, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-573-2019>

B.2 Approche procédurale : Définition d'un indice de fusion multimodale (MEFI) — Section **5.3** p.**161**

Traduction de l'article de revue internationale **5** : Pamart, A., Abergel, V., De Luca, L., Véron, P. (2023). Toward a Data Fusion Index for the Assessment and Enhancement of 3D Multimodal Reconstruction of Built Cultural Heritage. Remote Sens. 2023, 15, 2408. <https://doi.org/10.3390/rs15092408>

C ENRICHIR — Chap. **VI** p.**192**

C.1 Approche instrumentale : Restitution d'un processus d'annotations de numérisations multimodales avec AIOLI — Section **6.2** p.**194**

Basée sur l'article de conférence internationale avec acte **13** Pamart, A., Roussel, R., et Al. (2022). A Semantically Enriched Multimodal Imaging Approach Dedicated to Conservation and Restoration Studies, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLVI-2/W1-2022, 415–420. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-2-W1-2022-415-2022>

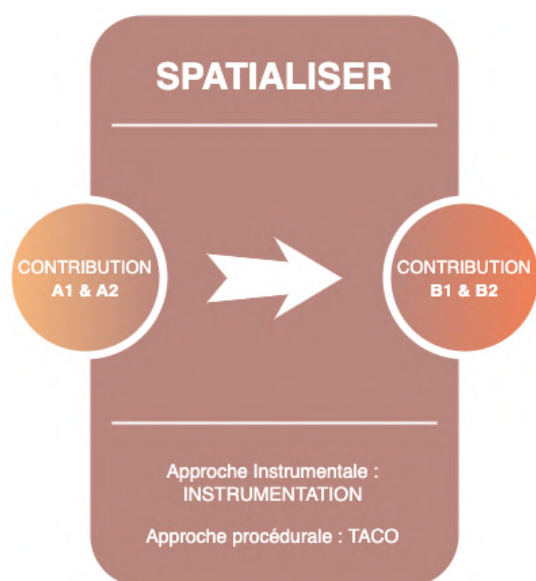
C.2 Approche procédurale : Fondation d'un système de documentation multimodale enrichi par les métadonnées (MEMoS) — Section **6.3** p.**202**

Traduction de l'article de revue internationale **7** : Pamart, A., De Luca, L., Véron, P. (2022). A metadata enriched system for the documentation of multi-modal digital imaging surveys. Studies in Digital Heritage, 6(1), 1 :24. <https://doi.org/10.14434/sdh.v6i1.33767>

Chapitre IV

SPATIALISER

4.1 DÉFINITION DES ENJEUX RELATIFS À LA SPATIALISATION



La multimodalité s’inscrit au sein des pratiques de numérisation 2D/3D en contexte patrimonial comme un élément à la fois unitaire et perturbateur¹ et qui impose en premier lieu un véritable questionnement sur l’acte d’acquisition de données. Nous l’avons vu, elle impose deux conditions (la *complétude* et la dimension *chronique*) qui amènent à réviser la phase de préparation et de mise en œuvre du relevé. Pour qu’une représentation numérique soit porteuse de connaissances ajoutées, elle doit d’une part permettre au modèle représenté d’intégrer des données de sources diverses et complémentaires (provenant généralement de plusieurs capteurs) et d’autre part être en mesure de gérer l’aspect « chrono-

nique » des données. Cela implique d’inscrire la numérisation et la modélisation dans une dynamique temporelle dans laquelle le modèle reflète plus seulement un « *instant t* » des données collectées sur l’objet réel.

1. Cette ambivalence est caractéristique de la compréhension de la multimodalité pour les Sciences du Patrimoine, qui se contrebalance par sa capacité à focaliser une pluralité des regards auparavant apposés sur l’objet patrimonial de façon disjointe tout en bousculant justement la façon d’appréhender l’acte de relevé et d’en parfaire sa mise en œuvre dans des pratiques communes.

4.1. DÉFINITION DES ENJEUX RELATIFS À LA SPATIALISATION

La gestion de structure multimodale complexe, entendue dans le cadre de cette étude comme l'aptitude à intégrer des scénarios de numérisation complexes dans leurs aspects multicauteurs, multiscalaires, multispectrales, multitemporels et multiacteurs impose de prime abord un renouvellement des pratiques de l'imagerie scientifique en contexte patrimonial. Si la phase de collecte de données reste un dénominateur commun, les contextes, les motivations et ainsi que les méthodes de mise en œuvre de cette documentation numérique demeurent variables face au caractère unique de l'objet patrimonial. C'est dans cette optique que les premières approches développées dans ce chapitre s'attardent sur les articulations fines entre l'acquisition et le traitement des données, pour lesquelles la thématique de la *spatialisation* semble un axe de recherche pertinent. Le chemin logique est d'aborder cette question du référencement spatial en commençant à bas niveau par les sources (capteurs, données) pour développer ensuite la réflexion à plus haut niveau (informations, observations, annotations). Ainsi, une première approche propose de redéfinir le rôle et la question du relevé instrumental au prisme de la multimodalité.

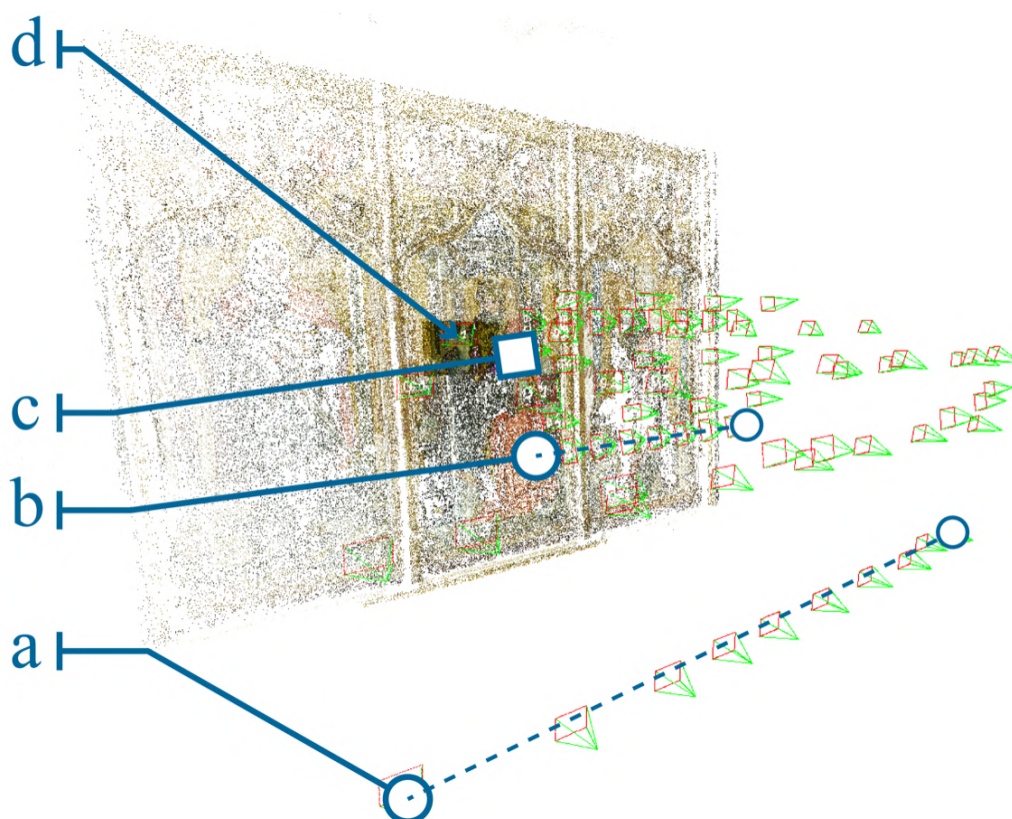


FIGURE IV.1 – Exemple d'acquisition multi-dimensionnelle : Approche photogrammétrique globale (a) et rapprochée (b), bloc multistéréo H-RTI (c) et photographie technique multitemporelle et multispectrale (d).

4.2 APPROCHE INSTRUMENTALE DE SPATIALISATION : RELEVÉS ET INSTRUMENTATIONS MULTIMODALES

Dans un premier temps, ce sous-chapitre, découpé en deux sous-parties, restituera une série d'expérimentations extraites de publications. La première sous-partie interroge l'aspect méthodologique des protocoles d'acquisitions sous le prisme de l'imagerie multimodale. La seconde sous-partie s'intéresse quant à elle à l'hybridation des techniques et aux dispositifs d'instrumentation *ad hoc*. Dans un second temps, le sous-chapitre fera la proposition une méthodologie de traitement de données photogrammétrique alignée avec le renouveau du paradigme de relevé en contexte multimodal.

4.2.1 Premières expérimentations et approche empirique du relevé multimodal

La porte d'entrée pour répondre aux objectifs poursuivis dans cette thèse concerne l'orientation de l'activité de numérisation vers des enjeux multimodaux. Les expériences présentées dans cette publication [9]² constituent les prémices d'une mise en place de stratégies d'imagerie multimodale dans un contexte patrimonial et en apportent les composantes fondamentales³.

Approche par extension

Les tout premiers tests ont été effectués, « par extension », sur des données n'ayant pas été collectées pour être spatialisées entre elles, et certaines n'étaient même pas prévues ni compatibles pour un usage photogrammétrique (images isolées, macrophotographie). Malgré tout, ces premières expérimentations ont démontré une certaine flexibilité et robustesse des règles de la photogrammétrie dans l'optique de spatialiser des sources variées, à condition de provenir d'un capteur photographique [Degrigny et al., 2016]. Outre les limites inhérentes au manque de conformité des images sources avec certains prérequis fondamentaux pour un usage photogrammétrique (recouvrement minimal, ratio base-hauteur, qualité optique, etc.), les résultats en matière de référencement spatial de blocs d'images multimodales furent prometteurs (cf. Fig. IV.1 et IV.2). En toute

2. Contenu basé sur l'article de conférence internationale avec acte [9] : Pamart, A., Guillon, O., et Al. (2016) Toward a multimodal photogrammetric acquisition and processing methodology for monitoring conservation and restoration studies. 14th EUROGRAPHICS Workshop on Graphics and Cultural Heritage, Eurographics, Oct 2016, Genova, Italy. <http://dx.doi.org/10.2312/gch.20161409>

3. Contributions de tiers collaborateurs : Acquisitions de données en photographie technique en collaboration avec Odile Guillon | Acquisitions de données en RTI en collaboration avec Éloi Gattet.

4.2. APPROCHE INSTRUMENTALE DE SPATIALISATION : RELEVÉS ET INSTRUMENTATIONS MULTIMODALES

logique, cette expérience décontextualisée du terrain a été suivie d'un relevé compensatoire ayant pour objectif de densifier la couverture photogrammétrique pour améliorer le recalage d'image sur des zones d'intérêts. Néanmoins, il est apparu, en poursuivant ces essais, que l'anticipation des contraintes multimodales était un facteur déterminant pour l'amélioration des capacités de référencement spatial, avec un gain en matière de précision comme en nombre de capteurs.

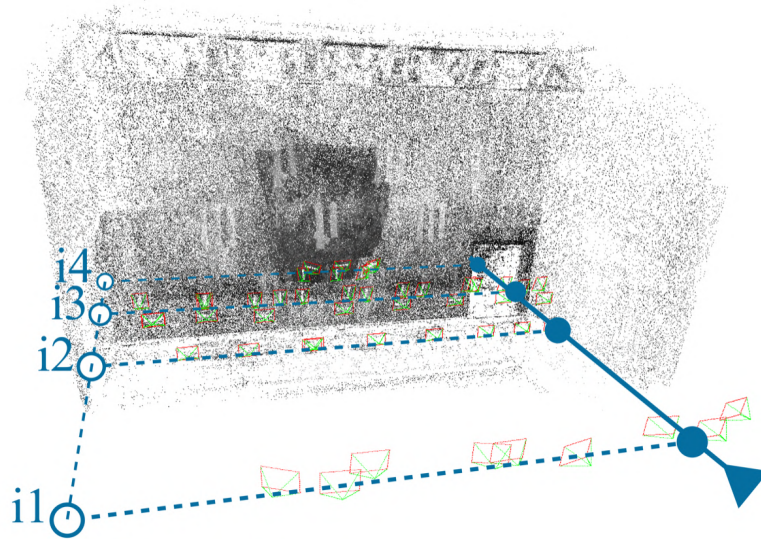


FIGURE IV.2 – Exemple de protocole d'acquisition multi-scalaire (4 itérations et 2 longueurs focales).

Approche par intention

Nous tirerons deux enseignements de ces expériences. Elles font apparaître comme premier point que l'*intentionnalité* d'un relevé multimodal est un facteur clé dans sa construction et sa réussite. Les raisons de ce constat sont prosaïques du fait que la définition et la mise en œuvre du protocole d'acquisition ont été adaptées spécifiquement à ce dessein. En contrepartie, cela impose une connaissance fine des modalités d'imagerie à la fois dans leur mise en œuvre, dans leur potentiel et surtout de leurs contraintes respectives. La rencontre de différentes modalités est généralement affaire de compromis et impose des choix — justement stratégiques — avant ou durant le relevé. De ce premier élément, découle le second point révélé par cette phase d'expérimentation *in situ* qui concerne la capacité de la photogrammétrie vis-à-vis de l'hybridation avec d'autres techniques d'imagerie. Cette versatilité pour dialoguer avec d'autres méthodes photographiques, le pont qu'elle établie entre la 2D et le 3D, tout comme entre l'objet réel et l'objet numérisé, l'installe comme un instrument pivot de premier ordre. Une chose est de remplacer une source d'imagerie par une autre pour faire par exemple un relevé photogrammétrique dans

le domaine de l'infrarouge, mais c'est autre chose d'arriver à un protocole d'acquisition intrinsèquement et intentionnellement multimodal, permettant de combiner différentes techniques d'imagerie lors d'une même séquence.

Cette problématique s'accroît quand les types d'imagerie ont des contraintes contradictoires dont la mise en cohérence peut découler sur une altération mutuelle des sources. Tel est le cas de la combinaison entre la photogrammétrie et le RTI (qui fera l'objet du prochain chapitre), l'une répondant au paradigme multivue et l'autre multiéclairage. Une piste émerge en prenant appui sur le domaine de la télédétection par imagerie satellite, dont les scientifiques se sont pourvus d'instruments « nativement » multimodaux, entendus comme des systèmes d'imagerie embarquant différents types de capteurs.

4.2.2 Prototypage d'un dispositif instrumental multimodal

Cette sous-partie aborde et poursuit la stratégie de *spatialisation* par une réponse instrumentale. Elle est issue de cette publication [8]⁴, fruit d'une collaboration entre l'unité MAP et le Centre Interdisciplinaire de Conservation et de Restauration du Patrimoine (CICRP)⁵ dans le cadre d'un laboratoire commun (LABCOM).

Présentation de l'Arbalète⁶

La conception de cette structure d'acquisition photogrammétrique multimodale est l'expression des contraintes respectives à deux techniques et permettant leur mise en œuvre conjointe. L'arbalète, nommée ainsi par sa ressemblance à cet objet, lorsque la structure est repliée, a permis de donner forme à la rencontre de la photogrammétrie avec la photographie technique. D'un côté, la photogrammétrie se base sur la multiplication des points de vue en respectant un recouvrement minimal avec des paramètres invariables (réglage des paramètres photographiques, conditions d'éclairage, etc.) pour acquérir de l'information spatiale. La zone de relevé est étendue au-delà du cadrage d'une seule image en fonction d'un cheminement permettant de couvrir cette zone. De l'autre côté, la photographie technique se base sur la multiplication de prises de vue selon un point de vue fixe pour compléter les informations spectrales sur la zone de cadrage, en faisant varier l'émission

4. Contenu basé sur l'article de conférence internationale avec acte [8] Pamart, A., Guillon, O., Gattet, E., et Al. (2017) Multispectral Photogrammetric Data Acquisition and Processing Forwall Paintings Studies, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W3, 559–566, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-559-2017>

5. Contributions de tiers collaborateurs : Acquisitions de données en multispectrale en collaboration avec Odile Guillon | Conception mécanique et robotisation électro-mécanique du système par Éloi Gattet et Michel Genevois.

6. Baptisée ainsi pour la ressemblance à cette objet lorsque la structure est repliée.

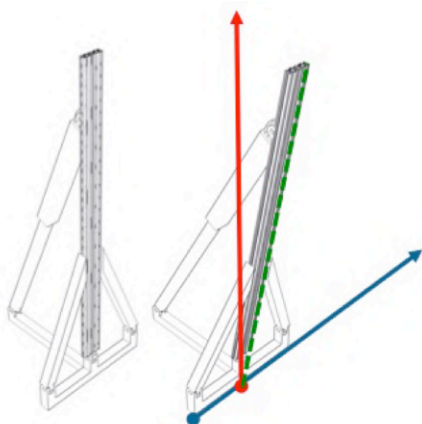


FIGURE IV.3 – Schéma de la structure d'acquisition multispectrale permettant une translation sur les axes XY (bleu/rouge) et une inclinaison sur l'axe X (vert).



FIGURE IV.4 – Vues du prototype en 2017.

et la réception de sources lumineuses. La mise en dialogue de ces deux techniques est assurée par le même matériel photographique, dont la variabilité de la mise en œuvre est exploitée pour collecter des informations complémentaires. Il s'agit d'une co-modalité en quasi parfaite symétrie, dont l'utilisation conjointe et simultanée permet d'enrichir la photogrammétrie d'informations spectrales tout en apportant la dimension métrique à la photographie technique.

Descriptif technique de l'Arbalète

Ce prototype demeure cependant une réponse technique à l'hybridation de ces deux méthodes de photo-documentation et appliquées dans un contexte précis. Sa faisabilité technique émane d'ailleurs de son inscription dans la problématique particulière du relevé orthophotographique de géométrie quasi plane et verticale — en l'occurrence des peintures murales⁷ — et pour laquelle les contraintes respectives aux deux techniques ne sont pas conflictuelles⁸. La possibilité d'une harmonisation technique est le moteur de la conception et réalisation mécatronique de l'arbalète. Le déplacement longitudinal est

7. Elle reste opérationnelle pour d'autres artefacts de cette typo-morphologie, tels que les fresques, les peintures de chevalets monumentales, les peintures sur bois, les retables ou les tapisseries, pour ne citer que les cas d'utilisations déjà expérimentés.

8. Par exemple, le développement d'un dispositif similaire visant une reconstruction 3D sur des objets à géométries complexes (en ronde-bosse) aurait été plus complexe. La condition d'un éclairage invariant en tout point de l'objet pour les deux techniques aurait été plus difficile (voire pratiquement impossible) à réaliser. De récents travaux repris ultérieurement ont par ailleurs validé ce postulat (cf. section 6.2 Fig. VI.2 et VI.3).

4.2. APPROCHE INSTRUMENTALE DE SPATIALISATION : RELEVÉS ET INSTRUMENTATIONS MULTIMODALES

assuré par le système de guidage sur rail motorisé depuis 2019 par une courroie à l'instar du déplacement vertical qui est effectué par la traverse glissante sur le mât central. Le recouvrement des prises de vue sur les deux axes est garanti par la distance réglable entre les deux boîtiers devant être égale au pas de déplacement en X et du décalage en Y pour l'alignement interligne. Le mât est inclinable pour que le déplacement des caméras soit coplanaire de la surface à relever afin de garantir l'invariabilité de la mise au point et du couple focale/distance à l'objet nécessaire respectivement à la précision et à l'uniformité de la résolution spatiale. La couverture de la zone de relevé s'effectue donc selon une séquence matricielle modulable pour s'adapter aux dimensions de la zone d'études, de la résolution spatiale visée et des contraintes du site (obstacles, recul, etc.). Les appareils photo sont disposés sur des plateaux micrométriques pour compenser la variation du grossissement à différentes longueurs d'onde par un déplacement du plan focal sur l'axe Z afin que les deux systèmes optiques cadrent de façon identique et produisent ainsi des orthophotos à la même résolution.



FIGURE IV.5 – Déploiement du dispositif Arbalète version robotisée, Chapelle Notre-Dame-des-Fontaines de La Brigue en 2021.

Résultats

L'intégration de deux capteurs permet de mener une acquisition de données simultanément bimodale (VIS + IR / Semi-rasante droite + semi-rasante gauche, etc.). Depuis la robotisation du dispositif finalisée en 2020, il est possible de multiplier les couples d'acquisitions en variant les modalités pour collecter des ensembles de données mosaïquées, haute définition et multibandes (cf. Fig. [IV.5](#)). Outre le gain de temps et de facilité de

4.2. APPROCHE INSTRUMENTALE DE SPATIALISATION : RELEVÉS ET INSTRUMENTATIONS MULTIMODALES

mise en œuvre, la motorisation du système a permis un gain considérable concernant la principale valeur ajoutée de l’arbalète — à l’instar de tout autre dispositif de numérisation automatisée — qui est la reproductibilité des protocoles d’acquisitions et par conséquent de la comparabilité des données résultantes. Les expériences précédentes ont donc fourni l’opportunité d’ébaucher et de systématiser les procédures de traitement incrémentales. Une acquisition de données n’étant plus considérée comme une collection homogène, mais comme de multiples sous-ensembles à traiter de façon unitaire puis coordonnés à l’échelle de la collection. La filiation et la progression dans la méthodologie de traitement sont par ailleurs claires entre les diagrammes des phases d’exploration (cf. Fig. IV.6), d’application (cf. Fig. IV.7) puis d’implémentation au sein de TACO (cf. section 4.3, Fig. IV.10 p.133) faisant office de contribution majeure à la stratégie de spatialisation développée dans la seconde partie de ce chapitre.

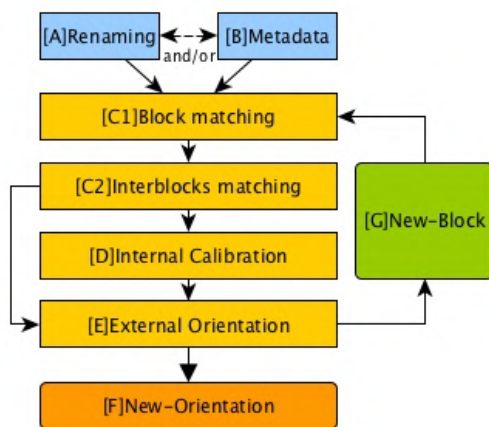


FIGURE IV.6 – Diagramme du processus de traitement lors du projet Fiatlux tel que décrit dans la publication [9].

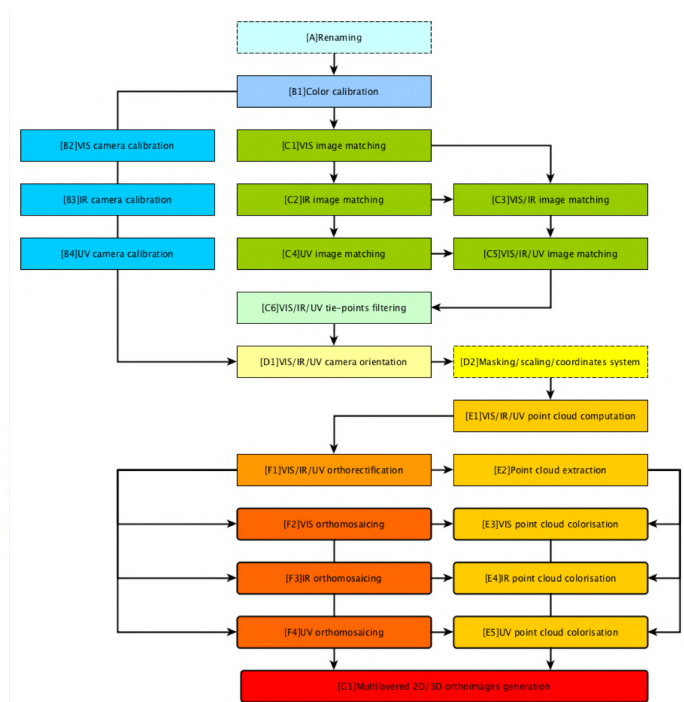


FIGURE IV.7 – Diagramme du processus de traitement lors du développement de l’arbalète tel que décrit dans la publication [8].

4.2.3 Retours sur expériences multimodales

L’élaboration de protocole et de développement de dispositifs multimodaux *ad hoc* participent à l’ébauche des stratégies de spatialisation poursuivies dans ce chapitre. Ils contribuent de façon efficace aux conditions de *complétude* par la création d’ensembles de données complexes et de renforcement de la dimension *chronique* en permettant une

reproductibilité des captations et d’harmonisation de données dans le temps. De plus, la systématisation et l’optimisation de la phase d’acquisition semblent déjà un levier important pour augmenter le potentiel de spatialisation, mais aussi de fusion de données.

La reproductibilité du relevé

En effet, la mécanisation de la prise de vue diminue le risque d’erreur et par extension le degré d’incertitude de la reconstruction. La mise en œuvre conjointe et simultanée de plusieurs modalités d’imageries participe donc à la capacité de référencer un plus grand nombre de capteurs avec une précision accrue tout en améliorant de façon non négligeable le co-recalage des sources entre elles. Il apparaît aussi que l’automatisation de la prise de vue va de pair — et quasiment de soi — avec les capacités d’automatisation des procédures de traitement de données, les spécificités des données sources étant connues, calibrées sinon invariables. Le résultat des orthophotographies multibandes produites grâce à l’arbalète inscrit cette approche dans la construction ou la consolidation d’un continuum informationnel (cf. Fig. [IV.20](#) p.[150](#)). De plus, les bénéfices qu’elle apporte offrent des conditions idéales en étape de fusion de données comme en témoigne la piste exploratoire permise par la fusion de couches colorimétriques (cf. Fig. [IV.8](#) ci-dessous) et sur laquelle on reviendra ultérieurement (cf. section [4.4](#)).

Pré-requis du relevé multimodal

En conclusion, il semble logique et quasi intuitif que la réussite comme la fiabilité d’une reconstruction multimodale dépendent au même titre qu’une modélisation classique, d’une optimisation et d’une mise en adéquation de la collecte des données avec le résultat visé. Les enseignements de ce sous-chapitre sont synthétisés ci-dessous :

- (i) Anticiper si possible, l’objectif, les conditions et les spécificités des composantes multimodales. Cette démarche *a priori* est à favoriser sur les démarches *a posteriori* pouvant impliquer des conditions sous-optimales au détriment des capacités sur le plan de la spatialisation et de fusion.
- (ii) Savoir identifier les contraintes, propres et combinatoires, des types d’imageries mobilisés. Pour cela, la meilleure approche est celle du dialogue nécessaire en phase préliminaire entre les différents experts compétents sur chaque technique d’imagerie.
- (iii) Définir un protocole d’acquisition harmonisant et faisant le meilleur compromis sur les libertés/-contraintes de chaque modalité.
- (iv) Transposer ces prérequis par une réponse instrumentale *ad hoc* soit via des dispositifs intégrés (Arbalète) ou par le biais de protocoles dédiés (cas de PHORAYVER et de SESAMES⁹).

9. Pour information, le protocole PHORAYVER est une transposition de l’arbalète sur un vecteur aérien alors que celui de SESAMES étend le spectre de la multimodalité à la captation acoustique (cf. Fig. [II.8](#) p.[49](#)).

Limites

Nonobstant la mesure et la prise en considération de cette notion, la condition multimodale accroît inmanquablement le degré de difficulté de l'acte de numérisation, car au-delà de calibrer les sources, il convient de les ajuster et les harmoniser entre elles, en faisant face dans certains cas à des contraintes conflictuelles, voire contradictoires. Bien que pertinente et pragmatique dans certains contextes, cette réponse par l'instrumentation *ad hoc* comporte quelques limitations. En effet, celle-ci reste une piste lourde et marginale dans le domaine de la numérisation patrimoniale [Karaszewski et al., 2013, Sitnik et al., 2016], pour une raison simple, les dispositifs ne sont adaptés qu'à une typo morphologie d'objet. Autrement dit, ils peuvent apporter une réponse aux objectifs et aux contextes généralement singuliers d'une campagne de numérisation, et s'intéressant à un fragment restreint de la richesse des objets patrimoniaux. Cela dit, la réflexion sur des dispositifs dédiés à une collection d'objets dans l'optique d'une numérisation massive ou dans l'objectif d'un suivi longitudinal, mérite un approfondissement et reste une piste cohérente et privilégiée.

Instrumental → Procédural

Il reste que le raisonnement et les réalisations exposées au cours de ce sous-chapitre ne sont valables ou du moins optimaux que dans un contexte précis. D'un côté, car elles interrogent les pratiques multimodales par intention (*a priori*) et pourraient être inefficaces sur des démarches par extension (*a posteriori*), c'est-à-dire dès lors qu'il s'agit d'agréger spatialement des sources disparates telles que décrites en amorce de ce chapitre (cf. section 4.2.2). De l'autre côté, car ce contexte particulier induit l'hypothèse que les données sources sont a minima connues, si ce n'est homogènes. Or la réalité des approches *a posteriori* est tout autre, parce que la nature des sources est variable et inconnue, se dresse comme un verrou majeur pour tenter de développer des procédures de traitement à la fois robustes et flexibles à différents scénarios multimodaux. C'est la raison pour laquelle, en complément de l'approche instrumentale exposée dans ce sous-chapitre, il semble nécessaire d'en explorer son versant procédural.

4.2. APPROCHE INSTRUMENTALE DE SPATIALISATION : RELEVÉS ET INSTRUMENTATIONS MULTIMODALES

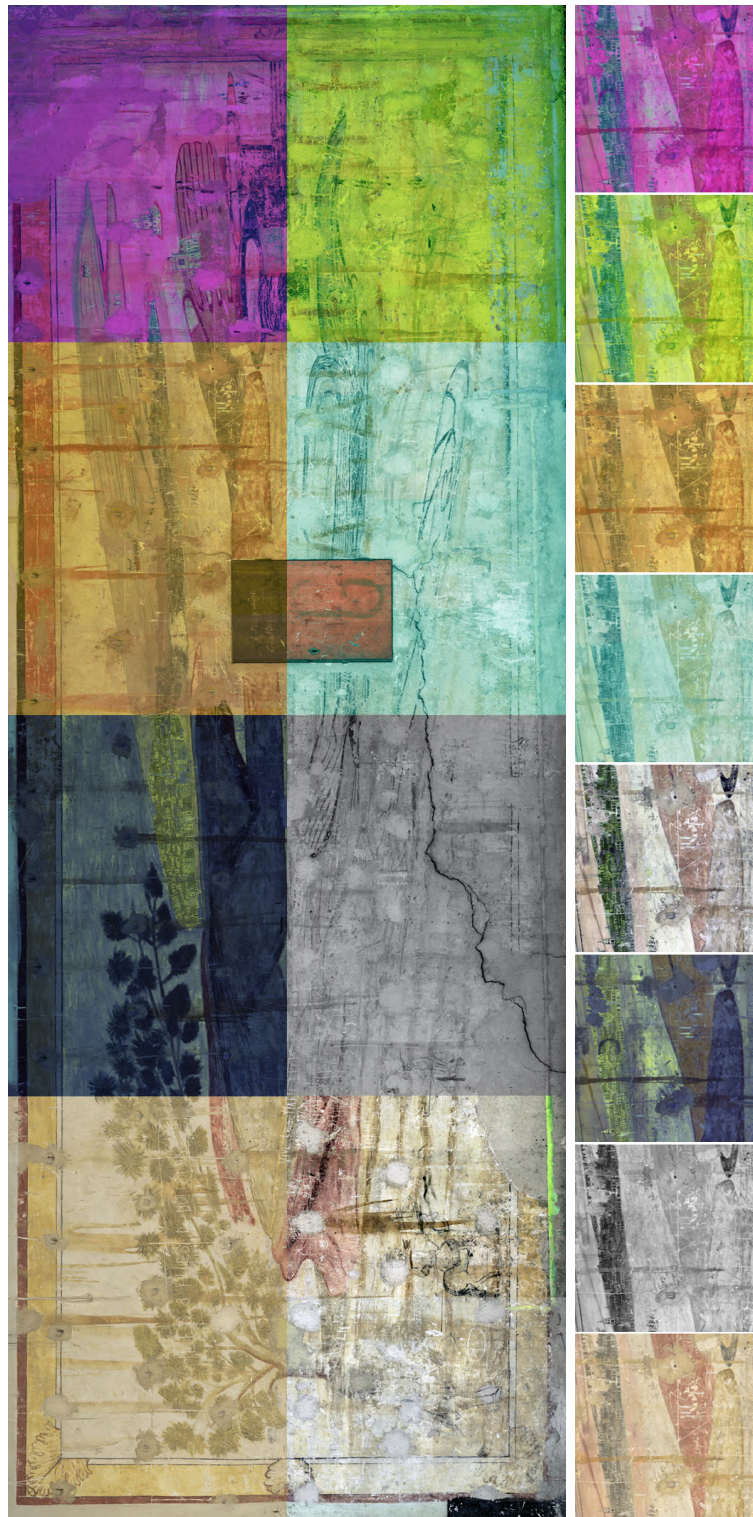


FIGURE IV.8 – Orthophotomosaïque multibande ; VIS, IR, UVf, composite moyenne et médiane, IRfc, composite UVf et composite fausse couleur synthétique VIS/IR/UV.

4.3 *Approche procédurale de Spatialisation : TACO*

Traduction de l'article de revue internationale [\[10\]](#) : Pamart, A., Morlet, F., De Luca, L., Veron, P. (2020) A Robust and Versatile Pipeline for Automatic Photogrammetric-Based Registration of Multimodal Cultural Heritage Documentation. Remote Sensing. 2020 ; 12(12) :2051. <https://doi.org/10.3390/rs12122051>.^[10]

4.3.1 *Une procédure automatique, robuste et polyvalente pour le recalage de la documentation photogrammétrique du Patrimoine Culturel*

Les techniques d'imagerie et les pratiques de Modélisation Basées sur l'Image (MBI) pour l'étude du Patrimoine Culturel (PC) ne sont plus utilisées aujourd'hui comme des applications ponctuelles, mais comme des scénarios variés et complexes impliquant de multiples modalités ; capteurs, échelles, bandes spectrales et temporalités utilisés par différents experts. L'utilisation désormais conjointe de méthodes provenant de la photogrammétrie ou Structure acquise à partir d'un Mouvement (SfM) nécessite l'amélioration des procédures de recalage des poses afin de permettre l'intégration d'une masse croissante et complexe de sources. Dans ce contexte, le référencement spatial de diverses techniques de photo-documentation est une étape clé pour développer des procédures avancées de fusion de données puis d'enrichissement sémantique collaboratif. Cet article présente la conception et l'implémentation d'une bibliothèque Traitement Automatisé de Calcul d'Orientation d'images (TACO) basée sur la synergie de solutions Open Source permettant le recalage de modalités d'imagerie par la photogrammétrie. La méthode proposée contribue à lever certains verrous en termes de robustesse et de polyvalence par sa capacité à spatialiser de grands ensembles d'images issues de la documentation patrimoniale, y compris dans des approches incrémentales.

4.3.2 **Contexte et cadre d'application**

La Modélisation Basée sur l'Image (MBI) fait partie aujourd'hui des techniques les plus utilisées dans le domaine du patrimoine grâce à sa flexibilité et son coût réduit comparée à la Modélisation Basée sur le Laser (MBL). Néanmoins, elle requiert des compétences

10. Contributions de tiers collaborateurs : Développement informatique de TACO en langage Python effectué par François Morlet | Ébauche et développement informatique du module Culbuto par Éloi Gattet.

techniques spécifiques et une expertise à la fois dans l’acquisition des données et dans leur traitement. À l’usage, les experts du patrimoine restent partagés entre l’opacité des « boîtes noires » commerciales et le manque d’intuitivité des alternatives Open Source pour traiter leurs données. Dans ce contexte, le développement d’une solution accessible et intuitive basée sur des logiciels libres semble être un choix pertinent pour répondre aux objectifs et aux enjeux de cette communauté. Cependant, dans l’optique de procédures entièrement automatisées, il n’est jamais trivial de trouver le bon compromis entre robustesse et précision. La singularité des objets patrimoniaux impose également de faire face à des données à la fois massives et complexes, tout en anticipant leur gestion au fil du temps.

Une nouvelle approche pour la spatialisation

Notre contribution à ce défi s’appelle TACO (Traitement Automatisé de Calcul d’Orientation d’images). Cette boîte à outils formalise une approche méthodologique dédiée à la documentation photogrammétrique d’artefacts patrimoniaux. Elle inclut des fonctionnalités comme le recalage itératif ou la mise à l’échelle automatique. Son développement s’inscrit également dans le cadre d’une plateforme d’annotations sémantiques 2D/3D dédiée à la documentation collaborative de biens patrimoniaux AIOLI en guise de nœud de calcul photogrammétrique. TACO est conçu comme un outil flexible et évolutif, mis en articulation avec une méthodologie globale de fusion de données visant à traiter et à intégrer des sources de données diverses. La documentation multimodale, issues de protocoles de relevés numériques, impose la gestion des données intrinsèquement multidimensionnelles (provenant de différents capteurs, échelles, bandes spectrales et/ou acquises dans des contextes temporels, synchroniques ou diachroniques), pour étudier et assurer un suivi des biens patrimoniaux. Basé sur des expériences précédentes [9, 8, 11] abordant la combinaison de modalités par fusion photogrammétrique, ce travail présente nos avancées sur la problématique du recalage automatisé de sources d’imagerie appliquées au patrimoine. Le développement de TACO a été initié et s’est construit au cours des dernières années en s’appuyant sur des projets de recherche axés sur la documentation et le suivi des travaux de conservation et restauration.

État des lieux des pratiques actuelles

Au sein d’une chaîne opératoire basée sur la photogrammétrie pour la documentation des objets patrimoniaux (cf. Fig. [IV.9]), la multimodalité nécessite une évolution des approches standards dites linéaires, telles que simplifiées ci-après comme une succession d’entrées-sorties (E/S) synchrone (cf. Fig. [IV.9] i). De nos jours, un résultat présumé final

est issu d'une chaîne d'opérations complexes impliquant des méthodes de fusion et de traitement éparses provenant de sources de données multiples (cf. Fig. IV.9 ii). Lors du recalage de nouvelles données, il est habituel d'être confronté à de nombreux problèmes propres à chaque étape (cf. Fig. IV.9 iii) tels que :

- (a) la compatibilité ou la redondance avec les données antérieures,
- (b) l'obsolescence ou la mise à jour des procédures de traitements,
- (c) la complexification des méthodes de recalage et de fusion,
- (d) l'accumulation et la disparité des résultats.

Dans ce contexte, TACO contribue à la définition et à la diffusion d'une méthode stable et cumulative favorisant la spatialisation incrémentale des ressources patrimoniales dans le temps (cf. Fig. IV.9 iv).

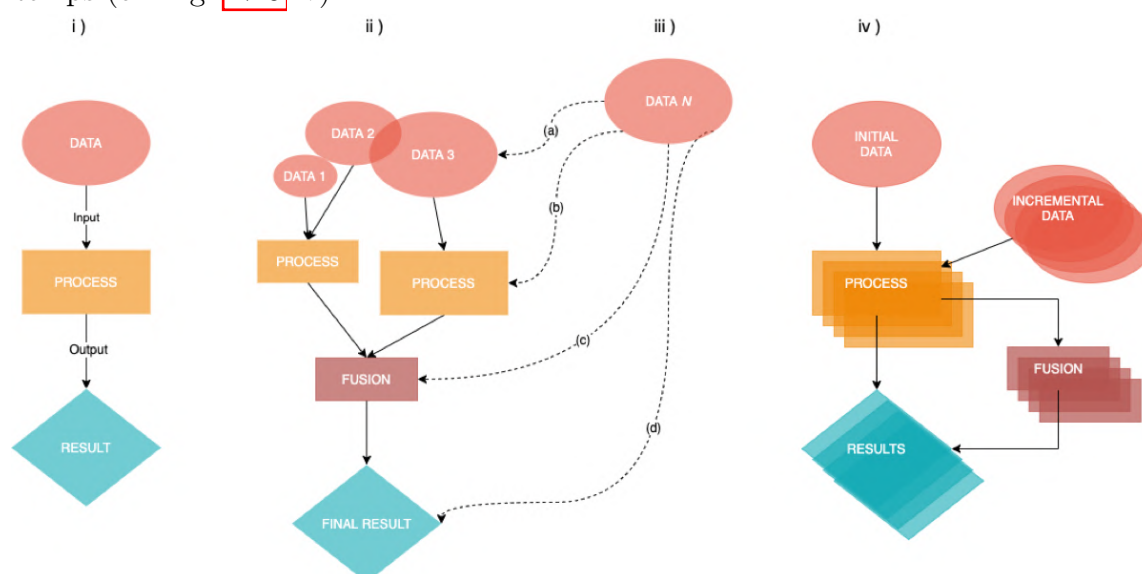


FIGURE IV.9 – Diagramme synthétisant les chaînes opératoires multimodales en photogrammétrie patrimoniale ; application conventionnelle « one-shot » i), état actuel ii), problèmes iii) et résultat visé à l'aide de TACO iv).

4.3.2.1 Structure du sous-chapitre

Le développement de TACO a été initié sur base de l'hypothèse de la démocratisation des pratiques multimodales dans le domaine patrimonial, telles qu'introduites et définies ci-dessus dans la section 4.3.2. La sous-section 4.3.3 suivante articule et positionne plus finement TACO vis-à-vis de la littérature orientée vers l'usage de la modélisation à partir d'images à des fins de fusion de données. Après une brève discussion sur des considérations techniques propres à notre application, la section 4.3.4 expose tous les composants (dans la section 4.3.4.1) et détaille l'implémentation technique pour les modules de reconstruction

Initiale (dans la section [4.3.4.2](#)) et *Incrémentale* (dans la section [4.3.4.3](#)) sur des ensembles d'images multimodales. Les résultats sont ensuite présentés et discutés dans la section [4.3.5](#), puis complétés par des travaux en cours sur les synergies logicielles en section [4.3.6](#). La conclusion et les perspectives sur l'apport méthodologique de TACO pour la fusion de données patrimoniales sont données dans la section [4.3.7](#).

4.3.3 Examen de la littérature

Au cours de la dernière décennie, plusieurs domaines, à l'instar des SP, ont fait de la réplique numérique un objectif scientifique à moyen terme. Ce « double numérique », pour les objets patrimoniaux est confronté à deux défis majeurs. Le premier est la capacité de construire un modèle numérique aussi fidèle et complet que possible, pour lequel les technologies de numérisation 3D apportent une aide précieuse. Le second est corollaire à la capacité d'intégrer de manière efficace de nouvelles données pour maintenir une modélisation à jour vis-à-vis d'une masse de données et de documentation toujours croissante.

Les avancées en matière de Modélisation Basée Images

Le premier aspect interroge le recours aux MBI en tant que techniques capables de générer une empreinte numérique de l'apparence d'un objet à un moment donné. Les avancées récentes relatives à la photogrammétrie ont rendu ses méthodes et ses outils encore plus accessibles et populaires, tant auprès de la communauté scientifique et que du grand public. Les applications de téléinformatique (c.-à-d. les traitements automatisés rendus accessibles par un service web) ont contribué à cette démocratisation progressive depuis les débuts de la photogrammétrie numérique [Grussenmeyer et al., 2002](#), [Nilsson et al., 2007](#), [Heller et al., 2015](#), [Alliez et al., 2017](#), [Nocerino et al., 2017](#). La plupart de ces travaux ont été confrontés à des problèmes similaires, à savoir la difficulté d'obtenir une chaîne de traitement robuste (c.-à-d. capable de faire face aux erreurs) tout en garantissant un spectre d'utilisation polyvalent, indépendamment des données d'entrée. Récemment, le déploiement d'autres services Web (p. ex. WebODM) a été facilité par le degré d'automatisation inclus des « logiciels libres "comme l'air" (sic) et Open Source »¹¹ (FLOSS) [Moulon et al., 2016](#), [Rupnik et al., 2017](#). L'essor du logiciel en tant que service (SaaS) s'est rapidement aligné avec les capacités des solutions SfM pour le traitement massif.

11. Pour Free/Libre and Open Source Software d'après la Fondation pour le logiciel libre. Source : Stallman, R. (2021, 5 novembre). FLOSS et FOSS (Par Fondation pour le logiciel libre (FSF – Free Software Foundation)). GNU.org. Consulté le 13 septembre 2023, à l'adresse <https://www.gnu.org/philosophy/floss-and-foss.fr.html>

Photogrammétrie × Structure à Partir du Mouvement

Ce que l'on nomme dorénavant MBI est le fruit d'un développement soutenu et parallèle entre des algorithmes dits SfM issus de la communauté de la Vision par Ordinateur et les méthodes photogrammétriques plus conventionnelles [Hartley and Mundy, 1993, Granshaw and Fraser, 2015] provenant de la Géomatique. Comme le soulignent des travaux récents [Aicardi et al., 2018], en dépit de leurs similitudes et de leurs différences, les approches semblent converger vers une solution optimale et hybride. En effet, la tendance des méthodes dites de « vision par ordinateur photogrammétrique » (sic) pourrait être une solution pertinente pour relever le défi de la numérisation massive en contexte patrimonial. D'une part, les méthodes issues de la SfM ont d'ores et déjà démontré leur capacité à allier robustesse et vélocité dans le traitement de données massives et non structurées [Snavely et al., 2008]. D'autre part, les approches photogrammétriques permettent le contrôle fin et précis d'un affinage global [Triggs et al., 1999] basé sur des modèles exigeants d'autocalibration de caméras [Remondino and Fraser, 2006] tout en incluant la compensation des points d'appui. Ce contrôle de la qualité est nécessaire pour atteindre la précision et l'exactitude des mesures requises pour des reconstructions 3D denses multisources dans un contexte patrimonial. Afin de profiter pleinement des atouts de chaque méthode, bibliothèque ou algorithme, la nécessité de passerelles et de synergie logicielle se fait de plus en plus présente. Récemment, des tentatives ont été faites dans ce sens pour mettre à disposition des outils accessibles au plus grand nombre [Gonzalez-Aguilera et al., 2018]¹². Cependant, les experts du patrimoine demeurent exigeants quant à la traçabilité et à l'incertitude des données. Cette spécificité de notre domaine s'illustre dans l'évaluation des solutions commerciales par le biais d'études logicielles comparatives [Remondino and El-Hakim, 2006, Remondino et al., 2017, Stathopoulou et al., 2019] visant à mesurer la performance des algorithmes dans de nombreux contextes d'études.

Extensions et limites de la photogrammétrie multimodale

Le deuxième aspect concerne le recalage spatial progressif des images, qui est une étape fondamentale et préparatoire à celle de la fusion de données. Elle constitue un défi de taille pour les applications patrimoniales. Plusieurs travaux relient ou combinent différentes modalités d'imagerie en exploitant le recalage par le biais de la mise en correspondance de points caractéristiques directement intégrée aux routines photogrammétriques, dans des approches multispectrales [Barazzetti et al., 2010, Nocerino et al., 2018, Grifoni et al.,

12. Et plus récemment [Ruiz de Oña et al., 2023].

[2018], multisources [Chane et al., 2013a, Yeh et al., 2016, Van der Perre et al., 2016] et/ou multiscalaires [Suwardhi et al., 2015]. Comme l'indique un article de synthèse [Ramos and Remondino, 2015], la diversité des applications patrimoniales accroît la complexité pour définir et automatiser des méthodes à la fois efficaces et reproductibles, pour intégrer des données provenant de divers cas d'application. Cette complexité s'explique notamment par la disparité des sources de données 2D et 3D impactant les procédures de recalage, contrairement à d'autres domaines comme l'imagerie médicale ou satellitaire où les combinaisons multimodales sont mieux prédéfinies. Connaissant cet écart technologique, TACO se focalise sur les techniques basées sur la photographie et plus couramment utilisées pour la documentation patrimoniale (p. ex. la photogrammétrie, la photographie technique et la photographie computationnelle). Néanmoins, l'extension des méthodes de recalage pour spatialiser d'autres techniques est à l'étude et discutée dans la section [4.3.7].

Cette revue de la littérature permet de souligner la difficulté d'implémenter une procédure stable et reproductible tout en abordant la problématique du recalage et de la reconstruction géométrique à partir de plusieurs couches multimodales. Ce constat reflète par ailleurs la richesse et de la variété des biens culturels eux-mêmes, au même titre que les méthodes d'analyse requises pour leur documentation scientifique.

4.3.4 Traitement Automatique de Calibration et d'Orientation d'images

Nous venons de voir que les procédés sur lesquels notre approche est basée sont présentés dans la littérature comme un ensemble de méthodes et d'outils stables et fiables malgré leur relative incertitude [Remondino and El-Hakim, 2006]. La photogrammétrie rapprochée demeure cependant une technique de mesure dite indirecte dont la qualité de la sortie est essentiellement liée à la qualité des données d'entrée. Dans les applications conventionnelles, le traitement des données est effectué par une entité (un expert, un laboratoire, une institution), chargée du contrôle de la qualité des données tout au long de la chaîne opérationnelle. Plus récemment, les scénarios de téléinformatique et/ou collaboratifs introduisent un changement de paradigme dans la mesure où les caractéristiques des données (c.-à-d. le volume, la complexité, la qualité, la modalité et les objectifs du relevé) sont variables et pour la plupart inconnues. Or, dans les applications patrimoniales, les circonstances sous-optimales lors de l'acquisition sont nombreuses et courantes : conditions sur site, mauvais éclairage, forme ou matériau de l'objet, utilisateur insuffisamment formé ou inexpérimenté. L'occurrence d'un ou plusieurs de ces éléments augmente proportionnel-

lement les complications pouvant survenir ultérieurement lors du traitement des données. Compte tenu de la complexité inconnue des données d'entrée, il devient plus difficile de définir une chaîne de traitement efficace et robuste (c.-à-d. minimisant les biais, les erreurs et les défaillances) et nécessite, par conséquent, d'établir un compromis sur les résultats attendus en termes de polyvalence, de rapidité, de précision et d'automatisation. Notre approche est initialisée avec des paramètres donnant la priorité à la précision et libère progressivement les contraintes pour gagner en robustesse face à une condition sous-optimale. En contrepartie, il y a une augmentation potentielle de l'incertitude — toujours préférable à un échec — et du temps de calcul (compensé par la puissance de calcul du serveur).

4.3.4.1 Vue d'ensemble et descriptif technique

TACO fait office de moteur photogrammétrique composé de deux principaux modules de traitement articulé comme suit : étant donné un ensemble initial d'images I_0 , il recherche l'ensemble des points de correspondances M_0 entre les images qui se chevauchent, l'ensemble des calibrations (intrinsèques et extrinsèques) C_0 , et l'ensemble des nuages de points denses D_0 composant une scène 3D. Pour le module incrémental, étant donné un nouvel ensemble d'images I_n , il calcule les correspondances M_n entre les images de $I_0 \cup \dots \cup I_n$, ainsi que les nouvelles calibrations C_n .

Fonctionnalités principales

En considérant, une procédure de traitement photogrammétrique conventionnelle comme une succession linéaire de processus E/S, TACO introduit des boucles au sein d'étapes décisives pour tenter de résoudre les erreurs en incrémentant certains paramètres clés. Le premier module opère une reconstruction dite *initiale* décrite dans la section [4.3.4.2](#) et reprise au sein de la Fig. [IV.10](#) (*Iter.0*). Sa robustesse est agrémentée de la capacité de traiter en une seule fois des ensembles d'images à la fois massifs et complexes (y compris des ensembles multicapteurs à focales variables). Le deuxième module permet une reconstruction dite *incrémentale* permettant de fusionner de nouveaux ensembles d'images avec les itérations précédentes avec une certaine polyvalence. Ce dernier est divisé en sous-modules qui dérivent différentes méthodes de recalage mises en œuvre et détaillées dans la section [4.3.4.3](#) et *Iter.n* de la figure [IV.10](#). Des modules optionnels orchestrent des fonctionnalités supplémentaires telles que : l'orientation globale et la mise à l'échelle basée sur la détection de cibles codées, l'interfaçage avec AIOLI et la conversion entre différents formats photogrammétriques. Les fonctions de TACO peuvent être combinées

pour construire un pipeline entièrement automatisé et adapté à un scénario de calcul déporté. Cependant, les modules et sous-modules peuvent également être paramétrés et utilisés séparément, y compris pour du calcul local. Par exemple, des options ont été implémentées pour sauter des sous-étapes d'un processus (p. ex. éviter de recalculer la mise en correspondance d'images 2D ou désactiver la corrélation dense 3D) afin d'améliorer l'interaction avec des jeux de données précalculés. Cette conception modulaire offre la flexibilité nécessaire pour gérer les exigences souvent variables d'ensembles de données multimodales, comme lors de l'expérimentation dédiée à la fusion RTI présenté dans une autre publication [11] (cf. section 5.2).

Implémentation

La dépendance principale utilisée pour le calcul photogrammétrique repose sur MicMac, développé par l'IGN et ENSG depuis 2003 [Rupnik et al., 2017]. Également connue sous le nom de la chaîne d'outils *Pastis-Apero-Micmac*, elle a l'avantage d'avoir été évaluée dans un contexte métrologique [Toschi et al., 2014], contrairement aux alternatives FLOSS. Cependant, à l'instar des solutions libres, elle souffre de goulets d'étranglement tels que la lenteur de l'étape de mise en correspondance 2D (*Pastis*) ou l'absence de parallélisation du calcul d'ajustement de faisceaux (*Apero*). Récemment, des performances intéressantes ont été atteintes lors de ces deux étapes critiques (cf. Fig. IV.18 et IV.19) en ayant recours combinatoire avec OpenMVG [Moulon et al., 2016]. À court terme, TACO pourrait articuler efficacement ces deux solutions avant d'envisager l'intégration de nouvelles bibliothèques dans un futur proche (COLMAP, THEIA, AliceVision¹³). Nos développements en cours sur les fonctionnalités interopérables entre OpenMVG et TACO sont discutés dans la section 4.3.6. TACO a été codé sous la forme d'un script de type itératif/récurif en langage Python pour appeler les commandes disponibles au sein des dépendances. Un exemple de pipeline complet combinant les processus *Initial* et *Incrémental* est structuré comme suit :

- (i) *Culbuto*, le module de mise à l'échelle et de géoréférencement automatique (cf. Fig. IV.11 - IV.12) prends l'ensemble d'images initial I_0 et produis les correspondances 2D/3D des points d'appui mis à l'échelle M_S .
- (ii) *Manioc* prend en charge le paramétrage des étapes sous-échantillonnage automatique pour la mise en correspondance 2D : il prend I_0 , et s_{\max} la plus grande dimension des images dans I_0 , sous-échantillonnées à l'échelle $s \in \{1000\text{px} \dots s_{\max}\}$, et sort des correspondances d'images M_0 .

13. La piste poursuivie est finalement toute autre : <https://github.com/alicevision/MeshroomMicMac>

4.3. APPROCHE PROCÉDURALE DE SPATIALISATION : TACO

- (iii) *Antipasti* introduit une méthode d'autocalibration adaptative : elle prend M_0 , M_S et produit des calibrations externes et internes C_0 .
- (iv) La commande MicMac *Per Image Matching* (PIMs), produit de façon native et automatique le nuage dense D_0 à partir de I_0 , M_0 , C_0 par un algorithme de corrélation multivues.
- (v) Lors d'une reconstruction incrémentale, *Manioc* prend I_0 , I_n un nouvel ensemble d'images et produit M_n (correspondances avec tous les ensembles d'images). Il donne également les plus proches voisins de I_n : $N_n \subset I_0 \dots I_{n-1}$.
- (vi) Enfin, le recalage incrémental robuste et polyvalent est effectué une nouvelle fois par *Antipasti*. Étant donné les caméras orientées C_{n-1} , les correspondances M_n et le voisinage N_n , TACO calcule les poses des nouvelles caméras C_n , dans le même repère spatial que C_0 , soit par des calculs d'ajustement de faisceaux (BBA), soit par Résection Spatiale (dérivé de la Transformation Linéaire Directe, DLT).

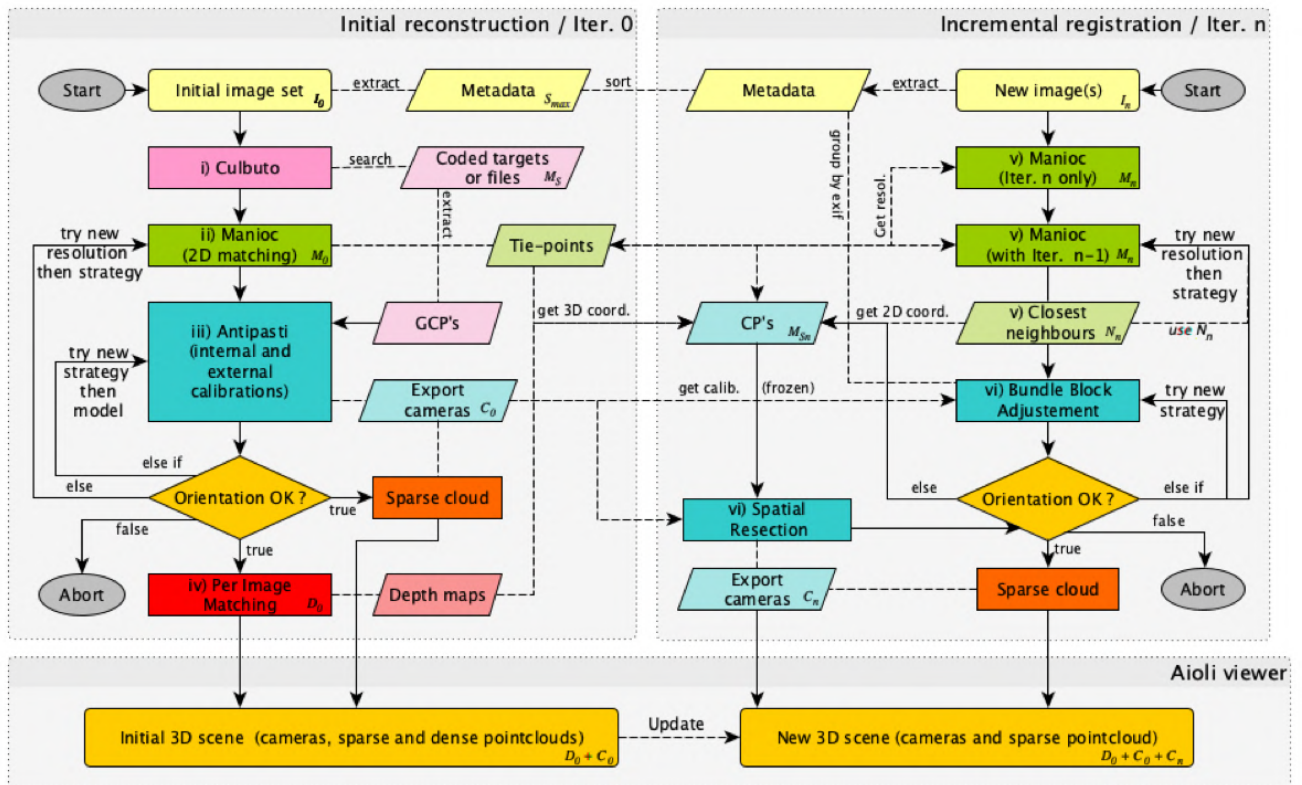


FIGURE IV.10 – Diagramme reprenant la procédure de traitement entièrement automatisé de TACO et implémentée dans AIOLI.

4.3.4.2 Une reconstruction initiale, robuste et automatisée pour les ensembles de données complexes

L'objectif du module de reconstruction initial est d'améliorer la robustesse, c'est-à-dire le taux de réussite des calculs, quels que soient le type, la taille, la complexité et la qualité de l'ensemble des images fournies en entrée. Ce module initial mobilise des routines photogrammétriques typiques : l'extraction et la mise en correspondance des points homologues, l'autocalibration des paramètres internes des caméras, l'orientation relative et l'orientation absolue des poses, jusqu'à la reconstruction de nuages épars puis denses. Au préalable, les métadonnées (EXIF) essentielles de l'image sont vérifiées pour éviter les erreurs relatives aux manquantes (p. ex. la distance focale en format 35 mm) ou les biais (p. ex. l'autorotation de l'image). Un journal synthétique est généré permettant de conserver et de vérifier tous les réglages significatifs de l'appareil photo à des fins photogrammétriques (tels que l'ISO, l'ouverture ou la balance des blancs, etc.). Le contenu de ce fichier LOG est destiné à guider de futures stratégies de (re)traitement par regroupement EXIF. Plus tard, elle facilitera la gestion, la navigation et la récupération de grands ensembles d'images orientées dans la visionneuse 2D/3D d'AIOLI (cf. annexe C p.294). Ce traitement des métadonnées est aussi nécessaire pour renforcer le continuum informatif et la provenance des données.

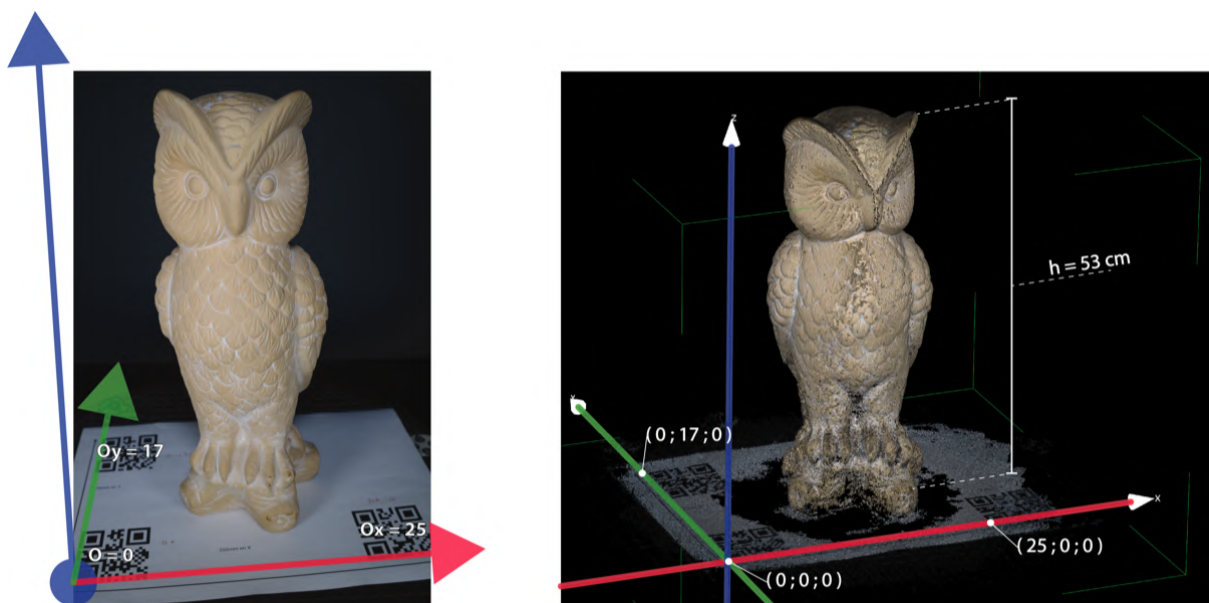


FIGURE IV.11 – Exemple d'orientation globale et de mise à l'échelle automatique grâce à un triplet de QR codes sur le jeu de données *Owl*.

(i) **Détail du module *Culbuto***

En *i*, un module appelé *Culbuto* recherche des fichiers de coordonnées 2D/3D ou essaie de les détecter à partir de cibles codées dans les images pour calculer l'orientation absolue dans *iii*. Une première approche est basée sur la détection d'un seul QR code qui incorpore une dimension métrique et où les axes sont dérivés des coins du code (définissant un plan de bascule). Elle permet d'approximer une mise à l'échelle et une orientation globale cohérentes selon un système de coordonnées défini par l'utilisateur. Cette approche simple peut être améliorée pour des objets ou des scènes plus grandes, en utilisant un triplet de QR codes, comme le montre l'illustration [IV.11](#). Cette méthode, similaire à l'utilisation de barres d'échelle photogrammétriques calibrées, souffre cependant d'un manque de polyvalence et d'évolutivité pour les acquisitions complexes et/ou à grande échelle. Récemment, une deuxième approche a été expérimentée pour intégrer plus librement les points d'appui (GCP), en fournissant les fichiers de saisies (en XML) des coordonnées dans leurs repères terrain et image, ou de manière automatisée en les couplant avec la détection séquentielle de cibles codées. Avec cette méthode, les index de chaque cible sont mis en correspondance avec leurs mesures 3D (acquises par méthode télémétrique, scanner laser ou à l'aide d'une station totale). Des expériences intéressantes utilisant les CCTag [\[Calvet et al., 2016\]](#) et les AprilTag [\[Wang and Olson, 2016\]](#) ont permis d'utiliser TACO dans un scénario avancé de fusion de données multimodales (cf. Fig. [IV.12](#)).



FIGURE IV.12 – Expérimentation de cibles codées en double-face pour permettre le recalage automatisé des blocs photogrammétriques recto et verso d'un retable.

(ii) Détail de la fonction *Manioc*

En *ii*, une approche itérative d'extraction et de mise en correspondance multirésolution de caractéristiques 2D a été mise en œuvre pour trouver un budget optimal de points homologues visant à optimiser les étapes ultérieures de calibration interne et externe. Basé sur un appel à la commande MicMac *Tapioca*, un passage à basse résolution est destiné à accélérer le calcul, puis l'échantillonnage est augmenté récursivement à des passes moyennes et hautes (respectivement la moitié et les trois quarts de la résolution native) jusqu'à ce que les poses de la caméra soient déterminées avec succès. Comme le montre le tableau [IV.1](#), l'Erreur de Reprojection (RE) moyenne est de l'ordre d'un pixel. Certaines options avancées permettent de résoudre des problèmes d'appariement (p. ex. texture moindre ou faible chevauchement) par modulation du ratio de correspondance des images [\[Lowe, 2004\]](#) ou d'amélioration locale du contraste [\[Rosu et al., 2015\]](#). En exploitant cette stratégie, baptisée *Manioc*, aide à faire converger les algorithmes des étapes de calibration suivantes vers des solutions optimales et satisfaisantes.

Jeu de données	Nb. images Initiales	Temps de calcul (min)	Nuage épars (k)points	Nuage dense (M)points	Résidu Moyen en(px)
Façade	8	2	102	2.35	1.08
Fragment	21	4	60	1.34	0.47
St-Trophime	26	7	94	3.13	0.54
Chouette	40	7	108	2.68	0.93
Zett	65	7	127	1.76	0.74
Site Fouille	95	43	641	1.34	0.49
Pt. Temple	134	120	1850	4.04	0.74
V. Charité	181	170	224	1.14	0.73
Arbre-serpents	273	390	1468	5.62	1.26
Tpl. Neptune	256	Nc.	2806	9.87	0.43
Plan-relief Lys	841	Nc.	20989	44.4	0.66

TABLE IV.1 – Composition et évaluation des résultats de reconstruction initiale sur les jeux de données.

(iii) Détail de la fonction *AntiPasti*

En *iii*, l'orientation relative est obtenue par une combinaison d'appels à commandes MicMac pour une estimation initiale des poses (via *Martini*) ensuite les paramètres internes et l'orientation globale sont affinées pour chaque caméra (via *Tapas*). Ces commandes utilisent respectivement des triplets avec la méthode de Tomasi-Kanade, tandis que l'autre opère un calcul similaire avec la méthode de Levenberg-Marquardt. Cependant, *Tapas* demeure une étape obligatoire et nécessaire au calcul d'autocalibration interne des caméras.

La contribution de TACO est d'alterner logiquement entre ces outils complémentaires jusqu'à ce que la condition d'orientation globale de toutes les images soit satisfaite. En cas d'échec, le modèle de calibration est progressivement réduit (passant progressivement de *FraserBasic* à *RadialBasic*) sinon un retour aux stratégies de correspondance d'images restantes est tenté. Grâce à cette méthodologie de traitement, nommée *AntiPasti*, les chances d'obtenir une solution fiable et cohérente (par minimisation du résidu de calibration) pour l'étalonnage des caméras sont considérablement augmentées.

(iv) Détail de l'appel à la commande *C3DC*

Enfin, en *iv*, un algorithme de corrélation multistéréoscopique dense 3D calcule un nuage de points dense. Celui-ci est réalisé par l'algorithme de base de MicMac, mais TACO donne accès à tout le panel des commandes automatiques « Per Image Matching » (PIMs) pour adapter les stratégies et les paramètres de densité (basés sur une approche pyramidale). Le gain de l'utilisation de TACO est lié aux améliorations précédemment mentionnées et qui diminuent l'incertitude de la reconstruction. Les possibilités d'utiliser d'autres algorithmes dépendront des conversions de fichier et des points de synergies discutés ci-après dans la section [4.3.6](#).

Bilan du module *Initial*

À l'issue de cette première itération du calcul, une reconstruction géométrique, initiale, stable et fiable (cf. Tableau [IV.1](#)) est définie dans l'attente de nouvelles images ajoutées lors des itérations suivantes. Cet ensemble de données sert de base pour les opérations ultérieures de recalage spatial, il est donc supposé être contrôlé et complet et agissant en guise d'acquisition « maîtresse » (ou de référence). Cela signifie que les positions de la caméra et le nuage de points résultant sont (à ce stade du développement) gelés (initialement en raison des exigences d'AIOLI¹⁴). Néanmoins, une méthodologie plus flexible permettant de libérer ou de geler les contraintes sur différents sous-ensembles pour l'étalonnage des caméras est prévue pour des travaux futurs. En effet, cette stratégie de raffinement global implique le contrôle de nombreuses métriques intercorrélées et doit être menée conjointement à l'évaluation qualitative de la reconstruction 3D dense à partir de sources multiples.

14. détaillés dans l'[annexe A. AIOLI](#) de l'article source [\[10\]](#)

4.3.4.3 Un recalage spatial polyvalent et incrémental de nouvelles images à partir d'un ensemble d'images orientées

Pour les usages collaboratifs et multidisciplinaires de la plateforme AIOLI¹⁵ le recalage spatial incrémental des images est une priorité. De plus, la spécificité des études patrimoniales exige de faire face à une variété des scénarios multimodaux. La principale difficulté consiste dans le traitement de blocs d'images dont le taux de recouvrement, les écarts relatifs à la résolution spatiale ou pixellaire, de cohérence colorimétrique et de modifications géométriques au sein de la scène sur de l'objet lui-même, sont inconnus et peuvent varier au fil des itérations.

(v) Détail du fonctionnement itératif de *Manioc*

À l'instar de la reconstruction initiale, l'optimisation des procédures d'extraction et de mise en correspondance des points homologues (c.-à-d. en variant à la fois la stratégie et la résolution) de l'étape *v* s'est révélée être une étape essentielle pour améliorer le recalage des données. Dans le cas où une seule image est ajoutée, la mise en correspondance de celle-ci en se basant sur une approche heuristique est un problème complexe et coûteux, surtout si l'ensemble de données dépasse des centaines d'images [Hartmann et al., 2016]. Dans ce contexte, notre solution consiste à trouver des correspondances dans une résolution très faible pour détecter les images adjacentes qui seront sélectionnées comme meilleures voisines. Dans le cas d'un nouveau bloc d'images, elles sont appariées ensemble avant d'être mises en correspondance avec toutes ou un sous-ensemble d'images préalablement orientées. La stratégie de *Manioc* est reproduite à la différence que le seuil de sous-échantillonnage bénéficie des correspondances passées et que le meilleur voisinage est utilisé pour accélérer le calcul. De nombreuses optimisations basées sur les points homologues peuvent être réalisées à ce stade. Jusqu'à présent, certaines approches de filtrage des points clés ont été expérimentées sur la base des résultats de travaux récents [Farella et al., 2019a].

(v) Détail du fonctionnement itératif d'*AntiPasti*

Pour le recalage spatial de l'étape *vi*, deux méthodes alternatives sont intégrées comme sous-modules. Elles sont toutes deux initialisées à partir des résultats des itérations précédentes (c.-à-d. les points homologues, les calibrations internes et externes ou le nuage de points dense). Comme expliqué précédemment, les poses des caméras et la géométrie précédemment calculées restent fixes pour répondre à des contraintes de développement

15. Cf. note bas de page supra. Idem

relatives à l'automatisation au sein d'AIOLI. Un module d'optimisation globale plus flexible et permissif pourrait faire l'objet de travaux futurs.

Spatialisation de blocs d'images

Une première approche basée sur l'ajustement de faisceaux par bloc (BBA)¹⁶ est dédiée aux jeux de données photogrammétriques dits réguliers. C'est-à-dire dans le cas où des séquences d'images à fort recouvrement sont données en entrée. La méthode BBA peut converger vers une solution sous-optimale, biaisée ou erratique en raison d'un manque de points homologues (généralement moins de 1000 points appariés). Cela est causé par différentes caractéristiques telles que la résolution (p. ex. taille de l'image, distance focale ou distance à l'objet), la radio colorimétrie (p. ex. exposition, bande spectrale, illumination) ou le contenu des images (p. ex. parasites, altérations).

Spatialisation d'images isolées

Dans ce cas, une approche de substitution basée sur la Résection Spatiale (SR) [Shih and Faig, 1988] a été implémentée pour calculer la pose d'une caméra unique (ou plusieurs traitées séquentiellement). Cette méthode a l'avantage d'être insensible aux métadonnées manquantes (capteur autre que photographique, archives, photographie analogique). Cette alternative est dérivée d'une Transformation Linéaire Directe (DLT) utilisant 11 paramètres combinés à un filtrage RANSAC (pour l'élimination des valeurs aberrantes). Elle est utilisée pour estimer les calibrations internes et externes parmi un ensemble de poses connues et d'un nombre restreint de coordonnées terrains. Néanmoins, ces points d'appui peuvent manquer ou être inexistantes, ce problème a été contourné en utilisant les coordonnées 2D des points homologues et leur projection sur les cartes de profondeur pour récupérer les coordonnées 3D correspondantes. Cette méthode SR peut retourner une solution approximative, mais permet de trouver une relation homographique avec seulement quelques dizaines de points correspondants lorsque la méthode BBA est impossible.

Bilan et optimisation du module *Incremental*

Pour les deux méthodes, la précision et la justesse globales ne sont pas seulement liées au nombre de correspondances utilisées pour l'estimation des poses, mais plutôt relatives à la qualité et à la distribution spatiale des caractéristiques appariées [Farella et al., 2019a]. Par conséquent, plus la redondance et la multiplicité des points sont faibles, plus l'incertitude

16. De l'anglais Bundle Block Adjustment traduit en français par compensation de bloc par faisceaux ou simplement ajustement de faisceaux [Egels, 2011].

de l'étalonnage sera élevée (plus flagrant et problématique avec la méthode SR). Avec l'une comme l'autre, un résultat peut converger vers des solutions insatisfaisantes, voire fausses pour lesquelles une revue des méthodes d'optimisation semble requise. Les pistes mènent à l'ajustement incrémental de faisceaux d'OpenMVG [Moulon et al., 2016], [Stathopoulou et al., 2019], à l'implémentation d'un solveur dit perspective-trois points (P3P) à l'état de l'art [Larsson et al., 2017], [Ke and Roumeliotis, 2017], [Persson and Nordberg, 2018] ou au recalage par une méthode d'information mutuelle 2D/3D [Corsini et al., 2009]. Malgré une marge d'amélioration, les résultats actuels (cf. tableau IV.2) semblent prometteurs quant à l'évolution des aptitudes de TACO à traiter des ensembles de données complexes issus d'imagerie multimodale. Les résultats en matière de qualité, de précision relative et de polyvalence sont discutés et illustrés dans la section suivante.

Jeu de données	Images ajoutées	Nombre d'itérations	Nombre de capteurs	Nombre de focales	Résidu moy. final en(px)
Façade	+107	12	1	6	1.54
Saint-Trophime	+4	4	4	4	0.6*
Zett	+6	3	1	2	0.80
Vieille-Charité	+1	1	1	1	1.12*
Arbre-serpents	+259	3	1	1	1.65
Temple de Neptune	Na	1	2	2	0.59
Plan-relief de Lys	Na	1	2	3	1.21

TABLE IV.2 – Détails du traitement itératif des jeux de données. (* comprenant un recalage par résection spatiale)

4.3.5 Résultats et discussions

Modalités d'évaluation

Les éléments du test de performance ci-après ont été traités en utilisant le serveur de calcul dédié à AIOLI¹⁷. Un environnement virtuel avec un conteneur Docker [Merkel, 2014] est utilisé pour exécuter les processus sur le serveur. Par conséquent, les temps de calcul donnés (cf. tableau IV.1) peuvent être approximatifs en cas de montée en charge du serveur et différent d'une utilisation sur une station de travail locale. Les paramètres d'évaluation de notre essai étaient le nombre d'images orientées et leur précision théorique de positionnement, évalués par une moyenne quadratique (RMS) de l'Erreur de Reprojection (RE) avoisinant un résultat honorable de l'ordre d'un pixel. Un travail additionnel serait nécessaire pour contrôler la qualité et évaluer la robustesse en

17. Dell Power Edge R940, avec un CPU Intel Xeon pour un total de 144 cœurs de 3.0 GHz, 256 Go de RAM et 4 To de stockage SSD.

intégrant des comparaisons avec de données de vérité terrain pour mesurer les performances de TACO.

Bilan des performances de TACO

Au lieu d'utiliser des données synthétiques, une centaine de jeux de données provenant des archives du laboratoire MAP ont été retraités pour mettre à l'essai la robustesse et la polyvalence de TACO. Ce benchmark était composé de projets variés : de 5 à 300 images, acquises avec des capteurs de tailles et de résolutions différentes (du smartphone au reflex plein format) avec une large gamme de focales (de 12 mm à 105 mm). TACO a reconstruit avec succès 99% de ces ensembles d'images composés de qualités, d'échelles, de complexités sur des objets reflétant la réalité et la variété des applications patrimoniales. La principale condition de réussite demeure la conformité des données aux règles de base des protocoles d'acquisitions photogrammétriques. Depuis l'implémentation de la librairie dans la dernière version d'AIOLI, les bêta-testeurs ont globalement constaté une diminution des échecs de processus ou des problèmes liés aux étapes photogrammétriques. Une sélection des typologies d'objets patrimoniaux extraites de cette évaluation massive est donnée dans le tableau [IV.1](#) pour l'itération initiale. Les résultats du traitement incrémentiel, décrivant les scénarios multimodaux suivants, sont présentés dans le tableau [IV.2](#) et résumés comme suit :

- Le jeu de données *Arbre-Serpents* (cf. Fig. [IV.13](#)) démontre la polyvalence de la gestion d'acquisitions complexes de relevés par drone.
- Le jeu de données *Façade* (cf. Fig. [IV.14](#)) prouve la capacité à gérer des acquisitions multi-focales variées.
- Le jeu de données *Zett* (cf. Fig. [IV.15](#)) met en évidence la capacité à emboîter des acquisitions multi-scalaires (grossissement équivalent à $14 \times GSD$).
- Le jeu de données *Vieille-Charité* (cf. Fig. [IV.16](#)) illustre la rapidité (40s. de calcul) pour spatialiser une image isolée sur un grand jeu d'images.
- Le jeu de données *Saint-Trophime* (cf. Fig. [IV.17](#)) montre la robustesse de l'intégration de blocs d'images multi-temporelles, y compris les archives web.

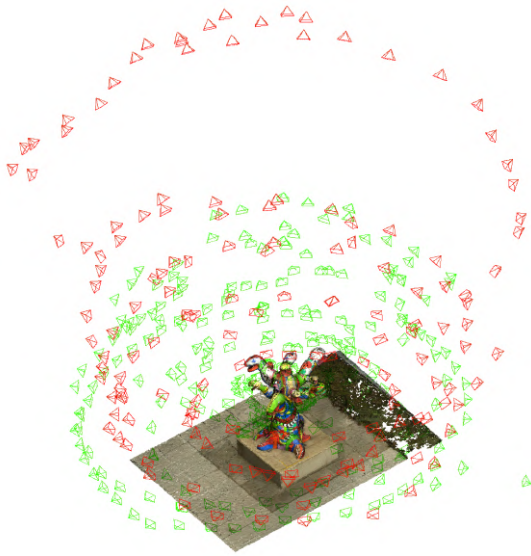


FIGURE IV.13 – Résultat du recalage multi-temporel de deux blocs d’acquisitions relevés par drone sur le jeu de données *Arbre-Serpents*.

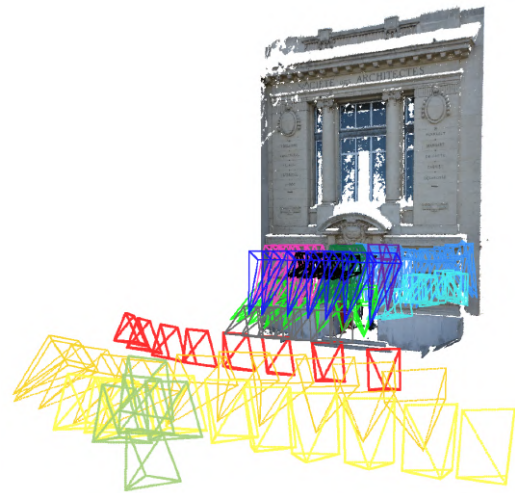


FIGURE IV.14 – Exemple de traitement sur un ensemble multifocal complexe (chaque couleur représente une nouvelle itération) sur le jeu de données *Façade*.

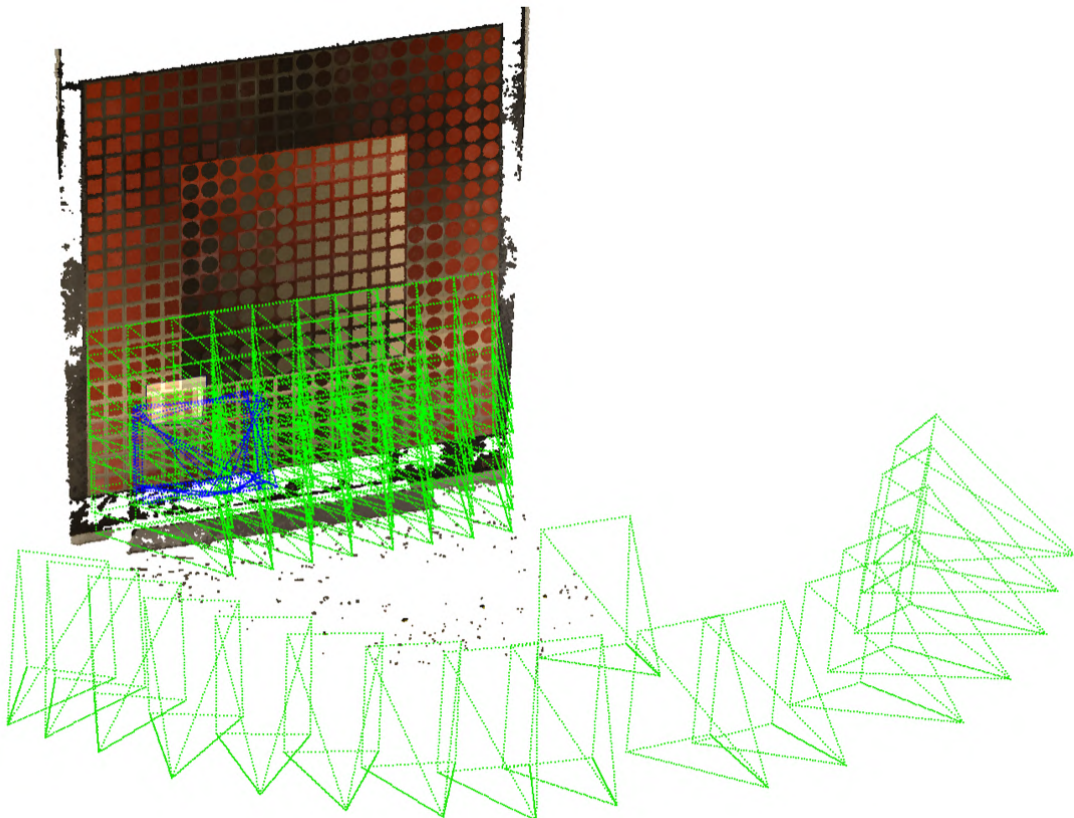


FIGURE IV.15 – Recalage spatial avec un écart d’échelle élevé sur le jeu de données *Zett*.

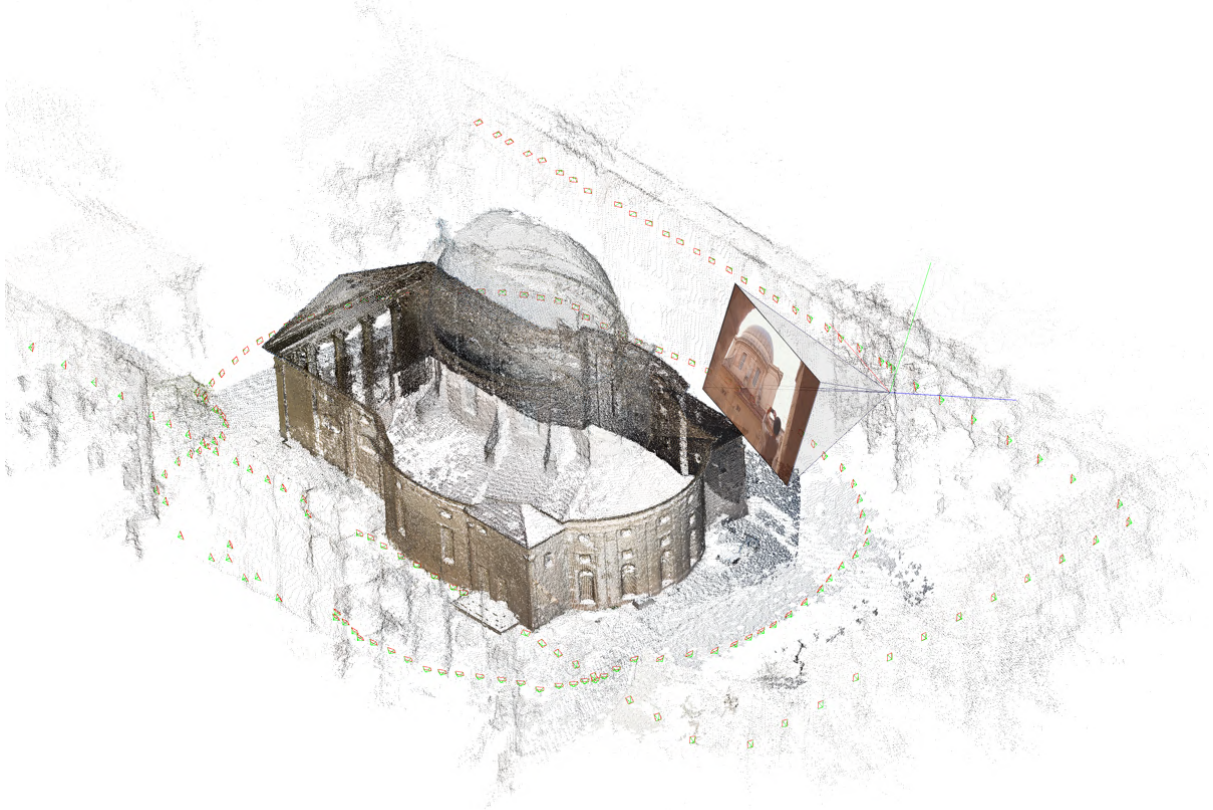


FIGURE IV.16 – Recalage d’une image unique isolée à l’aide de la résection spatiale sur le jeu de données *Old-Charity*.



FIGURE IV.17 – Recalage par résection spatiale d’images d’archives trouvées en ligne sur le jeu de données *Saint-Trophime*.

4.3.6 Vers des synergies logicielles

Discussion générale autour des synergies photogrammétriques¹⁸

L'échange de données et d'informations entre plusieurs logiciels de photogrammétrie est un défi important et ouvert. Actuellement, les logiciels de SfM et de photogrammétrie utilisent leurs propres conventions alors que les formats de fichiers d'échange fiables restent limités et incomplets. Par conséquent, la définition de passerelles de conversion est une action clé pour améliorer l'ensemble de la chaîne opératoire. L'exploitation des meilleures fonctionnalités de chacune des solutions permettrait d'atteindre un résultat optimal en termes de rapidité, de robustesse et de précision. Cela s'opère de nos jours par le rapprochement entre la communauté photogrammétrique et les approches SfM [Aicardi et al., 2018]. Aujourd'hui, il n'existe pas de solution FLOSS facilement accessible pour combiner efficacement ces approches distinctes.

Le dialogue et les synergies FLOSS sont des éléments clés pour répondre au défi des sciences et des données ouvertes, en offrant une véritable alternative aux solutions commerciales. L'ouverture de flux de données réciproque entre les solutions FLOSS et commerciales est tout aussi importante. Des travaux sont en cours pour interfacer MicMac/TACO avec Agisoft Metashape¹⁹ pour un usage synergique et complémentaire plutôt que strictement comparatif ou compétitif. L'état de la réflexion sur les synergies des algorithmes, des bibliothèques et des solutions logicielles, se résume à l'importance de résoudre de nombreux problèmes d'échange et de conversion énumérés ci-dessous :

- Un format de points homologues réversible entre les observations d'une seule et de plusieurs images.
- Un modèle de calibration intrinsèque sans perte selon des conventions de paramètres intrinsèques variables.
- Un format générique pour l'étalonnage externe préservant les mesures d'incertitude.
- Un format compréhensible par l'homme et la machine pour gérer la saisie des coordonnées 2D/3D des points d'appui (GCPs).
- Un format de nuage de points ouvert, standard et enrichi pour comparer et évaluer les résultats de la corrélation dense multisources.

18. Modification du titre et des mentions relatives à l'interopérabilité pour éviter les confusions avec la définition de cette notion dans le domaine web-sémantique.

19. cf. annexe A p.287

Premières expérimentations de traitement synergique

Malgré l'avantage d'un pipeline entièrement automatisé basé FLOSS, ce choix technologique n'est pas exempt d'inconvénients. Le manque d'interaction au sein des modes *Initial* (cf. section 4.3.4.2) et *Incrémental* (cf. section 4.3.4.3) a été compensé par la possibilité d'intervenir sur la linéarité de l'algorithme (au niveau des modules, des sous-modules, des points d'arrêts, des différents ajustements différentiels, ou des options) afin d'en étendre son potentiel. La conception modulaire de TACO anticipait également des travaux futurs en matière d'*interopérabilité* des processus de traitement de données synergiques. Deux jeux de données supplémentaires sont donnés à titre d'exemple des futures fonctionnalités de traitement synergiques orchestrées par TACO. Elles illustrent le potentiel d'une procédure de calcul partagée entre OpenMVG et MicMac. Le pipeline expérimenté (en développement et à ce jour non implémenté dans TACO) utilise OpenMVG pour obtenir une orientation initiale, puis les données sont converties et transmises à MicMac qui effectue un raffinement global de la calibration interne et externe avant de générer un nuage dense.

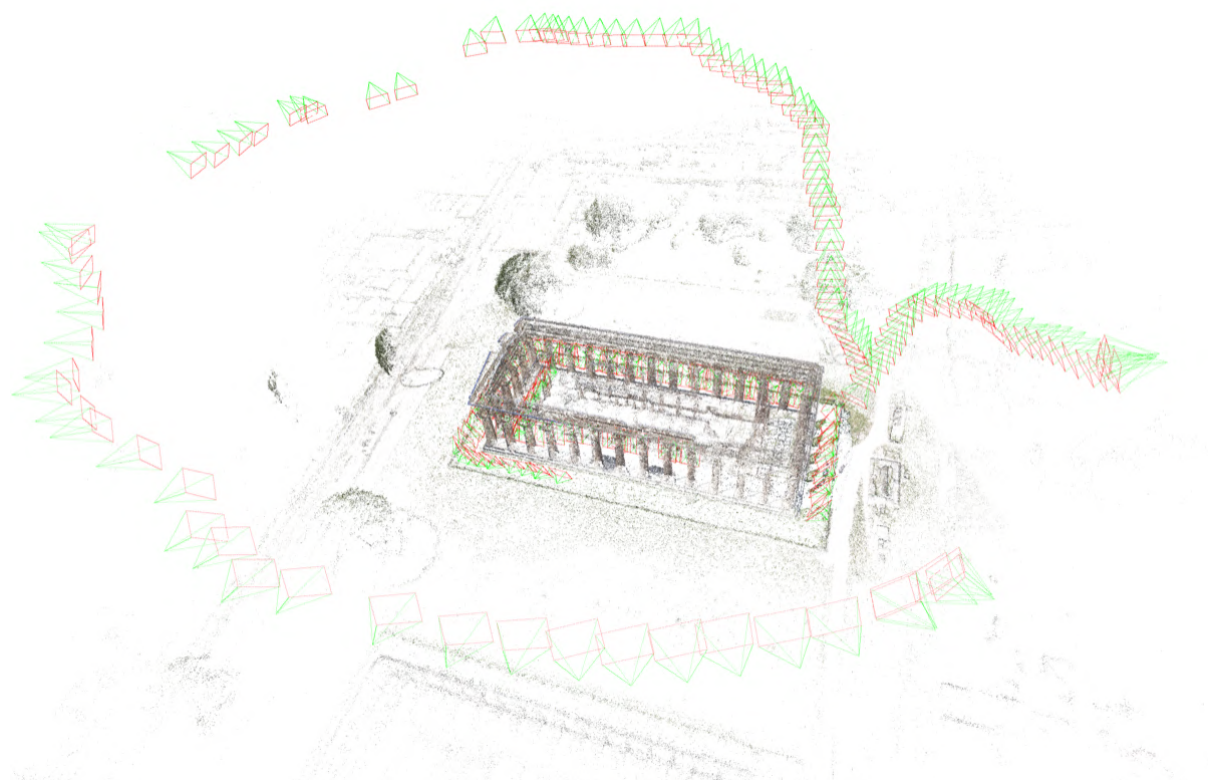


FIGURE IV.18 – Résultat d'une procédure de traitement synergique avec OpenMVG \times MicMac sur deux blocs d'images aériennes et terrestres issues du jeu de données *Temple de Neptune*.

L'exemple du *Temple de Neptune* (cf. Fig. [IV.18](#)) témoigne de nombreuses tentatives d'essais-erreurs basées uniquement sur MicMac qui sont restées vaines, y compris par traitement itératif de sous-ensemble. Ici, l'interopérabilité avec OpenMVG a permis de résoudre le problème critique de la correspondance 2D entre les données terrestres et les données aériennes dû à un faible recouvrement. Sur le jeu de données **Plan-relief** (cf. Fig. [IV.19](#)), la synergie OpenMVG \times MicMac a traité automatiquement l'orientation d'un jeu de données complexe composé de 841 images en une seule itération. Sur le deuxième exemple du Plan-relief de la ville de Lys, OpenMVG a substantiellement accéléré le temps de traitement tout en fournissant à MicMac les conditions idéales pour atteindre une erreur de reprojection acceptable (cf. Résidu Moyen dans le tableau [IV.1](#)) avec modèle de caméra plus exigeant (*Fraser Basic* au lieu de *Radial Basic*). Par conséquent, le nuage de points dense obtenu était moins bruyant que celui traité directement uniquement par OpenMVG.

Idéalement, il conviendrait de renforcer les synergies entre tous les sous-processus afin d'enrichir et d'optimiser la chaîne opérationnelle pour délivrer une sortie de qualité optimale. Au-delà de son fonctionnement basé sur des FLOSS et des performances du calcul déporté, les premiers résultats sont plus que prometteurs. TACO permet une reconstruction 3D à partir de collection d'images complexes et volumineuses, servant de base solide pour la spatialisation incrémentale d'autres sources d'imagerie.

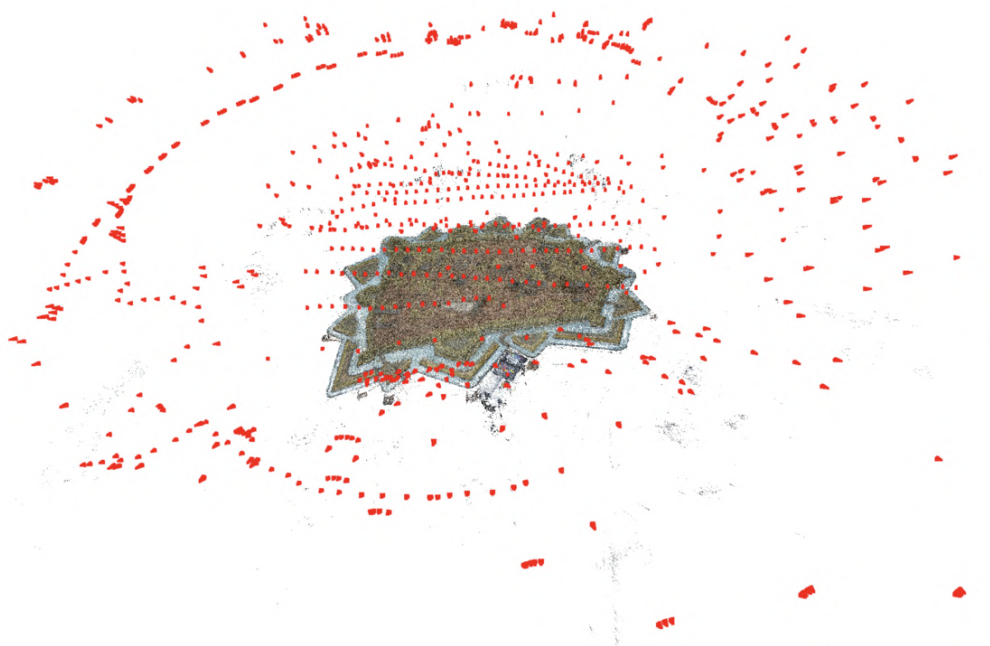


FIGURE IV.19 – Record actuel du nombre d'images spatialisées de façon automatisée à l'aide de TACO lors d'une seule itération sur le jeu de données *Plan-Relief*.

4.3.7 Conclusions et perspectives

Contributions principales de TACO

La méthodologie de traitement mise en œuvre et déployable par le biais TACO offre un gain significatif de robustesse et de polyvalence par rapport aux routines photogrammétriques FLOSS. Le module *Initial* a délivré des résultats intéressants pour traiter des jeux de données variés en termes de taille et de complexité. La complémentarité des méthodes BBA et SR des nœuds incrémentaux fournit une approche de recalage efficace supportant de nombreuses applications d'imagerie multimodales (y compris la gestion simultanée de couches multiéchelles, multicateurs, multitemporels ou multi-spectrales).

Développée initialement comme une solution automatisée dédiée au calcul déporté, TACO fait preuve d'une flexibilité et d'une marge d'évolution intéressante pour le croisement de modalités mixtes. La réussite reste conditionnée par les contraintes photogrammétriques d'une part, et d'autre part, relative à la cohérence (c.-à-d. les écarts spatiaux et de résolution, les déviations spectrales ou radiométriques, les variations temporelles ou contextuelles) entre et au sein des ensembles d'images. L'intégration du calcul d'orientation absolue et les fonctions synergiques offrent de nouvelles perspectives. Néanmoins, ces réalisations appellent de nouveaux défis qui nécessiteront une attention particulière dans le maintien, l'optimisation et le développement de nouvelles fonctionnalités.

Apports de TACO et ouverture

D'une part, les performances en termes de polyvalence, de robustesse et de synergies augmentent les potentialités pour construire et enrichir une représentation numérique mettant en coopération des sources d'images variées. D'autre part, la transition vers un système de coordonnées objet/espace cohérent permettra une évaluation et la comparabilité métrique avec d'autres flux de données. Cependant, la reconstruction d'un modèle 3D à partir de sources multiples nécessite un système d'évaluation qualitative pour consolider de manière persistante leurs géométries respectives (densités, qualités, incertitudes, similarités ou discontinuités). En effet, il serait contre-productif de spatialiser indéfiniment des ressources autour de géométries complexes, sans considérer leur impact positif ou négatif sur la fusion ou l'enrichissement. Il se trouve que l'accumulation de plusieurs géométries provenant de sources différentes augmente son inintelligibilité. Or, elle devrait au contraire pouvoir guider la démarche d'interprétation (c.-à-d. en associant les modalités d'une source aux observations qu'elle permet). En ce sens, TACO propose un cadre propice pour rendre plus efficace la fusion de données (en reliant des caractéristiques géométriques à des attributs sémantiques).

Cette nouvelle couche sémantique devra être intégrée au sein de la méthodologie proposée pour mémoriser les traces et les indices utiles de la multimodalité. Il est envisagé d’explorer des approches de filtrage et de réduction des données pour en faciliter l’interprétation. En définitive, nous proposons de prévenir l’entropie de la gestion des contenus numériques en analysant et en raisonnant dès à présent les usages de l’imagerie scientifique patrimoniale. Un défi majeur subsiste pour les Objets Patrimoniaux Numériques d’aujourd’hui soient en mesure de servir et d’anticiper les préoccupations de demain.

4.4 BILAN DES APPROCHES RELATIVES À LA SPATIALISATION

Instrumentation → Traitement

Les travaux repris et articulés dans ce chapitre ont permis de démontrer comment les stratégies de spatialisation pouvaient représenter une plus-value pour les scénarios de documentation multimodale. Les deux sous-chapitres ont montré la porosité des relations entre les étapes de collecte et de traitement de données. Dans un premier temps, on a posé la définition de protocoles d’acquisitions *ad hoc* anticipant la gestion d’imagerie multimodale comme pouvant être abordée soit sous un aspect méthodologique (cf. section 4.2.1) soit sous un aspect technique via des dispositifs instrumentaux dédiés à des contextes de numérisation (cf. section 4.2.2). Dans un second temps, l’élaboration de procédures de recalage au moyen de méthodes photogrammétriques optimisées pour être plus conciliante face à l’intégration de couches multimodales a permis d’augmenter sensiblement les sources d’imagerie qu’il est possible de spatialiser. Elles restent, pour l’instant, restreintes à la MBI et aux techniques basées sur la photographie. Les travaux présentés sous le prisme de deux approches complémentaires, l’une instrumentale et l’autre procédurale, démontrent une capacité accrue et renforcée à spatialiser de façon progressive un nombre toujours plus important de sources variées. Ainsi, les approches présentées dans ce chapitre apportent les premières contributions nécessaires à la construction de stratégies multimodales.

La spatialisation au sein d’un continuum d’information 2D/3D

Avant de dresser ci-après, un bilan plus détaillé des contributions respectivement proposées par les deux approches. Le croisement de ces dernières renforce l’hypothèse que la photogrammétrie puisse être une modalité d’appui, voire tel qu’introduit en chapitre III, un *instrument pivot*, c’est-à-dire au service de plusieurs modalités. Il ressort de ces expériences que la photogrammétrie offre effectivement une passerelle et une mise en coopération

— pour reprendre la définition proposée de la multimodalité — entre les techniques et les méthodes orientées 2D et celles orientées 3D. Ces approches combinatoires doivent converger vers la définition et du renforcement d'un continuum d'information 2D/3D dont la structure multicouche est ébauchée et illustrée ci-après (cf. Fig. [IV.20](#)) :

- I Définition d'une matrice basée sur la relation projective 2D/3D²⁰ et permettant de mettre en correspondance spatiale un système de représentation bidimensionnel (pixels exprimés $[x, y]$) avec une géométrie tridimensionnelle (coordonnées des nuages de points exprimées $[X, Y, Z]$).
- II Alignement des attributs colorimétriques composés de couches exprimées dans un espace colorimétrique propre ou transformé (exprimés en valeurs RVB, HSV, YUV, etc.) pour chaque plage spectrale de la modalité d'imagerie (p. ex. VIS, IR, UV...) ou d'images composites (image moyenne, médiane, D-stretch, etc.).
- III Décomposition significative des informations géométriques telles que les coordonnées 3D de points dans l'espace (exprimé dans un repère cartésien $[X, Y, Z]$) et d'éventuels attributs topologiques tels que les normales aux points $[Nx, Ny, Nz]$.
- IV Compilation de caractéristiques supplémentaires extraites des descripteurs 2D ou 3D variés $[n]$, telles que *l'Occlusion Ambiante* $[AO]$, la *Rugosité* $[R]$ ou *Courbure* $[k]$ (liste non exhaustive pouvant inclure la *Densité* ou la *Planarité* parmi la liste des descripteurs géométriques notamment proposés et accessibles dans CloudCompare [\[Girardeau-Montaut, 2022\]](#)) et pouvant être juxtaposées avec d'autres indices (indice de qualité, de confiance, de fusion).
- V Complétion de l'ensemble de données avec d'autres types d'attributs basés :
 - i sur des méthodes d'indexation, de seuillage, de classification ou de segmentation calculés sur des couches colorimétriques/géométriques, possiblement fusionnées, (notée $[S]$),
 - ii des masques issus de la binarisation de tracés vectoriels tels que des annotations (notées $[M]$),
 - iii ou toute combinaison analytique pertinente (notées arbitrairement $[i^n]$ pour dénoter de sa nature computationnelle).

20. Différentes méthodes peuvent être appliquées telles que dans ce cas l'orthorectification mais aussi la cartographie UV.

4.4. BILAN DES APPROCHES RELATIVES À LA SPATIALISATION

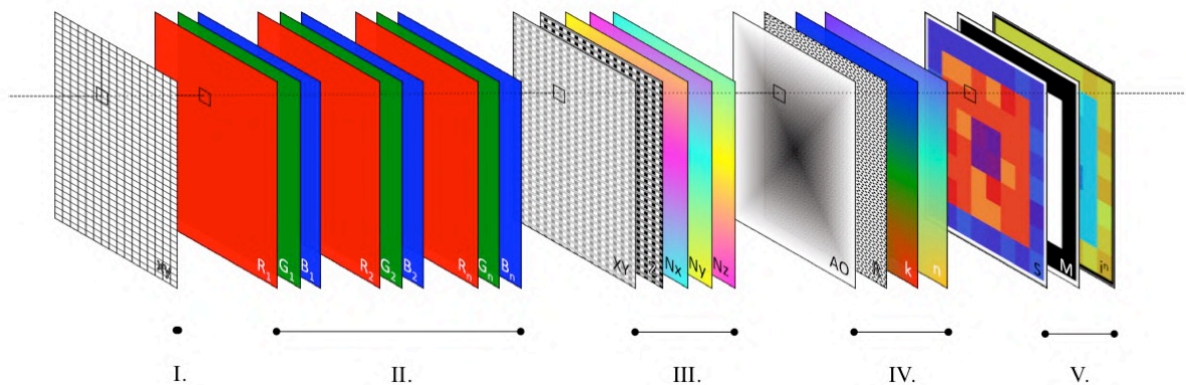


FIGURE IV.20 – Diagramme de la structure multicouche : I.) Indexation 2D ou 3D II.) Couches colorimétriques III.) Couches spatiales IV.) Attribut provenant de descripteurs visuels ou géométriques V.) Couches sémantiques issues de processus de segmentations (annotations) ou de classifications (*Mean-Shift*, *K-moyennes*, *Forêt Aléatoire*, *Analyse en Composantes Principales*, etc.).

L'exemple de cette structuration multicouche permet de mieux cerner et délimiter les enjeux de la *spatialisation* au sein de ce continuum informationnel. L'objectif est de rassembler et de mettre en cohérence une série d'informations disparates provenant de modalités diverses ou de leurs combinaisons, préalablement recalées. Cela permet un pas en avant vers la mise en synergie des modalités d'imageries 2D et 3D, qui devient non seulement possible, mais aussi vectrice de nouvelles connaissances nées des potentiels de corrélation entre différentes sources de données.

4.4.1 Bilan des contributions relatives à la spatialisation

Bilan des contributions de Spatialisation par l'instrumentation

Le principal apport des travaux repris dans ce chapitre thématique réside dans le phénomène d'hybridation de différentes modalités. Celui-ci s'installe comme un moyen efficace d'anticiper et de faciliter la spatialisation des données, ayant par inertie, un effet sur leur fusion et possiblement jusqu'à leur enrichissement. Notre contribution se manifeste par le fait de se saisir de la question de relevé, non plus comme une problématique en soi, mais comme un élément charnière entre l'acquisition, la spatialisation et le traitement de données. Ce travail pourrait ouvrir la voie à une série de réponses par un repositionnement stratégique du rôle de l'instrumentation en amont et en aval de l'acte de numérisation. Sur base d'une réflexion sur les protocoles d'acquisitions, il résulte de l'arbalète une imagerie nativement multimodale avec un gain notoire en ce qui concerne la reproductibilité, la

conformité voire la prédictibilité de données orientées temps. Cependant, la limite d'une réponse strictement instrumentale est, telle que convenue, non généralisable et extensible à tout cadre et contexte d'étude..

Bilan des contributions de Spatialisation (TACO)

Le versant procédural poursuit et complète ainsi les contributions en rendant accessibles et opérationnelles des approches multimodales avec des contextes plus variés ou sous-optimaux. Une contribution sous-jacente est d'une part l'élicitation de ces différents scénarios (multi-scalaires, multi-époques, multi-bandes, etc.), d'autre part l'aptitude des solutions proposées à les traiter efficacement de façon conjointe ou bien simultanée ces scénarios. La conception et l'implémentation d'une procédure de traitement automatisée (TACO) basée sur des solutions libres (et rendue en Open Source²¹) capable de gérer des scénarios multimodaux à la fois massifs et complexes apporte en soi une contribution majeure. La spatialisation est ici adressée par une réponse multi-niveau, améliorant les méthodes de recalage de données 2D/2D²² et de les mettre en perspective avec des méthodes 3D/3D enrichies, explorées dans les prochains chapitres.

Spatialisation → Fusion

À l'échelle méthodologique, voire systémique de ce travail, il est possible de faire émerger une dernière contribution du fruit de la rencontre des deux approches. Il s'agit de la dichotomie des démarches multimodales dites par intention (ou *a priori*) — à favoriser — ou par extension (ou *a posteriori*) et du fait que de potentielles stratégies multimodales, se doivent d'embrasser cette dualité, marqueur charismatique de leur inscription et de leur adéquation dans un contexte patrimonial. Autant que faire se peut, cette thématique de la *spatialisation* a été abordée en développant les liaisons fines entre l'acquisition et le traitement des données, cette démarche transversale sera conservée pour les autres approches. En guise de clôture et de transition vers le prochain chapitre, le moment semble approprié pour se rappeler que le recalage n'est pas *fusion*.

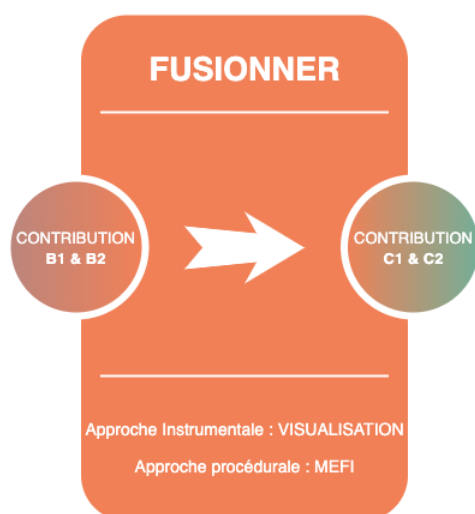
21. cf. annexe A p.287

22. Telles que les optimisations de l'appariement via *Manioc* ou de l'estimation de poses via *Antipasti* ainsi que l'intégration de marqueurs codés via *Culbuto* renforçant le continuum photogrammétrique

Chapitre V

FUSIONNER

5.1 DÉFINITION DES ENJEUX RELATIFS À LA FUSION



Comme vu au cours du chapitre précédent une meilleure articulation entre l'étape d'acquisition et la phase de traitement peut être abordée par le prisme d'actions stratégiques visant à améliorer notre capacité de spatialisation de sources d'imageries diverses. Ce chapitre traite des possibles stratégies permettant de renforcer l'interprétation des données en approfondissant le rôle des processus de fusion. Celles-ci sont mises en œuvre par le biais d'approches instrumentales ou procédurales en tirant bénéfice des apports précédents en termes de recalage et de spatialisation. Une série d'expérimentations mobilisant des ensembles de données multimodales déjà consolidés servira de socle. On envisagera si et comment

l'anticipation des contraintes de la multimodalité le plus en amont possible permet effectivement de faciliter et d'accroître le potentiel de la fusion. La notion de co-modalité sera approfondie pour ensuite étendre l'étude à des jeux de données à la structure multimodale plus complexe. Il sera aussi question de déterminer des combinaisons d'approches permettant d'ébaucher et de bâtir les fondations d'une possible méthodologie de traitement de données multimodales. La poursuite de cet objectif ne peut s'établir sans la prise en compte d'un ensemble d'éléments en interrelation tels que les objectifs du relevé, la fiabilité des sources ou l'incertitude du recalage spatial.

Ces enjeux trouvent un cadre d'application idéal par le biais de deux pistes explorées ré-

cemment dans des travaux de recherches. Une première expérience relate le développement d'une approche (relativement) opérationnelle pour l'exploitation d'imagerie RTI orientée dans l'espace. Ce travail prend sa source, d'une part, grâce à la nécessaire harmonisation des protocoles d'acquisitions propres au RTI et à la photogrammétrie introduite précédemment. Elle s'appuie d'autre part, sur l'implémentation à titre expérimental du module de spatialisation *incrémental* de TACO au sein de la plateforme AIOLI. Les contributions de ce chapitre sur la thématique de la *fusion* sont introduites par une approche instrumentale focalisant sur ce scénario bimodal précis (photogrammétrie \times RTI). Un complément de réponse est ensuite apporté par une approche procédurale élargissant à la fois le spectre, mais aussi le potentiel interprétatif d'ensembles complexes de données multimodales. Cette seconde partie se focalise sur la fusion de nuages de points denses et multisources sur un chantier offrant un scénario de documentation multimodale aussi riche que variée. La suite de ce chapitre décrit à la fois le contexte et l'utilisation de la stratégie de *spatialisation* issue abordée précédemment tout en orientant progressivement les travaux et la réflexion relatifs à la *fusion* vers le défi suivant consacré à la thématique de l'*enrichissement*.

5.2 APPROCHE INSTRUMENTALE DE FUSION : SPATIALLY ORIENTED RTI

Ce sous-chapitre retrace l'expérience menée dans cette publication [11]¹ qui est issue d'une recherche partenariale au sein d'un Laboratoire International Associé (LIA)² explorant la numérisation 3D massive pour la documentation à grande échelle des objets du Patrimoine Culturel³. Elle est intéressante, pour cette partie du développement, car elle s'attaque précisément à un des verrous laissés en suspens au cours du chapitre précédent.

Dualité des modalités photogrammétriques \times RTI

Faisant état de la difficulté de concilier des méthodes d'acquisitions lorsque leurs contraintes sont contradictoires, on prendra la cas d'une combinaison multivues (p. ex. photogram-

1. Contenu basé sur l'article de conférence internationale avec acte [11] : Pamart, A., Abergel, V., Alaoui M'Darhri, A., M., Morlet, F., et Al. (2019) A Complete Framework Operating Spatially-oriented RTI in a 3D/2D Cultural Heritage Documentation and Analysis Tool, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W9, 573–580, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-573-2019>.

2. Avec le CNR-ISTI, Visual Computing Lab, Pise, Italie.

3. Contributions de tiers collaborateurs : Conception et développement d'une visionneuse hybride au sein d'AIOLI par Violette Abergel | Implémentation de TACO et du processus SO-RTI dans AIOLI par Anas Alaoui M'Darhri.

métrie) et multilumières (p. ex. RTI) comme terrain d'étude⁴ [Cantó et al., 2022]. Sans être pour autant incompatible, l'articulation de ces deux techniques d'imagerie soulève un élément récurrent des pratiques multimodales [Adamopoulos and Rinaudo, 2019, Adamopoulos and Rinaudo, 2021]. Dans notre domaine d'application, les combinaisons multimodales fonctionnent essentiellement par paire. Ensuite, celles-ci sont appliquées par des approches centrées vers une modalité, introduisant une hiérarchie de type mère/fille, primaire/secondaire ou servant/servi. Souvent une technique se greffe à l'autre sans imposer une condition de réciprocité sur la plus-value qu'elle apporte. Effectivement, l'approche présentée ci-après ne reflète que la relation $RTI \implies Photogrammétrie$, dans laquelle on tente d'intégrer des données RTI dans le paradigme photogrammétrique. En outre, le travail effectué, exclu ou du moins ne couvre pas la relation $RTI \longleftarrow Photogrammétrie$ (tant elle serait possible). Tout l'intérêt se porte sur une possible relation d'équivalence $RTI \iff Photogrammétrie$ qui serait synonyme d'accroissement du potentiel multimodal réciproque de ce couple d'imageries.

Contexte et contraintes d'application

On ne discutera pas ici des contraintes et règles d'acquisitions respectives de ces deux techniques détaillées dans la publication. Cependant la portée de ce travail est renforcée par la sélection de jeux de données aux caractéristiques variables et volontairement inégales en qualité. Ce choix exprime l'intention de se confronter à des difficultés au plus proche de la « réalité terrain », et refusant le recours à des données synthétiques permettant d'améliorer les performances pour en restreindre le déploiement en cas concret. Cette mise en contexte est primordiale du fait qu'il n'existe pas de protocole universel et formel régissant comment mener en toute circonstance une acquisition combinant RTI et photogrammétrie. Là où les différents tests menés dans cette étude ont justement permis d'évaluer différents scénarios concrets, afin de raisonner sur la mise en œuvre de cette co-modalité (qui est essentiellement au stade empirique au moment de rédiger ces lignes). Cela a abouti à un corpus représentatif sur le plan de la typologie d'objet, de la complexité de la base photogrammétrique, de capture manuelle (H-RTI) et automatisée (Dôme) pour le RTI, d'écart en matière de longueur focale et/ou de résolution spatiale, et de captation diachronique ou synchronique (cf. Tableau V.1). Il ressort une nouvelle fois de cette expérience que les relevés combinatoires « par intention » offrent des contextes optimums pour exploiter au mieux les avantages d'une double modalité.

4. La modélisation d'une scène 3D basée sur la capture du réel permettant l'interpolation des points de vue conjointement à l'interaction lumineuse reste plus globalement un défi dans le domaine de la vision par ordinateur.

5.2. APPROCHE INSTRUMENTALE DE FUSION : SPATIALLY ORIENTED RTI

Jeu de données	PTG Nb. images	RTI Station et type	Plage de distances focales (<i>mm</i>)	Contextes d'acquisition
Vénasque	-	3 <i>H-RTI</i>	60	Diachronique
Tegulae	5	1 <i>LP</i>	24	Synchronique
Manuscript	5	1 <i>LP</i>	60	Synchronique
Vasarely	5	1 <i>LP</i>	35	Synchronique
Skull	6	2 <i>LP</i>	60	Synchronique
iSkull	38	2 <i>LP</i>	28 60	Diachronique
Bramante	23 + 33	2 <i>LP</i>	35 and 60 24 and 60	Diachronique
Melchior	50	17 <i>H-RTI</i>	105 85	Diachronique
Brea	29 + 39	5 <i>LP</i>	35 and 60 24 to 105	Synchronique
Hermes	43 + 185	3 <i>H-RTI</i>	35 and 60 60	Diachronique

TABLE V.1 – Composition des ensembles de données multimodales reprenant fonction le nombre d'images relatif à chaque modalité, leurs caractéristiques techniques (type de station, focales) et leur contexte d'acquisition.

Prédispositions instrumentales

À l'instar des expériences précédentes, le degré de précision du recalage spatial se révèle comme une composante primordiale pour que la multimodalité apporte un gain significatif. Ce problème déjà prépondérant pour le traitement de plusieurs sources provenant d'une même technique prend une tout autre ampleur dans la gestion de sources d'imagerie différenciées. Alors que l'impact de ce certain facteur peut être négligeable ou ignoré pour une application photogrammétrique, l'incertitude dans l'appariement et le positionnement approximatif d'une source RTI impactent directement l'usage qu'il peut en être fait (cf. Tableau [V.2](#)). Dans le cas précis où l'imagerie multiéclairage a pour vocation de permettre l'annotation et son transfert d'autres images orientées, l'ambiguïté ou l'incohérence spatiale de la calibration (tant interne qu'externe) rend inopérante son exploitation. Comme souvent la résolution de problème induit un retour à l'étape de captation (c.-à-d. connectivité de l'image avec le réseau de caméras et précalibration de la caméra ou réutilisation d'une caméra préalablement orientée), plutôt que de panser par des traitements artificiels (cf. Fig. [V.1](#)). Il est aussi possible de renverser le constat, en stipulant que toute erreur ou manquement en phase d'acquisition aura des répercussions néfastes pour la poursuite du processus.

5.2. APPROCHE INSTRUMENTALE DE FUSION : SPATIALLY ORIENTED RTI

Jeu de données	Bundle Block Adjustment	Resolution Image (SIFT)	Résidu moyen en (P_x)	Spatial Resection	Nb. moyen de GCP	Résidu ER ² en (P_x)
Venasque	3/3	1000	1.00	-	-	-
Tegulae	1/1	1000	1.05	-	-	-
Manuscript	1/1	1000	1.12	-	-	-
Vasarely	1/1	2000	0.74	-	-	-
Skull	2/2	2000	0.62	-	-	-
iSkull	2/2	2000	0.82	-	-	-
Bramante	2/2	2000	0.95	-	-	-
Melchior	0/17	3000	-	17/17	4113	1.29
Brea	3/5	3000	0.97	2/2	104	1.42
Hermes	3/3	2000	0.86	-	-	-
Résumé	49%	-	<< 1px	51%	-	>1px

TABLE V.2 – Résultats du recalage spatial sur les ensembles de données multimodales par ajustement de faisceaux (Bundle Block Adjustment - BBA) et par résection spatiale (Spatial Resection - SR). Légende : ● Partiellement ou bizarrement orienté ● Non orienté.

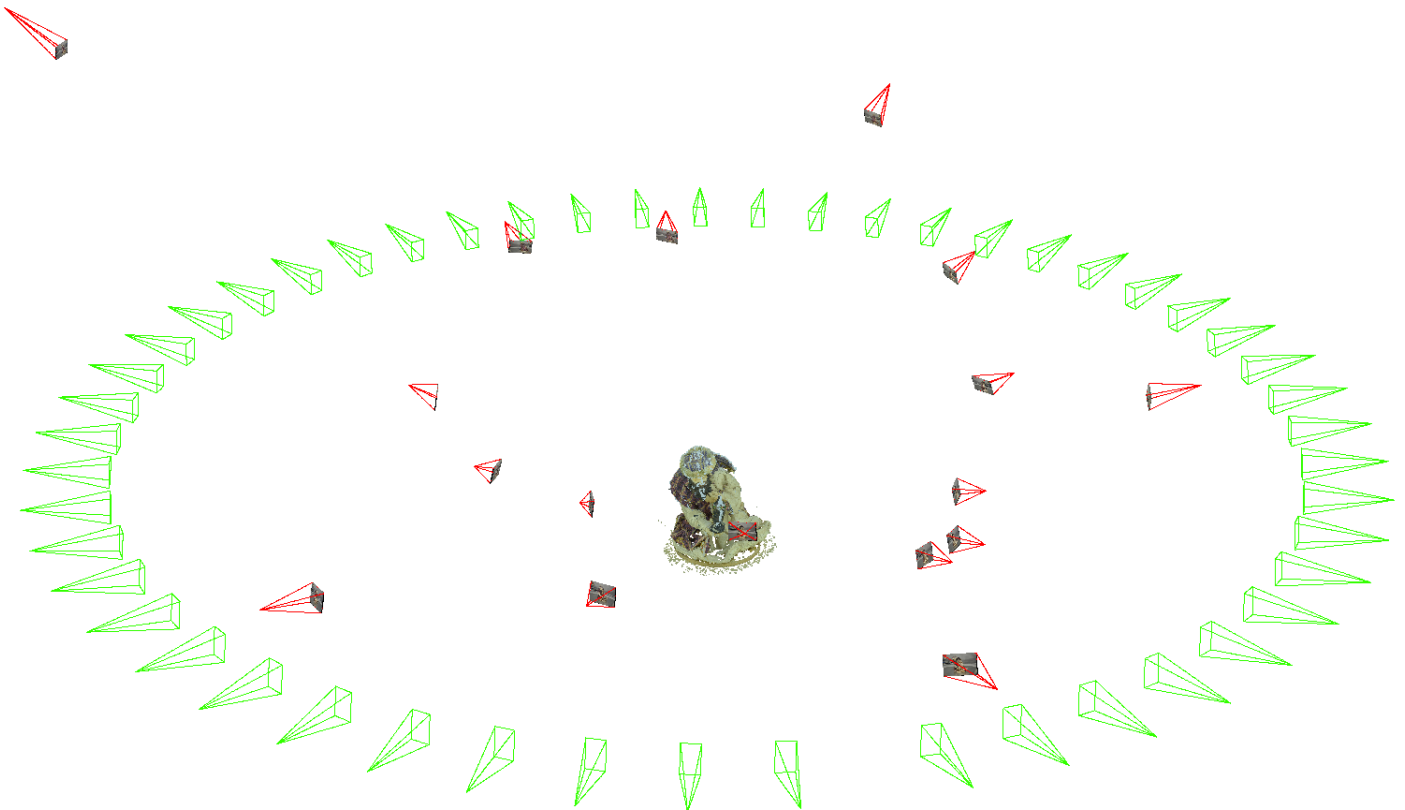


FIGURE V.1 – Illustration de l'incohérence de spatialisation sur les 17 itérations recalées par résection spatiale sur le jeu de données de *Melchior*.

5.2. APPROCHE INSTRUMENTALE DE FUSION : SPATIALLY ORIENTED RTI

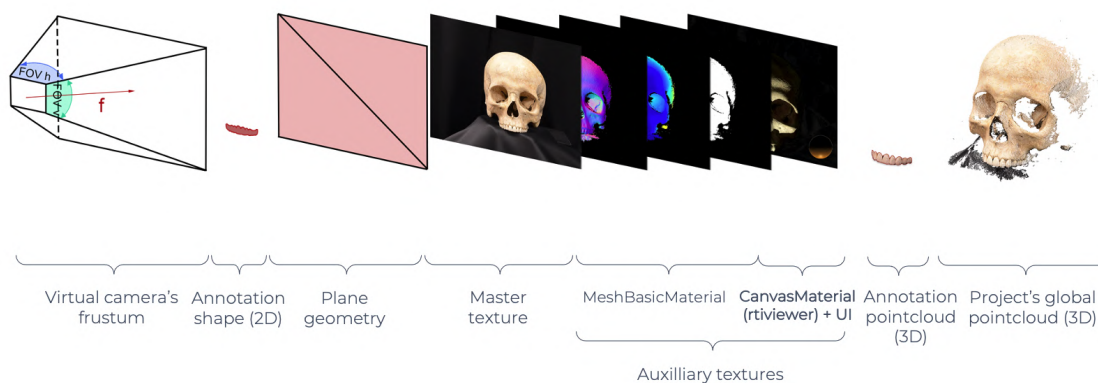


FIGURE V.2 – Schéma explicitant de la structure des caméras virtuelles multicouches tel que proposée et implémentée dans le viewer AIOLI/SO-RTI

La réciprocité de co-modalités

Les apports de TACO concernant la reproductibilité du recalage spatial ont été mis à contribution, pour se doter d'un environnement unique capable de manipuler simultanément les deux types de données. Ce travail aura permis de démontrer d'une part l'aptitude de TACO à spatialiser des données d'origine autres que photogrammétriques, en l'occurrence des ensembles RTI parmi d'autres images orientées. D'autre part, il valide la pertinence de son implémentation au sein d'une plateforme pour interagir et interpréter des sources variables par une lecture croisée. Malgré sa portée expérimentale, cela témoigne d'une démonstration marquante et innovante puisqu'il s'agit du premier système permettant de visualiser et d'annoter conjointement ces deux modalités d'imageries (cf. Fig [V.2](#)). La force de cette approche s'exprime par la potentielle réciprocité précédemment évoquée pour développer des scénarios d'annotations sémantiques à double sens, l'une exploitant le chemin $a \rightarrow b$ et l'autre $b \rightarrow a$, où a et b représentent deux modalités distinctes. La première se réfère à l'annotation et au transfert d'une observation non visible depuis une source photogrammétrique conventionnelle (car figée dans une condition d'éclairage unique). La seconde renvoie à la propagation d'une annotation basée sur la photogrammétrie sur un point de vue réilluminable par RTI pour affiner son observation. Des exemple sont donnés pour illustrer pour les deux cas ;

- Scénario $a \rightarrow b$; voir annotation de la signature gestuelle du potier sur le cas d'étude *Tegulae*, qu'il est possible de sublimer (et ainsi améliorer le dessin du contour) par la variation d'éclairage de la modalité RTI alors que difficilement perceptible sur la modalité photogrammétrie (cf. Fig [V.3](#))
- Scénario $b \rightarrow a$; voir annotation de la géométrie de la lésion du cas d'étude *Skull* mise en relief par le focus RTI sur cette même zone (cf. Fig [V.4](#))

5.2. APPROCHE INSTRUMENTALE DE FUSION : SPATIALLY ORIENTED RTI

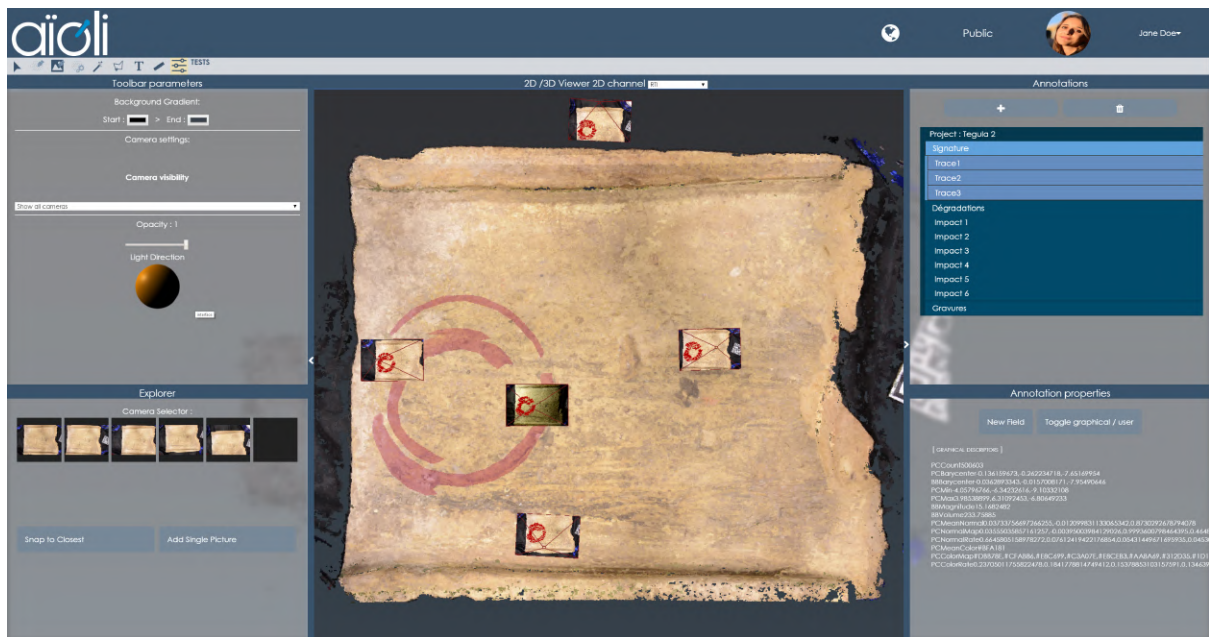


FIGURE V.3 – Scénario $a \rightarrow b$ sur *Tegulae*.

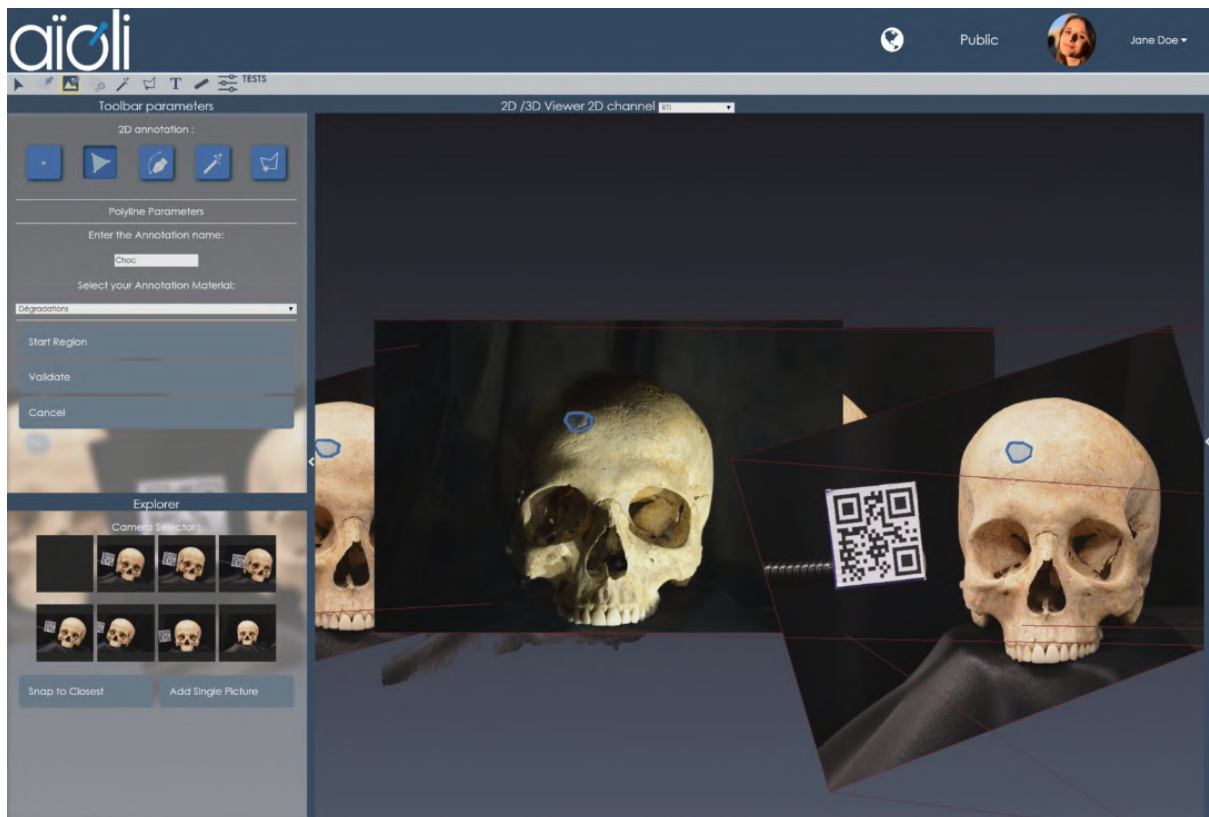


FIGURE V.4 – Scénario $b \rightarrow a$ sur *Skull*.

Extension de la méthode

En conclusion, les discussions relatives à cette expérience auront permis de démontrer l'enjeu des croisements de modalités spatialisées et la nécessité de les inscrire au sein de plateformes de visualisation avancées. Ces dernières doivent aussi être compatibles avec une gestion « incrémentale » — au fil de l'eau — des données. Tout l'intérêt de l'approche instrumentale réside ici dans l'accessibilité des données, dans un environnement unique, mettant en coopération deux techniques d'imagerie couramment utilisées dans les études patrimoniales. Les perspectives de ce travail sont nombreuses, dans le sens où la démonstration, effectuée sur le cas du RTI, pourrait s'étendre à l'intégration d'autres modalités basées sur la collection d'images. Cela ouvre des pistes d'extensions naturelles vers d'autres techniques de photographie computationnelle (imagerie HDR, Shape from Focus, Shape from Polarisation) voire des séquences d'images orientées temps (time-lapse). Plus récemment, une piste a été explorée pour intégrer avec ce même mécanisme des images multispectrales dont le recalage photogrammétrique s'avère complexe. De façon plus prospective, l'intérêt de cette approche de modalités spatialement orientées exploitant la spatialisation 2D/3D aurait tout son sens pour l'intégration de technique pouvant bénéficier d'un apport géométrique. C'est le cas notamment de la stéréophotométrie (par ailleurs cousine du RTI) qui permettrait d'envisager une approche cogénérative de géométrie basée image, cumulant les capacités de la photogrammétrique dans la reconstruction de surface complexe et celles de la stéréophotométrie pour restituer plus finement sa microgéométrie.

Limites de l'approche relatives aux ressources spatialement orientées

Malgré la preuve de concept validée par cette approche, elle n'est pas exempte de verrous ou des limites. Du côté des limites, cette méthode reste destinée aux données de sources photographiques et compatibles avec les contraintes photogrammétriques. Ensuite, au détriment de sa robustesse, la méthode de recalage par résection spatiale retourne la plupart du temps une solution difficilement exploitable. Si elle permet d'estimer de façon approximative, voire grossière la position d'une image dans l'espace, son imprécision est rédhibitoire pour exploiter sa *spatialisation* et donc sa potentielle *fusion*. Ce constat permet de faire la liaison avec une limite inhérente à la fusion de données, telle que définie et bornée lors des sections (cf. sections [2.3.3.1](#) et [3.4.2](#)). Il semble prérequis de se doter de métriques fiables permettant d'estimer une Mesure de la Performance (MoP) attribuée au résultat de la fusion et avant cela de pouvoir qualifier les sources par un Degré de Confiance (DoC). Dans ce cas précis, aucune de ces conditions n'est remplie.

Par conséquent, avant de pouvoir aborder de quelconques façons la question de la fusion de données, il convient de rappeler que le travail exposé ci-dessus ne peut pas se définir ou s'assimiler en tant que processus de fusion, dans le sens où il ne permet que le recalage et la superposition de modalités différentes au sein d'un environnement de travail unique. Il apparaît à ce point nécessaire de rappeler le postulat suivant :

$$\textit{recalage} \neq \textit{superposition} \neq \textit{fusion}$$

Ouverture vers le défi de la fusion multisource

Contrairement à d'autres domaines, il n'existe pas, pour le cas précis de l'imagerie 2D/3D appliquée aux Sciences du Patrimoine, de modèle de fusion de données à proprement parler. Comme énoncé précédemment, les approches de spatialisation 2D/3D, établies par la relation projective entre une source 2D orientée au sein d'une représentation géométrique 3D, à défaut de se substituer à la fusion, y apporte un support non négligeable. Pour la poursuite de ce travail, l'hypothèse approfondie sera celle menant à la modélisation 3D en tant que point d'ancrage — en quelque sorte, le dénominateur commun — pertinent pour opérer la fusion et l'intégration des couches multimodales. Elle occupe effectivement une position médiane entre des sources 1D (spectres), 2D (images), 4D (temps) ou nD (complexe multibande, annotations, descripteurs, etc.). La piste favorisée ci-après considère la fusion de données, par le prisme de la représentation tridimensionnelle. Cela implique la gestion d'ensembles géométriques complexes et variables, très généralement sous la forme d'une agrégation de nuages de points (ou bien de maillages) représentant tout ou une partie du même objet patrimonial. Or, de la même façon que la superposition de ressources 2D orientées dans une même scène 3D, l'accumulation de sources 3D dans un référentiel spatial unique, ne peut être assimilée à de la fusion de données. Des problèmes particuliers soulevés aux chapitres [II](#) et [III](#), pointaient l'imperfection, le non-déterminisme ou encore le manque de fiabilité de sources hétérogènes comme des composantes caractéristiques des données patrimoniales. L'approche procédurale à suivre permet d'interroger, les potentiels de la modélisation à renseigner et/ou de relever la structure multimodale d'un modèle 3D multisources comprenant ces caractéristiques.

5.3 Approche procédurale de Fusion : MEFI

Traduction de l'article de revue internationale [\[5\]](#) : Pamart, A., Abergel, V., De Luca, L., Véron, P. (2023). Toward a Data Fusion Index for the Assessment and Enhancement of 3D Multimodal Reconstruction of Built Cultural Heritage. *Remote Sens.* 2023, 15, 2408. <https://doi.org/10.3390/rs15092408>.[\[5\]](#)

5.3.1 Vers un indice de fusion de données pour l'évaluation et l'amélioration de la reconstruction multimodale 3D du patrimoine culturel bâti

Pour les Sciences du Patrimoine (SP), les stratégies de numérisation 2D/3D deviennent de plus en plus complexes. La démocratisation de l'imagerie multimodale (c.-à-d. des campagnes d'acquisition de données visant à mettre en coopération plusieurs capteurs, échelles, bandes et/ou époques simultanément) implique plusieurs défis sur le plan de la provenance des données, de fusion des données et d'analyse des données. En partant du postulat que l'utilité actuelle des modèles 3D multisources pourrait être plus significative que des millions de points agrégés, ce travail explore une approche de visant à « réduire pour comprendre » afin d'accroître la valeur interprétative des nuages de points multimodaux. Après plusieurs campagnes de numérisations accumulées sur un objet d'étude unique, une méthode basée sur l'estimation de densité a été élaborée pour calculer un Indice d'amélioration de Fusion Multimodale (*MEFI*) révélant les couches de modalités parfois complexes dissimulées au sein des coordonnées 3D. Stocké de manière transparente dans les attributs du nuage de points, *MEFI* permet d'exprimer sous la forme d'une carte de chaleur si les données sous-jacentes sont plutôt isolées et dispersées ou redondantes et denses. Au-delà de ces caractéristiques quantitatives représentées en gradient de couleurs, une couche sémantique est ajoutée pour renseigner les informations qualitatives des données sources. Un schéma de métadonnées descriptives polyvalent (MEMoS) est appliqué aux sources et au modèle 3D résultant de la fusion des données pour y incorporer toutes les informations concernant l'historique de numérisation afin d'augmenter sa valeur sémantique. En guise de démonstrateur, une visionneuse 3D a été prototypée pour explorer cette représentation multimodale améliorée comme point de départ pour d'autres investigations basées sur la 3D.

5. Contributions de tiers collaborateurs : Développement de la visionneuse expérimentale MEFI et rédaction originale de la sous-section [5.3.6.1](#) par Violette Abergel.

5.3.2 Cadre de l'expérimentation

Dans le domaine des études du Patrimoine Culturel (PC), les ressources d'origine numériques ou numérisées sont utilisées de nos jours pour documenter, analyser et partager des informations précieuses recueillies sur les objets patrimoniaux. Au cours des deux dernières décennies, les techniques d'imagerie 2D et 3D ont évolué jusqu'à contribuer aux potentiels et aux défis à venir des répliques numériques appliquées aux biens culturels. Cependant, on peut considérer que le processus de numérisation en lui-même (en dehors de l'optimisation et de la scalabilité⁶) n'est plus un problème scientifique, du fait que nous sommes en mesure de numériser presque n'importe quel objet avec des appareils sophistiqués qui tiennent dans notre poche. Durant l'essor de cette technologie, et d'autant plus maintenant que la numérisation est accessible et abordable, des collections massives, mais dispersées de données numériques sont amassées et ne cessent de grandir. On peut prévoir, du fait de cette phase de numérisation massive en cours, que l'on se dirige vers des corpus numériques centralisés, fruit d'une communication accrue entre entrepôts de données (EDD) et lacs de données (LDD)⁷.

Exponentialité et intrication des données patrimoniales

Le premier problème à anticiper est celui de l'« *exponentialité* », car de nos jours les données se démultiplient sans contrôle en variété, en nombre et en masse, sans s'accompagner de méthodes adéquates pour leur interprétation. Plus récemment, le domaine des SP a connu un tournant vers des approches multimodales, visant à explorer la coopération des données collectées par le prisme de différentes modalités (temps, échelle, dimension, etc.). Les ensembles de données multimodales comprennent la diversité et la complexité des données accumulées par plusieurs experts utilisant différents capteurs à différents moments et dans des contextes variables. En effet, ce type de documentation multisource représente la grande majorité des travaux présentés par la communauté scientifique de nos jours. Cela nous conduit à un second problème, celui de l'« *intrication* », car du fait de leur origine multiple il devient plus complexe d'accéder et d'extraire des informations significatives, des relations croisées entre les ensembles de données. Cela soulève également des défis en amont et en aval de la fusion des données (discutés dans la section 5.3.3), car cela implique que les processus de lignage des données doivent être améliorés par rapport pour garder une trace de pratiques dépendantes de leurs contextes.

6. Saut d'échelle volumétrique vers la numérisation dite « massive ».

7. La différence entre ces deux notions est donnée ici : <https://azure.microsoft.com/fr-fr/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-a-data-lake/#what-is-a-data-lake>

Prise de distance vis-à-vis de l'IA

Sur la base de ces observations, on peut s'attendre à l'expansion d'une masse croissante de données non structurées et inexploitées. Pour faire face à cette situation, diverses communautés scientifiques, y compris celles liées aux SP, tentent actuellement d'appriivoiser et de s'approprier les méthodes d'apprentissage machine (supervisées ou non supervisées). Dans notre domaine, les recherches sur la sémantique des données ont pris une nouvelle dimension ces dernières années. Des travaux mobilisent par exemple des méthodes de classification et de segmentation pour extraire des caractéristiques géométriques sémantiques au sein de données multicouches [Matrone et al., 2020]. Sur des bases identiques, d'autres proposent d'améliorer leur potentiel web sémantique [Poux et al., 2017], ou de les diriger vers un raisonnement ou un calcul basé sur l'ontologie [Buitelaar et al., 2008]. Ces pistes sont pertinentes et intéressantes pour les études sur le Patrimoine Culturel Numérique ; cependant, ce travail ne traitera pas directement de ce sujet.

Motivation de l'approche

La méthode présentée s'installe en amont (c.-à-d. avant l'extraction/exploration sémantique potentielle), et explore la piste conduisant à explorer le contenu sémantique d'ensembles de données multimodales. Cette idée a émergé en essayant d'exploiter une importante collection de données provenant d'enquêtes numériques sur un objet patrimonial unique. Comme de nombreux autres sites ou objets patrimoniaux à travers le monde, une équipe scientifique multidisciplinaire a travaillé sur une petite chapelle du XV^{ème} siècle, ayant mené des campagnes récurrentes d'acquisition de données au cours des dernières années. Face à l'incapacité d'enregistrer, de comprendre et de relier efficacement nos données collectées, ce travail a été entrepris pour améliorer l'analyse d'un ensemble de données multimodales par une approche informatique. Celle-ci est née du constat que suite au recalage et à la fusion des données, tout ce qui restait à disposition été constitué de plusieurs centaines de millions de coordonnées géométriques et d'attributs non structurés brutalement empilés dans un espace 3D. La valeur informative et interprétative d'un tel ensemble de données 3D aussi massif que complexe est — dans cet état précis — pratiquement nulle.

Une indicatrice de fusion

Même l'utilisation d'une station de travail ultra-performante offre une expérience médiocre en termes de visualisation et d'interaction avec un modèle si complexe et volumineux. L'hypothèse qui motive ce travail est que l'accumulation de données et, plus important

encore, leurs écarts, contiennent des informations importantes sur la manière dont le modèle a été créé et de ce qui le compose. Dans cette optique, nous avons imaginé une carte de chaleur permettant d'indiquer et de révéler les zones dans lesquelles le modèle contient plus d'informations et où il en manque. L'idée principale est de générer un indice de fusion pour étendre et améliorer les informations sous-jacentes stockées au sein d'une reconstruction 3D multisource. Ainsi, la métrique calculée agit comme une « indicatrice »⁸ de fusion des données, définie comme un indice quantitatif reflétant un score de chevauchement à partir des caractéristiques spatiales et géométriques.

Objectif

Cet article présente notre tentative en cours pour définir un Indice d'amélioration de Fusion Multimodale (*MEFI*) dédié à la numérisation 3D patrimoniale. *MEFI* est une stratégie de traitement des données par discrétisation visant à révéler des caractéristiques sémantiques de bas niveau enrichies par ses métadonnées pour améliorer la traçabilité des données issues de la reconstruction multisource. En provençal, *mèfi* (dérivé de *se mēfisa*, *se mesfisa*) est une interjection très couramment utilisée, correspondant à l'expression française *méfiance*. Elle remplace l'impératif « Attention ! ». Dans notre cas, son utilisation vise à porter le regard sur les zones sur-documentées et sous-documentées d'un modèle issu de diverses numérisations. Il pourrait d'indice pour guider l'analyse et l'interprétation de jeux de données complexes et hétérogènes. Comme *MEFI* est lié aux problèmes de fusion des données, certains résultats sont discutés dans le contexte de méthodes informatiques ou de visualisation avancées contribuant aux stratégies de fusion multimodale dans le domaine du patrimoine culturel.

Structure du sous-chapitre

Cette section a introduit *MEFI* dans un raisonnement scientifique et une motivation plus génériques. Un état de l'art est proposé dans la section 5.3.3 (p. 165), dans laquelle la discussion et la portée de la méthode sont articulées vis-à-vis des travaux connexes. Dans la section 5.3.4 (p. 170), la collection de données Notre-Dame des-Fontaines est présentée comme un cas d'utilisation dans le contexte de l'étude. La méthodologie complète est détaillée dans la section 5.3.5 (p. 172), où une description textuelle du pseudocode de *MEFI* est développée. Les résultats sont présentés et discutés dans la section 5.3.6 (p. 180), tandis que le développement d'une visionneuse dédiée est détaillé dans la section 5.3.6.1 (p. 182).

8. Dans le sens « dispositif donnant une indication, un renseignement » (Source CNTRL) telle que l'indicatrice de Tissot (https://fr.wikipedia.org/wiki/Indicatrice_de_Tissot).

Les limites et les perspectives du travail sont présentées dans la section 5.3.6.2 (p. 184). Les conclusions et les discussions sur la valeur scientifique de *MEFI* et ses contributions possibles pour les études patrimoniales sont données dans la section 5.3.7 (p. 187).

5.3.3 Littérature associée et positionnement

Dans un travail récent [7] basé sur des recherches antérieures [9], une définition étendue et exhaustive de la multimodalité dans le domaine du patrimoine culturel numérique a été proposée. Dans cette recherche, la multimodalité est comprise comme la coopération de plusieurs modalités visant à améliorer la signification d'une reconstruction numérique à des fins différentes. La section suivante vise à clarifier et à délimiter les principaux aspects de notre étude, à savoir la fusion des données dans le cadre de la reconstruction multimodale 3D pour les applications du patrimoine culturel.

La fusion de données patrimoniales

Idéalement, la fusion des données poursuit le leitmotiv $1+1=3$. Plusieurs travaux provenant de la littérature de notre domaine discutent de la combinaison des techniques d'imagerie, que ce soit dans leurs aspects spectraux [Mathys et al., 2019], scalaires [Guidi et al., 2009] ou temporels [Markiewicz et al., 2021], qu'ils soient appliqués par des approches synchroniques [9] ou diachroniques [Rodríguez-Gonzálvez et al., 2019]. Plus récemment des études soulignent une tendance selon laquelle la majorité des pratiques et des projets en cours intègrent ou se dirigent vers l'imagerie multimodale, en tant que direction critique pour les futures recherches. Néanmoins, comme rapporté dans [Adamopoulos and Rinaudo, 2019], [Adamopoulos et al., 2017], les scénarios multimodaux actuels sont souvent limités au croisement de double modalités, et la plupart du temps une technique est subordonnée à l'autre. Dans de nombreux travaux, si ce n'est tous, la photogrammétrie a été utilisée comme technique de liaison [Tschauner and Salinas, 2006], [Adamopoulos et al., 2017], [Mathys et al., 2019], [Grifoni et al., 2022] [9, 12].

Dans ce travail, nous avons essayé d'étendre notre capacité à exploiter les coopérations entre des modalités intentionnellement variables en nombre et en type. Dans ce but, l'ensemble de données utilisé ne mélange pas moins de 28 sources obtenues par le biais de cinq techniques d'imagerie principales (cf. section 5.3.4). Cela étant dit, à cette échelle de complexité, la fusion des données multisources demeure un défi de taille y compris dans sur des données patrimoniales.

La fusion de données multisources

Comme le rapportent quelques travaux abordant la fusion de données dans le domaine du PC [Ramos and Remondino, 2015, Adamopoulos and Rinaudo, 2021], les difficultés résident dans le fait que la fusion des données peut interférer à presque toutes les étapes du flux de travail ; parmi lesquelles on distingue les approches basées sur les données 2D–2D, 2D–3D ou 3D–3D (ce dernier étant le plus couramment utilisé). Généralement, au gré de nombreuses méthodes reprises dans [Huang et al., 2021], le recalage des données est préalablement réalisé par des approches par plus proche voisin (ICP) pour les données purement 3D, ou avec des informations mutuelles [Pintus et al., 2017] lorsqu’il s’agit d’approches 2D/3D. La classification proposée et dérivée par Ramos et Al. est issue de [Klein, 2004] et inclut également des niveaux basés sur les données (méthodes d’enregistrement basées sur les points, les caractéristiques ou les surfaces) et des niveaux basés sur l’objectif (des données brutes aux approches basées sur la sémantique)⁹. En d’autres termes, les auteurs expriment la forte nécessité de connaître les caractéristiques spécifiques de chaque modalité afin que la fusion ait du sens. D’autres informations intéressantes sur la fusion des données peuvent être tirées de la littérature plus abondante en ingénierie [Hall and Steinberg, 2001, Boström et al., 2007, Lahat et al., 2015].

Évaluation des méthodes de fusion

Dans ce domaine, il est bien connu que les modèles de fusion de données sont développés pour des applications *ad hoc* avec des performances très variables¹⁰. Par conséquent, une étape d’évaluation est nécessaire et peut être influencée par deux facteurs. En amont, par le Degré de Confiance (DoC) lié à la qualité intrinsèque ou à l’incertitude des entrées, sur lequel un système de notation est appliqué. Il est intéressant de noter que cette littérature regorge d’information permettant par exemple de dresser une liste de phénomènes qui dégradent la fusion des données. Beaucoup d’entre eux sont d’ailleurs représentatifs des ensembles de données multimodales issus du contexte patrimonial (absence de vérité terrain, imperfections, valeurs aberrantes, hétérogénéité, données conflictuelles, dimensionnalité, erreurs d’enregistrement, redondance, temporalités ou procédures de traitement). En aval, par la mise à disposition d’outils de Mesure de Performance (MoP) pour évaluer la supposée supériorité de la sortie, comme représenté dans la figure [V.5]. De manière similaire à [Adamopoulos and Rinaudo, 2019], on constate que la réalisation de la fusion des données est généralement limitée aux données rigides et formatées. Malheureusement,

9. Cf. Fig. [II.15] p. [69]

10. Aussi en fonction de leur stade d’intervention pouvant être soit précoce, intermédiaire ou tardive.

cela est loin de la réalité en ce qui concerne les applications dans le domaine du patrimoine culturel, où les méthodes et les outils sont aussi riches et hétérogènes que les objets traités. Cela peut expliquer le fossé entre notre domaine et d'autres (p. ex. la télédétection, l'imagerie médicale, etc.) en ce qui concerne la fusion des données multimodales.

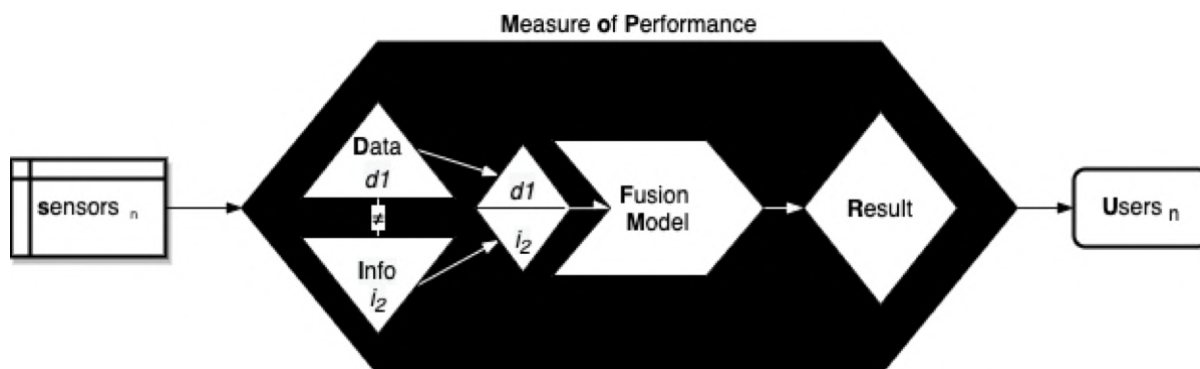


FIGURE V.5 – Représentation schématique de la fusion de données.

L'alliance des données douces et des données dures

Un autre défi a été identifié par [Khaleghi et al., 2013](#) concernant la complexité de la fusion de données dures et douces [Hall et al., 2008](#). Transposées à notre domaine, les données dures seraient des données quantitatives issues de la capture (sous différentes formes telles que des pixels, des nuages de points, des attributs géométriques et des caractéristiques), tandis que les données douces constitueraient d'autres types de ressources chargées sémantiquement qualifiant chaque source (également sous différentes formes telles que des métadonnées/paradonnées, des annotations, des données liées, etc.). Ce point spécifique a motivé la connexion entre *MEMoS* (voir les figures dans la sous-section [5.3.4](#)) et *MEFI*. Nous verrons par la suite que cette piste de corrélation des données douces et dures est porteuse d'un potentiel encore inexploré.

Revue des méthodes de comparaison 3D-3D

Une revue des outils de comparaison et d'analyse croisée des nuages de points reste nécessaire à notre étude. Les méthodes actuelles orientées 3D proposent uniquement des comparaisons par paires basées sur des ensembles de points et/ou des maillages et sont principalement dédiées à la détection de changements [Antova, 2019](#). Si notre solution exposée ci-après devait se baser sur ce type d'approche, cela nécessiterait des calculs par paires successifs, ce qui augmenterait le coût et la complexité du calcul, proportionnellement aux nombres de paires possibles à traiter. En effet, la distance nuage

à nuage (C2C)¹¹ ou la distance nuage à maillage (C2M)¹² sont des méthodes couramment utilisées, toutes deux accessibles avec le logiciel libre CloudCompare. Au-delà de cette métrique conventionnelle, ce néanmoins efficace, il existe aussi la comparaison de nuages modèle-à-modèle multiéchelle (M3C2) qui améliore les capacités de multirésolution et est disponible sous forme de plugiciel pour CloudCompare [James et al., 2017]. Les deux méthodes sont influencées par la compréhension initiale des composants (chevauchement, qualité intrinsèque, extension spatiale et carte de précision) avec une analogie directe au *DoC*. Certains travaux innovants liés à la fusion de données [Hänsch et al., 2014, Farella et al., 2019b, Li et al., 2021b] intègrent de plusieurs descripteurs géométriques [Weinmann et al., 2017, Ioannou et al., 2012, Hackel et al., 2017] pour améliorer les performances possibles d'intégration des données. Quelques exemples de fusion de données 3D efficace et efficiente entre différentes sources ont été donnés [Li et al., 2018, Li et al., 2021a] pour mettre en évidence la différence entre ces travaux et la méthode proposée. Contrairement à ces références, notre objectif n'est pas de rivaliser en termes d'amélioration qualitative de l'exactitude et/ou de l'exhaustivité, car notre but est d'augmenter la qualité de la valeur informative et du potentiel interprétatif des nuages de points multisources et non pas sa géométrie.

La visualisation de données 2D/3D sémantiquement enrichies

Dans ce contexte, les approches dites intégrées sont principalement orientées vers la définition d'outils avancés alliant des capacités de visualisation et d'exploration sémantique. Les solutions développées ici varient en termes de type de données (2D à 3D à 4D à nD), de contexte et de finalité de l'application (documentation du patrimoine culturel, archéologie, surveillance de la santé structurelle des patrimoines bâtis). Parmi ces travaux on distinguera la Modélisation Basée sur le Réel (MBR) et à d'autres paradigmes de modélisation. À l'échelle architecturale, un premier type d'approche est lié à la modélisation paramétrique (BIM/H-BIM) dans laquelle la sémantique est intégrée et contrainte aux attributs et relations prirent en charge dans les classes IFC [Yang et al., 2020]. À l'échelle du territoire, la spécialisation des données est abordée par les SIG et leur déploiement web, permettant la mise en relation de modèles 3D avec leur documentation, éventuellement avec une surcouche de données ouvertes et liées [Nishanbaev et al., 2021] ou une dynamique 4D [Ortega-Alvarado et al., 2022]. À l'échelle de l'objet ou du monument, nous pouvons citer des outils de visualisations innovants par leur aspect multicouche [Jaspe-Villanueva

11. Cloud to Cloud distance dans la littérature anglophone.

12. Cloud to Mesh distance dans la littérature anglophone.

5.3. APPROCHE PROCÉDURALE DE FUSION : MEFI

[et al., 2021] ou multidimensionnel [1], assimilable à des Systèmes d'Information Géométrique. La principale limitation de ces outils, y compris les méthodes reposant sur des nuages de points 3D issue de numérisation, est le manque de transfert de données dans un référentiel spatio-temporel commun [Dutailly et al., 2023]. Actuellement, de plus en plus de systèmes dédiés au Patrimoine sont proposés par la communauté [Soler et al. 2017, Richards-Rissetto and von Schwerin, 2017, Nova Arévalo et al., 2023] pour lesquels *MEFI* vise à fournir une nouvelle façon de gérer les numérisations 3D à provenance multiple.

Néanmoins, il convient de noter qu'à des fins de simplification de l'étape de développement, la méthode proposée est limitée en matière de techniques d'imagerie et de types de données; cependant, notre étude reste ouverte à la discussion sur l'intégration d'autres techniques. En effet, comme discuté dans [Adamopoulos and Rinaudo, 2019], la problématique multimodale dans le cadre de la fusion de données patrimoniales est aussi complexe et difficile du fait qu'elles proviennent de « la collecte de données métriques, de numérisation, spectrales, chimiques, géophysiques, constructives et climatiques » qui doivent être appréhendées au sein d'un cycle de documentation (cf. Fig. V.6).

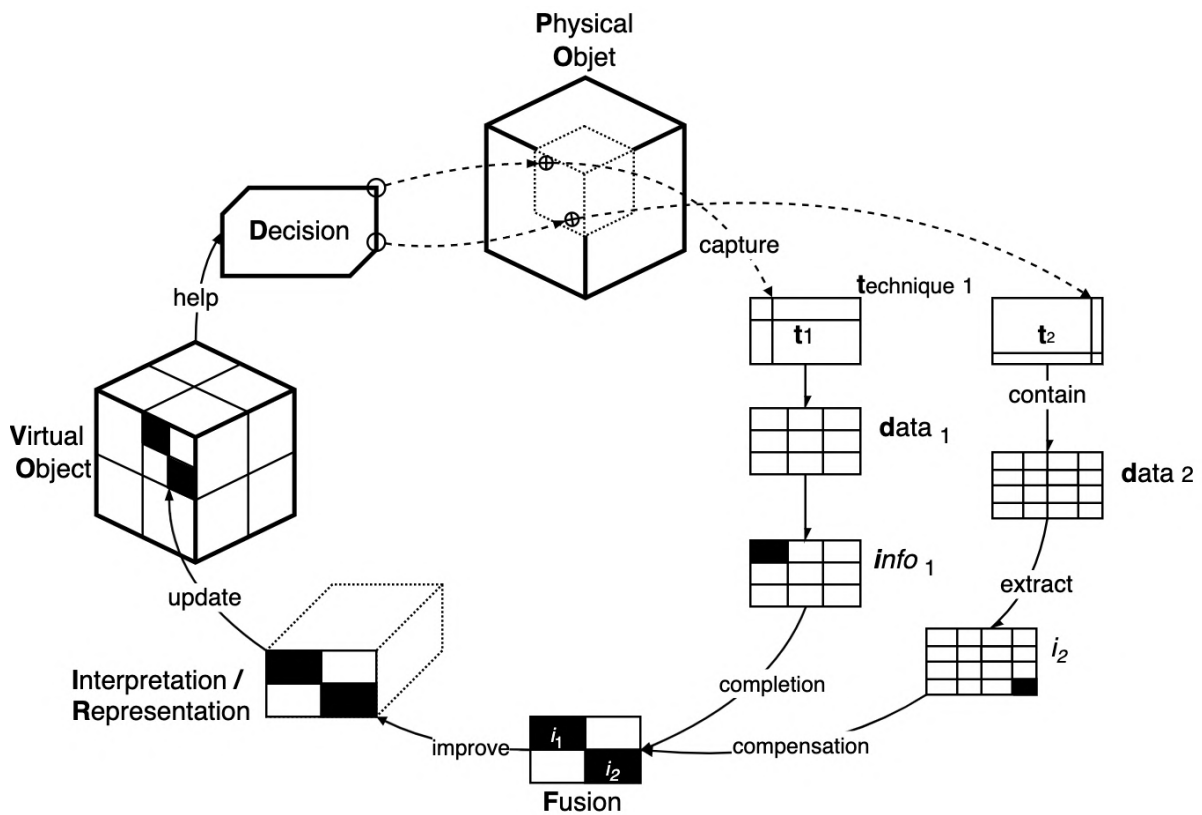


FIGURE V.6 – Représentation schématisée d'une chaîne opératoire orientée vers la fusion de données patrimoniales.

5.3.4 Présentation du cas d'étude

Afin d'évaluer *MEFI* dans un scénario réel, nous avons composé une étude de cas avec des données 3D très éparées et hétérogènes, à l'image de la plupart des objets patrimoniaux soumis à des études numériques. La collection de données mobilisée pour cette expérimentation comporte plusieurs couches multimodales superposées, et énumérées ci-après :

- **Temps** : Plusieurs campagnes d'acquisitions de données (six) ont été réalisées dans le cadre de différents projets de recherche (quatre) entre 2015 et 2021. En complément, des archives (principalement des photographies) existent depuis 1950 et de nouvelles missions sont prévues dans un avenir proche.
- **Échelle** : Différentes stratégies et dispositifs ont été utilisés en intérieur/extérieur, en utilisant des approches terrestres et aériennes, avec une grande variabilité de résolution spatiale (entre 85 points et 0,1 point pour 1 cm).
- **Capteur** : Des capteurs actifs (lasers) et passifs (photos) ont été utilisés. Au total, 14 modèles de capteurs correspondant à quatre types de capteurs (photographique, à décalage de phase, télémétrique et thermique) ont permis d'appliquer pas moins d'une dizaine de techniques d'imagerie. Dans un futur proche, des travaux sont prévus concernant l'intégration de données spectroscopiques (LIBS, XRF), de mesures acoustiques (ultrasons, SRIR) et de capteurs climatiques (température, hydrométrie).
- **Spectral** : Certaines techniques d'imagerie ont été collectées à différentes plages spectrales (visible, proche infrarouge et ultraviolet). Dans cette étude, seules des techniques photographiques multispectrales ont été intégrées; cependant, certaines fresques ont été documentées par du RTI multispectral et par imagerie hyperspectrale.
- **Acteurs** : Ces données ont été capturées par plusieurs chercheurs (sept) appartenant à plusieurs équipes et domaines d'expertise, avec des niveaux d'expérience et des méthodes différentes.

La collection numérique Notre-Dame-des-Fontaines (NDF)

L'ensemble de ce corpus représente pas moins de 250 millions de points répartis dans 28 nuages de points. Une telle complexité de données est difficile à appréhender; raison pour laquelle des représentations graphiques sont proposées. Elles sont générées à partir d'un schéma de métadonnées appelé *MEMoS* [7] pour aider à la compréhension des données sources de cette étude (cf. Figures V.8 et VI.17 p.229). [...] ¹³ Pour chaque nuage de points, un fichier *MEMoS* est affilié au format JSON, rempli de métadonnées descriptives structurées en sept sections, à savoir : *QUI*, *QUAND*, *OÙ*, *QUOI*, *COMMENT*, *LEQUEL* et *POURQUOI*. [...] ¹⁴

13. Le texte original de l'article est tronqué pour éviter toute redondance et ne pas divulguer le contenu du chapitre suivant.

14. Idem.

5.3. APPROCHE PROCÉDURALE DE FUSION : MEFI

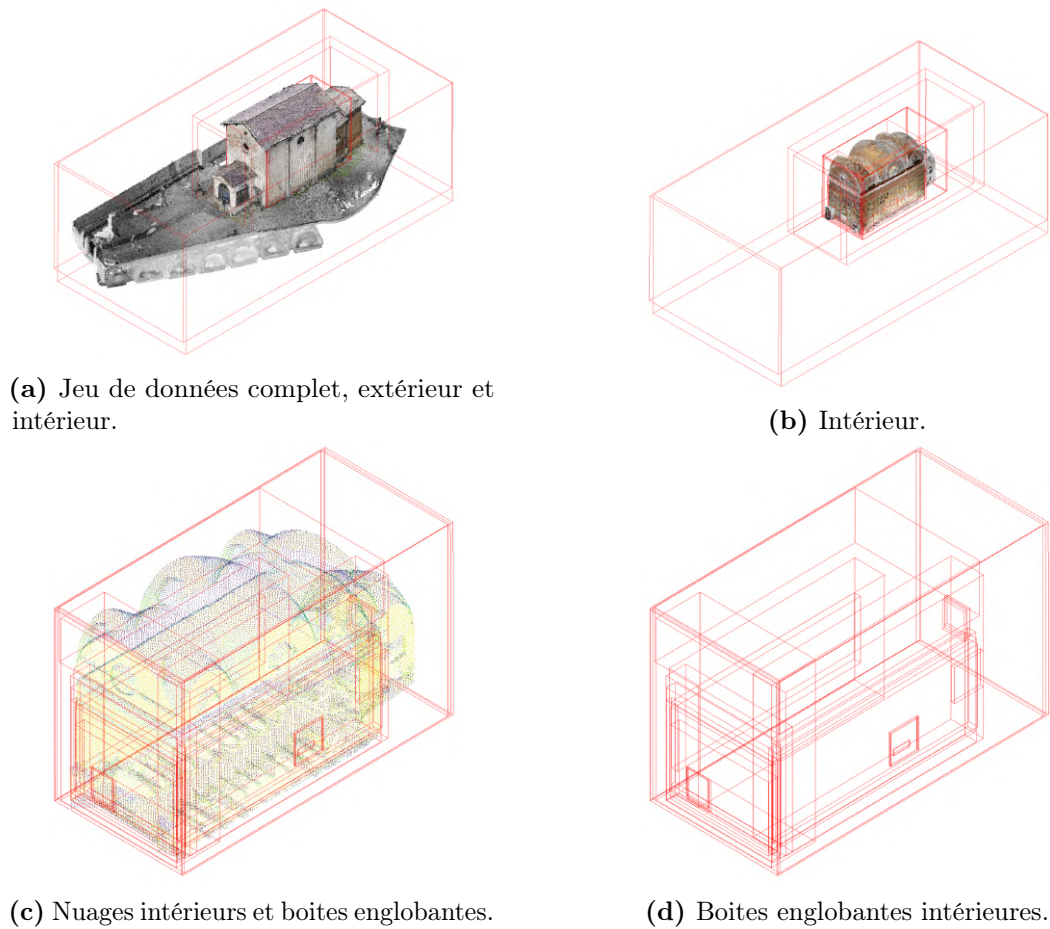


FIGURE V.7 – Vues d’ensemble de la collection de données 3D.

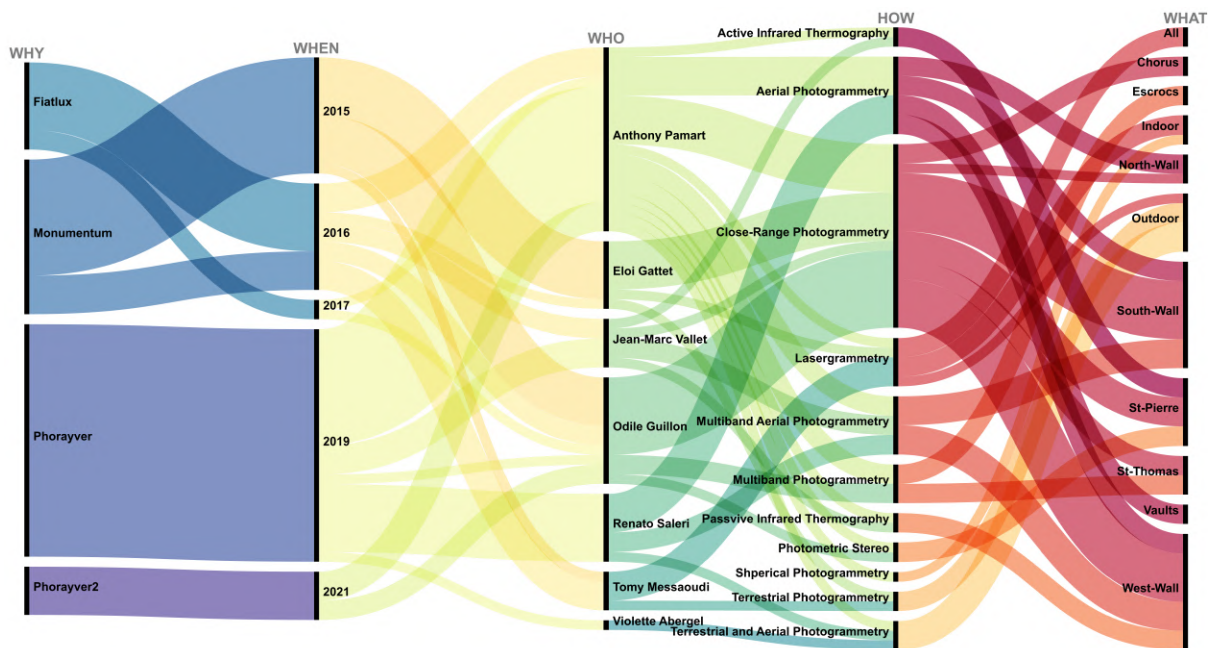


FIGURE V.8 – Représentation graphique basée sur *MEMoS* révélant la corrélation entre les projets (WHY), les dates (WHEN), les acteurs (WHO), les techniques (HOW) et les zones étudiées (WHAT).

5.3.5 Méthodologie

Pour cette recherche, nous partons du principe que les pratiques multimodales orientées Patrimoine peuvent être représentées par un cycle de données (cf. fig. [V.6](#)), au sein duquel un Objet Physique est instancié par un Objet Virtuel en combinant plusieurs activités de numérisation. Dans notre scénario, la fusion de données est une étape cruciale pour améliorer l'Objet Virtuel en augmentant sa valeur interprétative par le prisme de sa représentation. Notre objectif est de définir un modèle de fusion de données augmentées de métadonnées descriptives orientée vers la prise de décision [\[Klein, 2004\]](#). Dans cette optique, le modèle numérique issu d'un premier cycle pourrait être (ré)utilisé pour guider les futures campagnes d'acquisition de données. *MEFI* s'inscrit dans le cadre d'opération visant à analyser et surveiller un OP, par le biais de campagnes de numérisation récurrentes, à l'échelle du site ou du monument. [...]

Justification des choix

Certains choix méthodologiques ont dû être effectués afin d'aligner les exigences de la méthode avec les problématiques exposées dans les sections précédentes. Le problème d'*exponentialité* a motivé la définition d'une nouvelle méthode au lieu de s'appuyer sur des comparaisons par paires (p. ex. C2C et M3C2) tout en préservant la possibilité de traiter de grands ensembles de données (p. ex. échantillonnage Octree, etc.) [\[Tschauner and Salinas, 2006\]](#), [\[Georgiev and Georgiev, 2017\]](#). Du problème de l'*intrication* découle la nécessité d'une méthode apte de gérer simultanément plusieurs couches multimodales (p. ex. époque, résolution, échelle et/ou dimensions spectrales). D'autre part, le travail s'est focalisé sur les approches strictement orientées 3D pour simplifier la conception et le développement de la méthode, ainsi que pour limiter, au stade actuel, le champ des techniques prises en charge. Les données ont été traitées par des méthodes conventionnelles, mais variables de lasergrammétrie et de photogrammétrie, à l'aide de progiciels non détaillés dans cet article ¹⁵. Pour l'instant, même si l'importance de la qualité des données (*DoC*) est connue et a été discutée, les métriques parfois intégrées au sein des nuages de points (c.-à-d. les attributs de confiance calculés lors d'un traitement photogramétrique ou intensité de réflectance capturé par le laser) sont ignorées lors de l'étape de fusion. Cela étant dit, la seule exigence est d'avoir des nuages de points 3D qui se chevauchent et qui ont été préalablement recalés conjointement (cf. Fig. [V.9](#)). Il est également important de nettoyer

15. Ces informations sont néanmoins reprises sommairement au sein de la figure [VI.17](#) p. [229](#) en suivant le chemin suivant : *WHICH* > *Protocol* > *ProcessingSoftware*. Cette illustration reprends l'intégralité des champs W7 sur la collection de données NDF.

les nuages de points pour éliminer le bruit et les valeurs aberrantes. Le recalage peut être effectué à l'aide de méthodes conventionnelles 2D à 3D (basées sur des caractéristiques ou des marqueurs) et/ou de méthodes 3D (ICP), toutes deux utilisées dans le cas présent. Bien sûr, le seuil d'incertitude du recalage doit être compatible avec le niveau d'analyse souhaité, dans notre cas, la moyenne quadratique (RMS) a été estimée à moins de 1 cm d'erreur pour tous les ensembles de points (alors que le niveau d'analyse est fixé à 4 cm). Comme le montre l'aperçu de l'ensemble de données 3D (cf. Fig. [V.7](#)), la méthode fonctionne même si toutes les données ne sont pas interconnectées sur le plan spatial (cf. cartographie de chevauchement et de recalage des sources Fig. [V.9](#) a et b).

Implémentation

Nous avons choisi d'utiliser le logiciel CloudCompare [\[Girardeau-Montaut, 2022\]](#) pour effectuer les calculs, car il s'agit d'un outil efficace, convivial et largement utilisé, y compris dans la communauté des scientifiques du patrimoine. À ce stade du développement, le processus a été réalisé directement via l'interface graphique, bien que certaines étapes soient accessibles en ligne de commande. L'automatisation et la généralisation de la méthode, prévues pour les travaux futurs (voir section [5.3.6.2](#)), seraient simplifiées par l'utilisation de *wrappers* Python pour CloudCompare (CloudCompy et le plugin Python de CloudCompare). La partie computationnelle expliquée textuellement ci-dessous est détaillée dans une formulation mathématique accompagnée d'un pseudo-code (cf. annexes [B](#) pp. [292](#) - [288](#)).

Composantes principales de l'approche

La méthodologie développée pour construire l'indice de fusion multimodal est composée des principaux éléments suivants :

- **Sémantisation** : L'étiquetage sémantique de chaque source de nuage de points est obtenu au préalable grâce à la description détaillée basée sur *MEMoS*. Pour une valeur de nom donnée, une correspondance est établie entre le nom du nuage de points et l'attribut d'appellation stocké dans la section *QUOI*. Lors de l'étape de fusion, l'indice du nuage d'origine est stocké dans le champ scalaire utilisé côté visualisation pour récupérer et afficher une description complète de la modalité source.
- **Estimation de densité** : La densité est tout d'abord estimée pour chaque source avec un Rayon de Voisinage Local variable (*LNR* pour Local Neighborhood Radius). Cela permet de suivre la densité locale qui peut varier en fonction de la résolution

5.3. APPROCHE PROCÉDURALE DE FUSION : MEFI

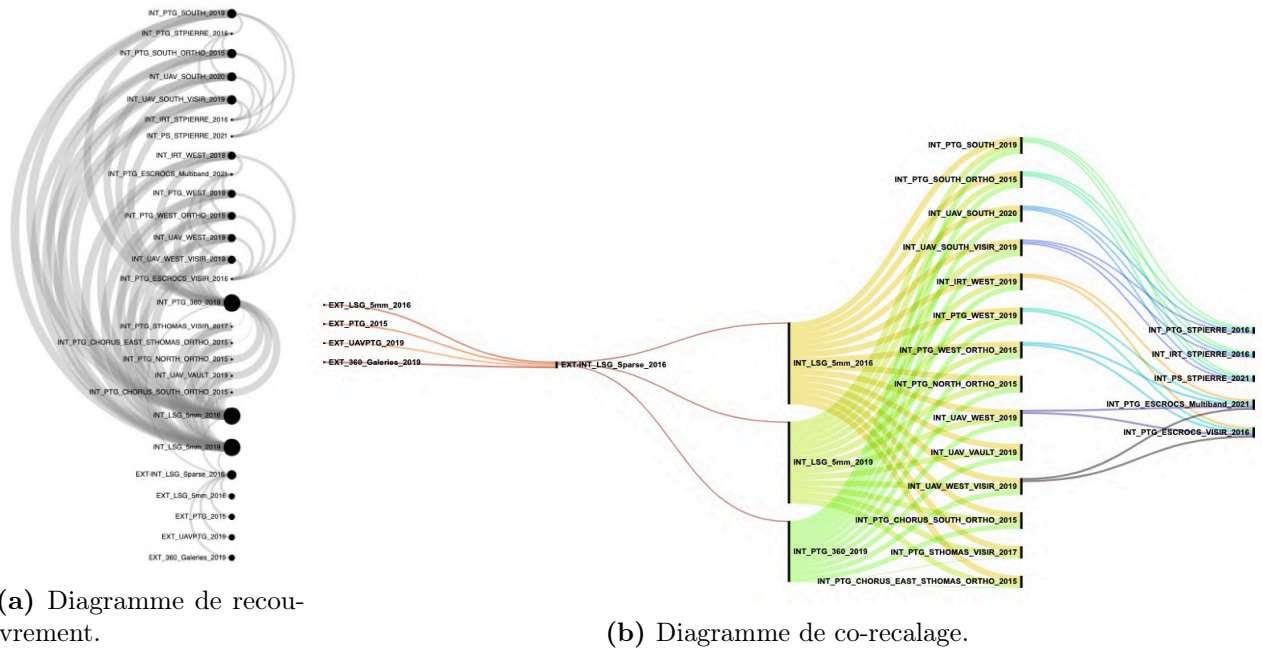


FIGURE V.9 – Représentation graphique du jeu de données révélant la corrélation spatiale entre les sources et dans un nuage de points. Les densités sont unifiées en utilisant cette variable comme facteur d'échelle pour obtenir une approximation comparable par rapport à la multirésolution des sources. Un troisième et dernier calcul de densité est effectué après la fusion, permettant de compter le nombre de modalités chevauchantes pour une taille de cellule donnée de l'Octree.

- **Calcul et échantillonnage de l'Octree** : L'aspect multidimensionnel des sources (c.-à-d. l'échelle et la résolution) implique la nécessité d'unifier l'espace d'échelle des ensembles de données 3D. L'Octree est utilisé comme grille spatiale sous-jacente, permettant plusieurs niveaux de détail en profondeur. L'échantillonnage, basé sur un niveau d'Octree donné, permet de discrétiser les nuages de points à une résolution comparable tout en préservant la cohérence spatiale (p. ex. grille Octree).
- **Mise à l'échelle et fusion des caractéristiques** : La gestion de la dimensionnalité variable des sources (c.-à-d. les extensions spatiales, les échelles et les résolutions) pose de nombreux problèmes du côté informatique. À différentes étapes de l'algorithme, une mise à l'échelle des caractéristiques (à l'aide d'une méthode de normalisation min-max) est nécessaire pour atteindre un objectif de comparaison multisource. L'agrégation des caractéristiques est réalisée à partir de fonctions arithmétiques de base, avec une formule finale obtenue par un processus empirique d'essais et erreurs. Cette approche permet d'obtenir un indice de fusion qui préserve les variations locales et absolues de densité, en intégrant le chevauchement spatial

des modalités.

- **Amélioration visuelle** : Étant donné que les densités étaient très variables, la distribution des valeurs des caractéristiques pouvait entraîner certains problèmes de visualisation. Comme *MEFI* est un attribut indicatif, certaines transformations peuvent être appliquées aux champs scalaires pour améliorer leur valeur interprétative (p. ex. égalisation d’histogramme). C’est pourquoi un lissage bilatéral est appliqué à la dernière étape pour améliorer la distribution des valeurs et réduire l’impact des valeurs aberrantes et du bruit sur le dégradé. Une fois que *MEFI* est calculé, une carte de couleurs est créée et ajustée à l’histogramme. En fin de compte, une palette arc-en-ciel personnalisée est générée, mais de nombreuses autres (divergentes, ondulées, etc.) pourraient être utilisées et adaptées pour mieux révéler les caractéristiques de *MEFI*.

Problèmes à traiter

Étant donné une liste de nuages de points bruts co-recalés, la méthode renvoie un seul nuage de points sous-échantillonné selon une échelle d’observation définie. Le nuage de points résultant est enrichi d’un champ scalaire appelé **Multimodal Enhancement Fusion Index** (*MEFI*) dérivé d’une seule caractéristique géométrique (la densité). L’indice est exprimé pour chaque point dans une plage de 0 à 255, associée à une carte de couleur ajustée à l’histogramme [Cramer et al., 2020, Liu and Heer, 2018]. Il est utilisé pour indiquer si, pour une coordonnée 3D donnée, la fusion de plusieurs ensembles de points est plutôt clairsemée et isolée ou dense et redondante. Contrairement aux méthodes par paires (C2C et M3C2), *MEFI* peut traiter une liste de nuages de points avec des perspectives cumulatives et comparatives. *MEFI* a la capacité de gérer des sources hautement variables et hétérogènes, notamment l’échelle ou la résolution. Cette question de l’évolutivité a été abordée par la structure de données Octree. Ainsi, selon une échelle d’observation minimale prédéfinie (c.-à-d. la subdivision la plus fine de l’Octree), l’ensemble du calcul peut être rapidement interpolé pour d’autres niveaux de réduction (cf. Fig V.10). Cependant, étant donné que nous souhaitons traiter des sources variables, des tests préliminaires ont rencontré le problème des valeurs aberrantes (pour cause de nuages de points trop clairsemés ou trop denses). Les étapes de calcul de *MEFI* se déroulent en trois parties, détaillées ci-après : la définition des variables, la préparation des données et le calcul de l’indice.

Définition des variables

Afin de limiter l’impact des valeurs aberrantes, la notion d’Échelle d’Observation *OS* (*Id*

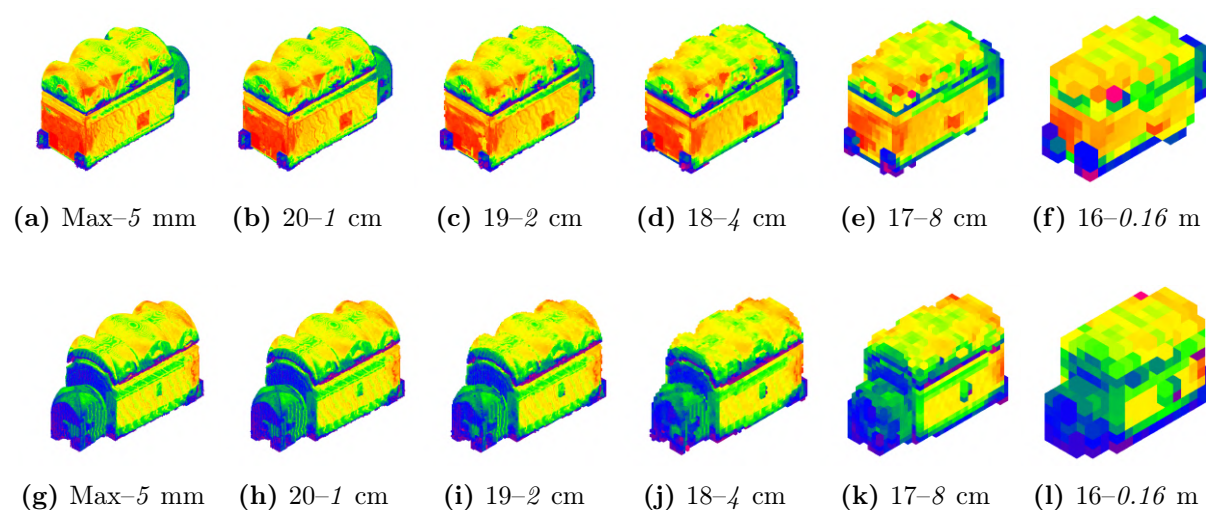


FIGURE V.10 – Niveaux d'interpolation de *MEFI* pour différentes profondeurs de l'Octree et la taille de cellule correspondante ; (a–f) Vue du sud-ouest, (g–l) et du nord-est.

est Observation Scale) devait être introduite et prédéfinie en amont.

Échelle d'observation Minimale et Finale

L'objectif de l'échelle d'observation est de définir une plage métrique sur laquelle l'indice peut être calculé. Elle est dérivée de deux paramètres : l'échelle d'observation minimale (*mOS*) fixe la limite au-delà de laquelle une densité plus élevée sera ignorée, et l'échelle d'observation finale (*fOS*) qui définit l'unité d'échelle pour le calcul. Ces valeurs doivent être modulées en fonction de l'échelle propre à l'objet et de la résolution spatiale de la numérisation. La relation entre *mOS* et *fOS* repose sur le niveau de subdivision de l'Octree.

Profondeur d'Octree

Dans CloudCompare, l'Octree a une profondeur maximale de 21 et il est possible de forcer le calcul pour une taille de cellule cible au niveau maximum. À chaque niveau, la taille de la cellule est multipliée par deux. Ainsi, pour un *mOS* fixé à 0,005 (soit 5 mm) et égal à la taille de cellule minimale, les sous-niveaux respectifs sont ; 0.01, 0.02, 0.04, 0.08, 0.16 et ainsi de suite. Dans cette étude, le niveau 18, équivalent à une taille de cellule de 4 cm, a été défini comme une unité appropriée pour le *fOS*. Comme mentionné dans la documentation du logiciel, l'Octree est particulièrement adapté à l'indexation spatiale, à l'optimisation des algorithmes de comparaison et à l'extraction efficace des voisins les plus proches, tous des éléments fondamentaux pour la méthode proposée. En effet, en s'appuyant sur l'Octree pour *MEFI*, on bénéficie de nombreux avantages, car cela garantit une cohérence spatiale entre toutes les sources, permet des approches multiéchelles et

accélère le calcul de la densité (basé sur les voisins les plus proches).

Préparation des données

Calculs d'Octree et de Densité initiale

Dans la deuxième étape, pour chaque nuage de points, le traitement des données est initialisé par un calcul d'Octree selon un paramétrage commun. Ensuite, le descripteur géométrique de densité est calculé en fonction du nombre de voisins avec le *LNR* automatiquement donné par CloudCompare à partir d'une approche statistique. Le coût de calcul est considérablement réduit au détriment du calcul de la densité avec un *LNR* fixe (c.-à-d. la valeur de *fOS*), car les nuages ont des densités très variables. La densité est directement stockée dans un champ scalaire, attribuant à chaque point une valeur représentant le nombre de voisins dans le *LNR*.

Optimisation

À ce stade, une instruction conditionnelle est nécessaire pour vérifier la distribution de la densité parmi les sources. Si la valeur du *LNR* est inférieure au *mOS*, le nuage de points brut est nettoyé en supprimant les points dupliqués à l'aide d'une fonction de suppression des doublons en utilisant le *LNR* comme distance minimale entre les points. Sur ce nuage de points nettoyé, le calcul de la densité est répété et si le *LNR* dépasse toujours le seuil de *mOS*, alors le nuage de points brut est sous-échantillonné à la profondeur maximale de l'Octree (dans notre cas, l'équivalent à un sous-échantillonnage spatial avec un espacement de 5 mm entre les points). Ce point est important, car il peut affecter la distribution scalaire, ce qui peut entraîner des problèmes de visualisation (sauf si les sources sont de résolution uniforme). Lorsque la densité optimisée est calculée, la valeur *LNR* est stockée dans un champ scalaire en tant que constante.

Score de multimodalité

Si le nuage de points contient d'autres sous-modalités, un score multimodal (cf. Fig. [V.11](#) b) est également stocké comme une constante. Par exemple, un nuage de points résultant d'une acquisition photogrammétrique multibande. Dans ce cas, le score est égal au nombre de sous-modalités effectuées (c.-à-d. deux pour une acquisition combinée pour les longueurs d'onde visible et infrarouge). Ce score est utilisé à l'étape suivante pour pondérer le calcul. En effet, un nuage de points à double bande transporte deux fois plus d'informations qu'un nuage de points RGB dans le domaine seul du visible.

Densité échelonnée et sous-échantillonnage

À ce stade, la densité précédemment calculée n'exprime qu'une variation locale de voisinage pour un ensemble de points donné et ne peut pas être comparée à une autre. Une densité cohérente à l'échelle (cf. densité mise à l'échelle dans la figure V.11a) est calculée en utilisant des fonctions arithmétiques sur des champs scalaires en divisant la densité initiale par la valeur LNR stockée dans R . Enfin, le nuage de points est sous-échantillonné selon l'unité cible définie par fOS . À la fin de cette étape, une liste de nuages sous-échantillonnés de manière homogène est obtenue, chacun étant enrichi de champs scalaires cohérents avec l'échelle utilisée dans l'étape suivante de fusion des données.

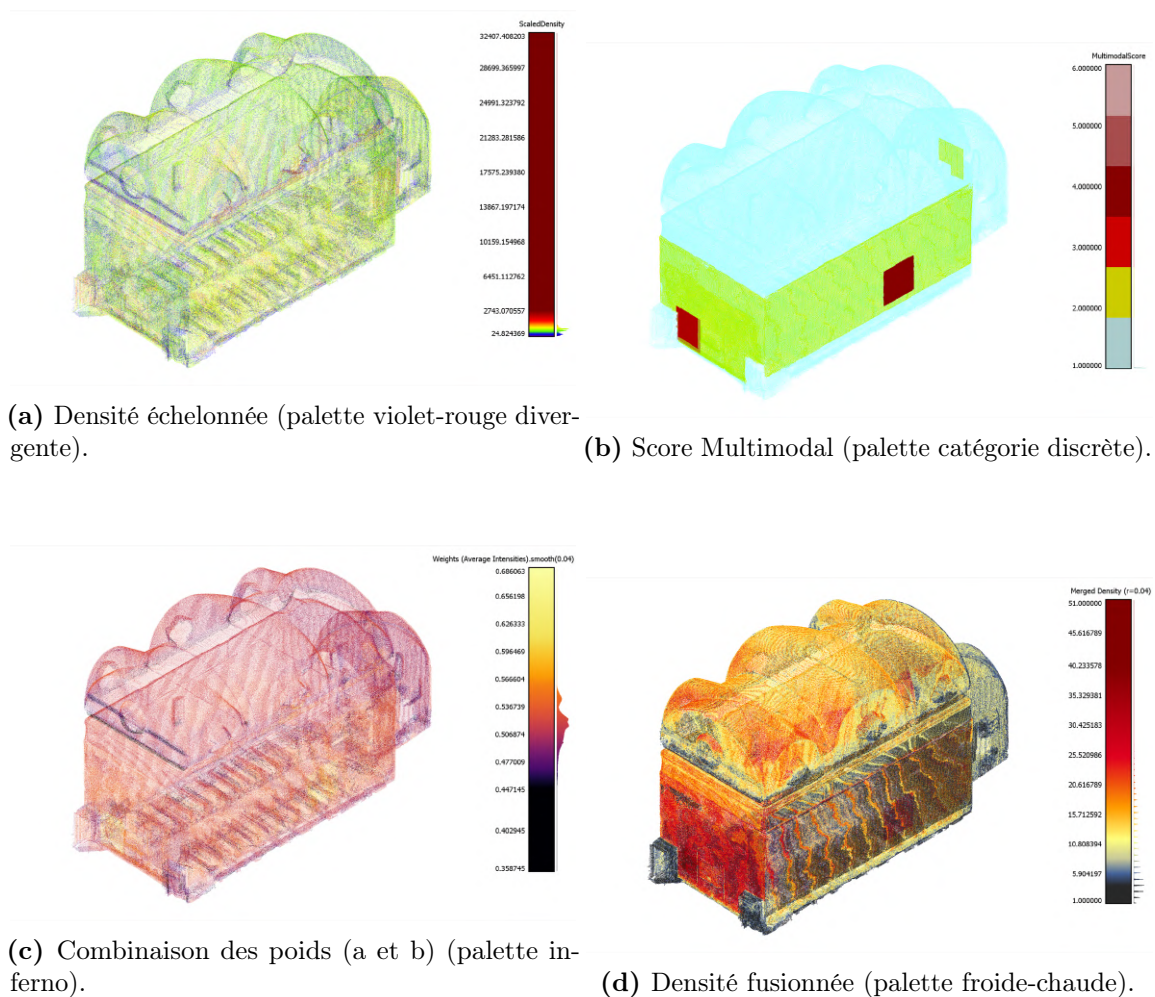


FIGURE V.11 – Composants utilisés pour calculer $MEFI$ (exprimés avec des palettes couleurs personnalisées).

Calcul de l'indice

À cette étape, tous les nuages de points ou un sous-ensemble représentatif de ceux-ci (p. ex. partie intérieure, extérieure ou toute autre zone d'intérêt) sont fusionnés en un seul nuage de points.

Fusion

La fonction de fusion dans CloudCompare préserve toutes les coordonnées 3D et concatène automatiquement les champs scalaires ayant le même libellé. Ce nuage de points hérite donc des champs scalaires précédemment calculés (*Densité*, *LNR*, *ScoreMultimodal* et la *Densité Mise à l'Échelle*, cf. Fig. [V.11](#)) et est enrichi par un *Indice de Nuage d'Origine* permettant de mémoriser la source de chaque point.

Calcul de densités fusionnées

Sur ce résultat intermédiaire, une nouvelle densité est calculée (cf. densité fusionnée, dans la Figure [V.11d](#)) en se basant sur le nombre de voisins, mais cette fois avec un *LNR* défini comme étant égale à *fOS* (4 cm dans notre cas). Comme les sources ont été sous-échantillonnées avec la même résolution et avec une grille Octree similaire, cela renvoie le nombre de points pour chaque cellule de l'Octree et permet d'estimer le nombre de nuages de points se chevauchant au niveau de la cellule.

Mise à l'échelle et pondération

Une fois égalisée avec un facteur d'échelle maximale (*Id Est Maximal Feature Scaling*) pour redistribuer les valeurs sur une plage commune étalonnée entre $[0; 255]$, il en résulte un indicateur clair de la redondance des données. Pour compléter *MEFI*, deux éléments de pondération sont ajoutés sous forme d'intensités (c.-à-d. codées entre la plage $[0; 1]$). Le premier poids est dérivé de la fonction logarithmique appliquée au champ scalaire de *Densité Mise à l'Échelle*. Le deuxième poids utilise la racine carrée du champ scalaire du *ScoreMultimodal* (cf. Fig. [V.11b](#)). Le logarithme et la racine carrée sont utilisés pour atténuer l'impact des valeurs aberrantes, en particulier si le maximum de chaque composante est trop élevé par rapport à la valeur moyenne ou médiane, ce qui tend à étirer de manière exponentielle la distribution des valeurs. C'est d'autant plus problématique dans le cas (présent) où des données à haute résolution (valeur de *Densité Mise à l'Échelle* élevée) sont composées de plusieurs sous-modalités (*ScoreMultimodal* élevé) situées dans une zone relevée à plusieurs reprises (*Densité Fusionnée* élevée). Les poids sont combinés avec une moyenne arithmétique simple (cf. Fig. [V.11c](#)).

Calcul de MEFI

MEFI est finalement calculé en multipliant la *Densité Fusionnée* égalisée par les poids combinés. Cependant, comme le nuage de points fusionné a une densité faible, cela entraîne une visualisation bruitée ; par conséquent, le champ scalaire est lissé à l'aide d'un filtrage bilatéral. La paramétrisation du filtre est simple, en utilisant *fOS* comme sigma spatial (σ^{spat}) et le maximum de *MEFI* comme sigma scalaire (σ^{scal}). Afin de résoudre les problèmes de visualisation 3D, le nuage de points amélioré est échantillonné pour correspondre à la *fOS*, définie comme adaptée à des fins analytiques.

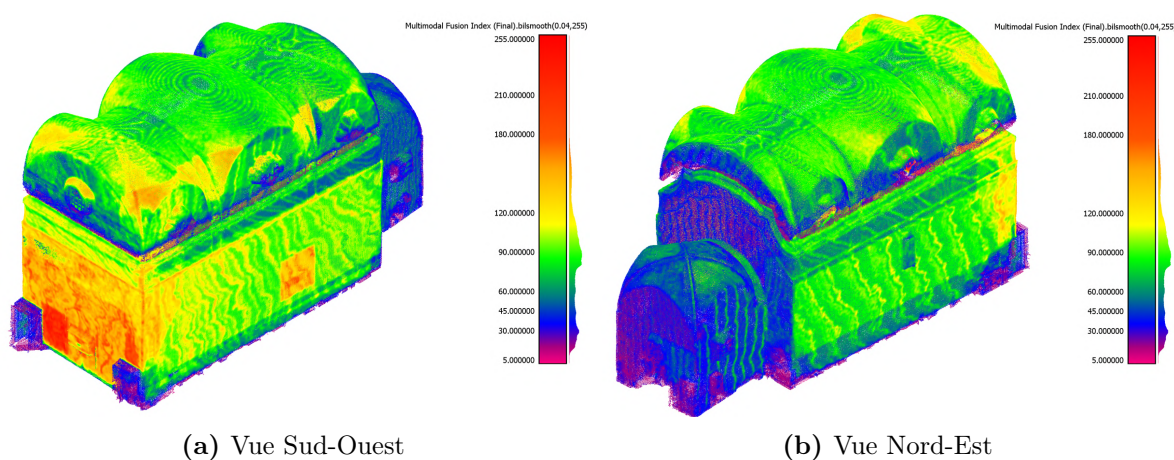


FIGURE V.12 – Nuage de points final enrichi avec *MEFI*.

5.3.6 Résultats et discussions

MEFI ne doit pas être considéré comme une fin en soi, mais plutôt comme un nouveau point de départ pour des investigations ultérieures. Dans cette première expérimentation, il a révélé ce que nous savions déjà au sein de notre équipe (validant ainsi en quelque sorte la méthode), sur bases de connaissances tacites, car seulement disponibles verbalement ou par écrit (au sein des rapports de mission). *MEFI* a mis en évidence que nous avons principalement travaillé sur le mur ouest, en mettant l'accent sur la scène des *Escrocs* à côté de l'entrée et la scène iconographique du reniement de *St. Pierre* située sur le mur sud (cf. Fig. V.12a). On peut constater les zones sous-documentées dans le chœur, les parois ouest environnantes et au-dessus des corniches (cf. Fig. V.12b). À ce stade, l'indice pourrait être facilement utilisé pour mettre en évidence des zones spécifiques avec des outils de filtrage basiques (cf. Fig. V.13). Pour des problèmes de visualisation, l'ensemble de données a été scindé en deux parties correspondantes à l'intérieur et à l'extérieur de la

chapelle. Les acquisitions extérieures comptent seulement cinq nuages de points avec une superposition réduite, rendant *MEFI* moins significatif et intéressant (cf. Fig. V.9). La principale difficulté réside dans la gestion des écarts de densité au sein de nuage de points dont l'échelle et la résolution sont variables. À titre indicatif, les valeurs moyennes de *densité échelonnée* variaient entre 229 pour les moins denses et 5340 pour les plus denses, avec un écart-type de 3861.

Bien que *MEFI* révèle avec précision où les données sont concentrées, il ne fournit pas directement d'informations sur la modalité présente pour chaque point. Ainsi, nous avons utilisé le champ scalaire de l'indice du nuage d'origine, calculé lors de l'étape de fusion, pour faire correspondre et récupérer des informations sur les sources de données stockées dans la description *MEMoS*. À partir de ce résultat, on peut imaginer des requêtes plus complexes liant des données dures et des données douces pour explorer des ensembles de données 3D dans des environnements de visualisation avancés [Jaspe-Villanueva et al., 2021, Bares et al., 2020, Grifoni et al., 2022]. Par exemple, il serait possible de filtrer le nuage de points par technique et/ou acteur, ou révéler une combinaison multimodale spécifique pour une date donnée. Les bases d'un tel outil, bien que prospectif, sont exposées dans les sous-sections suivantes.

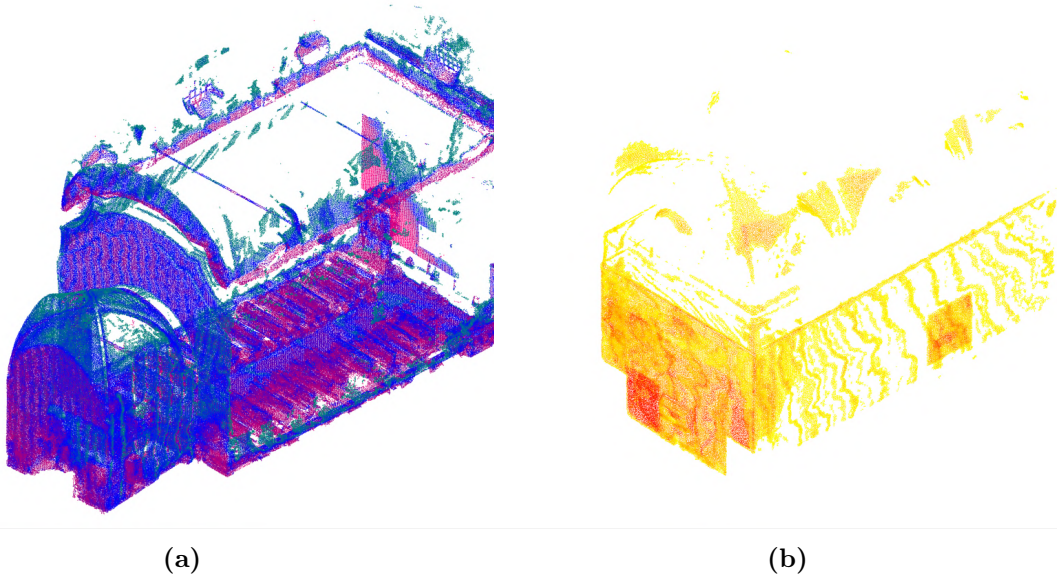


FIGURE V.13 – Filtrage des valeurs extrêmes de *MEFI* pour révéler les divergences multimodales. (a) Mise en évidence des zones éparses et isolées ($MEFI \leq 40$) à partir d'une vue du nord-est. (b) Zones denses et redondantes mises en évidence ($MEFI \geq 110$) sur la vue sud-ouest.

5.3.6.1 Une visionneuse expérimentale pour MEFI

De nos jours, il existe de plus en plus de moyens de documenter les reconstructions 3D basées sur le réel en attachant des métadonnées et/ou des paradonnées, que ce soit par l'utilisation de normes descriptives [D'Andrea and Fernie, 2013, D'Andrea and Fernie, 2013, Hermon et al., 2012] ou de plateformes dédiées [Tournon et al., 2021, Meghini et al., 2017, Petras et al., 2017, Boutsis et al., 2019]. Les données 3D peuvent quant à elle être publiées en ligne en utilisant des bibliothèques spécialisées [Schutz, 2016, Potenziani et al., 2015]. Néanmoins, la visualisation des nuages de points 3D et des informations associées est encore considérée comme deux problématiques distinctes. Leur union est généralement envisagée à travers deux systèmes, l'un comprenant une visionneuse 3D, l'autre une table ou une liste de métadonnées.

La visualisation de données multimodales

Dans le cas des reconstructions multimodales résultant de la fusion de nombreuses sources, cela est pourtant insuffisant. Premièrement, comme discuté précédemment, les attributs qualifiant l'ensemble du nuage de points (densité moyenne, recouvrement moyen, etc.) n'enrichissent pas réellement la compréhension de l'utilisateur final sur la nature des données manipulées, leurs origines et leurs spécificités. Deuxièmement, l'utilisation de plusieurs sources conduit à des métadonnées et des paradonnées hétérogènes et spécifiques à chaque modalité d'acquisition, pouvant considérablement différer les unes des autres. Ainsi, les informations pertinentes pour l'utilisateur peuvent être très variables en fonction des zones d'intérêt du nuage de points 3D final. Il est donc nécessaire de prendre en compte la densité d'informations et les problématiques de visualisation selon un focus rapproché. Certaines initiatives récentes abordent la visualisation de données multicouches pour des combinaisons multispectrales [12] [Jaspe-Villanueva et al., 2021] ou audiovisuelles [3]. Mais jusqu'à présent, au-delà du support de plusieurs textures, les bibliothèques de visualisation 3D en ligne ne permettent pas d'exploiter idéalement les attributs résultant de ces processus d'acquisition et de leur richesse.

Implémentation

Un prototype de visionneuse web 3D a été développé afin de se doter d'une solution de diffusion nous permettant d'exploiter *MEFI*. Elle permet d'interagir avec le modèle enrichi sans perdre les couleurs initiales du nuage de points, mais aussi d'expérimenter des façons de combiner les visualisations 3D avec celles des métadonnées/paradonnées. Pour cela, nous avons utilisé Potree.JS, une bibliothèque FLOSS offrant un moteur de

rendu basé sur WebGL pour les grands nuages de points [Schutz, 2016]. Cette solution est basée sur la génération préalable d’une Octree, effectuée à l’aide de PotreeConverter 1.7 [Schutz, 2022]. À partir du nuage de points d’entrée, PotreeConverter génère un fichier binaire par nœud, ainsi qu’un fichier au format JSON spécifiant les propriétés du nuage de points, en particulier ses attributs. Pour la conversion, seules les coordonnées euclidiennes de chaque point sont nécessaires, mais le logiciel prend également en charge quelques attributs facultatifs (p. ex. les normales ou l’intensité).

Pour tirer profit des attributs de *MEFI* au sein du prototype, nous avons d’abord exporté le nuage de points au format PLY, en enregistrant, en plus des informations classiques (c.-à-d. coordonnées, couleurs et normales), deux attributs personnalisés supplémentaires : les valeurs *MEFI* et l’*Indice de Nuage d’Origine (INO)*, tous deux donnés sous forme d’entiers. Pour effectuer la conversion du fichier PLY en Octree, PotreeConverter commence par lire l’en-tête pour déterminer les propriétés de chaque point et leur ordre. Ensuite, pour chaque point, une instance de la classe *Point* est créée et récupère ses coordonnées euclidiennes et ses propriétés – uniquement celles prises en charge par le moteur de rendu WebGL de Potree. À la fin de la génération de l’Octree, les fichiers finaux sont écrits. Comme ce processus ne couvre initialement que certains attributs courants, nous avons dû apporter une légère modification à la bibliothèque dans la deuxième étape, afin de préserver nos attributs ajoutés.

Exploitation du prototype

À partir de ce stade, nous avons pu implémenter de nouvelles fonctions dans la visionneuse pour prendre en charge ces attributs et les exploiter pour la visualisation. *MEFI* a été principalement utilisé par le nuanceur (*Id est* shader) pour créer une nouvelle texture de dégradé (cf. Fig. V.14a), qui peut, si nécessaire, être combinée avec d’autres dans une texture composite issue de Potree. La valeur numérique de *MEFI* correspondant à chaque point peut être récupérée par l’utilisateur à l’aide d’un outil de sélection de points. Pour interroger les métadonnées locales, nous avons mis en place un outil basé sur le lancer de rayons, permettant la récupération en temps réel de toutes les métadonnées et paradonnées existantes concernant le point 3D survolé. En bref, le principe est le suivant : si nous connaissons la valeur de l’*Indice de Nuage d’Origine* d’un point 3D, alors nous pouvons savoir quelle modalité d’acquisition a été utilisée pour le générer. Il est ensuite facile d’interroger le fichier JSON contenant les métadonnées appropriées, qu’il s’agisse d’un fichier local ou d’un document provenant d’une base de données NoSQL, pour obtenir

5.3. APPROCHE PROCÉDURALE DE FUSION : MEFI

et afficher les informations pertinentes. De cette manière, l'utilisateur final peut accéder en temps réel à toutes les caractéristiques du nuage de points, que ce soit ses caractéristiques géométriques et visuelles, l'appréciation visuelle du résultat de la fusion multimodale (le dégradé de *MEFI*), ou toute information supplémentaire associée aux coordonnées 3D. Un outil fonctionnant de manière relativement similaire fournit également un compte des différentes modalités rencontrées dans une zone carrée de 10×10 pixels et la valeur moyenne de leurs scores *MEFI* (cf. Fig. V.14b). Nous travaillons actuellement sur une fonction qui utilisera la valeur de l'*INO* pour filtrer les régions du nuage de points par modalité d'acquisition. Par exemple, il est possible de masquer tous les points 3D qui n'ont pas été générés à partir d'une acquisition photogrammétrique en lumière visible. Ce type de fonction est déjà largement utilisé lorsqu'il s'agit de classification et ne présente aucun problème d'implémentation.

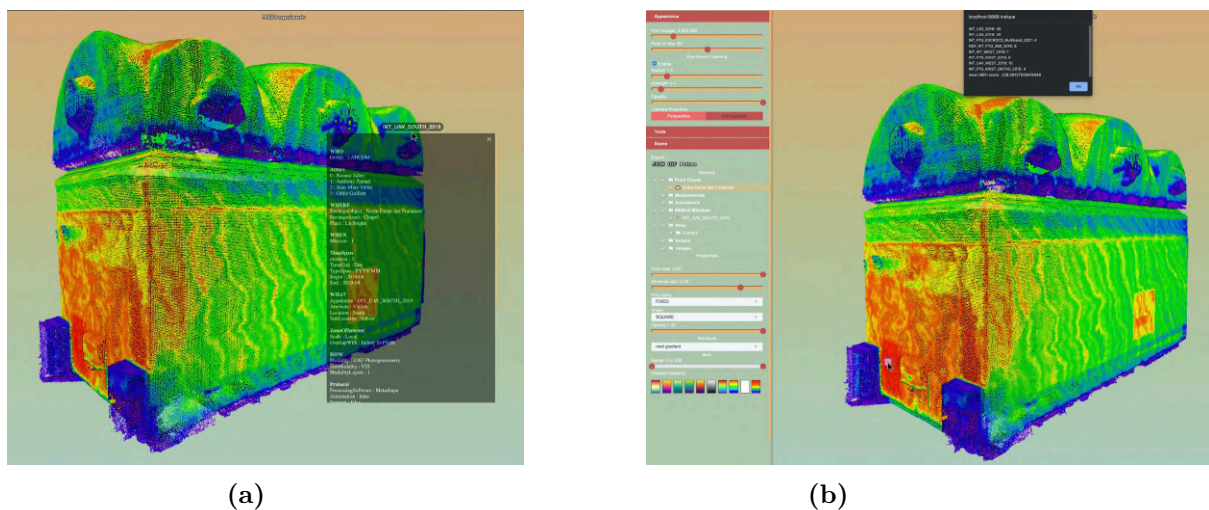


FIGURE V.14 – Captures d'écran des fonctionnalités expérimentales dans la visionneuse *MEFI*. (a) JSON basé sur *MEMoS* associé à chaque point 3D ; (b) outil de sélection multiple renvoyant au recouvrement des modalités.

5.3.6.2 Limites et travaux futurs

Dans un contexte où les données 3D sont souvent manipulées par de nombreux chercheurs issus d'horizons variés n'ayant pas participé à leur création, l'ambition de cette expérimentation *MEFI* est de réduire au minimum les ambiguïtés susceptibles d'affecter l'interprétation et/ou la réutilisation des données.

Vers un intégrateur de données multimodales

Au stade actuel et préliminaire, *MEFI* montre déjà certaines améliorations notoires. Avant tout, des solutions seront explorées pour se défaire des limites d'une méthode dépendante à la 3D. Cela sera étudié par la nécessité d'intégration progressive d'autres techniques, capteurs et données associées disponibles au sein du corpus numérique de NDF : non seulement la photographie technique, la RTI, l'imagerie hyperspectrale, mais aussi la LIBS, la fluorescence sous rayons X, la microscopie sur des échantillons stratigraphiques, les mesures thermographiques et acoustiques [Blaise et al., 2022, Bergerot et al., 2022]. Actuellement, les techniques non-3D ont été indirectement référencées, ce qui signifie que la couverture photogrammétrique a généralement été réalisée sur la même zone documentée par une autre des techniques mentionnées ci-dessus. Dans ces zones, le *ScoreMultimodal* (cf. Fig. V.11b) a été augmenté dans le nuage le plus proche pour renseigner que plusieurs modalités d'imagerie ont été utilisées. Bien sûr, les données ne sont pas fusionnées, mais nous pouvons au moins identifier que ces techniques ont été appliquées simultanément à l'étude photogrammétrique, ce qui agit comme une méthode de prélocalisation efficace.

Perspectives d'optimisation

Malgré nos efforts pour minimiser leur impact, certaines aberrations et artefacts sont encore visibles dans l'indice final. Pour en citer quelques-uns, on peut remarquer les zones rougeâtres sur les voûtes qui ne correspondent pas à un chevauchement significatif de modalités, mais sont la conséquence d'un nettoyage insuffisant des nuages de points sources. De plus, nous n'avons pas pu supprimer les artefacts en forme de zébrures, principalement visibles sur les murs sud et nord ou les voûtes. Elles sont une conséquence indésirable du désalignement du nuage et de la grille Octree lors des étapes successives de sous-échantillonnage spatial. Le calcul lui-même pourrait être optimisé par le biais de l'Octree, cette fois-ci non seulement pour la représentation, mais aussi pour générer et/ou moduler l'indice directement dans la grille spatiale au lieu des nuages de points. Cela résulte du choix d'effectuer cette première expérience sur la version interfacée de CloudCompare. Les prochaines étapes viseront à améliorer la reproductibilité en testant et en adaptant *MEFI* sur d'autres cas d'utilisation. En complément, l'automatisation et la généralisation de la méthode pourront s'appuyer sur les fonctions « wrapper » de Python pour exploiter différentes bibliothèques (CloudCompPy, PyMeshLab, PCL, Open3D). De cette manière, *MEFI* 2.0 pourrait, par exemple, gagner en performance et en efficacité avec une estimation préalable du chevauchement basée sur les boîtes englobantes orientées [Chang et al., 2011] suivi d'une estimation robuste de l'IoU [Xu et al., 2019]. De

plus, l'intégration de plus de poids supplémentaires (p. ex. mesures qualitatives, métriques) lors de futurs développements pourrait orienter *MEFI* vers un outil dédié à la MoP.

Encodage de données complexes

Dans une vision plus prospective, cela pourrait surcharger et compliquer les données pour lesquelles le format de fichier 3D deviendrait inefficace. L'encodage des données pourrait alors se faire à l'aide d'un format plus versatile et convivial pour l'apprentissage automatique tel que le protocole HDF5. Des problèmes de format de fichier ont déjà été rencontrés au cours de cette étude, car la piste initiale pour l'étiquetage sémantique était basée sur la classification LAS. Cependant, en raison de l'inadéquation du plugiciel Q-Layer de CloudCompare et de certaines restrictions côté visualisation, les attributs personnalisés au format PLY ont été préférés en tant que preuve de concept. À cette fin, les données douces et dures représentées par le biais de visualisations 2D basées sur *MEMoS* et leurs 3D interactions avec *MEFI* nécessiteraient d'être unifiées dans un environnement unique. Cela permettrait d'améliorer l'expérience conventionnelle de visualisation 3D avec des superpositions sémantiques.

Encodage de données complexes

Enfin, *MEFI* ne prétend pas être un indice multidescripteurs, car il est basé pour l'heure seulement sur l'attribut de *Densité*, qui a le bénéfice d'être à la fois simple, compréhensible, facilement accessible grâce à des bibliothèques Open Source. S'appuyer sur un tel descripteur largement diffusé et documenté, plutôt que sur des solutions sophistiquées et supposément plus puissantes, mais opaques, est une décision forte et affirmée. Nul doute que *MEFI* pourrait hériter des avantages d'une fusion multiattributs [Zhang et al., 2018b], mais ce point qui dépasse du cadre de cette étude est laissé pour des travaux futurs. Dans la lignée de certains travaux [Buglio and Derycke, 2015, Verhoeven et al., 2021], nous abordons une posture plus épistémologique visant à mieux appréhender la nature des données manipulées, plutôt que s'inscrire dans des perspectives strictement technologiques. Nous estimons par ailleurs que les méthodes d'interprétations humaines sont dans un premier temps plus efficaces pour les comprendre et réduire le paradigme d'intrication des données. Il convient de préciser que malgré leurs contributions à la problématique de la fusion [Jusoh and Almajali, 2020], ce travail n'aborde volontairement pas les approches actuelles d'apprentissage machine. Il s'agit de méthodes stimulantes et passionnantes, mais elles ont une incapacité bien connue à gérer des données trop hétérogènes et sont donc exclues de cette étude.

Articulation avec l’annotation spatialisée

Pour l’heure, le fait que *MEFI* soit capable de mettre en coopération des données autour de nuages de points 3D est un premier achèvement. Cependant, l’intégration de surfaces maillées par le biais de leurs sommets est possible, mais nécessiterait quelques adaptations autant du côté du calcul de l’indice que de sa visualisation. Par extension, cela ne signifie pas qu’il est capable de traiter tel quel des données de types raster ou vectorielles, mais nous envisageons de nous appuyer sur d’autres outils pour spatialiser et propager les attributs entre les géométries 3D et les ressources 2D (p. ex. AIOLI [1]). En effet, l’import de régions 3D à partir du processus d’annotation avant le calcul de *MEFI* est d’ores et déjà possible tout comme l’exploitation d’un processus d’annotation sur un ensemble de points préenrichi par *MEFI*. Cette piste de l’annotation spatialisée semble le moyen le plus efficace pour intégrer par intention des informations sémantiques diverses (p. ex. l’humidité, la température, les mesures spectrocolorimétriques, les analyses de matériaux, l’identification de phénomènes de dégradation, etc.). Si cette piste de fusion des données s’avérait pertinente, une approche plus sophistiquée consisterait à convertir ou à orienter *MEFI* vers la voxelisation en vertu de sa capacité de segmentation basée sur la sémantique [Poux and Billen, 2019]. Sur la base de travaux récents [Croce et al., 2023b], nous pourrions également envisager le transfert des annotations sémantiques entre la MBR (c.-à-d. un nuage de points sémantiquement chargé) et la modélisation paramétrique (H-BIM).

5.3.7 Conclusions

Contributions principales de MEFI

Dans ce travail, nous avons présenté une méthode de calcul permettant d’enrichir un nuage de points 3D multisource avec un nouvel attribut *MEFI*. Nous avons développé une méthodologie permettant de synthétiser en un seul nuage de points un ensemble complexe de données obtenues grâce à des relevés 3D multimodaux. Notre approche basée sur le découpage et la proximité au sein d’une structure en Octree a permis de résoudre les problèmes de variations de résolutions et d’incertitudes. Cette méthode peut améliorer notre compréhension et donc l’interprétation des modèles 3D multisource pour dans le cadre d’études patrimoniales. À partir d’une liste de nuages de points superposés et enregistrés, la méthode proposée renvoie, avec un coût de calcul raisonnable et efficace, un indice de fusion basé sur la densité. Celui-ci est directement stocké dans les attributs du nuage de points, le rendant lisible dans divers environnements 3D. Reprenant le fonctionnement

d'une carte de chaleur 3D il permet d'exacerber les variations spatiales entre des données éparses et isolées ou denses et redondantes. En exploitant des palettes de couleurs adaptées aux données, il révèle ainsi la stratégie de numérisation multimodale déployée sur les sites ou objets patrimoniaux. Les premiers résultats de *MEFI* montrent des aptitudes intéressantes pour gérer des ensembles de données multimodales, y compris avec des couches spatio-temporelles variées. Enfin, il est intéressant de noter sa robustesse vis-à-vis des ensembles de données multirésolutions et multiéchelles permises par la distribution et la scalabilité de la structuration en Octree.

Apports de MEFI et ouverture

Dans cette étude, nous avons également présenté une piste pour l'intégration des données de couches sémantiques. Celle-ci est basée sur un schéma de métadonnées descriptives libre et conforme à une modélisation en CIDOC-CRM (*MEMoS*) [7] et contribue ainsi à améliorer la provenance des données dans les pratiques multimodales pour le patrimoine. Afin de démontrer la valeur ajoutée potentielle pour l'analyse des données et les perspectives interprétatives, un prototype de visualisation hybride basé sur Potree a été développé pour améliorer l'interprétation des attributs quantitatifs en 3D de *MEFI* en corrélation avec des attributs qualitatifs issus d'un processus d'enrichissement sémantique des données sources. En conclusion, nous espérons que ce travail contribuera plus globalement au défi actuel des études patrimoniales en favorisant l'intermodalité (c.-à-d. le transfert et le partage d'informations entre plusieurs modalités) et de manière plus prospective, à de futures pistes menant à l'émergence de l'« hypermodalité » (c.-à-d. nouvelles interactions issues du croisement entre des structures géométriques et sémantiques complexes).

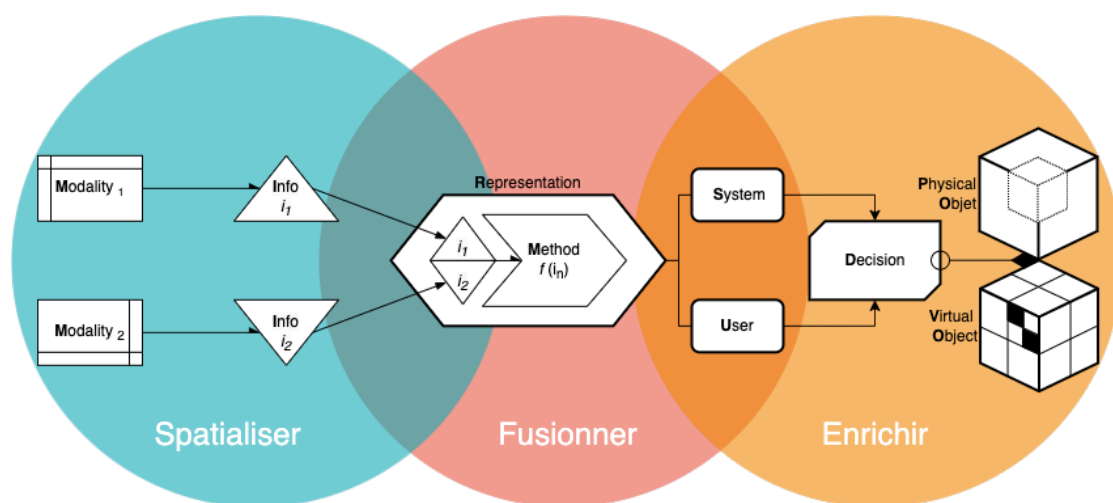


FIGURE V.15 – Représentation synthétique d'une stratégie de fusion de données patrimoniales

5.4 BILAN DES APPROCHES RELATIVES À LA FUSION

Dans ce chapitre, la thématique de la *fusion* de données à été approfondie en partant du principe que les méthodes de spatialisation n'étaient qu'une amorce pour exploiter le croisement des modalités. Les deux sous-chapitres détaillant deux approches, une instrumentale et l'autre procédurale, ont permis de mettre en exergue les liens ténus entre différents systèmes et sous-systèmes de traitement de données.

Bilan de l'approche instrumentale de Fusion (SO-RTI)

Dans la première partie, la méthode de spatialisation (TACO) a été éprouvée dans un scénario d'exploitation opérationnelle de double modalité (photogrammétrie \times RTI). Cette expérimentation a révélé la nécessité de se doter d'un environnement (ici de visualisation) permettant la mise en cohérence des sources d'imageries mobilisées. Pour cette expérience (SO-RTI), c'est la piste de l'annotation sémantique spatialisée qui a été choisie comme vecteur d'enrichissement des données en anticipation de la phase d'interprétation. Dans ce cas, c'est l'annotation elle-même, qui, appliquée conjointement sur les deux modalités, opère de façon dérivée une opération de fusion, car c'est elle qui est porteuse d'une potentielle valeur ajoutée.

Bilan de l'approche procédurale de Fusion (SO-RTI)

La seconde partie s'est attelée à la définition d'un modèle de fusion de données *stricto sensu* conçu et applicable sur l'imagerie patrimoniale, en l'occurrence des nuages de points. La problématique de la fusion telle que définie auparavant (cf. section [2.3.3.1](#)) s'accompagne de tâches éminemment complexes (dont certaines non traitées dans cette étude), pour lesquelles ce sous-chapitre relate d'un premier pas vers un indice de fusion multimodale dédié aux données patrimoniales. L'indicateur généré s'intègre avec transparence et simplicité aux données fusionnées et s'il pouvait servir de guide pour des procédures de fusion avancées, il a été conçu plus spécifiquement pour faciliter l'interprétation des données. En effet, le nuage de points résultant, enrichi pour chacun de ses points par un attribut de MEFI, renseigne de façon claire et explicite la richesse multimodale d'une modélisation 3D multisources. Cette plus-value s'exprime d'un point de vue soit quantitatif (rapport densité et redondance des modalités) soit qualitatif (intégration et restitution des métadonnées descriptives).

Ces deux approches (SO-RTI et MEFI) participent de consorts aux enjeux des stratégies multimodales. Elles participent aussi au renforcement du continuum informationnel permettant *in extenso* de garantir la *complétude* et la *chronique* et *in fine* la consistance

de l'Objet Patrimonial Numérique. Les apports de ces deux travaux permettent bel et bien de mettre en coopération des modalités d'imagerie complémentaires, la dimension temporelle est quant à elle soutenue par la spatialisation incrémentielle de stations RTI et par la capacité de MEFI à retracer l'historique de constitution d'un nuage multisource et extrêmement dense.

5.4.1 Bilan des contributions relatives à la Fusion

Vers des systèmes d'instruments pivots

L'approche instrumentale SO-RTI propose une avancée significative vers la coopération des deux techniques (basées sur la photographie) les plus accessibles et couramment utilisées pour documenter les OP. Ce travail appuie la nécessité de l'harmonisation des protocoles d'acquisitions et de processus de traitements de données mise en avant lors du chapitre précédent. La rencontre et le dialogue ainsi établis entre la photogrammétrie et le RTI contribuent en effet au rapprochement, lent, mais continu, de la modélisation géométrique et la modélisation de l'apparence des matériaux. Cette expérience propose les prémices d'une solution hybride allant vers la fusion entre les environnements multivues et multilumières. Même si ce verrou scientifique demeure quasi intact, ce travail propose une alternative issue d'un système de visualisation hybride développée en marge d'une autre thèse [Abergel, 2020]. Au delà de renforcer un scénario récurrent d'imagerie bimodale, un facteur de *directivité* à été introduit au sein de coopérations multimodales, faisant apparaître qu'une fusion n'est pas forcément bilatérale ou réciproque et que sa mise en œuvre induit possiblement une hiérarchie entre les modalités. Néanmoins, les approches développées jusqu'ici demeuraient dépendantes au paradigme de la photogrammétrie. Rappelons ici une des hypothèses de travail, sur le rôle de médiateur intermodal de cette technique, dénommée "instrument pivot" (cf. section 3.4.1). Cela permet de proposer la conjecture suivante, à savoir que les multiples facettes de la Modélisation Basée Image¹⁶ pourraient être ou faire partie d'un système d'instruments pivot tel que discuté en section 3.3.1 p.103.

Réduire pour enrichir

Afin de prendre de la distance avec la modalité « image », l'attention s'est portée plus largement sur la représentation 3D lors de l'expérimentation MEFI sur le cas du nuage de point. Les contributions directes de cette approche procédurale sont claires. Elle propose tout d'abord une méthode computationnelle, basée sur une solution libre, pour la mise en comparaison une liste de n sources là où les outils actuels sont limités à des paires (C2C,

16. Telles que l'acquisition, l'instrumentation, la spatialisation, le traitement, la visualisation, etc.

C2M, Cloud2CAD, M3C2). Elle offre une méthode de réduction adaptée à la manipulation de données massives robuste à la variation d'échelles et de résolutions. Enfin, elle étend et amorce la problématique de la fusion de données aux couches sémantiques, faisant l'objet du prochain chapitre. Cette expérience a permis de démontrer les bénéfices d'une fusion de données et d'information précoce, dans ce cas en conciliant en amont l'association des données sources (des nuages de points) avec des attributs sémantiques (leurs métadonnées descriptives). Par ce biais, une approche pertinente et innovante a été proposée permettant de synthétiser des données tout en enrichissant son contenu informationnel.

Fusion douce (informations) et dure (données)

La complémentarité des deux approches de ce chapitre consacré à la *fusion* a permis de mettre en exergue et d'apporter quelques contributions à la problématique de la fusion étendue aux données dites *douces* et *dures*. Une contribution implicite est d'avoir proposé et transposé ce problème aux cas des données patrimoniales. Des nuances, subtiles, mais stimulantes ont pu émerger de la confrontation des deux méthodes, et permettant de considérer et d'interroger les annotations et les métadonnées descriptives pourtant bien différentes sur le même plan, celui de données douces. En approfondissant la réflexion, cela conduit à envisager le processus d'annotation sémantique spatialisé comme une méthode de fusion de données complexe, du fait qu'il met en relation une source (tracé 2D) et une cible (région 3D) de nature différente (nuage[s] \rightarrow image[s]) en y ajoutant une signification supplémentaire (annotation) conformément au modèle W3C (cf. Fig. [II.26](#) p.[88](#)).

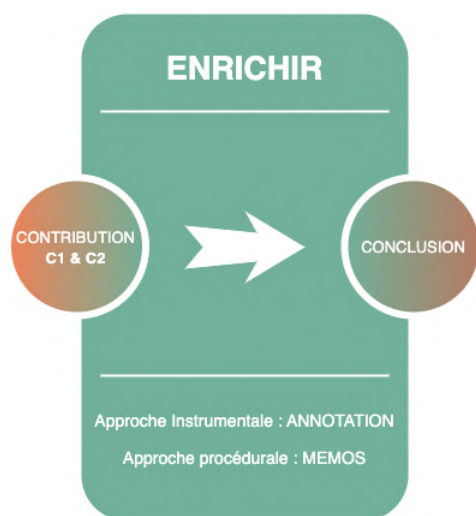
Fusion \rightarrow Enrichissement

En guise de conclusion de ce chapitre orienté sur le thème de la *fusion*, le potentiel d'une approche systémique a été démontrée et développée. Celle-ci a permis d'approfondir les interrelations, entre le traitement de données et d'informations spatiales et les voies d'interprétations issues de la fusion de ces dernières. Certains jalons ont été déposés dans ce chapitre pour introduire la notion d' *enrichissement* choisie pour colorer la suite et la fin de l'étude. Par sa capacité à augmenter la valeur documentaire et le potentiel interprétatif d'une ressource numérique, cette dernière thématique permettra d'avoir un regard à la fois rétrospectif et prospectif sur le système soumis à observation et ainsi apporter quelques précisions sur les stratégies de fusion multimodales visées par cette recherche (cf. Fig. [V.15](#)).

Chapitre VI

ENRICHIR

6.1 DÉFINITION DES ENJEUX RELATIFS À L'ENRICHISSEMENT



Ce dernier chapitre aborde la thématique de l'*enrichissement* en qualité d'étape nécessaire pour faire avancer la réflexion et les actions sur la voie de l'interprétation des données. Ce dernier point sera aussi et surtout indispensable pour tenter de reboucler le tour d'horizon de notre système vers une nouvelle phase de collecte de données. Dorénavant sur l'hémisphère « sémantique » du système, les données manipulées sont majoritairement telles que précédemment définies comme *douce*, c'est-à-dire enrichies ou en cours d'enrichissement. Sur base d'ensembles de données complexes fusionnées selon les approches décrites aux précédents chapitres, l'objectif

consiste à savoir comment négocier ce virage sémantique des données multimodales. Jusqu'ici, la démonstration a été faite qu'il était possible que la représentation 3D puisse jouer le rôle d'agrégateur de données spatiales et fusionnées. Pour autant, afin qu'un ensemble de données (à la fois *douces* et *dures*) avec un tel niveau de complexité soit vecteur de connaissance, la confrontation à une phase interprétative par le biais de méthodes d'analyses humaines ou assistées par ordinateur reste requise. Les travaux menés dans cette thèse ont permis d'explorer deux pistes distinctes à articuler et combiner avec les approches précédentes pour dessiner avec plus de précision une stratégie globale.

Un des moyens privilégiés pour l'enrichissement sémantique des données se base à l'heure actuelle en grande partie sur les processus d'annotations. L'autre piste, basée de façon similaire sur la possibilité d'étiqueter des données, se penche sur la question des métadonnées et de leur enrichissement. L'une comme l'autre, mènera aux défis des données liées et ouvertes qui implique des scénarios réutilisation des données à relier au défi sociétal des Sciences Ouvertes. Cette ouverture s'accompagne d'une norme fournie et imposée (bien que légitime) qui est celle des principes FAIR, dont le point évoqué en est d'ailleurs le dernier pilier (de l'anglais *Reusable* pour *Réutilisable*). On fera l'impasse ici les détails (explicités ailleurs en section [2.4.2.4](#) p.92) pour évoquer un point crucial de la « *fairisation* » des données y compris patrimoniales. Il s'agit du rôle et de l'importance souvent négligés des métadonnées des données instrumentales, particulièrement celles dites descriptives pourtant primordiales dans le cas précis de la documentation numérique du patrimoine. En effet, au-delà du besoin de description des contenus numériques — dont la piste de l'annotation est partie constituante — la description du contenant (images, nuages, etc.) est souvent délaissée. Cela pose un véritable défi en termes de provenance des données, de traçabilité des informations ou de vérification de la fiabilité des sources faisant que les préceptes du lignage de données semblent encore balbutiant pour les SP. Mis à part ce problème de fond, il subsiste un véritable problème de forme émergeant du constat que les données patrimoniales sont peu (voire pas) suffisamment documentées, ou alors pas de façon commune ni systématique et tout du long de leur cycle de vie. C'est en partant de ce constat qu'une approche d'enrichissement de la documentation multimodale par le biais des métadonnées est développée au cours ce chapitre.

Ce chapitre consacré à la thématique de l'*enrichissement* est structuré une nouvelle fois en deux parties décrivant deux pistes complémentaires pour favoriser l'interprétation de données multimodales. Dans un premier temps, l'approche instrumentale est traitée par un travail de synthèse dont la thématique de la multimodalité était le fondement du projet de recherche. Ce sous-chapitre propose de résumer une expérience au long cours durant laquelle des scénarios d'annotations sémantiques ont été mis à l'essai, tout en intégrant la majeure partie des approches développées dans les chapitres précédents. Ce travail aurait pu faire office de contribution de synthèse, voire conclusive, si certaines lacunes relatives à la documentation des sources avaient été anticipé. Ainsi, une approche procédurale est discutée, un second sous-chapitre examinant la possibilité d'améliorer le système de documentation numérique basé sur la numérisation multimodale par la saisie et l'enrichissement des métadonnées afférentes.

6.2 APPROCHE INSTRUMENTALE D'ENRICHISSEMENT : EXPÉRIENCE SUMUM

Ce sous-chapitre reprend les travaux visant à développer une approche d'enrichissement sémantique de sources d'imagerie multimodale appliquée aux études de conservation et de restauration [1]. Il restitue une série d'expérimentations menées dans le cadre du projet SUMUM, acronyme de « Stratégie de docUmentation MUltiéchelle, multiModale du patrimoine culturel : acquisition, traitement, étude et diffusion » [2].

Articulation avec AIOLI

Ce travail s'inscrit en continuité de travaux du laboratoire MAP jouissant d'une douzaine d'années d'expérience autour d'une plateforme expérimentale d'annotations sémantiques spatialisées 2D/3D, collaborative et spécifiquement orientée pour les applications patrimoniales (AIOLI) [1]. Il serait vain de décrire une nouvelle fois ici, le contexte et l'historique de son développement, le descriptif actuel de ses fonctionnalités ainsi que ses perspectives on fera dont seulement rappel avec ces quelques références clés [De Luca et al., 2010b], [Manuel et al., 2014], [Manuel et al., 2018], [Roussel and De Luca, 2023].

6.2.1 Contexte du projet SUMUM et son corpus

S'il fallait schématiser le chemin parcouru jusqu'ici, on devrait être en mesure de : définir des stratégies d'acquisition intrinsèquement multimodale, référencer au fil du temps, avec précision et cohérence spatiale, différentes sources d'imageries pour être en mesure d'explorer et d'interagir avec ces représentations numériques complexes dans un environnement propice à leur enrichissement, si possible collaboratif. Il s'agit peu ou prou du contexte et des objectifs poursuivis par le projet SUMUM. Ce projet mobilise la notion de méthodologies d'acquisition *ad-hoc* introduite en section 4.2. Il en démontre une application concrète avec un large éventail de techniques d'imagerie, sur un corpus d'études aussi varié que complexe et proposant des problématiques de restauration-conservation stimulantes. Pour chacun des objets d'étude, des scénarios complexes ont été nécessaires en termes de multimodalité (cf. Fig. VI.1).

1. Contenu basé sur l'article de conférence internationale avec acte [13] Pamart, A., Roussel, R., et Al. (2022). A Semantically Enriched Multimodal Imaging Approach Dedicated to Conservation and Restoration Studies, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLVI-2/W1-2022, 415–420. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-2-W1-2022-415-2022>.

2. Contributions de tiers collaborateurs : Acquisition des dossiers d'imagerie scientifique par Émilie Hubert | Transcription des constats d'état par annotations sémantiques structurées au sein d'AIOLI par Roxane Roussel.

6.2. APPROCHE INSTRUMENTALE D'ENRICHISSEMENT : EXPÉRIENCE SUMUM

Pour couvrir les trois cas d'études des combinaisons entre 5 et 10 modalités d'imageries ont été nécessaires. Comme il a été évoqué, les approches de numérisation de chaque objet du corpus ont été guidés vis-à-vis du contexte et de la problématique de conservation et restauration propre à chacune des œuvres. L'objectif visé est de répondre de façon pragmatique par une stratégie de documentation à la fois raisonnée et raisonnable pour tenter de contribuer à l'identification — si ce n'est à la compréhension — des phénomènes de dégradations ou d'altérations affectant chaque œuvre. La fusion des modalités d'imagerie reflète donc d'une stratégie adaptée pour chaque cas d'étude. C'est ainsi que trois scénarios ont été déterminés vis-à-vis des facteurs propres (dimensions, matériaux, altérations) et contextuels (environnement d'exposition, études préalables ou interventions planifiées) des œuvres pour explorer des coopérations de modalités susceptibles d'apporter du sens pour l'interprétation de la documentation.

Technique	Lasergrammetry	Photogrammetry	MLIC			Technical Photography				Photography				Analytical		
Case Study \ Modality	TLS	T-CRP	A-CRP	RTI	MS-RTI	PS	VIS	RaK	IR	UV	CP	DOC	SC	SP	Total	
Zett by V. Vasarely	X	X	X	X	X	X		X	X				X	X	10	
Expansion Contrôlée by César	X	X		X			X		X	X	X		X		8	
Arbre aux serpents by Niki de Saint-Phalle	X		X				X					X	X		5	

FIGURE VI.1 – Tableau reprenant les sources d'imageries multimodales fusionnées pour chaque objet d'étude issu du corpus SUMUM.

Les scénarios de documentation multimodale

Voici une description synthétique des trois démarches proposées (cf. annexe C p.294), décrites plus en détail au sein de l'article donné en référence de ce sous-chapitre :

- Le chantier sur l'œuvre *Expansion Contrôlée* du plasticien César développe une démarche dite multi-spectrale compilant une base d'acquisition photogrammétrique en polarisation croisée complétée d'une dizaine de stations RTI orientées autour du nuage de points combinant des sources laser et image, ainsi que des prises de vues issues du dossier d'imagerie scientifique dans le domaine du visible, de l'infrarouge et de l'ultraviolet. La dimension multi-spectrale répond à un double objectif. Le premier est corollaire des hautes réflexions spéculaires induites par le matériau composite de la sculpture imposant dès lors l'usage de techniques multi-lumières pour améliorer la reconstruction géométrique. Le second se manifeste par la présence de restaurations antérieures rendues apparentes uniquement au-delà du domaine de la lumière visible (cf. Fig. VI.2)

6.2. APPROCHE INSTRUMENTALE D'ENRICHISSEMENT : EXPÉRIENCE SUMUM

- Le chantier sur la sculpture monumentale de *L'Arbre aux Serpents* de l'artiste Niki de Saint-Phalle développe une démarche multi-temporelle compilant deux acquisitions par drone (avant et après restauration) intégrant les analyses spectro-colorimétriques localisées sur la base d'un nuage de points issu d'une fusion entre sources laser et photo. Le gros plan sur la dimension multi-temporelle est motivée et justifiée par le fait que la statue a subi une procédure de mise à blanc, permettant une documentation comparative non équivoque de l'état sanitaire de l'œuvre en amont et en aval de sa restauration, et pouvant servir de base pour un suivi (cf. Fig. VI.3).
- Le chantier élaboré pour la peinture monumentale *Zett* intégrée au sein du complexe architectural de la Fondation Vasarely développe une démarche qualifiée de multi-scalaire compilant une base d'acquisition photogrammétrique convergente globale densifiée par des acquisitions rapprochées en ortho par assistance mécatronique (drone et système arbalète), comprenant une couche dans l'infrarouge et complétée d'éléments du Dossier d'Imagerie Scientifique en éclairage semi-rasant (propices à la lecture de décollement du motif contre-collé, cf. Fig. VI.4). La démarche multi-échelle s'est imposée par les problèmes d'accessibilité induits par les dimensions monumentale de l'œuvre (plus de 5 mètres de côté) cumulés avec les altérations physico-chimiques d'ordre infra-millimétrique de la peinture effet daim (Nextel Coating) du revêtement.

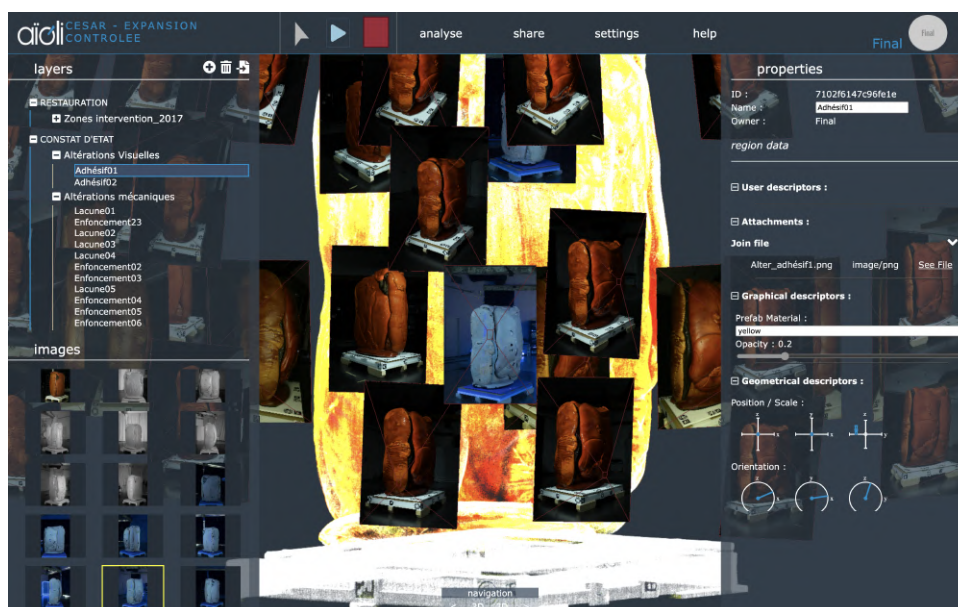


FIGURE VI.2 – Extrait de la scène AIOLI sur *l'Expansion Contrôlée* montrant l'intérêt du recalage de la fluorescence UV pour révéler et propager les annotations sur les zones des restaurations passées.

6.2. APPROCHE INSTRUMENTALE D'ENRICHISSEMENT : EXPÉRIENCE SUMUM

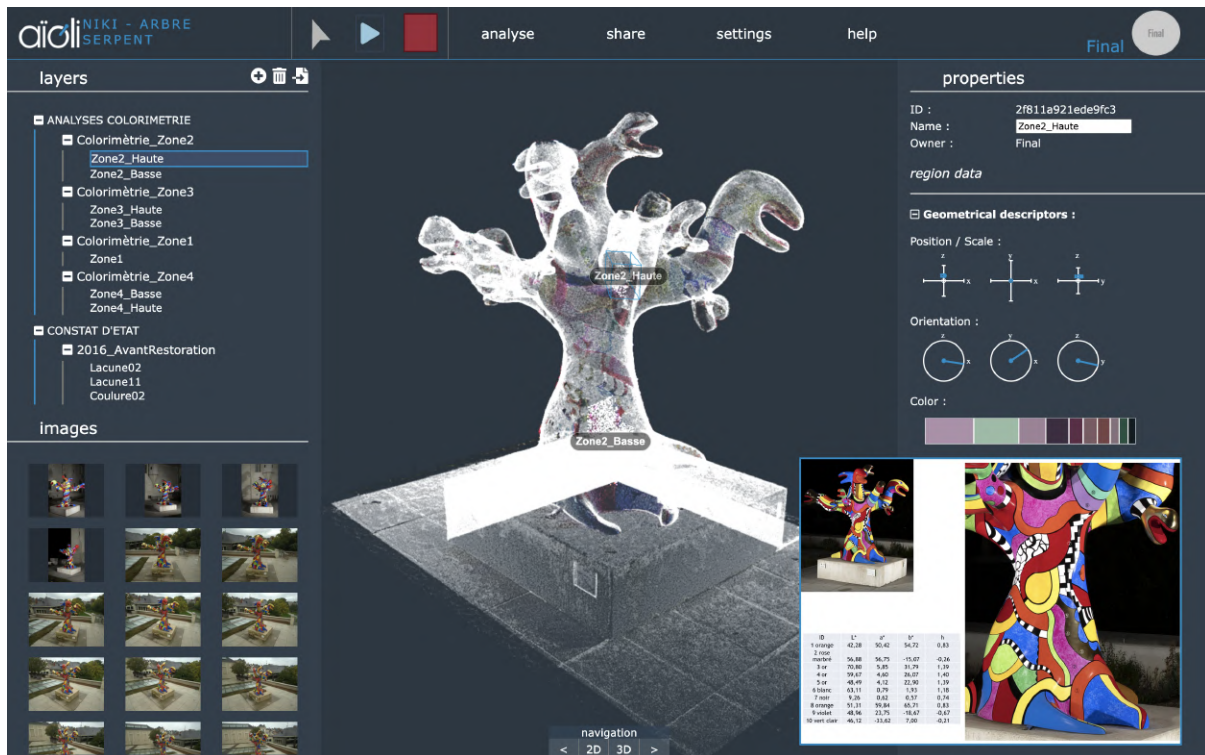


FIGURE VI.3 – Extrait de la scène AIOLI sur l'Arbre aux Serpents montrant la corrélation entre l'analyse spectroscopique et la palette de couleurs issue de la colorimétrie du nuage dense.

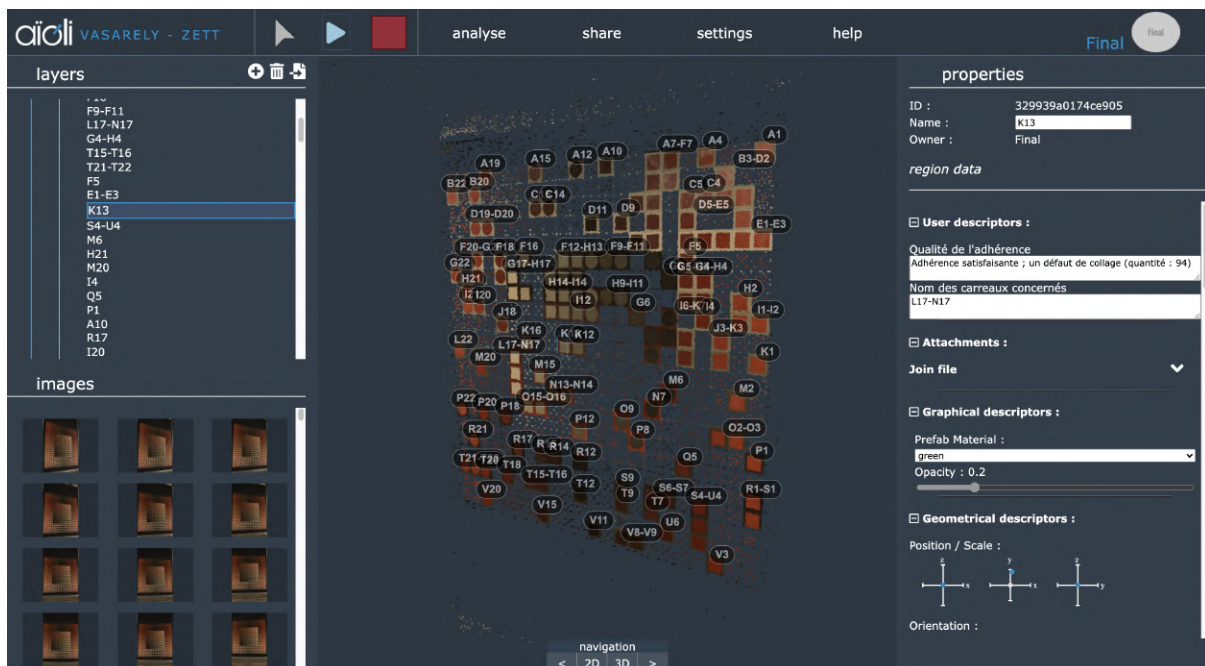


FIGURE VI.4 – Extrait de la scène AIOLI sur Zett révélant le niveau des détachements par le biais d'annotations 3D du nuage de points denses.

Mise à l'épreuve et optimisation de TACO

Avant d'aborder la procédure d'enrichissement par le biais de l'annotation, il convient de revenir sur les modalités de traitement et d'harmonisation spatiales des sources d'imagerie opérées par le biais de TACO. Contrairement à l'expérimentation SO-RTI, la spatialisation n'a pas été effectuée directement au sein d'AIOLI, mais par le biais d'un calcul local. Ce scénario de traitement a permis d'exploiter les subtilités de TACO pour recaler entre-elles des modalités bien plus complexes que celles mises à l'essai jusqu'à présent. Une fois le traitement validé et contrôlé, les chantiers photogrammétriques comprenant nuages et images orientées ont pu être intégrés au sein d'AIOLI, grâce à de nouvelles fonctionnalités d'import (et d'export) de projets³. Cela a aussi permis de s'astreindre de plus contraintes et limitations techniques. D'une part, certaines limites relatives à l'accroissement d'erreur résiduelle dû à l'accumulation de sources disparates. Ce point a été résolu par le biais de l'ajout d'une étape d'optimisation non implémentée dans TACO. D'autre part, certaines œuvres impropres à la photogrammétrie résultaient à l'obtention d'un nuage dense non optimal (c.-à-d. zones non corrélées, bruits, artefacts, etc.). Dans ce cas, le nuage de point dense générée automatiquement par photogrammétrie a été optimisé, fusionné ou substitué par des sources lasergrammétriques.

6.2.2 Processus d'annotations d'imagerie multimodales

C'est sur cette base d'un ensemble de documentation cohérent, combinant différentes modalités que la phase d'enrichissement sémantique a pu être amorcée. La piste explorée est celle du rôle de la représentation numérique 3D en tant qu'agrégateur et portail d'accès aux données spatialisées. On définira pour cette expérience le processus d'annotation sémantique par celle qui prévaut au sein des SP, c'est-à-dire une démarche « experte »⁴. Dans ce cas l'annotation relate d'une posture d'expertise (i.e propre et limitée à un domaine d'expertise), par laquelle au lieu de structurer et de restituer une observation sous une forme idoine (textuelle, cartographique, etc.) celle-ci vient enrichir directement la ressource ou le support documentaire. Dans le cas d'AIOLI, cette ressource est l'image orientée dans l'espace sur laquelle une caractéristique de l'objet est observable en tout point autour de sa représentation 3D. Le mécanisme exploite ensuite la relation projective entre la 2D et 3D pour propager les annotations et ses attributs sémantiques au sein des géométries images et nuages.

3. cf. annexe A p.287

4. Différente de celle qu'il serait par exemple possible d'appliquer pour des sciences participatives ou citoyennes.

Le constat d'état spatialisé

Un parallèle est établi entre le mode opératoire des professionnels et scientifiques de la conservation - restauration qui restituent leurs diagnostics ou leurs interventions sous la forme de rapports cartographiques et utilisant par conséquent le même principe d'annotation. Les attributs sémantiques sont par contre codifiés par le système de représentation et la sémiologie graphique (couleurs, types et épaisseurs de traits, symboles, légendes) et leur signification ou interprétation est reportée et approfondie par une description textuelle. À partir de ce constat, le travail a consisté à retranscrire avec justesse et finesse les observations produites par les experts eux-mêmes. Les constats d'états et rapports de restauration ont ainsi été transposés et spatialisés en adaptant pour chaque œuvre la structure et la description des couches d'annotations. L'approche proposée débouche sur deux atouts. Elle permet de relier les données brutes — provenant de l'imagerie multimodale — aux données interprétées (c.-à-d. les observations établies sur base de cette documentation multisource). Elle rend les sources et les contenus de cet enrichissement accessibles et explorables au sein d'un environnement unique et affranchi de toutes contraintes interdimensionnelles (c.-à-d. passage 1D-2D-3D-4D). Il va sans dire que ce potentiel de mise en coopération d'une documentation aussi riche que complexe redouble la valeur informative et interprétative de l'imagerie multimodale. A minima, elle apporte une réponse efficace à la localisation, l'intégration et l'exploration de ressources hétérogènes, à la façon d'un SIG dont le portail d'accès n'est autre que la numérisation multisources.

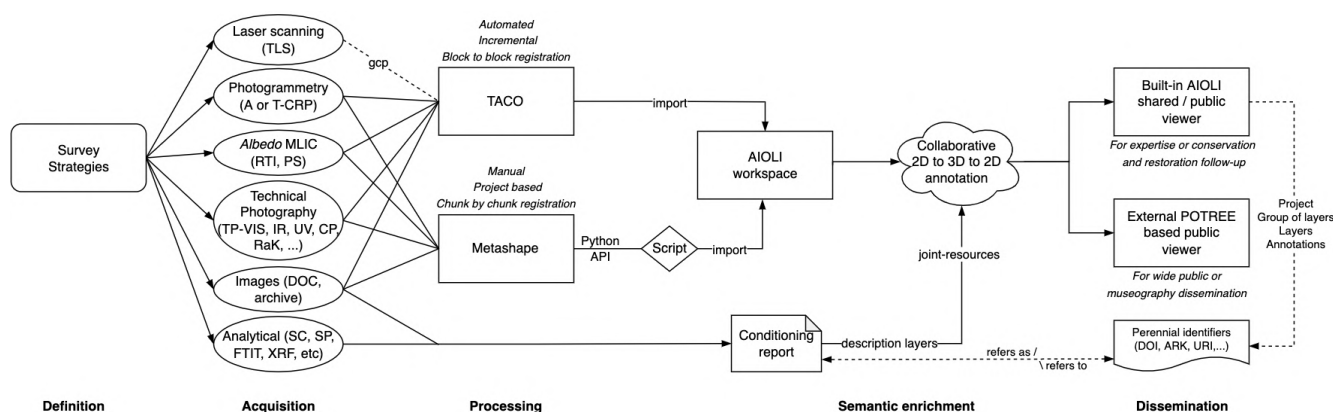


FIGURE VI.5 – Aperçu du flux de travail sémantiquement enrichi développé dans le cadre du projet SUMUM.

6.2.3 Des représentations numériques à haute valeur sémantique

Cette procédure a abouti à trois scènes AIOLI provenant d'une combinaison pragmatique de modalités d'imagerie sémantiquement enrichies pour en accroître leur potentiel documentaire et interprétatif (cf. annexe C p.294). Ces scènes sont composées de ressources 2D orientées d'une géométrie hybride (issue de la fusion de plusieurs sources) mise en synergie par le biais de couches sémantiques comprenant d'autres ressources complémentaires (textes, analyses, cartographiques issues des rapports d'expertise). Malgré quelques défauts et limites discutés ci-après, cela offre un moyen novateur et efficace pour interagir et mettre en relation la documentation multimodale disponible pour ces œuvres. Ces scènes peuvent être entrevues comme un instantané numérique de l'état documentaire de ces objets patrimoniaux, partageables et accessibles via une simple URL. Quiconque y ayant accès est en mesure d'atteindre des données, informations ou connaissances auparavant disparates permettant d'apporter des éléments de réponses à des questions telles que ;

- Quels types d'imagerie ou d'analyse a été mobilisé sur toute ou une partie de l'œuvre ?
- Où sont situées ses principales altérations ?
- Existe-t-il des analyses complémentaires pour comprendre le mécanisme de ces dégradations ?
- Y a-t-il eu, quand et par qui, des interventions de restaurations sur ces zones et par quel procédé ?
- Peut-on en observer des effets positifs ou négatifs sur base de la documentation collectée à ce jour ?

Les scientifiques du patrimoine savent qu'il n'est pas trivial de répondre à ces requêtes complexes, et même si l'expérience relatée ici ne permet pas de faire une requête au sens informatique du terme, elle aura permis i) de rassembler ces ressources au sein d'un environnement unique ii) de mettre relation spatiale des données, des observations et des analyses iii) d'accéder et d'interagir avec cette documentation aussi riche et complexe soit elle.

Limites et perspectives de l'approche

Les limites inhérentes à la plateforme AIOLI, où relatives à ses composants (TACO) ne seront détaillées ici. L'attention est reportée sur celles permettant d'approfondir la réflexion

6.2. APPROCHE INSTRUMENTALE D'ENRICHISSEMENT : EXPÉRIENCE SUMUM

sur la thématique de l'*enrichissement*. Comme évoqué, le recours à titre expérimental à l'intégration d'une géométrie issue de la fusion de plusieurs sources a posé la question de la nature et du rôle de l'accroche géométrique de l'annotation⁵. Celle-ci peut être discutable, car considérée comme arbitraire, du fait que le pointeur de l'annotation peut ne pas refléter la réalité de l'objet physique. De plus, comme vu au chapitre précédent, une géométrie multisources n'est en soi pas porteuse ni de sens ni d'enseignement (bien au contraire) si l'on en reste au stade de la compilation de nuages de points dans un espace 3D. Il faudrait donc être en mesure, de générer et d'incorporer une géométrie « intelligente » (si ce n'est intelligente). C'est dans cette optique que se positionne MEFI, même si la chronologie des travaux n'a pas permis son intégration dans cette expérience. Cette piste sera très certainement explorée à courte échéance⁶.

L'autre limite principale est relative aux lacunes de fusion entre les données *douces* et *dures*. Si le processus d'annotation permet en partie de mettre en corrélation des données *douces* (c.-à-d. l'information contenue dans le corps de l'annotation) et les données *dures* (i.e les données relatives à la zone spatiale faisant office de cible de l'annotation), la fusion reste incomplète si la source (ici la géométrie) est imparfaite, tel que mis en exergue au point précédent. De plus, l'annotation ne représente qu'un volet des données *douces* permettant d'enrichir la valeur sémantique. L'autre volet s'intéresse au chaînage des données à leurs métadonnées auquel cette approche ne participe pas. En effet, cette expérience comporte de nombreuses lacunes en matière de traçabilité des données, en commençant à la source par l'absence de documentation des modalités d'acquisitions.

De nos jours, la question de l'enrichissement des données est appréhendée seulement en fin de cycle, si cela semble logique pour la piste de l'annotation, la documentation par les métadonnées dès la phase de collecte des sources semblerait un point d'entrée particulièrement pertinent. Le chapitre suivant, amorcé par une démarche novatrice — presque un point de rupture — visant à définir un protocole d'enrichissement des données en amont même de leur acquisition et ouvrant des perspectives d'interprétation intéressantes et permettant d'entrevoir un système d'*enrichissement* tel qu'il sera tenté de le définir dans ce chapitre.

5. Du fait de l'imperfection des nuages de points multimodaux, uniquement un des trois chantiers fut satisfaisant (en raison de la géométrie quasi planaire de l'œuvre Zett).

6. Au même titre que l'enrichissement des sources d'imagerie par métadonnées descriptives (MEMoS) qui fera l'objet du prochain sous-chapitre

6.3 *Approche procédurale d'Enrichissement : MEMoS*

Traduction de l'article de revue internationale [7] : Pamart, A., De Luca, L., Véron, P. (2022). A metadata enriched system for the documentation of multi-modal digital imaging surveys. *Studies in Digital Heritage*, 6(1), 1 :24. <https://doi.org/10.14434/sdh.v6i1.33767>. [7]

6.3.1 *Un système d'enrichissement des métadonnées pour la documentation des relevés par imagerie numérique multimodale*

Dans le domaine des études sur le Patrimoine Numérique, la provenance des données a toujours été une question ouverte et difficile. Comme les objets du patrimoine culturel sont par définition uniques, les méthodes, les pratiques et les stratégies pour construire une documentation numérique ne sont pas homogènes, universelles ou standardisées. Les métadonnées sont une forme minimaliste, mais puissante de pour décrire et conserver la provenance des ressources numériques. Elles sont souvent requises ou obligatoires à un stade avancé d'un projet de patrimoine numérique. L'approche développée reflète une tentative d'intégrer celles-ci en amont, soit dès la capture des données. Un Objet Patrimonial Numérique (OPN) étant essentiellement composé de nos jours à partir de sources multiples (c.-à-d. par relevés d'imagerie multimodale) il s'avère primordial garder une trace des informations significatives pour sa documentation. Cet article expose les aspects méthodologiques et techniques liés au développement en cours d'un système de documentation multimodale enrichie par les métadonnées. MEMoS vise à contribuer aux problèmes de provenance des données dans les études d'imagerie multimodale actuelles. Il explore un moyen de documenter les ensembles de données collectés sur les objets patrimoniaux avec un schéma de métadonnées descriptives polyvalent et inspiré du modèle ontologique W7. Cette expérience est illustrée par plusieurs études de cas qui explorent la possibilité d'encoder ces métadonnées dans des codes-barres 2D disposés directement au sein de la scène capturée. L'article jette les bases d'une méthodologie en trois parties, visant la description, l'encodage et l'affichage de ces ressources pour générer une documentation enrichie.

7. Contributions de tiers collaborateurs : Expérimentation de sérialisation de JSON-LD selon LinkedArtData Model et illustration [VI.16] par Isabelle Cao.

6.3.2 Contextualisation de l'approche

Les métadonnées sont un élément crucial et récurrent tout au long de la chaîne opératoire et du cycle de vie des données de documentation nativement numérique du Patrimoine Culturel (PC). Cependant, la gestion et la conservation de ces métadonnées restent jusqu'à aujourd'hui une tâche difficile et fastidieuse. Dans le contexte des études numériques menées sur le patrimoine culturel matériel au cours des dernières décennies, les métadonnées sont créées, intégrées, partagées, mais aussi et plus souvent tronquées, modifiées ou effacées à chaque étape, de l'acquisition des données jusqu'à leur archivage pérenne. La provenance des données et la traçabilité de la documentation numérique du patrimoine sont mises à rude épreuve. Elle demeure un point clé qui a été abordé à de nombreuses reprises dans divers contextes (conservation, études archéologiques ou historiques). Les outils et les méthodes mobilisées pour créer du patrimoine numérique sont en perpétuelle évolution et doivent s'adapter à une variété de formes, d'échelles, de matériaux et d'environnements. Cela rend difficile ou vain de transposer et de réutiliser des solutions approuvées et efficaces d'un projet à l'autre. De plus, cet écueil se combine avec un large éventail de techniques d'imagerie et de capture en constante évolution, appliquées dans des contextes variables et bien souvent à des fins différentes.

État des lieux des pratiques actuelles

À partir de ce constat, chacun peut prévoir que la probabilité de disposer dans un avenir proche d'une solution unique, générique et standardisée couvrant toutes les applications possibles, actuelles et futures, est proche de zéro. En raison des avancées de la numérisation, la communauté scientifique du patrimoine collecte jour après jour une masse croissante de données hétérogènes, avec un risque élevé que la majorité de ces données ne soient tout simplement pas réutilisables à l'avenir en raison d'un manque de documentation. Un tel scénario n'est pas si étranger, car ces lacunes s'expriment déjà à l'échelle des institutions jusqu'aux opérations *in situ*. Au-delà des questions techniques ou de l'obsolescence technologique, satisfaire l'exigence minimale de la provenance des données est un défi ouvert identifié plus largement au sein de communautés scientifiques [Ram and Liu, 2008], [Ram and Liu, 2009] travaillant sur base de ressources nativement digitales, y compris l'application spécifique de la numérisation 2D/3D [Carboni et al., 2016]. En outre, la provenance des données est dans ce domaine spécifique d'autant plus importante que la plupart des études actuelles combinent des sources multiples, qui impliquent des problèmes stimulants de fusion de données [Ramos and Remondino, 2015], [Al-Barakati et al., 2014].

Descriptif de l'approche

Pour autant, un grand nombre de techniques basées sur l'image appliquées peuvent de nos jours être exploitées pour intégrer directement des métadonnées dans les données résultantes. Différentes solutions telles que le filigrane numérique et l'intégration de codes-barres [Dibble et al., 2007, Hill and Whitty, 2021] existent pour éviter les discontinuités entre les données et les métadonnées. La première citée vise à cacher des informations à des fins de confidentialité ou de sécurité (en plus de soulever la question de l'intégrité des données) tandis que le problème soulevé par cette étude est — à l'inverse — de révéler des informations latentes et précieuses à travers les métadonnées. Ainsi, les codes-barres semblent offrir aujourd'hui des caractéristiques intéressantes (p. ex. robustesse, capacité, facilité d'utilisation) et un niveau élevé de maturité technologique pour la perspective d'une application pour la documentation patrimoniale. Parmi les codes à barres 2D, le code Quick Response [Pandya and Galiyawala, 2014] grâce à sa grande capacité, sa lisibilité à 360° et ses capacités de correction des erreurs/dommages a été expérimenté dans le cadre de cette recherche. Dans cette optique, un système a été conçu et expérimenté afin de documenter une ressource numérique en devenir sur base des relevés photographiques mise en œuvre pour sa création. Ce travail présente une approche polyvalente dédiée au patrimoine, intitulée MEMoS (Metadata Enriched Multimodal dOcumentation System). MEMoS propose une solution conviviale pour intégrer les métadonnées et les paradonnées essentielles au moment de l'acquisition des données. Les premiers résultats sont présentés sur les aspects méthodologiques et des solutions de mise en œuvre technique sont proposées, tandis que la principale contribution liée aux questions de la provenance des données patrimoniales numériques dites « ouvertes » est discutée tout au long du chapitre.

6.3.3 Littérature croisée et revue des progiciels

La communauté du patrimoine culturel numérique tente de se doter depuis une dizaine d'années d'un cadre sémantique partagé pour enrichir et interrelier les données produites par des principes FAIR [Mi and Pollock, 2018]. Cette amélioration du cycle de vie des données se fait actuellement au prix d'une complexification croissante à chaque étape de la chaîne opératoire, de la conservation de la provenance des données jusqu'à la traçabilité des informations [Al-Barakati et al., 2014].

À la croisée des domaines

Animés par le même objectif de recherche, certains domaines, notamment celui des Sciences Naturelles, qui présentent de nombreuses similitudes avec notre domaine de recherche,

semblent plus avancés, ou du moins paraissent converger plus efficacement vers des flux de travail et des méthodologies stabilisés [Huisman et al., 2019]. Depuis un certain temps, les acteurs patrimoniaux tendent à avancer vers la numérisation dite massive [Santos et al., 2017, Hey and Trefethen, 2003]. Il faut cependant admettre l'écart important entre cette branche des SHS et les principaux contributeurs des Cybersciences⁸(physique, astronomie, biologie, chimie ou Sciences de l'Environnement) au regard de l'intégration et de l'ingestion des données liées [Hey and Trefethen, 2003, Simmhan et al., 2005, Schroer and Mudge, 2017]. Outre ces lacunes, les SP partagent pourtant une sorte de *modus operandi*, notamment avec la biologie et les sciences de la terre. En effet, à l'instar de ces domaines, nos scientifiques collectent des échantillons sur le terrain, les transforment en données et les analysent sur place ou en laboratoire pour extraire des connaissances issues de la combinaison de diverses technologies.

Aperçu des solutions existantes

Dans ce contexte, une revue des outils et des logiciels analogues est proposée sous la forme d'un tableau de synthèse (cf. Fig. VI.6). Cette liste certainement non exhaustive de solutions est aussi examinée sous forme textuelle au cours des paragraphes suivants sous le prisme de différentes fonctionnalités importantes pour mener cette étude telles que ;

- l'adaptation au domaine
- la gestion des données multimodales
- l'extension vers les Données Ouvertes Liées (LOD)
- la conformité avec l'OAIS⁹
- les fonctions de visualisation et d'annotation
- le support des codes-barres

La vue d'ensemble synthétique des travaux connexes reprise ci-après n'est pas donnée à des fins de comparaison concurrentielle, mais pour placer notre proposition dans un cadre global où des forces synergiques peuvent émerger de l'utilisation conjointe de ces outils dans l'optique d'améliorer le potentiel de corrélation multimodale. Ainsi, l'hypothèse faite est de s'appuyer sur l'interopérabilité de l'écosystème numérique existant pour renforcer les passerelles entre les outils présents et futurs. *In extenso* de se tenir à distance d'approche visant à contraindre les utilisateurs à s'adapter à une solution unique et ubiquitaire. En

8. De l'anglais e-Science.

9. Modèle de référence pour un système d'information archivistique ouvert, voir : <https://www.cines.fr/archivage/un-concept-des-problematiques/le-modele-de-referance-loais/>

effet, les expériences passées ont montré la difficulté de se focaliser vers une solution générique et standardisée [Simmhan et al., 2005], [Hermon et al., 2012], [Al-Barakati et al., 2014]. Ces tentatives ont déjà démontré la difficulté d'obtenir l'acceptation univoque d'une communauté en se heurtant aux besoins intrinsèquement multidisciplinaires et interdomaines, qui font par ailleurs la richesse des SP.

[...] ¹⁰

	Domain	Type	Open-source	Spatialized Data	Multisource Data	Visualization	Annotation	FAIR Data	Standards compliance	OAIS	Barcodes support
CollecScience	N	Both	Y	Y	Na	Y	Na	N	Y	±	Y
CherOb	Y	Standalone	Y	SIG	±	Y	Y	N		N	Y
DLN:CC	Y	Standalone	Y	N	±	N	N	Y	±	Y	N
Aioli	Y	Web	Not yet	Y	±	Y	Y	±	±	N	Y
Memoria	Y	Web	N	N	Y	±	N	N	N	N	N
Arches	Y	Both	Y	SIG	N	±	Y	Y	Y	Y	N
Archeogrid	Y	Web	Not yet	N	Y	Y	Y	±	Y	Y	N

FIGURE VI.6 – Aperçu des outils et des caractéristiques des progiciels orientés vers la gestion des données patrimoniales.

6.3.3.1 AIOLI (Laboratoire MAP)

Depuis 2014, notre unité de recherche développe AIOLI (www.aioli.cloud), une plateforme web d'annotation sémantique collaborative basée sur la réalité. Un vaste panel de ressources digitales peuvent être liées à une annotation sémantique spatiale ancrée dans une région 2D et 3D (cf. annexe C p.294). Parmi toutes les plateformes destinées

10. Par esprit de synthèse seuls les 3 solutions mobilisées dans cette thèse sont reprises ci-après, les autres ont été placées *pro memoria* dans l'annexe C p.296).

au patrimoine, AIOLI est le seul outil qui permet aux utilisateurs de construire une corrélation spatiale entre les données géométriques et l'enrichissement sémantique [Roussel and De Luca, 2023]. Chaque annotation dessinée directement sur la visionneuse 2D/3D peut être structurée et étiquetée librement ou en faisant appel à des thésaurus et des vocabulaires contrôlés, tandis que les régions correspondantes sont propagées dans la scène et enrichies par des caractéristiques géométriques et statistiques (normales, courbures, boîte englobante, barycentre, palette de couleurs, etc.). Les liens entre MEMoS et AIOLI sont nombreux et pourraient être mis en œuvre assez rapidement puisque le décodeur de QR code est déjà implémenté. Parmi les exemples, citons la géolocalisation automatique, l'invitation de collaborateurs, la gestion de l'état temporel, le chargement d'un modèle prédéfini d'annotations ou de termes provenant de thésaurus, et l'établissement de liens avec des Identificateurs de Ressources Uniformes (URI) et des IDentificateurs Universellement Uniques (UUID). Du côté web sémantique, un pont intéressant avec MEMoS est prévu, car les processus AIOLI, y compris l'annotation, ont été récemment formalisés dans une modélisation CIDOC-CRM.

6.3.3.2 SI MEMORIA (Laboratoire MAP)

Memoria est un système d'information (<http://memoria.gamsau.archi.fr/projet/>) visant à enregistrer le processus par lequel une ressource numérique ou des activités ont été réalisées [Blaise and Dudek, 2017, Dudek et al., 2022]. Memoria est une plateforme web permettant de décrire et de représenter un processus de recherche, notamment dans les sciences historiques et patrimoniales. Les utilisateurs peuvent construire le processus de recherche directement à travers l'interface, y compris en décrivant les outils, les flux de travail et même les choix faits pendant leur travail pour créer une ressource numérique. Memoria est basé sur une initiative interne et collective visant à créer une roue d'activités (et comprenant les relevés numériques multimodaux) avec des définitions correspondantes pour chaque terme et activité. L'interaction avec cette base de données envisagée comme un système basé sur la connaissance se fait directement via le site web ou par le biais de formulaires PDF, où les utilisateurs peuvent ajouter ou modifier les descripteurs pour documenter les instruments, les objets d'études, la couverture temporelle ou les informations liées au format. Des passerelles entre MEMoS et Memoria sont déjà prévues, soit en impliquant MEMoS pour initier ou compléter une description, soit pour utiliser l'interface et la base de données Memoria (auteurs, affiliation, équipement, etc.) afin de les conformer à MEMoS.

6.3.3.3 ArchéoGRID (ArchéoVision)

ArchéoGRID est l'interface web (www.archeogrid.fr) d'un EDD qui facilite et encourage la gestion collaborative de la documentation pour les projets 3D dans les humanités numériques alliant le partage des données, la publication et la préformalisation d'une archive pérenne. Depuis plus d'une décennie, Archéogrid est utilisé comme portail pour accéder et explorer des ressources numériques sémantiquement enrichies selon les différents protocoles d'échange standard en vigueur (DublinCore, RDFa, OAI). Il permet aux utilisateurs de visualiser, de parcourir, d'interroger et d'annoter la documentation recueillie en fonction de ses métadonnées descriptives remplies manuellement ou par lots au niveau des fichiers, des objets, des sites ou des collections. Il a pour objectif d'héberger des données textuelles, iconographiques, mais aussi scientifiques ou de recherche, y compris des modèles 3D, et de les préparer à être déposées dans le [Conservatoire National de données 3D](#), avant d'être archivées à long terme conformément aux exigences du CINES, grâce à un logiciel autonome (aLTAG3D). ArchéoGRID est en accès libre et les données sont hébergées dans [HumaNum](#), une infrastructure numérique des sciences humaines avec laquelle des méthodes de moissonnage à grande échelle sont actuellement envisagées à l'échelle européenne et internationale.

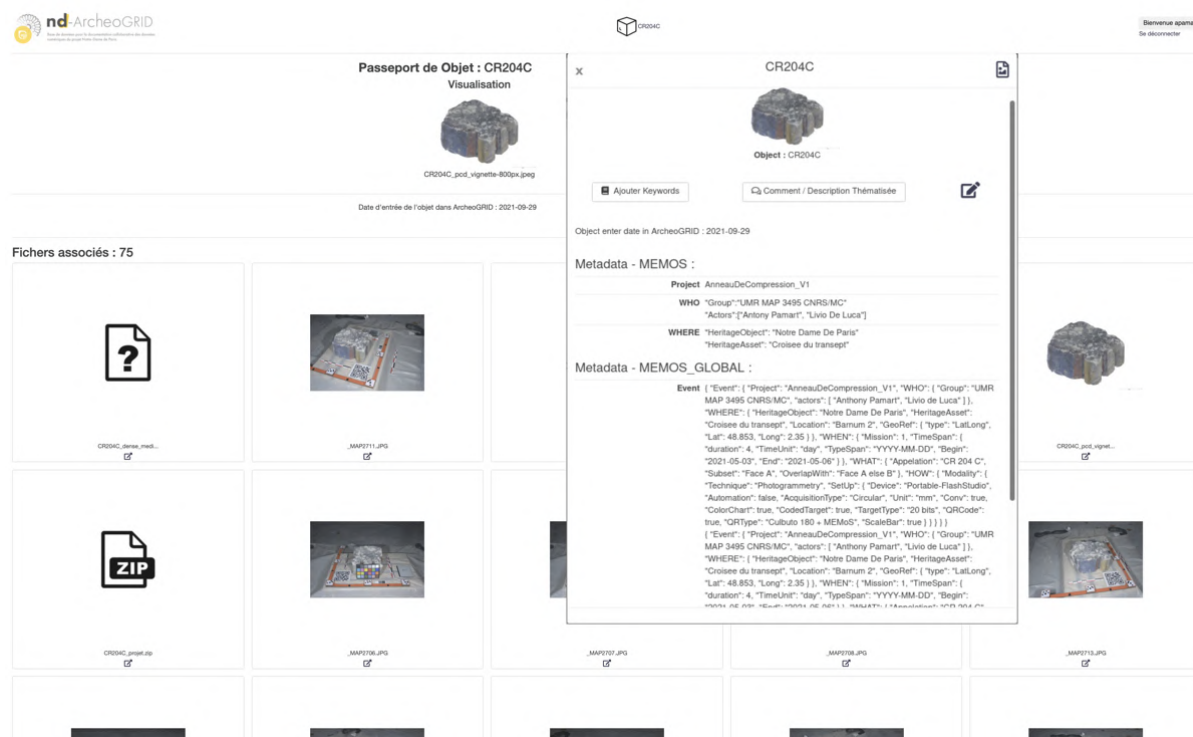


FIGURE VI.7 – Capture d'écran de la plateforme ND-ArchéoGRID montrant le travail en cours de remplissage et d'association automatisés de métadonnées basés sur les MEMoS.

6.3.4 La multimodalité dans les études du patrimoine culturel numérique

Une double hypothèse doit être prise en considération pour élaborer une définition un tant soit peu précise de la multimodalité dans notre domaine d'étude. Premièrement, il y a une tendance actuelle des pratiques basées sur la numérisation à passer d'un flux de travail linéaire à un flux cyclique [Limp et al., 2010]. En effet, les projets innovants passés et actuels, y compris les initiatives à l'échelle européenne (COST-COSCH, SCAN4RECO, ITN-CHANGE), ne sont plus des applications ponctuelles et isolées sur des cas d'études circonscrits visant *in fine* à construire et à explorer un modèle numérique omnipotent à partir d'une source unique. Au contraire, l'innovation en matière de PN semble liée à des scénarios toujours plus complexes dans lesquels les paradigmes de modélisation sont utilisés pour représenter, renouveler et discuter dans le temps les connaissances ajoutées par des reconstructions virtuelles dynamiques et multisources. Par conséquent, il serait trop limitant de considérer nos méthodes de production comme des chaînes opérationnelles simples d'entrée/sortie, mais il faudrait plutôt les envisager comme faisant partie d'un système. L'implication du principe d'une approche systémique aide à embrasser toute la multiplicité et la complexité qui définissent les pratiques actuelles et permet de justifier notre définition de la multimodalité[...]¹¹.

6.3.5 MEMoS, un système de documentation multimodale avec des métadonnées enrichies

MEMoS est actuellement une approche expérimentale séquencée en trois parties pour successivement *Décrire*, *Encoder* et *Exposer* des métadonnées significatives attachées à un ensemble d'images au moment de leur capture. La description est effectuée au préalable à l'aide d'une structure inspirée du modèle ontologique W7 (cf. Fig. VI.8). L'encodage est réalisé à l'aide de codes à barres 2D des plus communs et simples d'utilisation. L'*Affichage* est repris dans la section 6.3.5.3 suivante, illustré par les utilisations déjà faites de MEMoS dans différents contextes d'étude. Les résultats présentés ci-dessous ont été obtenus à l'aide de plusieurs bibliothèques et logiciels. Cependant, MEMoS pourrait bénéficier d'un prototypage logiciel et matériel dédié, tel que synthétisé dans l'illustration VI.8 ci-après.

11. Le texte original de l'article est tronqué pour éviter toute redondance avec les propos sur la multimodalité en section 1.2 et 2.1.

6.3. APPROCHE PROCÉDURALE D'ENRICHISSEMENT : MEMOS

Une analogie au claquoir cinématographique La motivation derrière l'utilisation de codes-barres pour incorporer des métadonnées dans la phase d'acquisition prends source par une analogie avec le célèbre « claquoir »¹² utilisé dans l'industrie cinématographique et servant deux principaux objectifs. Premièrement, l'ardoise elle-même sert à conserver une trace des informations utiles au tournage de la vidéo, correspondant à notre schéma de métadonnées encodé dans un QR code. Deuxièmement, le bruit du claquement indique le début d'une séquence, correspondant dans notre scénario à une nouvelle capture de données. L'analogie du claquoir peut également être étendue à ses étapes productives. De la même manière qu'elle est utilisée pour le montage de films, la détection de QR codes peut aider à structurer, étiqueter, trier et filtrer des séquences d'ensembles de données complexes en fonction de leurs métadonnées liées.

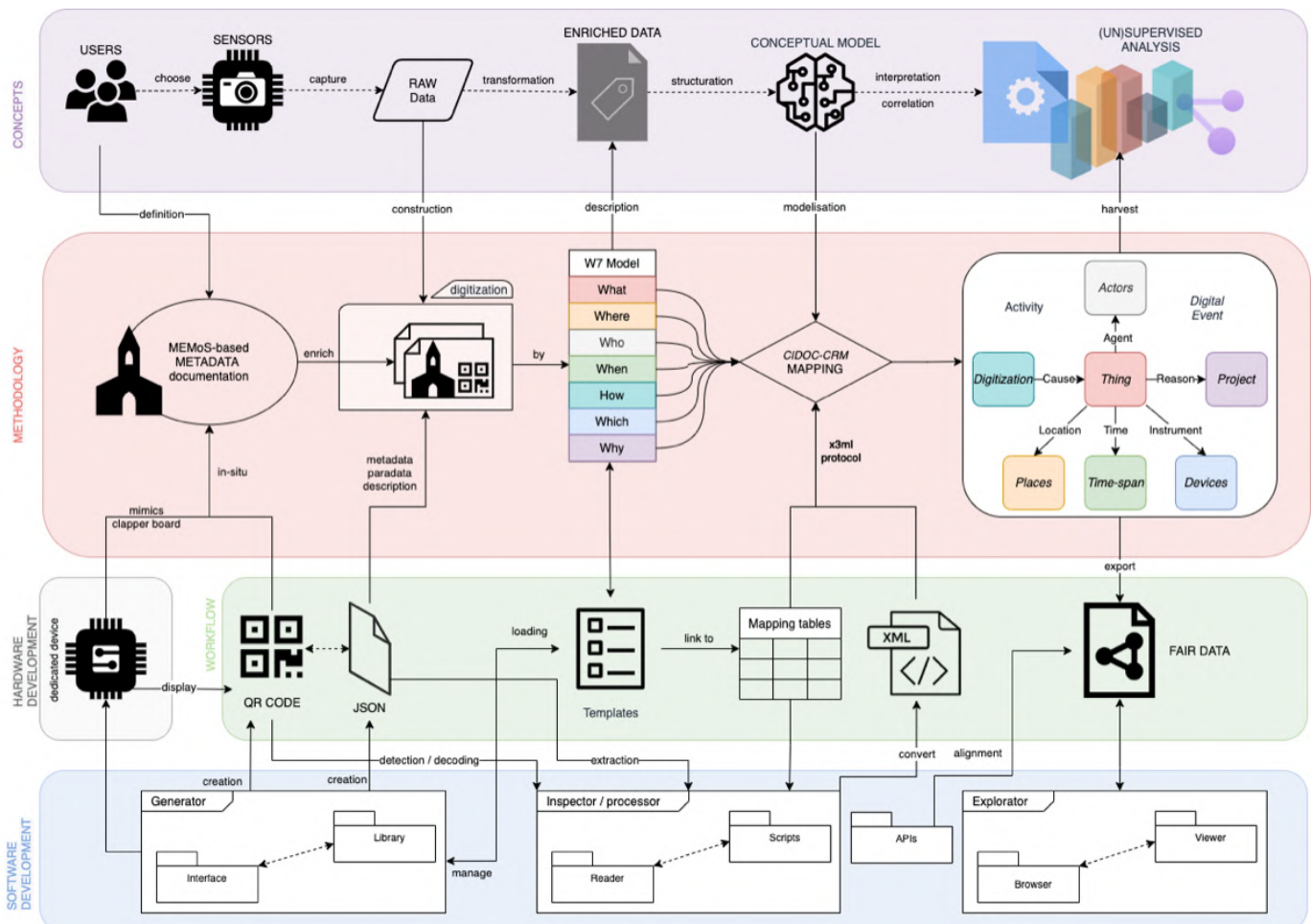


FIGURE VI.8 – Schéma synthétique de l'écosystème attendu de MEMoS.

12. Plus connu sous le nom anglais de "clapperboard".

6.3.5.1 DÉCRIRE : une structure de description de métadonnées inspirée du modèle W7

Dans le domaine du patrimoine au sens large, les métadonnées s'adressent essentiellement aux institutions dites de mémoire (musées, bibliothèques, centres de documentation) tandis que les considérations techniques sous-jacentes sont l'apanage des scientifiques des données. De nos jours, il subsiste donc un fossé important entre le créateur/fournisseur de ces données (*sur le terrain*) et le détenteur/utilisateur des métadonnées afférentes (*en bibliothèque*).

Métadonnées VS Standardisation

Des tentatives pour converger vers une solution généralisée et standardisée ont déjà été explorées [Hermon et al., 2012, Steiner and Koch, 2015], sans vraiment parvenir à un consensus. Pour autant, certaines normes sont plus couramment utilisées telles que le Dublin Core, MIDAS, POLIS, LIDO [Pitzalis et al., 2011] et CARARE 2.0 [D'Andrea and Fernie, 2013]. Cependant, la plupart d'entre elles présentent de fortes limitations pour leur adaptation sans accroc aux acquisitions multimodales, c'est pourquoi une méthode inspirée de DICOM a été récemment présentée [Daffara et al., 2018], mais elle a été conçue dans un but spécifique d'analyse du vieillissement. Pour les utilisateurs, la contrainte de devoir renseigner un champ obligatoire (surtout si celui-ci est inutilisé ou non applicable) est le point négatif commun de tous les formulaires de remplissage de métadonnées techniques et descriptives. Les photographies, les images ou les métadonnées liées aux ressources visuelles sont généralement traitées par le biais de la norme EXIF, tandis que leur association avec d'autres normes comme XMP ou IPTC [Saleh, 2018] fait l'objet d'un débat ouvert [Reser, 2012]. Néanmoins, ces formats sont conçus pour les métadonnées purement techniques et ne peuvent pas englober d'autres types de paradonnées mobilisées pour les études concernées. Ces normes sont généralement conçues dans le but de servir une application spécifique, ce qui les rend inévitablement peu applicables à d'autres objectifs de recherche, y compris le présent travail. Par conséquent, au lieu de contourner les normes existantes et leurs limites respectées, le choix a été fait de faire appel à une structure éloquente, pragmatique et flexible pour organiser les métadonnées.

Justification du modèle W7

Le modèle W7 a été conçu à des fins de provenance des données avec l'ambition d'être suffisamment flexible pour des utilisations interdomaines [Liu and Ram, 2017]. Il est intéressant de noter que le modèle W7 a également été choisi dans d'autres domaines tels

que la microscopie biologique et spécifiquement pour préparer les données à des utilisations FAIR [Huisman et al., 2019]. Ainsi, nous pouvons garantir que le modèle semble adapté à la multidisciplinarité des Sciences du Patrimoine et qu'il pourrait être extensible au-delà du contexte de cette étude. Il est constitué de sept composants interconnectés, à savoir : quoi, quand, où, comment, qui, quoi et pourquoi. Ces composants peuvent être mis en correspondance au niveau ontologique avec des « concepts » de classes supérieures. Dans le contexte de notre application, ces éléments de balises peuvent contenir des informations significatives pour décrire une ressource du patrimoine numérique, en utilisant la structure suivante (cf. Fig VI.10 et annexe C p.300) :

- Activité (événement numérique)
 - Who : définis à un niveau sémantique les « agents » impliqués et peut se référer à des institutions, des unités de recherche, des groupes ou des experts individuels.
 - Where : est utilisé pour décrire le concept d'espace, visant à localiser l'emplacement de l'objet physique et/ou à délimiter la zone de l'enquête.
 - When : est lié aux informations temporelles comme moyen de délimiter la durée ou les aspects temporels de l'événement décrit ou les informations temporelles sur l'artefact.
 - What : fournis des informations sur l'objet ou la partie de l'objet patrimonial documenté.
 - Which : est la section consacrée aux renseignements afférents aux matériels/logiciels mobilisés tels que les instruments, les dispositifs ou les applications et autres supports utilisés pour la collecte des données.
 - How : englobe la sphère de l'« action » et permet d'exposer les méthodes, techniques ou procédures utilisées.
 - Why : est consacrée à l'inclusion des contenus contextuels et des objectifs ou de toute information ayant motivé l'action réalisée. Le spectre de cette section est plus vague que le précédent, mais peut être rempli d'éléments liés au projet lui-même ou au résultat attendu de l'ensemble de données.

De cette façon, toute activité, comprise comme un événement numérique flexible (projet, mission, ensemble de capture, sous-ensemble ou même ressource unique) est donc défini par les relations croisées entre les sept éléments, enrichis de métadonnées descriptives de forme libre et dépendante du contexte.

Dépendance au « mapping »

En mobilisant cette structure inspirée du W7, le choix a été fait de s'appuyer sur les capacités des métadonnées pour l'interopérabilité au lieu de contraindre l'utilisation d'une norme ou d'en imposer une nouvelle. Le choix de ce modèle flexible et ouvert n'empêche en rien l'utilisation de différentes classes de métadonnées normalisées. La non-rigidité du système MEMoS s'accompagne également d'une limite importante en raison du risque plus élevé de métadonnées dispersées ou hétérogènes. Notre proposition se base sur la facilité d'adoption de la structure W7 au niveau des sections avec un alignement CIDOC à usage générique (cf. Fig. VI.9), en offrant des contraintes minimales pour les différents besoins des utilisateurs (équipe, projet ou domaine d'expertise). Par la suite, MEMOS pourraient dériver vers un modèle *sui generis*, défini à l'échelle d'une communauté d'utilisateurs pour améliorer et approfondir le niveau de mapping¹³ à des cas d'application plus spécifiques.

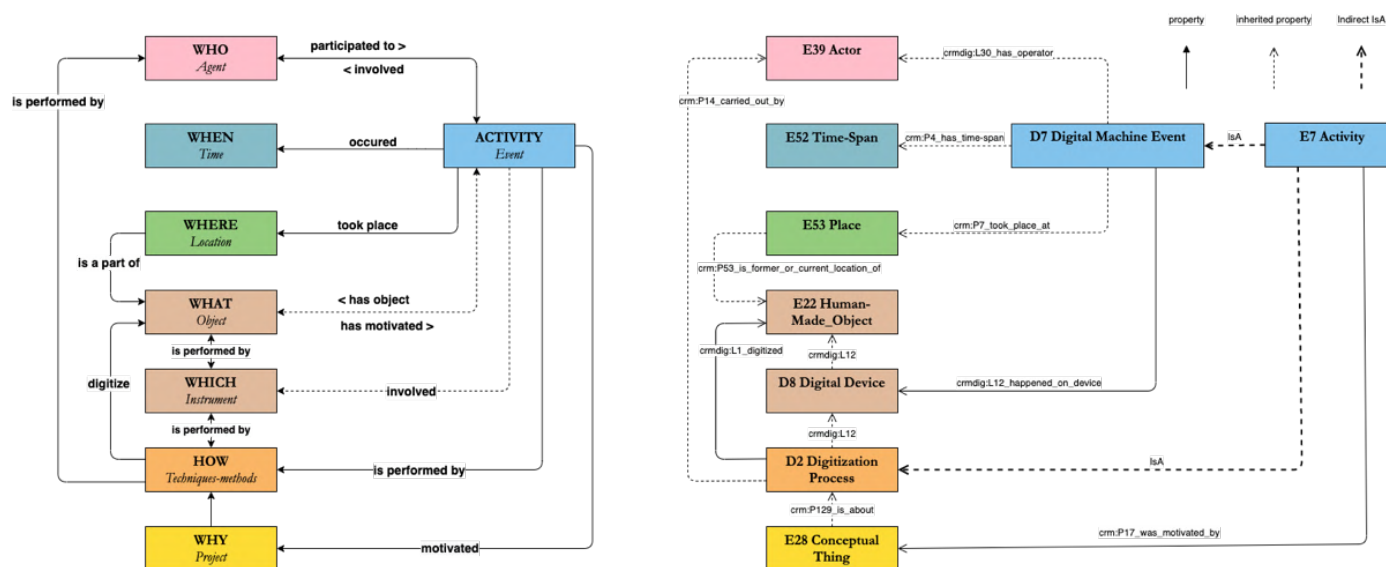


FIGURE VI.9 – Exemple de schéma préliminaire (à gauche) pour dériver une description MEMoS (niveau section) en un mapping conforme à l'ontologie CIDOC-CRM (à droite).

13. (Terme Informatique) Plus génériquement, mise en correspondance : toute opération établissant une correspondance entre les éléments d'un ensemble de données et ceux d'un second (changement de système de coordonnées, assignation de fonctionnalités à des modules, association de champs textuels avec une ontologie, etc.). Source : <https://fr.wiktionary.org/wiki/mapping>

6.3.5.2 ENCODER : une solution conviviale et polyvalente basée sur les codes à barres 2D

Les codes à barres 2D constituent un moyen efficace et simple d'encoder des données, mais restent fortement limités en ce qui concerne la capacité de stockage. Il faut donc trouver une solution optimale pour maximiser le volume des métadonnées encodées tout en préservant un bon résultat de décodage et d'extraction. La première idée était de raccourcir le flux de données en intégrant une description déjà FAIRisée (p. ex. en RDF ou en sérialisation JSON-LD). En revanche, cela implique d'une la préexistence d'un cadre sémantique stable avant la capture des données (ce qui est dans les faits, rarement le cas). D'autre part, la verbosité de ces formats s'est imposée comme une limite. Pour la même raison, l'alternative des langages de balisage (XML) particulièrement prédisposés et usités pour la normalisation des échanges de métadonnées descriptives a été rejetée. La nécessité de balises répétées implique un pourcentage élevé de caractères non utiles à l'enrichissement. Le meilleur compromis a été trouvé avec le format JSON rassemblant de multiples avantages (cf. Fig VI.10 et annexe C p.300), principalement : sa syntaxe, le typage des données, la minification et les facilités d'analyse¹⁴ et de conversion. Les travaux futurs tenteront d'étendre les formats d'entrée possibles à des alternatives encore plus conviviales telles que le YAML ou CSV.

Revue des codes-barres 2D

Une brève revue des codes à barres matriciels 2D a été effectuée afin de s'orienter vers la solution la plus appropriée. Le premier critère de sélection est la plus grande capacité de stockage, car l'objectif est d'intégrer un système de description de métadonnées le plus riche possible. Le deuxième critère est l'accessibilité, car certaines solutions demeurent soumises à des licences propriétaires, par conséquent restrictives. Le dernier critère est le comportement radio colorimétrique, car le code-barres doit être stable dans un environnement multilumières ou en prévision d'une utilisation potentielle avec des dispositifs multispectraux. Le plus connu est le « Quick Response Code » (QR code), qui présente l'avantage d'être largement diffusé et accessible (c.-à-d. large choix d'application ou de bibliothèques pour le codage/décodage). Il dispose d'une capacité maximale équivalente de 177x177 modules¹⁵, faisant que la taille du symbole, si elle est combinée à un taux de correction d'erreurs élevé (essentiellement la redondance des données), pourrait conduire

14. Parsing

15. Dans laquelle, un module représente une unité de stockage dont l'étendue bidimensionnel permet de stocker un maximum de 4,269 caractères alpha numérique soit \pm 3KB de données.

dans certains cas à un QR code plus imposant que l'objet à numériser. Ce problème pourrait être résolu en utilisant la méthode de fractionnement des QR codes. Si la capacité devient une limite, certaines techniques comme le multiplexage pourraient aussi être exploitées [Abas et al., 2016]. La société Denso Wave a développé le iQR code avec une capacité étendue de 80% par rapport au QR code classique ; cette technologie permet d'intégrer jusqu'à 40 000 caractères dans un module de 422x422. Ou elle peut être utilisée inversement pour réduire la taille d'un symbole à des fins d'affichage (c.-à-d. adaptation au code-barres et à l'échelle de la configuration). Contrairement à son prédécesseur, iQR n'a pas été diffusé en Open Source, ce qui pourrait limiter son utilisation, son développement et la diffusion de MEMoS basée sur cette technologie. Pour le développement de Microsoft Tag Service, la multinationale a présenté le High-CapacityColor Barcode (HCCB) [Grillo et al., 2010]¹⁶ et plus tard le HCC2D, mais cette solution prometteuse a été abandonnée en 2015 et donc obsolète. Plus récemment, d'autres solutions [Melgar and Farias, 2019] dont Just Another Barcode (JAB) [Berchtold et al., 2020] a réintroduit la polychromie dans les codes-barres 2D. Pour un volume de données identique et un taux de compensation d'erreurs comparable, un QR code devrait être 2,5 fois plus grand. Le code source de JAB a également l'avantage d'être publié sous GNU LPGL. Pour ce travail préparatoire, les QR codes monochromatiques ont été choisis, mais JAB présente une alternative intéressante, surtout si sa robustesse est validée avec l'imagerie multibande.

QR code statique VS dynamique

Au stade actuel du développement, des bibliothèques Python (PyZbar ou qrcode 7.3.1) ou des solutions gratuites (QR-Studio, InkScape) ont été testées pour générer des codes-barres à partir d'un seul ou d'un lot de fichiers JSON. De plus, pour cette étape préliminaire, le choix d'une solution statique a été fait. Il présente l'avantage de (dé)crypter au sein des codes-barres du contenu directement lisible par l'homme (c.-à-d. intégration de fichiers JSON). Cependant, l'alternative d'un QR code dynamique, dans lequel une simple URL ou URI est encodée à la place des chaînes de caractères, pourrait offrir des métadonnées modifiables au prix d'une dépendance à un système en ligne. Pour notre application, un code-barres pourrait être utilisé pour intégrer un identifiant unique (UUID) lié à une plateforme MEMoS permettant de créer et d'éditer de manière plus flexible et collaborative les champs de métadonnées. Cette solution aurait également l'avantage de limiter les besoins en capacité et donc la possibilité d'utiliser des codes à barres plus compacts et plus robustes (p. ex. semacode ou datamatrix).

16. Basé sur 4 ou 8 couleurs, étendant ainsi la densité de stockage jusqu'à 2 KB/po² contre 0.627 KB/po² pour le QR Code.

6.3. APPROCHE PROCÉDURALE D'ENRICHISSEMENT : MEMOS

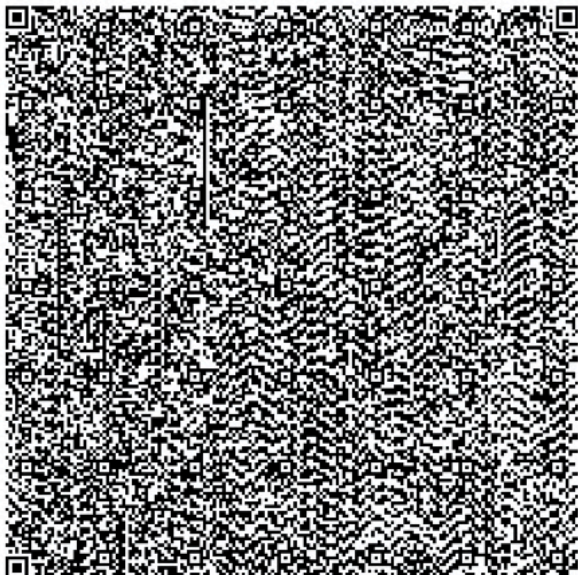
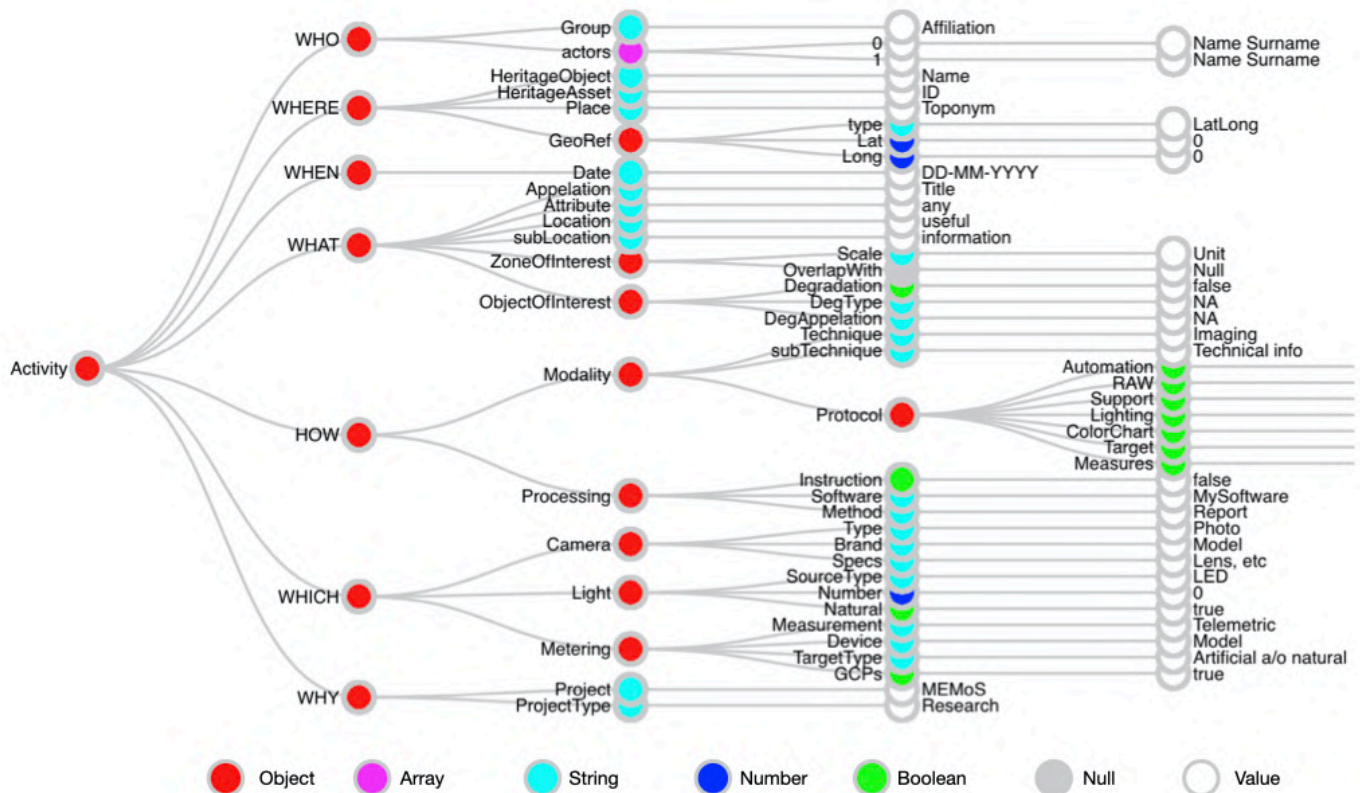


FIGURE VI.10 – Exemple de modèle MEMoS exprimé dans une structure JSON avec le type de clés et les valeurs (en haut) encodé dans un code-barres type QR code (en bas à gauche) et type JAB (en bas à droite). Voir aussi modèle JSON en annexe C p.300

6.3.5.3 EXPOSER : Retour d'expériences sur des cas d'utilisations concrets

Dans cette section, quelques études de cas illustrées sont proposées pour démontrer la polyvalence et l'opérativité de MEMoS — malgré son état de prototype — afin de documenter certaines missions et expérimentations récemment menées. Ces cas d'utilisation sont issus de véritables projets et campagnes d'acquisition du laboratoire MAP et de son cercle de collaboration, pour lesquels MEMoS a été utilisé afin de documenter les phases d'acquisition de données à différents niveaux.

Documentation à l'échelle du projet ou de la mission ponctuelle :

Pour cette expérience réalisée en novembre 2019, un QR code unique a été intégré à une mire de calibration avec d'autres cibles codées. La mire a été déplacée dans différentes zones du relevé, chacune représentant une orthoimage détaillée d'une scène de la peinture murale de la face sud préalablement relevée par une orthomosaïque globale. L'objectif était de tester la détection et le décodage d'un QR code en variant les capteurs et les résolutions. Le QR code intégrait une synthèse d'informations basiques afin de les mémoriser. La structuration des métadonnées était envisagée pour faciliter le tri et la gestion des données de la collection numérique de la chapelle Notre-Dame des Fontaines (NDF), détaillée en sous-section [6.3.5.3](#).

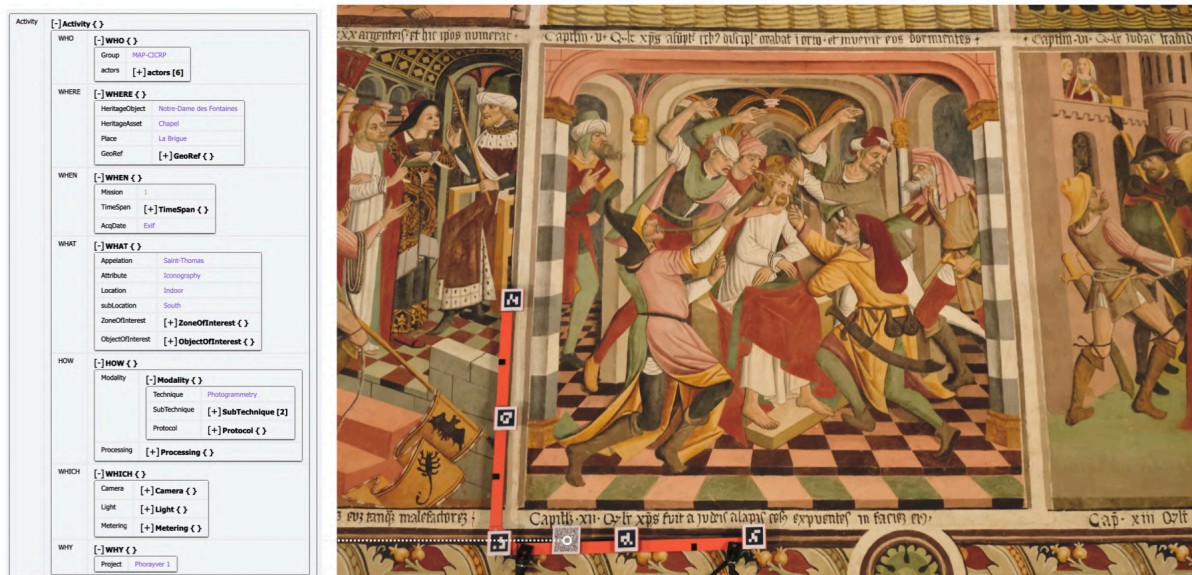


FIGURE VI.11 – Exemple de QR code MEMoS intégré à une barre d'échelle photogrammétrique pour documenter une campagne d'acquisition d'orthophotomosaïques.

Documentation à l'échelle de l'objet :

Ce scénario est illustré par des ensembles de données provenant d'un séminaire pédagogique autour de l'imagerie scientifique coordonné par le Campus suisse de Conservation et de Restauration. En guise de travaux pratiques, chaque groupe d'étudiants devait analyser différents objets avec plusieurs techniques d'imagerie (dont la photogrammétrie, la RTI et la thermographie infrarouge). L'expérimentation MEMoS a consisté à encoder lors de l'acquisition, les métadonnées et les paradonnées relatives au groupe, à la technique et à l'objet documenté. À titre d'exemple, les informations telles que les matériaux, les techniques de réalisation et les altérations ont été intégrées, car l'objectif de l'expérience était d'évaluer et de comprendre quelles techniques permettent ou aident à l'interprétation des phénomènes et des mécanismes de dégradation observables (cf. section WHAT, Fig. VI.12).

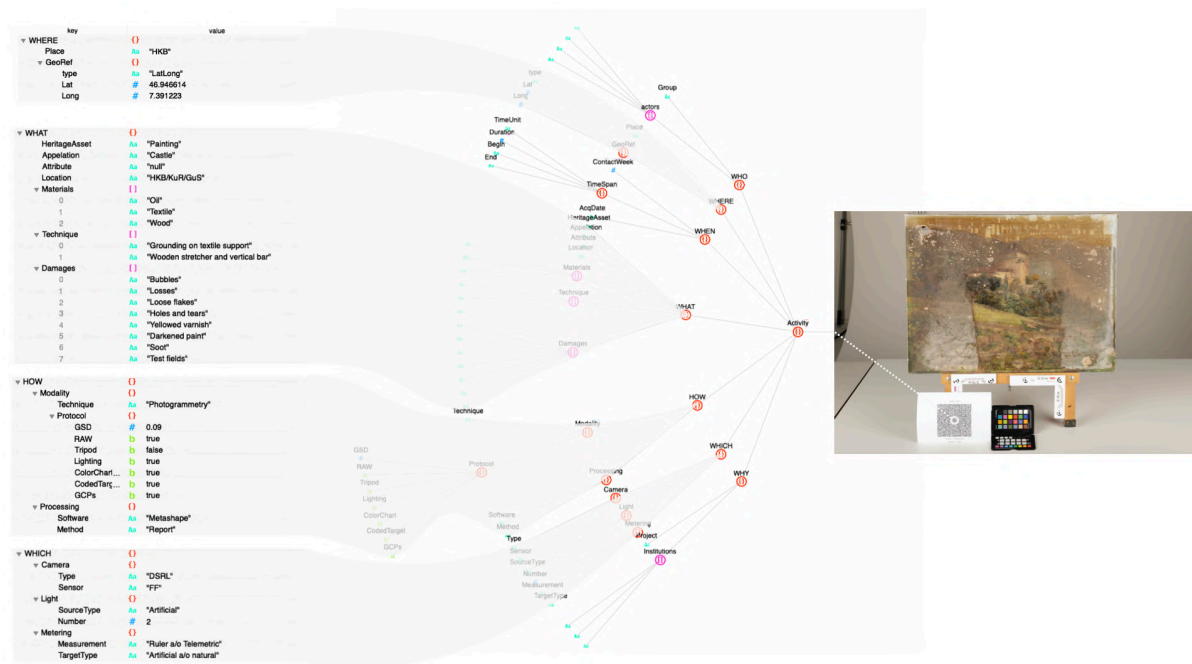


FIGURE VI.12 – Exemple de QR codeMEMoS et de métadonnées intégrées capturées à côté d'une carte colorimétrique avant l'acquisition photogrammétrique.

Documentation à l'échelle de la collection :

Depuis l'incendie de Notre-Dame de Paris, le laboratoire MAP a été impliqué dans le chantier scientifique afin de fournir, par le biais des moyens techniques de numérisation, des

6.3. APPROCHE PROCÉDURALE D'ENRICHISSEMENT : MEMOS

informations significatives et utiles pour le processus de restauration et de reconstruction en cours. Toutes les données collectées ont pour finalité d'être intégrées dans un double numérique - librement accessible à tous les scientifiques impliqués. [...] Le laboratoire MAP a été chargé, entre autres, de numériser les fragments architecturaux effondrés de la croisée du transept. Chaque fragment des arcs doubleaux et de l'anneau de compression révéla lors du dégagement à l'ambition d'être replacé dans sa position initiale au sein du double numérique. Dans ce contexte, chaque modèle 3D doit être suivi et associé à des ressources croisées (p. ex. photos documentaires, jeu d'images photogrammétriques, base de données, etc.) tout au long de l'anastylose virtuelle. À cette fin, MEMoS a été déployé pour générer, dès l'étape d'acquisition, un schéma de métadonnées garantissant la provenance et la traçabilité des données, orchestrées au sein de l'écosystème NDame (cf. Fig. VI.13). Un résultat de cette étude de cas, portant sur l'automatisation du remplissage des métadonnées dans NdArchéoGRID, est détaillé dans la section suivante et illustré en Fig. VI.7

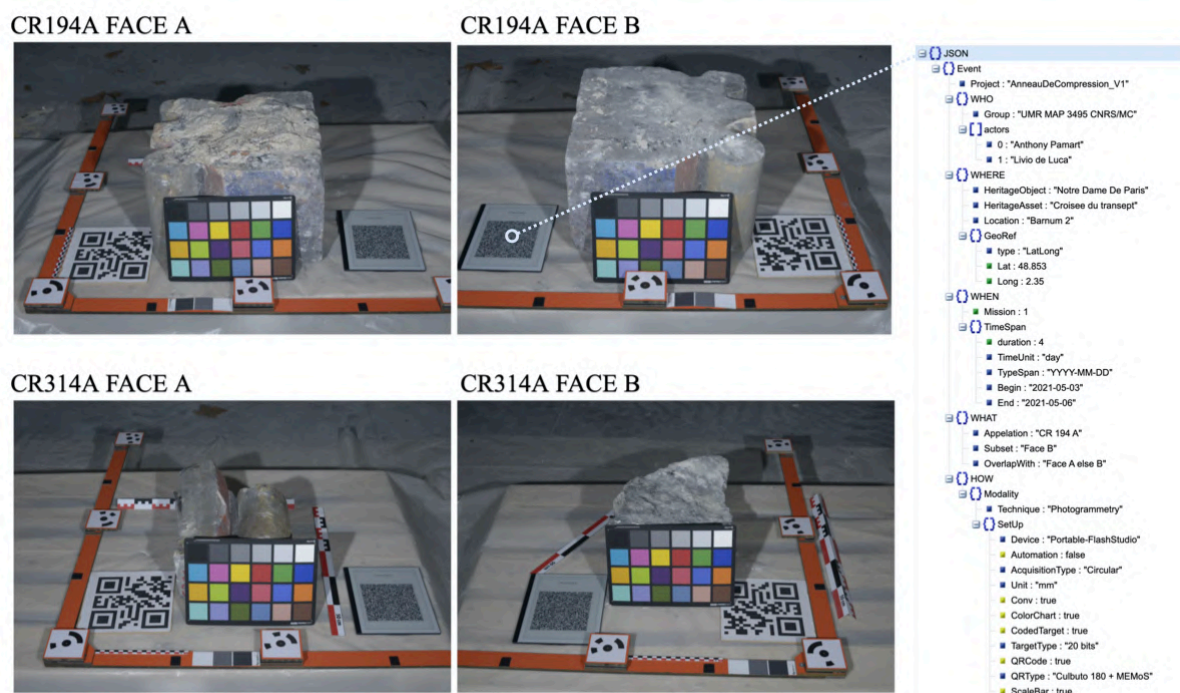


FIGURE VI.13 – Exemple de QR codes MEMoS affichés sur un dispositif e-ink et intégrés à un dispositif photogrammétrique pour documenter uniformément toute une collection de vestiges lapidaires de Notre-Dame de Paris.

Documentation à l'échelle d'ensembles de données :

Comme mentionné dans les sections précédentes, l'objectif principal de MEMoS est la documentation de relevés numériques dits multimodaux. Nos pratiques actuelles impliquent en effet généralement plusieurs techniques, experts, échelles ou couches spectrales pour documenter les états temporels d'un OP. Ces campagnes d'acquisition de données sont généralement complexes en raison du nombre d'appareils et de l'expertise nécessaire pour éviter les écueils ultérieurs en phase de fusion de données. Dans la pratique, les relevés multimodaux sont en fait séquencés ou structurés de manière similaire à un tournage, d'où l'analogie proposée avec le clap cinématographique. L'exemple ci-dessous est issu d'une acquisition multimodale « simple » réalisée dans la chapelle Saint-Martial du Palais des Papes d'Avignon. Elle combine un balayage laser, un relevé panoramique et différentes séquences de photogrammétrie rapprochée. Chaque sous-ensemble du protocole d'acquisition de données (respectivement les parties A, B, C, D et E de l'illustration [VI.14](#)) a été documenté avec les métadonnées associées, codées dans un code-barres, exposé et capturé *in situ* pendant l'étape d'acquisition correspondante.

Documentation multi-niveaux :

L'expérience MEMoS étant une initiative récente, un scénario complexe a été simulé en décrivant *a posteriori* de nombreuses acquisitions réalisées dans la chapelle NDF de La Brigue entre 2016 à 2019. Durant cette période, cet édifice a été inclus dans différents programmes de recherche au cours desquels un important volume de données a été acquis. Bien qu'elles fût collectées par la même équipe et quelques partenaires proches, à la fréquence d'une à deux missions par an, une grande quantité des données reste inexploitée, non fusionnée ou même non traitée. Dans ce contexte, l'ensemble des jeux de données ont été décrits rétrospectivement via MEMoS afin de mémoriser ce qui a été fait, où, quand, par qui, en utilisant quelle technique et dans quel but. Une fois compilées et combinées entre elles, les collections de métadonnées en format JSON sont exploitées pour donner une vue d'ensemble et une meilleure compréhension de la documentation numérique (c.f. comparaison des deltas présentée au sein de l'illustration [VI.15](#)). Les travaux futurs se concentreront sur les représentations basées sur InfoViz pour comprendre, gérer, explorer ou exploiter au mieux la documentation numérique multimodale. L'idée derrière ce travail est d'évaluer MEMoS pour un double usage *a priori* en encodant les métadonnées directement sur les ensembles de capture, ou pour documenter *a posteriori* les activités de numérisation passées dans une approche rétrospective.

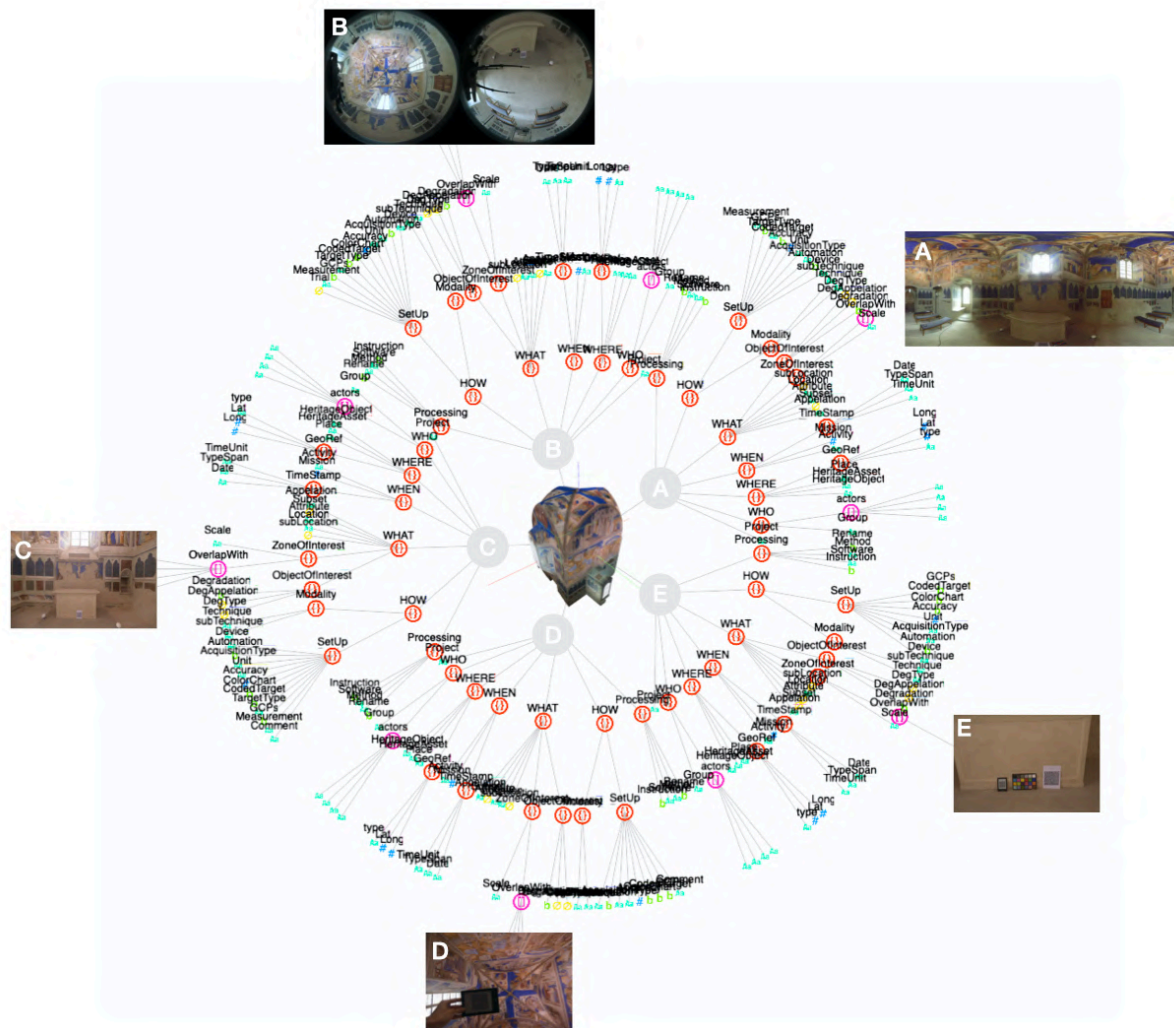


FIGURE VI.14 – Exemple de visualisation basée MEMoS représentant une séquence de relevés d'imagerie multimodale composée de TLS (A), de photogrammétrie 360 (B), de photogrammétrie rapprochée sur les murs (C), les voûtes (D) et de gros plans sur la peinture murale et des éléments de détails (E).

6.3.6 Limites et perspectives

Bien que la mise en œuvre technique sur le plan matériel comme logiciel soit actuellement à un stade précoce, MEMoS a déjà fourni des résultats prometteurs. Outre la valeur ajoutée des ensembles de données auto documentés illustrés ci-dessus, d'autres résultats ont été expérimentés. Sans surprise, MEMoS apparait comme une méthode permettant de gagner du temps pour trier, organiser et même appliquer certaines étapes de prétraitement en exploitant le lien entre les données et les métadonnées.

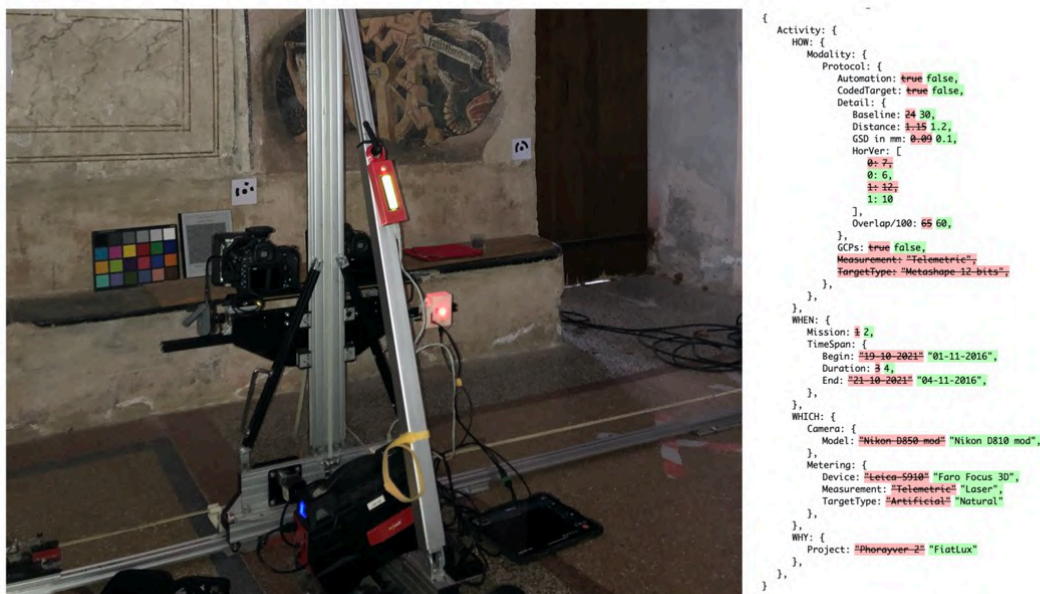


FIGURE VI.15 – Mise en évidence des différences entre deux acquisitions multi-temporelles sur la même zone à partir d'un appareil photogrammétrique multispectral basée sur la comparaison de plusieurs JSON.

Une aide à l'autocomplétion

Les résultats les plus intéressants ont été obtenus avec la documentation à l'échelle de la collection appliquée à la numérisation des vestiges lapidaires de Notre-Dame de Paris (cf. Fig. VI.7 p. 208 et VI.13). Dans ce contexte, MEMoS a été intégré de façon expérimentale en tant que schéma de métadonnées au sein de l'EDD ArchéoGRID. Ainsi, pour chaque fichier JSON détecté dans l'arborescence, une routine spécifique a été développée pour créer une collection numérique associant un objet virtuel et toutes ses ressources correspondantes (p. ex. images, nuages de points, etc.) avec les métadonnées étendues décrites à l'aide de MEMoS. De toute évidence, MEMoS est orienté vers les relevés issus de techniques basées sur la photographie (photogrammétrie, photographie numérique et photographie technique), même si certains travaux utilisent des codes-barres 2D apposés sur les images [Hill and Whitty, 2021] comme moyen possible d'étendre la compatibilité à d'autres techniques d'imagerie. D'un point de vue technique, les principales limitations sont liées à l'incertitude d'un décodage complet ou réussi, nos expériences ont montré quelques difficultés dans le cas d'approches multirésolution et/ou multispectrales. Le développement d'un écosystème dédié (cf. Fig. VI.8) permettrait d'être en mesure d'adapter la taille inadéquate des symboles en fonction de la définition du capteur et de l'échelle d'observation.

Aptitude vis-à-vis du LOD

D'un point de vue méthodologique, la non-rigidité des étiquettes de métadonnées intégrées dans une structure MEMoS pourrait contribuer aux problèmes de qualité et d'hétérogénéité des métadonnées. Sur ce point, notre position est que des métadonnées non homogènes sont toujours préférables à des données non documentées. Tous les choix techniques mentionnés ci-dessus (format de fichier, verbosité et structure des métadonnées) ont également été motivés pour anticiper l'utilité du système de documentation descriptive MEMoS vers le défi des données ouvertes. L'alignement de MEMoS sur les principes de FAIR et des sciences ouvertes liées est déjà un travail en cours. D'une part, notre approche est libérée d'une formalisation trop contraignante dans la saisie des métadonnées imposée par d'autres normes. D'autre part, la flexibilité supposée du modèle W7 devra également être évaluée avec des procédures de mise en correspondance et d'alignement avec un schéma de métadonnées standardisé (p. ex. Dublin Core, EDM, etc.). Cette discussion ouverte et cruciale sur le formalisme de MEMoS et son alignement avec d'autres normes, actuellement en phase préparatoire, sera développée dans de futurs travaux. Cependant, notre approche s'inspire d'un modèle conceptuel à spectre large développé ces dernières années à différents niveaux (acquisition, traitement, annotation, etc.) pour créer et améliorer la provenance des données et la documentation numérique sémantiquement enrichie [Carboni et al., 2016]. Comme preuve de concept, à partir de la cartographie W7 basée sur CIDOC-CRM présentée dans l'illustration VI.9, un essai a été fait pour dériver le contenu JSON de MEMoS dans un format orienté vers le web sémantique (cf. Fig. VI.16).

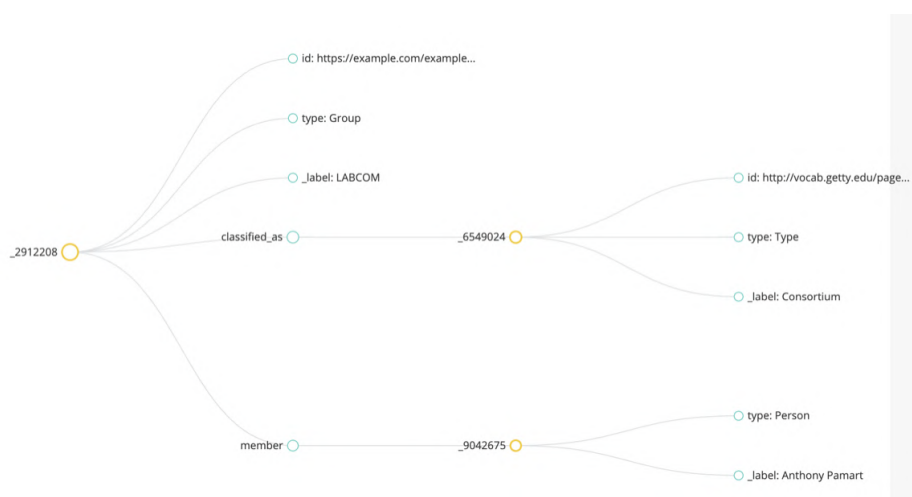


FIGURE VI.16 – Exemple de description web sémantique d'une section WHO sérialisée à partir d'un JSON MEMoS en utilisant le Linked Art Data Model.

6.3.7 Bilan de l'expérience MEMOS

Dans cet article, nous avons présenté MEMoS comme un système conçu et développé pour améliorer la provenance des données et la gestion des flux de numérisation multimodale et de documentation numérique du PC. Notre proposition offre la possibilité d'inclure dans le flux de données des métadonnées ou paradonnées significatives et utiles dont la plupart des études en SP pourraient bénéficier.

Contributions principales de MEFI

Le système proposé permet d'exploiter des voies d'enrichissement polyvalentes de métadonnées inspirées du modèle ontologique W7 dès leur intégration au moment de la capture sous la forme de codes-barres 2D. En anticipant et en automatisant la description des métadonnées et des paradonnées, notre approche contribue à une transition fluide des pratiques multimodales vers un cycle de vie des données renouvelé et étendu par FAIRisation. L'aperçu des solutions de gestion de données patrimoniales a mis en évidence les attentes croissantes en matière d'interopérabilité permettant d'harmoniser l'utilisation d'outils et de méthodes variées partagées entre plusieurs domaines d'expertise. En articulation avec d'autres outils, MEMoS pourrait participer à augmenter la valeur et la (re)connaissance des pratiques croisées actuelles en matière de documentation numérique. La mise en œuvre technique de notre système, y compris vis-à-vis de ses exigences logicielles et matérielles, est actuellement en phase expérimentale. Nonobstant, nous avons exposé des solutions possibles et viables pour orienter le développement futur vers le renforcement des aspects prioritaires tels que la convivialité et la polyvalence. Les études de cas illustrées démontrent l'efficacité de MEMoS dans des contextes d'acquisition de données variés et riches, grâce à un schéma de description aisément adaptable à différents niveaux et projets de numérisation. Plus globalement, ce travail pourrait contribuer aux stratégies à long terme des études de PN en renforçant la capitalisation des connaissances et le réinvestissement des expériences pour des réutilisations ultérieures.

Apports de MEMoS et ouverture

Dans des utilisations plus prospectives, nous imaginons que MEMoS permettra de décrire graphiquement des ensembles de données multimodales complexes en exploitant les méthodes d'InfoViz. Ces représentations interactives, si elles sont intégrées ou en dialogue avec des visionneuses 3D, pourraient également être agrémentées d'un moteur de requête pour créer des moyens innovants d'interagir avec la documentation patrimoniale numérique pour en faciliter l'interprétation. Lorsqu'une masse critique sera atteinte, les travaux

futurs pourraient s'articuler avec les méthodes de moissonnage et d'apprentissage à large échelle pour révéler le chevauchement des modalités en corrélation avec les annotations spatialisées enrichies sémantiquement. Par ces moyens, l'objectif est de dériver du concept de multimodalité pour approfondir progressivement la notion d'intermodalité, comprise comme l'utilisation combinée et intentionnelle de modalités multiples pour que les contenus numériques deviennent vecteurs d'informations et de connaissances partagées.

6.4 BILAN DES APPROCHES RELATIVES À L'ENRICHISSEMENT

Ce chapitre aura permis d'aborder la dernière partie du système sous le prisme des phases d'enrichissement et d'interprétation des données vers ses possibles liaisons avec l'étape d'acquisition. D'un point de vue méthodologique, la fermeture de cette boucle permettant d'interroger la charge sémantique du relevé multimodal. Au-delà d'être un point saillant et innovant de cette recherche, il était crucial pour appliquer et démontrer la portée d'une approche systémique de domaine d'étude. Les deux sous chapitres se sont efforcés de mettre en avant, par le biais de deux approches d'enrichissement sémantiques que des travaux futurs tenteront certainement de conjuguer.

Bilan de l'approche instrumentale d'Enrichissement (SUMUM)

Pour l'approche instrumentale, l'occasion a été saisie d'une démarche multimodale complexe *par intention* développée grâce au projet ANR SUMUM pour mettre en articulation et en perspective les apports des précédentes contributions. Le contexte de ce projet aura permis d'explorer la richesse et la complexité des approches multimodales. Les résultats se concentrent ici en termes d'*enrichissement* autrement dit sur la potentielle valeur ajoutée interprétative née de la *spatialisation* et de la *fusion* multimodales. Sur ce point, la discussion sur la valeur présumée de cette approche au sein ou en guise de système d'instrument pivot fera l'objet d'approfondissement. L'usage d'AIOLI au sein d'un tel système semble favoriser la mise en synergie de la documentation multimodale. Il reste qu'à ce stade il manque une prise en main et un retour des utilisateurs. Néanmoins, on retiendra que des questions stimulantes (et des éléments de réponses, cf. encadré p. 200) ont émergé de la mise en corrélation de données *douces* et *douces* issues des différentes modalités, qu'il sera possible d'explorer ultérieurement au sein d'un environnement unique (cf. section 5.3.6.1). Ce travail permet de projeter la réflexion dans une dynamique temporelle s'ouvrant sur de nouveaux questionnements ;

- Comment serait-il possible de planifier et de coordonner un nouveau cycle de collecte ?
- Si ou comment serait-on en mesure de fusionner cette nouvelle phase de documentation ?
- Surtout, ne serait-il pas bénéfique d'anticiper la question de l'enrichissement sémantique en amont de toutes (nouvelles) études ?

Bilan de l'approche procédurale d'Enrichissement (MEMoS)

Les apports de MEMoS se développent en réponse aux questionnements ci-dessus. Le renforcement anticipé de l'enrichissement sémantique en phase d'acquisition par le biais des métadonnées descriptives s'installe comme une piste pertinente et originale pour déjouer certaines lacunes et saisir de ces questions pour des travaux en cours ou à venir. Sur base de cadres d'applications concrets (ERC NDame, Equipex Espadon), le modèle W7 permet bel et bien de décrire avec acuité une pluralité de modalités et de sources d'observations (cf. Fig. VI.12 et VI.14). Le rayon d'action historiographique notamment présentée par le biais de visualisations de données douces fusionnées (cf. Fig. V.8 p.171 et VI.17 p.229) lui confère un intérêt de la part de communauté ciblée (Raco, 2023). Des expériences en cours semblent aussi valider la pertinence de l'hybridation MEMoS-W7 pour l'exercice de la modélisation conceptuelle et sa propension aux LOD (Guillem et al., 2023). La force de cette approche réside dans le court-circuit effectué par l'enrichissement des métadonnées en amont de la création des données elles-mêmes. En abordant ainsi la documentation des données au-delà de la documentation par le biais de données, il semble que MEMoS ait posé les premières briques d'une approche d'*enrichissement* innovante et prometteuse.

6.4.1 Bilan des contributions relatives à l'Enrichissement

Les deux approches d'*enrichissements* développées dans ce chapitre agissent de façon directe et de consorts à l'égard aux multiples enjeux de la multimodalité. Elles agissent non seulement sur la complétude et la chronique des représentations numériques, mais en renforcent aussi son continuum d'informations. De plus, on peut considérer que le rapprochement des deux paradigmes de modélisation, l'un géométrique, l'autre sémantique et conceptuelle proposée par les approches de cette thèse renforce de façon significative la consistance de la documentation multimodale.

Bilan des contributions d'Enrichissement (SUMUM)

Cette expérience confirme l'intérêt des approches multimodales dites *par intention*, dont le moteur est ici l'observation fine d'une problématique de conservation. Cette mise en adéquation au préalable des objectifs avec des croisements d'imageries permettant l'examen et le suivi de mécanismes de dégradations, devrait être le prérequis de toute étude. Il est de coutume de rappeler que le relevé n'est jamais une fin en soi ; adage auquel une réponse a été approtée par des spécifications préliminaires permettant d'aligner l'intention du relevé aux apports propres à chaque modalité d'imagerie. À l'aune de la systématisation et de l'intensification des pratiques multimodales, décuplant les effets de bord de la *complexité* et l'*intrication* des sources, la proposition est ainsi faite d'un retour aux démarches raisonnées et raisonnables. Cette amorce de stratégie prend particulièrement son sens dans l'anticipation de la finalité d'enrichissement. Sur le plan de l'interprétation, l'apport de ces nouvelles fonctionnalités multimodales d'AIOLI renforce le potentiel d'analyses croisées sur bases de différentes sources d'imagerie spatialisées.

Bilan des contributions d'Enrichissement (MEMoS)

Le système proposé apporte une réponse soutenable et pragmatique, pour les experts chargés des activités de numérisation pour répondre aux lacunes de documentation des sources. Elle offre un niveau d'automatisation non négligeable, favorisant une adoption large et garantissant *in fine* une meilleure traçabilité des informations. La transposition de la structure ontologique, dite W7 aux activités de numérisation multimodale du patrimoine, est une contribution qui ouvre des perspectives pour répondre au défi des données sémantiques à large échelle, y compris multidomaines. La procédure de mapping (CIDOC-CRM) et le test de sérialisation des données sources en données liées (cf. Fig. VI.16) certifie et renforce cette contribution majeure pour l'interopérabilité des données patrimoniales. En complément des expérimentations en cours pour étendre ou propager ce schéma de description à d'autres étapes du cycle de vie des données, augmente son potentiel au-delà des objectifs initiaux. Malgré que cette approche n'impose aucun alignement sur un des modèles standards de métadonnées, elle constitue un risque de dispersion. Il faudra rapidement contrer une trop forte hétérogénéité des clés et des valeurs descriptives par deux pistes. La première en expérimentant l'utilisation d'identifiants pérennes (UUIIDS, URL, ARK) en lieu et place d'une description statique. La seconde en démontrant les capacités versatiles de MEMoS avec des protocoles de mapping, dont certains pourraient mobiliser des approches multistandards tels que l'EDM (Europeana Data Model^[17]).

17. <https://pro.europeana.eu/page/edm-profiles>

Bilan des contributions croisées

Le lecteur aura très certainement tissé des liens qui n'ont pas été clairement explicités au fil du document. La discussion de contributions à la croisée des deux approches est reportée Pourtant au chapitre de conclusion. Effectivement les travaux de SUMUM (entre 2017 et 2020) sont antérieurs à ceux de MEMoS (ou encore de MEFI). Quoi qu'il en soit la piste d'une approche visant la mise en convergence de l'enrichissement sémantique abordé par la fusion des annotations sémantiques et de métadonnées descriptives constitue un axe prioritaire pour de futurs travaux de recherche.

Ouverture

Cette piste stimulante comme d'autres qui seront discutées dans le dernier chapitre à suivre invite à la réflexion. Elle implique tout d'abord de dériver vers un schéma de métadonnées dites dynamiques, si un tel schéma n'existe à notre connaissance pas pour les SP. On se contentera à ce stade de faire référence aux travaux amorcés par [Gutiérrez and Servigne, 2007](#) visant la définition de Métadonnées Spatio-Temporelles Temps Réel (MDSTTR) développées pour des applications géospatiales de systèmes de surveillance multicateurs en contexte urbain¹⁸. S'il est possible de s'inspirer d'un tel système, l'alliance des métadonnées continues et de l'annotation spatialisée offrirait un cadre idéal pour diriger la recherche vers des approches d'autoapprentissage. Autrement dit, des approches par lesquelles la constitution d'une ressource numérique (dont le processus cognitif serait tracé tout au long du cycle de vie des données) pourrait être autogénératrice de nouvelles connaissances. Dans cette perspective assez lointaine, on pourrait imaginer un scénario où un modèle multimodal à haute valeur sémantique puisse guider les opérations à venir.

Ainsi se clôt sur ces propos, certes prospectifs, ce segment de l'étude destiné à esquisser les contours d'un système de numérisation patrimoniale bénéficiant de différentes stratégies d'approches multimodales. La réflexion proposée au cours des trois chapitres en amont, semble avoir fait évoluer la sacrosainte triade opérationnelle

Acquisition → *Traitement* → *Interprétation*

en un ensemble d'interactions ciblées et articulées ;

Spatialiser ↔ *Fusionner* ↔ *Enrichir*

et propices à dépasser les frontières actuelles de l'imagerie multimodales au service des Sciences du Patrimoine.

18. La problématique, la nature et la provenance des données sont à un niveau de proximité avec l'étude actuelle et les objectifs semblent aussi converger.

6.4. BILAN DES APPROCHES RELATIVES À L'ENRICHISSEMENT

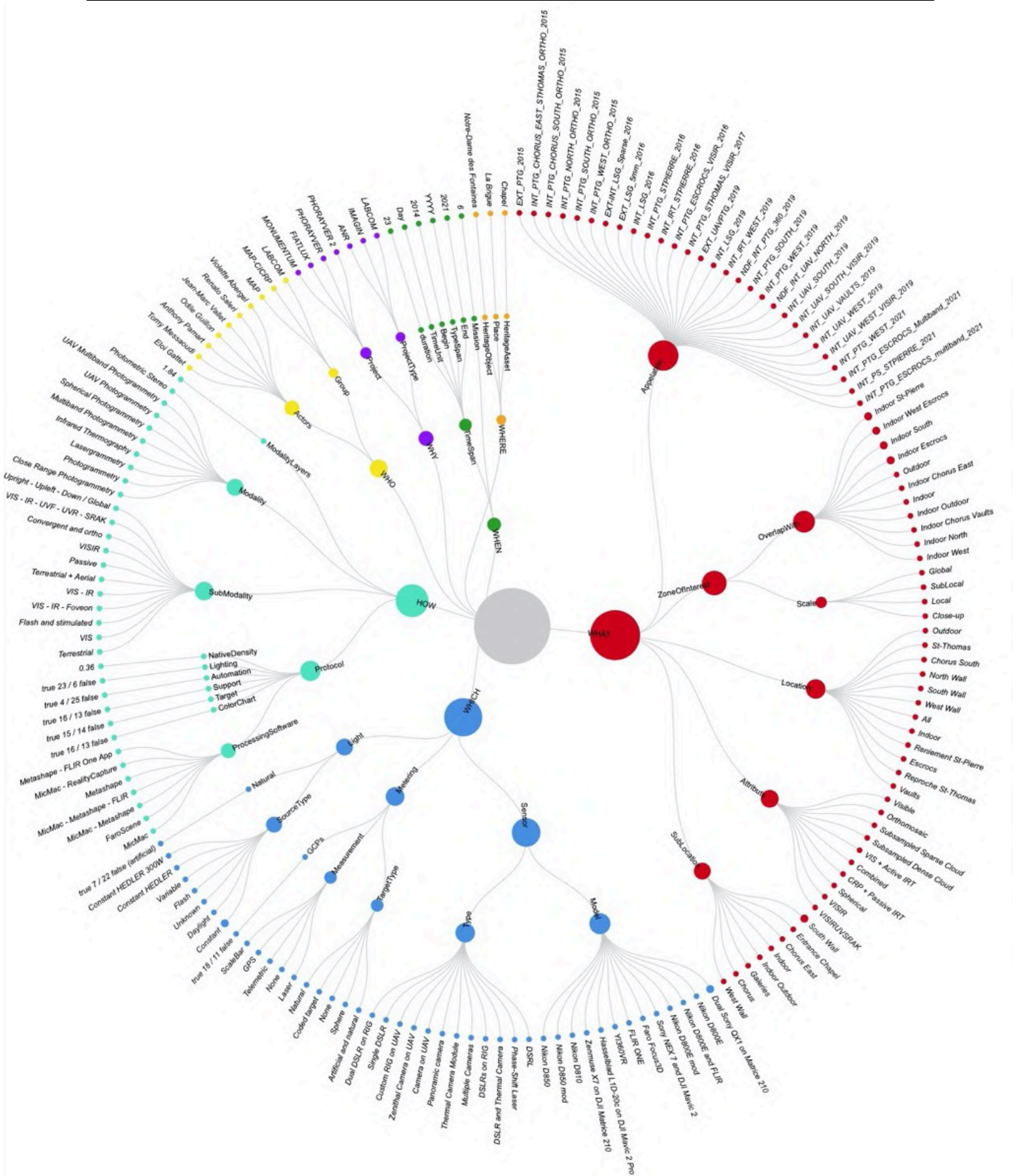
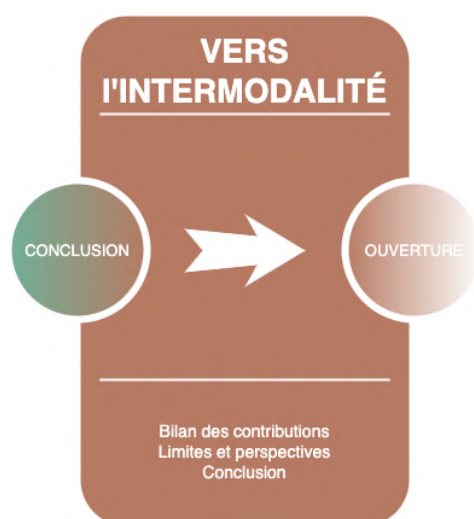


FIGURE VI.17 – Représentation graphique basée sur *MEMoS* synthétisant les activités de numérisation menées à Notre-Dame des Fontaines depuis 2014.

Chapitre VII

Conclusion



Ce travail de recherche s'est intéressé aux possibilités de développer des approches stratégiques de la numérisation 3D pour renforcer le potentiel de l'imagerie multimodale pour les études en Sciences du Patrimoine. Entrevus comme un système complexe, différentes approches ont été développées pour mettre en synergie des instruments, des outils ou des méthodes couramment utilisés pour documenter, étudier et ainsi contribuer à la préservation des biens patrimoniaux. Le travail a été structuré par une méthodologie en trois parties s'appuyant sur une démarche systémique afin décomposer le problème posé pour *in fine* mieux cibler et de lier les contributions.

Cette thèse a permis d'identifier des moments clés pour être en mesure d'intervenir de façon stratégique sur la spatialisation, la fusion et l'enrichissement de l'imagerie scientifique appliquée au patrimoine intégrant les enjeux de la multimodalité. L'efficacité des approches proposées a été démontré en les articulant sur des expérimentations issues de différents projets de recherche.

7.1 BILAN DES APPORTS

Une première partie de ce travail s'est attachée à mieux comprendre et délimiter la multimodalité pour l'imagerie patrimoniale par numérisation 2D/3D (cf. sections [1.2](#) et [2.1](#)). Cette doit notion se définir dès lors avec les liens entretenus avec les différentes étapes qui régissent la documentation et les études numériques basées sur des pratiques actuelles. Elle s'installe ainsi comme un élément fédérateur, permettant de compléter et

de renouveler l'acuité des ressources sur lesquelles baser nos observations. À l'opposé, et surtout sans approches construites, elle accroît le risque de dispersion des regards, des efforts, par extension l'aspect désordonné des opérations. De fait, on peut considérer cette réflexion comme une première contribution globale.

Selon le parti pris développé au long de cette thèse une approche multimodale comme réponse à un contexte donné ne peut être que stratégique. Pour simplifier cette tâche, deux angles complémentaires ont été abordés, l'un se focalisant sur des approches guidées par l'instrument, les autres par les méthodes et les procédures. Pour le premier point d'entrée, le concept d'*instrument pivot* a été introduit, au-delà de valider son existence pour notre champ d'application, il est possible d'affirmer que toute approche multimodale nécessite en amont l'identification et l'exploitation d'un tel pivot. Tel que vu au cours de cette étude, il peut s'agir de la capacité de la photogrammétrie, en tant que technique, à établir une passerelle entre les techniques strictement 2D et celles 3D. Cela peut tout aussi être le cas de l'annotation spatialisée en qualité d'agent facilitateur de fusion d'information et de données, tant douces que dures. Il apparaît que les approches multimodales sont renforcées par l'usage stratégique de *systèmes d'instruments pivots*, qui seraient dans ce cas concret ceux naissant de la combinaison des instruments cités. Il est fort probable que d'autres systèmes existent ou sont à créer pour performer dans d'autres contextes d'études. Cela est par ailleurs renforcé par la notion de *schème* mis en exergue lors des approches procédurales et qui a orienté le regard sur la façon de construire un continuum d'informationnel qui ait du sens pour études actuelles et leurs reprises. Enfin nous avons démontré comment l'introduction de la sémantique, de façon anticipée dès la phase de relevé, contribue à l'émergence des *schèmes structurés*. À défaut de pouvoir et devoir harmoniser ces modes opératoires qui font la richesse de notre domaine d'application, les approches multimodales ne peuvent gagner du sens que par la pertinence et la traçabilité des ensembles de méthodes mobilisés.

Cette thèse démontre la potentielle plus-value de stratégies globales décomposées de telle façon à aborder les différentes thématiques et leurs interactions ;

acquisitions \iff spatialisation \iff traitements \iff fusion \iff interprétations \iff enrichissement

Par la mise en œuvre d'une séquence de ce type, il semble dès lors envisageable de ne plus considérer nos pratiques multimodales comme des opérations isolées, délimitée dans le temps et dans l'espace. À l'inverse, il devient possible de les considérer et de les

élaborer comme un ensemble de méthodes perméables et reproductibles.

7.2 BILAN DES CONTRIBUTIONS

Comme vu lors de l'état de l'art en chapitre III, l'imagerie multimodale peut s'appuyer sur une grande variété de méthodes et d'outils pour lesquels une lecture critique de certains éléments permet de mieux coordonner les usages combinatoires. Dans les prochaines lignes, on tentera de mettre en synergie la triade de contributions principales (cf. 4.3, 5.3, 6.3) avec les contributions secondaires (cf. 4.2, 5.2, 6.2) et de la transversalité des thématiques (Spatialiser \iff Fusionner \iff Enrichir). Faisant l'hypothèse que le triptyque TACO – MEFI – MEMoS renforce le potentiel informatif et cognitif des études numériques du patrimoine, les prochaines lignes permettront comment il serait possible de les renforcer davantage.

Sur les approches relatives à la spatialisation, on a vu que notre capacité à mettre en cohérence spatio-temporelle des sources variées d'imagerie réside tout d'abord à en anticiper le croisement des modalités et leur mise en œuvre, sur le plan technique et méthodologique. Deux pistes ont été explorées, l'une menant à l'hybridation des protocoles, l'autre aux dispositifs d'instrumentation, toute deux revenant à intégrer le plus en amont possible la condition nativement multimodale des relevés numériques (cf. 4.2 p.116). À défaut d'anticipation, il semble tout de même possible d'accroître la reproductibilité et l'intégration incrémentale de modalités variables par des méthodologies de traitement de données adaptées à différentes contraintes. Prenant l'exemple du (co)référencement spatial par le biais de routine photogrammétrique, cette technique développe un potentiel nouveau en guise d'instrument pivot au sein d'un système de numérisation. Les capacités de cette stratégie de spatialisation ont été démontrées par le biais d'une implémentation de TACO en tant que moteur photogrammétrique couvrant des scénarios aussi riches que variés (cf. 4.3 p.125).

La démonstration s'est poursuivie avec une première expérience basée sur AIOLI, dans laquelle des données non photogrammétriques I ont été intégrées et exploitées (cf. 5.2 p.153). Cette section a permis de voir comment le fait de disposer de ressources multimodales orientées dans l'espace pouvait être une amorce à des procédures de fusion de données plus élaborées, sans ne pouvoir s'y substituer pour autant. Par ce biais l'importance d'élaborer des outils de traitement et visualisation avancés pour mettre en corrélation des données dures (géométrie) et douces (sémantique) a été introduit. Pour ce faire,

1. En l'occurrence des données RTI qui ouvrent le champ vers la modélisation de l'apparence.

une méthode de fusion de données géométriques a été proposée tout en permettant de conserver les informations sémantiques des modalités sources. MEFI est un indice de fusion multimodale visant à réduire un ensemble de nuages de points en une représentation multidimensionnelle doté de la capacité d'exprimer le niveau de redondance et de densité des sources pour une plage d'observation donnée (cf. [5.3](#) p.[161](#)).

La clôture des chapitres de développement est amorcée par une seconde expérimentation basée sur AIOLI, dans laquelle l'enrichissement est corollaire de l'augmentation de la capacité de gestion de couches multimodales composées de données dures (sources d'imageries) et douces (structurations et descriptions des observations issues de ces sources). On a mobilisé pour cela les stratégies d'acquisitions et de spatialisations multimodales développées dans le cadre du projet de recherche SUMUM (cf. [6.2](#) p.[194](#)). Cette expérimentation a fait l'objet du constat d'un manque de continuité de l'information sémantique quelque peu corrigé par la contribution conclusive. La problématique explorée est celle des métadonnées et de paradonnées comme une solution possible visant à renforcer la provenance des données et de leurs flux. MEMos est ainsi élaboré comme un système permettant la documentation des numérisations multimodales tout en consolidant leur traçabilité. Par ce biais, cette approche a été orientée vers un dialogue plus étroit avec les perspectives sémantiques, à plus large échelle et à long terme (cf. [6.3](#) p.[202](#)).

Néanmoins, le cadre de cette recherche n'a pas donné l'opportunité d'appliquer et d'intégrer l'ensemble de ces contributions sur un cas unique². Au prix de quelques articulations supplémentaires que abordées infra, les grandes lignes d'une stratégie innovante ont été définies pour mettre en œuvre des approches multimodales efficaces et pertinentes dans de nombreux contextes. En effet, en réponse aux phénomènes de complexité et d'hétérogénéité de la situation de départ, l'approche développée combine et équilibre deux éléments qui apparaissent comme primordiaux, à savoir la réduction³ et l'organisation (cf. Fig. [VII.1](#)). Il est possible que les conclusions faites semblent à l'encontre de la tendance actuelle majoritairement orientée vers des approches massives et cumulatives visant à restituer numériquement toute la complexité des objets patrimoniaux. Il apparait tout aussi possible que l'objet patrimonial numérique, doit se forger — par émancipation — sa propre identité, dans l'optique de compléter et d'augmenter notre compréhension du réel. Il pourrait dans ce cas devenir non seulement porteur, mais vecteur de ses propres connaissances. Avant de mettre trop en perspectives ces travaux de thèse, il convient de les confronter à ses limites.

2. À cause du contexte spécifique de ces travaux de thèse et leur déroulement chronologique.

3. « On peut en tirer la leçon que, sans réduction, un modèle redoublant totalement la réalité n'apporte aucune connaissance ». Boudon, P., 1987. Une architecture mesurée. In : L'objet architecture. 1987. Vol. XLIII, n° 476-477, p. 121-133.

7.3. LIMITES ET PERSPECTIVES

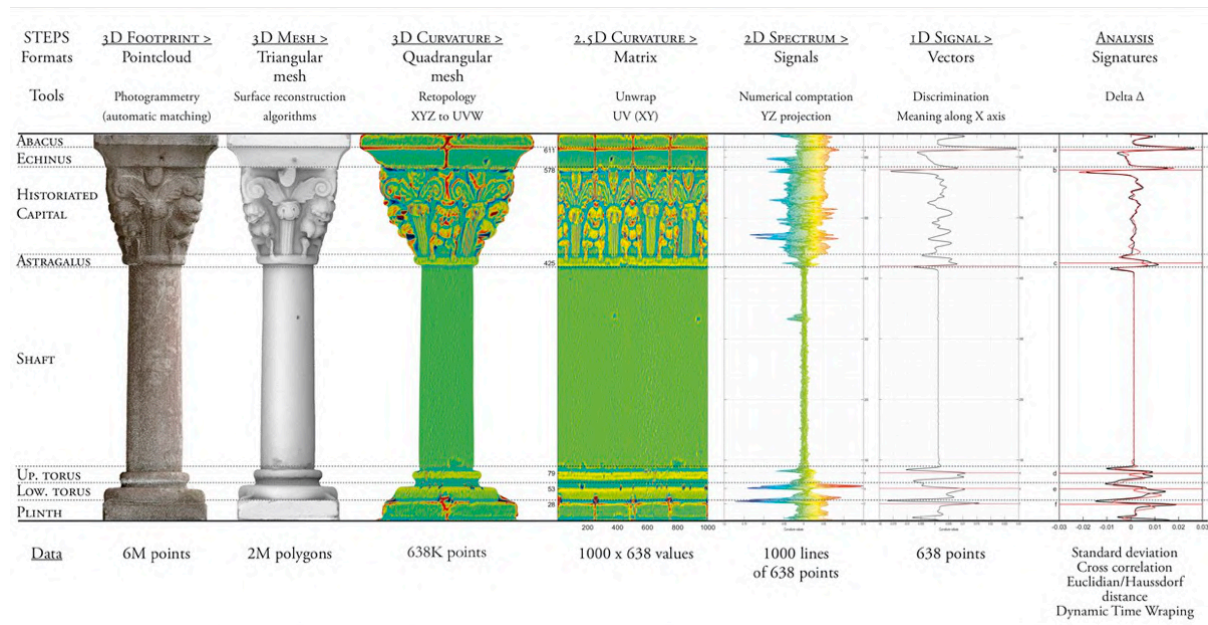


FIGURE VII.1 – Construction par réduction et organisation d’une signature morphologique sur base d’un modèle 3D dense, d’après l’article [6].

7.3 LIMITES ET PERSPECTIVES

On ne relèvera ici que les limites de ce travail compris dans son ensemble, chaque chapitre de contribution incluant déjà une discussion sur son périmètre respectif. La discussion sera faite sur les éléments qui réduisent les articulations possibles entre les différentes parties du système.

Comme évoqué précédemment, une première limite est relative au déroulement spécifique de cette thèse et de son inscription dans plusieurs actions de recherche décorréées. Tout en faisant partie d’une réflexion globale cohérente, l’ensemble des contributions ne sont pas chaînées dans les moindres détails, et appuyées par une démonstration sur un cas unique. Le déphasage entre MEFI (cf. 5.3 p.161) qui est en fait postérieur à MEMoS (cf. 6.3 p.202) est un premier exemple. Si cela a permis d’inclure une description sémantique au sein de la méthode de fusion, la problématique de fusion de schéma MEMoS pour décrire un modèle résultant de MEFI mériterait d’être abordée plus en profondeur. Des pistes ont été exposées par le biais de représentations graphiques synthétiques (cf. Fig. VI.17) ou de calcul de différence (cf. Fig. VI.15). Il aurait été intéressant que l’expérimentation SUMUM (cf. 6.2 p.194) intègre un nuage enrichi par MEFI permettant de relier et de corréler les annotations aux modalités d’imagerie sources de l’observation. Pour les mêmes contraintes chronologiques, les liaisons entre TACO (cf. 4.3 p.125) et MEFI (cf. 5.3 p.161)

pourraient être plus explicites afin de renforcer la cohérence du système et l'efficacité de notre approche multimodale. En effet, MEFI aurait pu bénéficier d'une intégration des positions, orientations et projections des frustums de caméras. Au-delà de renforcer ou de guider le calcul de l'indice de fusion, cela permettrait d'inclure des modalités d'imageries qu'il n'est pas possible d'intégrer sous la forme de nuages de points. Réciproquement, même si cela est plus projectif, l'utilisation de l'indice de fusion pour affiner ou ajuster la corrélation dense multistéréoscopique sur des blocs d'images multisource est une piste prometteuse. Pour finir, les liens en MEMoS (cf. [6.3](#) p.[202](#)) et TACO (cf. [4.3](#) p.[125](#)) ne sont pas dénués de sens et d'intérêt. En tenant pour acquis le module de détection et de décodage de QR-code au sein de TACO, l'ingestion de descriptions MEMoS permettrait de structurer le calcul d'ensembles multimodaux complexes, voire d'attribuer des processus de traitement ou de fusion spécifique. Inversement, des informations relatives au traitement de données devraient dans le cas idéal être incluses pour faire évoluer le schéma MEMoS au-delà de l'étape d'acquisition (cf. annexe [C](#) p.[302](#)).

Enfin, il reste à exposer certaines limites relatives à l'utilisation de l'imagerie et de la multimodalité. Malgré le choix justifié de restreindre cette étude sur une partie des techniques 2D/3D, les méthodes développées peuvent être plus ou moins directement à la plupart des techniques d'imagerie utilisées en Sciences du Patrimoine. Certes, les approches de modélisation basées images et lasers peuvent couvrir un large spectre d'études, mais ne sont représentatives que d'un fragment d'entre elles. Cette approche est contrainte aux catégories de techniques qui englobent ou peuvent dialoguer avec des représentations 2D ou 3D de caractéristiques géométriques ou plus généralement visuelles. S'il semble, du moins en théorie, possible de rapprocher des méthodes spectrocolorimétriques au-delà du domaine du visible ou de l'échelle de l'observable sans instrument, seuls de nouveaux paradigmes de représentations des données permettraient de mettre en application ces pistes. Cela équivaut à faire converger les méthodes empruntées au traitement d'image, largement mobilisées dans cette étude, avec celle provenant du traitement du signal. Cette piste découle de perspectives de recherche issues d'une expérimentation non intégrée à ce travail de thèse [\[6\]](#). Elle est rentrée en écho avec un projet bien plus récent, qui interroge et projette vers de nouveaux horizons les limites multimodales tel qu'exprimées à l'instant. Les expérimentations multimodales élaborées dans le cadre du projet de recherche SESAMES portent sur le relevé puis les tentatives de caractérisations spatio-acoustiques d'espaces architecturaux [\[2\]](#). Dans les deux travaux que mis en comparaison graphique (cf. Fig. [VII.2](#)), la notion de signatures, morphologique pour l'un, acoustique pour l'autre, est un élément perspectif de recherche.

7.3. LIMITES ET PERSPECTIVES

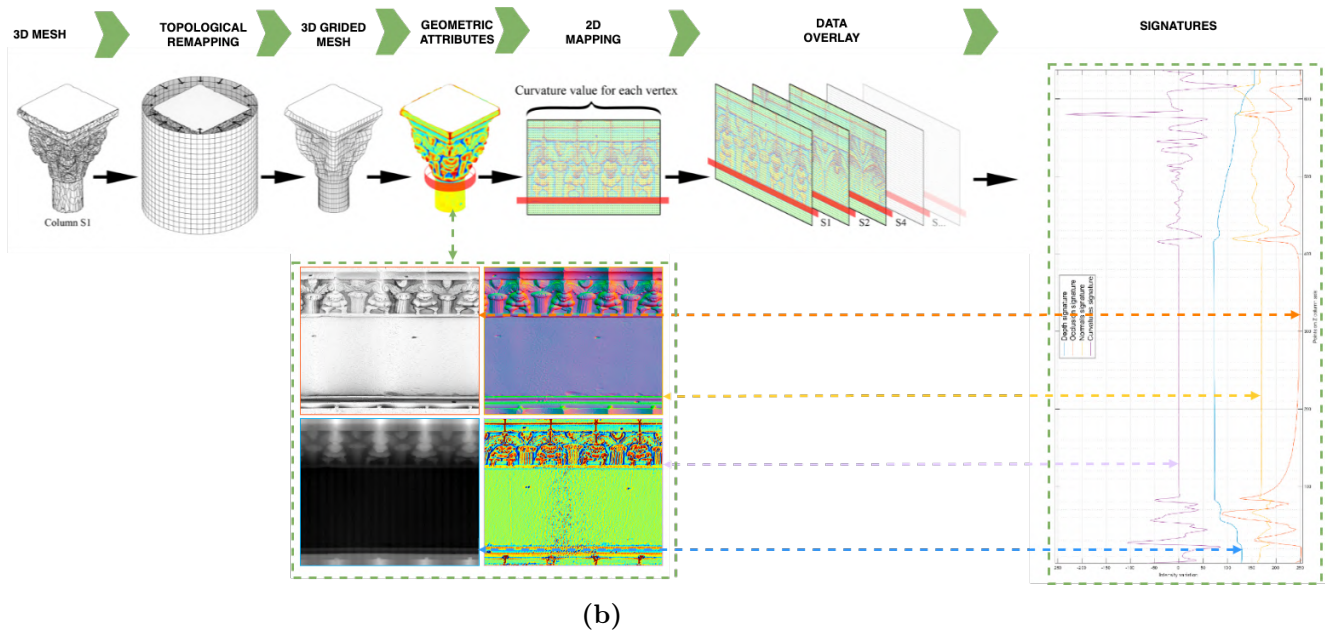
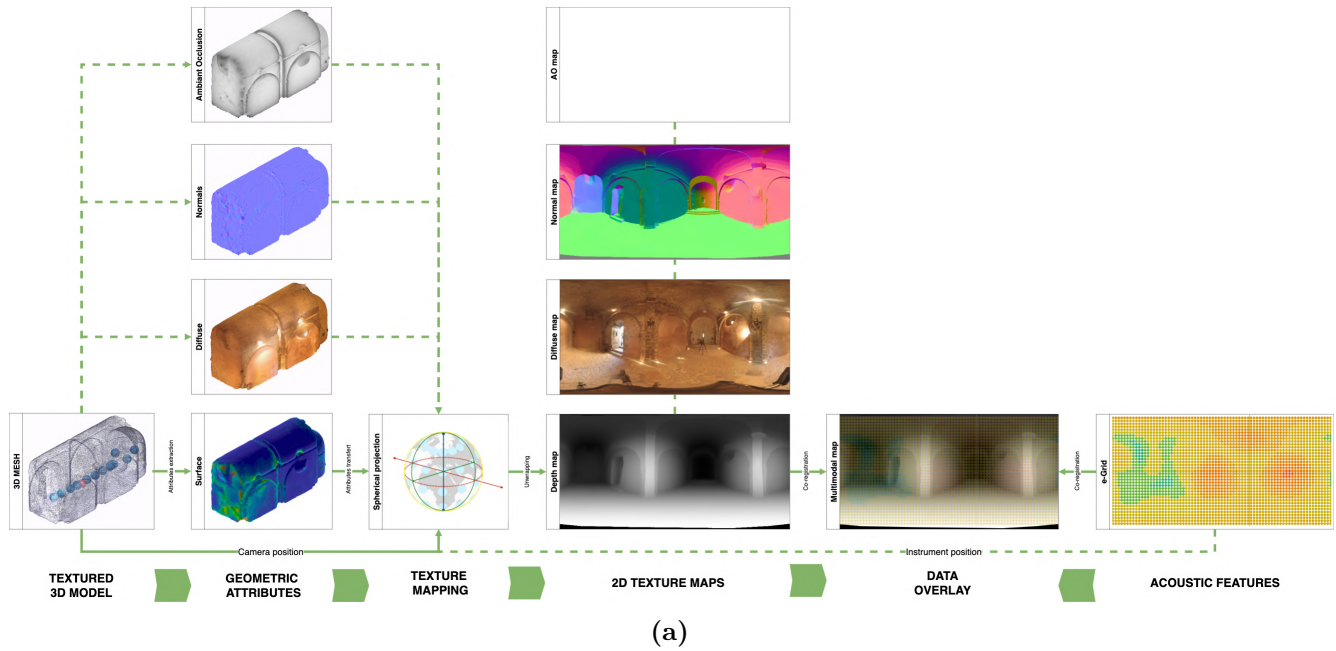


FIGURE VII.2 – (a) Protocole de fusion de données spatio-acoustiques multi-descripteurs [2]
 (b) Protocole de construction de signatures morphologiques [6].

7.3. LIMITES ET PERSPECTIVES

Tel que l'on vient de le voir, le chaînage des éléments du système reste à peaufiner, en systémique cela est généralement effectué par un système de pilotage ou de décision (cf. Fig VII.3). N'étant pas dans une approche performative ou directement opérationnelle, il est préférable de discuter ici du concept d'un système de supervision⁴, assurant la provenance et la traçabilité des ressources (en tant que données, informations ou connaissances) mobilisées pour une étude numérique en Science du Patrimoine. La technologie de cryptographie des chaînes de blocs pourraient s'adosser à un tel système dans l'optique de garantir d'un point de vue informatique l'authentification et la filiation des ressources numériques. Dans ce contexte, on fera l'hypothèse pour de futurs travaux visant à considérer le SI Memoria comme un tel outil de supervision (cf. Fig VII.4). La capacité de ce système à tracer des processus complexes et à les lier entre eux en documentant les renseignements relatifs à chaque instrument, outil, méthode d'analyses, le rend tout à fait perspicace pour cet objectif de supervision.

L'intérêt de cette étude réside dans le fait que les limites exposées offrent autant de pistes de recherches pour des travaux à venir dans un futur proche. Si certaines se heurtent à des verrous scientifiques, la majorité d'entre elles représentent des objectifs raisonnables qu'il est possible d'adresser à court terme.

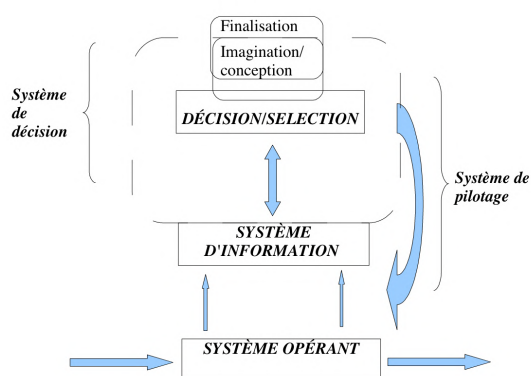


FIGURE VII.3 – Système de degré 5, d'après Karsky & Donnadiou, 2002 [Cambien, 2008].

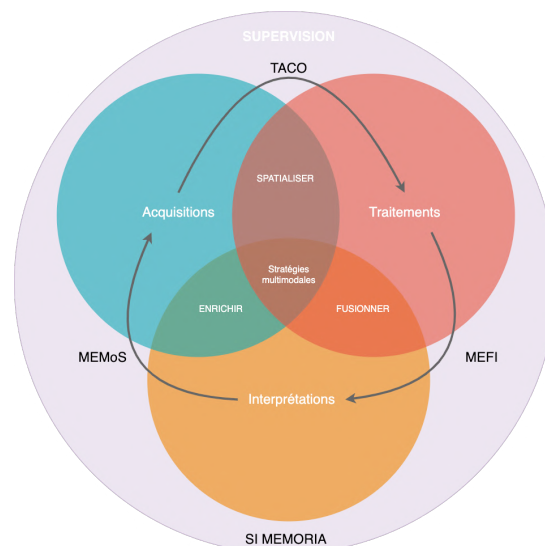


FIGURE VII.4 – Système de numérisation multimodale avec outil dédié à la supervision.

4. Dont on acceptera la définition informatique en tant qu'élément de surveillance du bon fonctionnement d'un système ou d'une activité. Source : Université Paris-Est Marne-la-Vallée (Éd.). (s. d.). Supervision Monitoring. Consulté le 29 juin 2023, à l'adresse : http://www-igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2007/dmichau_supervision/supervision.html

7.4 CONCLUSION ET OUVERTURE

Cette thèse a présenté différentes approches synergiques pour mettre en place des stratégies de fusion d'imagerie multimodale dans leurs applications pour les Sciences du Patrimoine. Nul doute que ce travail permettra de construire des scénarios exploitant plus en profondeur le potentiel de la multimodalité tout en évitant certains écueils pointés ou révélés dans la recherche présente. Sur base des quelques apports présentés dans cette recherche, il sera tout d'abord possible de faire glisser le curseur de la multimodalité vers l'intermodalité⁵. Si l'on assimile une information (voire une connaissance) comme un passager au sein d'un système de transport, il est aisé de comprendre en quoi les pratiques de demain devront être intermodales. Les contributions apportées permettent d'amorcer cette transition en commençant par savoir si, comment et par quel moyen il est possible de spatialiser, de fusionner et d'enrichir des sources d'imagerie 2D/3D afin de rendre cette documentation réexploitable (cf. Fig. VII.5). Le travail qui démarrera après cette conclusion s'attachera à consolider et faire émerger de telles approches multi, inter voire hypermodales⁶ qui puissent véritablement guider et inspirer les expériences à venir. Cette boucle entre des corpus de modèles numériques enrichit et les nouvelles acquisitions représentent un défi stimulant. Un cercle vertueux dont cette recherche n'est évidemment ni la seule ni la première à entrevoir et à projeter [Cerreta and Savino, 2020]. À ce stade, il n'apparaît toujours pas nécessaire de développer ce concept de double numérique volontairement tenu à distance de cette étude en raison de son positionnement parfois trop dogmatique et technocratique, qui persiste depuis ses prémices [Gruen, 2008, Guo et al., 2009] jusqu'aujourd'hui [Scott, 2023]. Qu'on lui attribue ce concept, ou qu'on l'envisage - à la manière de cette étude — comme un système complexe imbriqué au sein d'infrastructure à plus large échelle, le Patrimoine Numérique se manifeste de plus en plus sous la forme d'un Objet Frontière⁷ tel que défini par Susan Leigh Star [Leigh Star, 2010, Bowker et al., 2016]. À ce stade du document, il paraît évident que cette piste de réflexion sera réservée pour des travaux futurs.

5. Dans le domaine de la recherche scientifique, la nuance ce cerne très facilement, sans besoin de définition, en faisant référence à la différence entre la multidisciplinarité (ou pluridisciplinarité) et l'interdisciplinarité.

6. Il s'agit d'une notion déjà en écho avec certaines orientations actuelles des Humanités Numérique. Cf. Lemke, J. L. (2002). Travels in hypermodality. *Visual Communication*, 1(3), 299-325. <https://doi.org/10.1177/147035720200100303>

7. « Les objets frontières comportent trois composantes, comme indiqué dans l'article original de 1989. La souplesse d'interprétation, la structure des besoins et des dispositions en matière d'information et de processus de travail et, enfin, la dynamique entre les utilisations mal structurées et les utilisations plus personnalisées des objets ». [Leigh Star, 2010] (p.601)

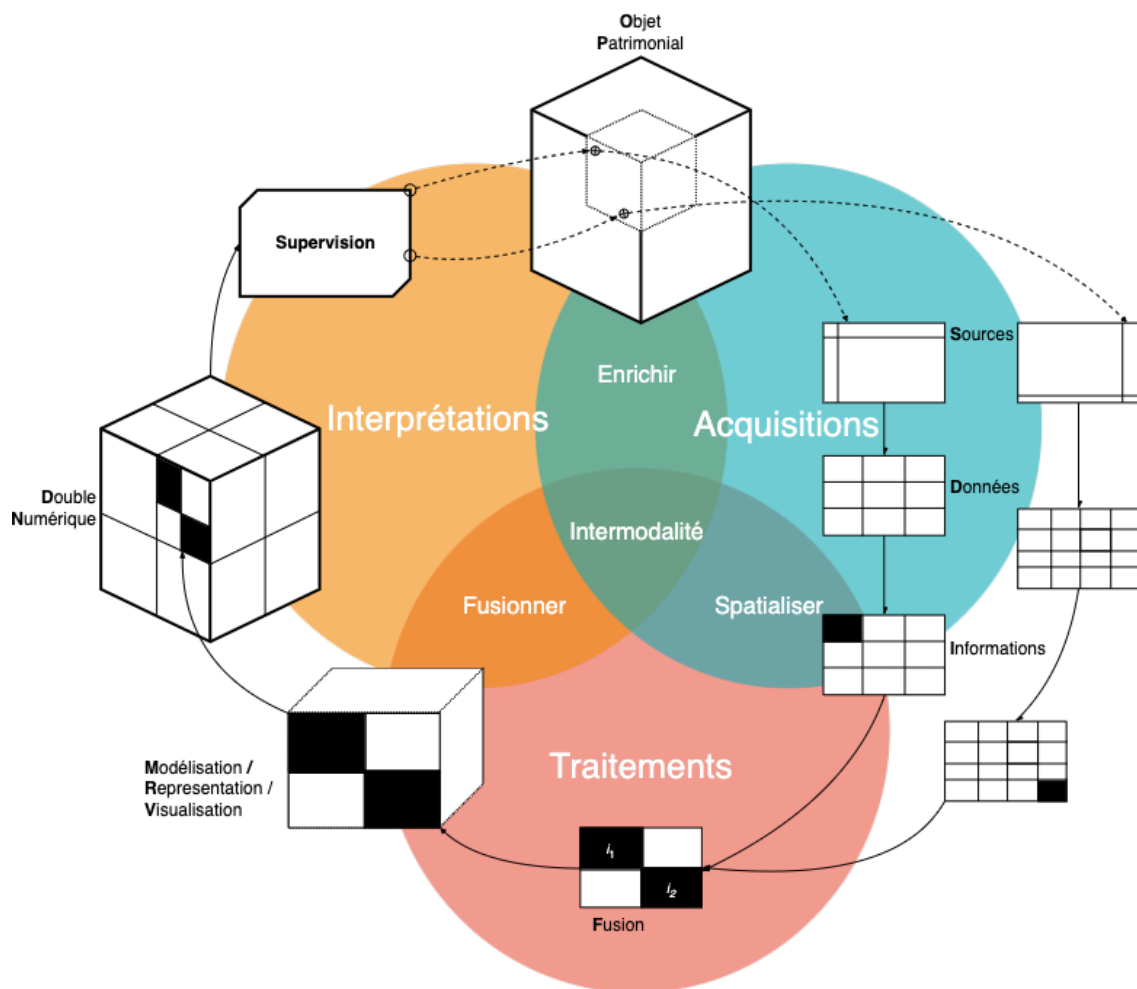


FIGURE VII.5 – Vers des systèmes de numérisations intermodales.

Glossaire et acronymes

GLOSSAIRE

Ajustement de faisceaux (BBA) : De l'anglais *Bundle Block Adjustment*. L'ajustement ou encore la compensation de faisceau consiste à affiner simultanément les coordonnées 3D décrivant la géométrie de la scène, et l'étalonnage de la (des) caméra(s), étant donné un ensemble d'images appariées par des points de liaisons (dit homologues).

Annotation sémantique : Processus qui repose sur la mise en relation entre un document et des informations complémentaires, afin d'établir des relations entre les informations liées aux données plutôt qu'entre les données elles-mêmes (Abergel, 2020 | p.61). Dans cette étude le modèle utilisé est celui du W3C (cf. section [2.4.2.2](#) et encadré p.[88](#)).

Approches instrumentales : Les approches qualifiées d'instrumentales se concentrent sur l'utilisation d'outils et de techniques spécifiques pour résoudre un problème.

Approches procédurales : Les approches dites procédurales se focalisent quant à elles sur les méthodes et les étapes nécessaires pour résoudre un problème, sans nécessairement se concentrer sur un outil spécifique.

Arbalète : Prototype de dispositif de photogrammétrie multispectrale dédié au relevé orthographique de surface verticale quasi-planaire (cf. section [4.2.2](#) p.[118](#))

Contrôle Non Destructif (CND) : De l'anglais *Non Destructive Technique* (NDT), regroupe l'ensemble des procédés et techniques qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances. On parle aussi d'essais non destructifs (END) ou d'examen non destructifs. Sources : [Wikipedia](#) et [InterControle](#)

Données douces et dures : Les données de fusion peuvent être fournies sous différentes formes, c'est-à-dire sous une ou plusieurs modalités, et être générées par des capteurs physiques (données dures) ou des opérateurs humains (données douces). Concepts provenant de (Khaleghi et al., 2013) mobilisés dans cette étude notamment pour distinguer différentes approches de fusion de données (cf. section [2.3.3.1](#) p.[65](#)).

Enrichissement : L'enrichissement des données est un terme général qui se réfère aux processus utilisés pour renforcer, affiner, ou améliorer de diverses façons des données brutes (cf. p.72).

Entropie : Entendu ici comme phénomène ou facteur de désordre et d'incertitude dans l'organisation des données et du flux de données. Une acception hybride entre celle de la thermodynamique et de la théorie de l'information, qui interrogent toutes les deux la notion de système, domaines dans lesquels l'entropie est une mesure du désordre (cf. p.110 et notion connexe de Vrac Numérique p.22) dans leurs contextes.

Fusion : La fusion de données et/ou d'informations est l'étude des méthodes efficaces pour la transformation de sources variables en représentations utiles afin d'en accroître leurs significations (cf. p.62).

Imagerie par Transformation de Reflectance (RTI) : Technique de photographie computationnelle qui fait partie de la collection d'images multi-lumière (MLIC). Elle consiste en un ensemble de photographies d'un objet prises à partir d'un point de vue fixe, mais dans des conditions d'éclairage variables permettant de révéler les caractéristiques d'une surface imagée grâce à un ré-éclairage virtuel et interactif.

Instrument pivot : Notion empruntée au domaine de l'Ergonomie énoncé par Rabardel pour définir un instrument, qui au sein d'un système peut jouer un rôle d'organisateur, de médiateur (cf. section 3.3.1 p.103).

MEMORIA : Le projet MEMORIA est un projet à long terme, qui visait à l'origine le développement d'un Système d'Information expérimental permettant de décrire, structurer, archiver et analyser les ressources numériques produites du laboratoire MAP (cf. section 6.3.3.2 p.207).

Métadonnées : Les métadonnées sont des données utilisées pour décrire et fournir des informations sur d'autres données (cf. section 2.4.2.3 p.90).

Modèle W7 : Modèle conceptuel dit ontologique destiné à la provenance des données proposé par Ram et Liu et mobilisant 7 concepts : WHAT, WHO, WHEN, WHERE, WHICH, WHY and HOW (cf. section 6.3.5.1 p.211).

Modélisations Basée Image (MBI) : De l'anglais *Image-based Modeling* (IBM) concerne les instruments de relevé ainsi que les techniques de modélisation qui mobilisent des capteurs passifs (p. ex. photo), comprenant ainsi les techniques relatives à la photogrammétrie.

Modélisations Basée Laser (MBL) : De l'anglais *Range-based Modeling* (RBM) concerne les instruments de relevé ainsi que les techniques de modélisation qui mobilisent des capteurs actifs (lasers), comprenant ainsi les techniques dites lasergrammétriques.

Modélisations Basée sur le Réel (MBR) : De l'anglais *Real-based Modeling* concerne les instruments de relevé ainsi que les techniques de modélisation relatives au MBR et MBI

7.4. CONCLUSION ET OUVERTURE

du moment qu'elles traitent capture du réel. Similaire à ce qui réfère à la numérisation 2D/3D.

Multimodalité : La multimodalité est définie par la coopération entre plusieurs modalités ou processus (cf. p. 36). Les modalités sont quant à elles définies par différents aspects (cf. section 1.2.2 p. 19).

Objet Patrimonial : Dans notre étude, objet physique relatif à un élément du Patrimoine Culturel.

Objet Patrimonial Augmenté : Concept propre au projet Equipex Espadon qui désigne l'équivalent du double numérique pour les Sciences du Patrimoine (cf. section 1.1.1.3 p. 15). Voir définition donnée à l'adresse : <http://www.sciences-patrimoine.org/espadon/#1661526398326-249d5091-5aab>.

Objet Patrimonial Numérique : Dans notre étude, se réfère principalement un objet patrimonial numérisé, qui comprends aussi les données en tant que patrimoine (*Data as Heritage*) ou alors aux données à propos du patrimoine (*Data about Heritage*) (cf. p. 14).

Paradonnées : Les paradonnées sont des données recueillies en parallèle d'un dispositif de collecte et qui en décrivent le processus, là où les métadonnées décrivent les données collectées (cf. section 2.4.2.3 p. 92).

Patrimoine Culturel (PC) : Catégorie concrète capable de combiner toutes les valeurs culturelles, des biens culturels matériels aux biens culturels immatériels (cf. section 1.1.1 p. 13).

Patrimoine Numérique (PN) : Dans notre recherche, domaine d'étude dont le sujet et les méthodes sont relatives à un objet patrimonial numérisé (cf. section 1.1.1.2 p. 14). De l'anglais *Digital Heritage*.

Point d'appui (GCP) : De l'anglais *Ground Control Point*. Dans notre étude, un point sur une surface ou un objet dont les coordonnées spatiales sont connus et pouvant servir d'appui pour orienter une ressource 2D ou 3D dans un repère spatial prédéfini.

Résection : La résection et l'intersection de positions sont des méthodes permettant de déterminer une position géographique inconnue (recherche de position) en mesurant des angles par rapport à des positions connues. Dans le cas de la résection, le point dont les coordonnées sont inconnues est occupé et des repérages sont effectués sur les points connus ; dans le cas de l'intersection, les deux points dont les coordonnées sont connues sont occupés et des repérages sont effectués sur le point inconnu. Source : [Wikipedia](#)

Résection Spatiale : En photogrammétrie, la Résection Spatiale (SR) consiste à déterminer la position spatiale et l'orientation d'une photo sur la base des mesures d'images des points de contrôle au sol qui apparaissent sur la photo. Source : Easa, S. M. (2010). Space resection in photogrammetry using collinearity condition without linearisation. Survey Review. <https://doi.org/10.1179/003962609x451681>.

7.4. CONCLUSION ET OUVERTURE

Science-s du Patrimoine (SP) : La (ou les) Science(-s) Patrimoine est l'étude de l'interprétation et de la gestion des preuves matérielles de l'humanité (cf. p.16). Elle représente le domaine d'application visée par la recherche présente.

Stéréophotométrie : La stéréophotométrie, également connue sous le nom de *shape from shading*, est une technique photographie computationnelle visant à estimer, à partir d'une scène stationnaire et d'une collection d'images de la scène prises dans des conditions d'éclairage variables (au moins trois), certaines caractéristiques de la surface (direction normale, forme tridimensionnelle, albédo) pour chaque pixel.

Stratégie : « Ensemble d'actions coordonnées, d'opérations habiles, de manoeuvres en vue d'atteindre un but précis » ou « Manière d'organiser, de structurer un travail, de coordonner une série d'actions, un ensemble de conduites en fonction d'un résultat ». Définitions utilisées pour justifier l'approche dite stratégique de cette étude (cf. section 3.2 p.100).

Structure à partir du Mouvement (SfM) : De l'anglais *Structure from Motion*, est une technique d'imagerie par intervalle destinée à estimer la structure 3D de quelque chose à partir d'images 2D. Ces méthodes se distinguent de la photogrammétrie, même si elles traitent le même problème elles sont l'apanage d'une autre communauté, celle de la Vision par Ordinateur. La principale différence réside dans le fait que les méthodes dites SfM ne couvrent que l'estimation des poses et la reconstruction éparses (cf. 4.3.3 p.129).

Système : Dans plusieurs Sciences, ensemble d'éléments divers formant un tout dont toutes les parties sont liées, ou encore ensemble structuré d'éléments abstraits, ensemble de concepts présentés sous une forme ordonnée (cf. p.24).

Transformation Linéaire Directe (DTL) : Méthode particulière de Résection Spatiale utilisée en photogrammétrie qui vise à résoudre le problème de la détermination des paramètres d'une caméra (selon le modèle sténopé) à partir d'au moins six correspondances entre les points de l'image 2D et les points du monde 3D. Source : Barone, F., Marrazzo, M., Otón, C. J. (2020). Camera calibration with weighted direct linear transformation and anisotropic uncertainties of image control points. *Sensors*, 20(4), 1175. <https://doi.org/10.3390/s20041175>

LISTE DES ACRONYMES

AIOLI : Recette scientifique provençale permettant des scénarios d'annotations sémantiques 2D/3D spatialisées collaboratifs au sein d'une plateforme web (<http://www.aioli.cloud/>).

BBA : Bundle Block Adjustment (cf. Ajustement de faisceaux).

C2C : Cloud to Cloud. Indice de mesure permettant de quantifier la distance entre deux nuages de points.

7.4. CONCLUSION ET OUVERTURE

C2M : Cloud to Mesh. Indice de mesure permettant de quantifier la distance entre un nuage de points et un maillage.

CIDOC-CRM : Modèle conceptuel de référence (Conceptual Reference Model) provenant du Comité international pour la documentation (CIDOC) utilisé pour représenter les collections relevant du Patrimoine Culturel afin d'améliorer le partage d'information sur ces collections et ces entités (cf. section [2.4.1.3](#) p. [2.4.1.3](#) Source : [Wikipedia](#))

DLT : Direct Linear Transformation (cf. Transformation Linéaire Directe).

DoC : De l'anglais, Degree of Confidence (cf. Degré de Confiance ci-dessus).

FAIR : Findable Accessible Interoperable Reusable.

FLOSS : *Free Libre and Open Source Software* (cf. note p. [128](#)).

GCP : Ground Control Point (cf. Points d'appuis).

GSD : Ground Sample Distance. La Résolution au Sol est la distance entre deux centres de pixels consécutifs mesurée au sol. Plus la valeur du GSD de l'image est élevée, plus la résolution spatiale de l'image est faible et moins les détails sont visibles. Source : [Pix4D](#).

H-BIM : Acronyme anglophone de Heritage-Building Information Modeling qui est un paradigme de modélisation basé sur les primitives géométriques hérité de la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et qui dépasse du périmètre de cette étude.

ICCROM : Centre international d'études pour la conservation et la restauration des biens culturels.

ICP : De l'anglais *Iterative Closest Point*. Algorithme consistant à calculer, de façon itérative, la matrice de transformation recalant le mieux deux (ou plusieurs) ensembles de données 3D (points 3D, courbes ou surfaces). Source : Douadi, L. (2005). Variantes de l'Algorithme ICP pour le recalage de données 3D couleur. <https://hal.science/lirmm-00106684v1>

IFC : Industry Foundation Class, est un modèle standard de données utilisé dans le domaine du bâtiment échanger des entités relatives aux maquettes numériques BIM.

IHM : De l'anglais *Interaction Human Interface*. L'Interaction Humain-Machine s'intéresse à la conception et au développement de systèmes interactifs en prenant en compte ses impacts sociétaux et éthiques. Domaine duquel cette étude tire notamment sa définition de la Multimodalité.

IoU : De l'anglais, *Intersection over Union*. L'Intersection par rapport à l'Union, est une mesure de performance utilisée pour évaluer la précision des algorithmes d'annotation, de segmentation et de détection d'objets. Source : [Encord](#)

LOD : Linked Open Data ou Données Ouvertes et Liées.

LiDAR : De l'anglais *Laser Imaging Detection And Ranging*. La détection et l'estimation de la distance par la lumière ou par laser est une technologie de mesure de distance appartenant à la lasergrammétrie.

7.4. CONCLUSION ET OUVERTURE

MEFI : Multimodal Enhancement Fusion Index. L'Indice d'amélioration de Fusion Multimodale est le nom de l'algorithme relatif à notre contribution sur la thématique de la fusion (cf. section [5.3](#) p. [161](#)).

MEMoS : Metadata Enriched Multimodal documentation System. Le Système de documentation Multimodale avec des Métadonnées Enrichies est le nom de la méthode relative à notre contribution sur la thématique de l'enrichissement (cf. section [6.3](#) p. [202](#)).

MoP : De l'anglais, Measure of Performance (cf. Mesure de la Performance ci-dessus).

NDT : Non Destructive Technique (cf. Contrôle Non Destructif).

OPN : Objet Patrimonial Numérique (cf. Glossaire).

PHORAYVER : Acronyme d'un projet de recherche du laboratoire MAP.

RTI : Reflectance Transformation Imaging (cf. Imagerie par Transformation de Reflectance).

SESAMES : Acronyme d'un projet de recherche du laboratoire MAP financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR).

SI | SIG : Système d'Information | Système d'Information Géographique.

SLAM : De l'anglais *Simultaneous Localization And Mapping*. La localisation et la cartographie simultanées est le problème informatique visant la construction ou de la mise à jour d'une carte d'un environnement inconnu tout en gardant simultanément la trace de la position de l'appareil permettant la mesure dans cet environnement. Source : [Wikipedia](#)

SP : Science-s du Patrimoine (cf. élément du Glossaire ci-dessus).

SUMUM : Acronyme d'un projet de recherche du laboratoire MAP financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) coordonné par le laboratoire ImVia.

SfM : Structure from Motion (cf. Structure à partir du Mouvement).

TACO : Traitement Automatisé de Calcul d'Orientation d'images est le nom de l'algorithme relatif à notre contribution sur la thématique de la spatialisation (cf. section [4.3](#) p. [125](#)).

ToF : Time of Flight pour Temps de Vol, technologie de lasergrammétrie.

Bibliographie

LISTE DES PUBLICATIONS

- [1] ABERGEL, V., MANUEL, A., PAMART, A., CAO, I., AND DE LUCA, L. Aïoli : A reality-based 3d annotation cloud platform for the collaborative documentation of cultural heritage artefacts. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* 30 (Sep 2023), e00285.
- [2] BERGEROT, L., BLAISE, J.-Y., DUDEK, I., PAMART, A., ARAMAKI, M., FARGEOT, S., KRONLAND-MARTINET, R., VIDAL, A., AND YSTAD, S. Combined web-based visualisation of 3d point clouds and acoustic descriptors : An interdisciplinary challenge. *Heritage* 5, 44 (Dec 2022), 3819–3845.
- [3] BERGEROT, L., BLAISE, J.-Y., PAMART, A., AND DUDEK, I. Visual cross-examination of architectural and acoustic data : The 3d integrator experiment. vol. XLVI-2/W1-2022, p. 81.
- [4] LOUISET, T., PAMART, A., GATTET, E., RAHARIJAONA, T., DE LUCA, L., AND RUFFIER, F. A Shape-Adjusted Tridimensional Reconstruction of Cultural Heritage Artifacts Using a Miniature Quadrotor. *Remote Sensing* 8, 10 (Oct. 2016), 858.
- [5] PAMART, A., ABERGEL, V., DE LUCA, L., AND VERON, P. Toward a data fusion index for the assessment and enhancement of 3d multimodal reconstruction of built cultural heritage. *Remote Sensing* 15, 9 (2023).
- [6] PAMART, A., BUGLIO, D. L., AND LUCA, L. D. Morphological analysis of shape semantics from curvature-based signatures. In *2015 Digital Heritage* (Sept. 2015), vol. 2, pp. 105–108.
- [7] PAMART, A., DE LUCA, L., AND VERON, P. A metadata enriched system for the documentation of multimodal digital imaging surveys. *Studies in Digital Heritage* 6, 1 (Jun. 2022), 1–24.
- [8] PAMART, A., GUILLON, O., FARACI, S., GATTET, E., GENEVOIS, M., VALLET, J.-M., AND DE LUCA, L. Multispectral photogrammetric data acquisition and processing for wall paintings studies. In *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (Nafplio, Greece, 2017), vol. XLII-2-W3, Copernicus GmbH, pp. 559–566.
- [9] PAMART, A., GUILLON, O., VALLET, J.-M., AND DE LUCA, L. Toward a Multimodal Photogrammetric Acquisition and Processing Methodology for Monitoring Conservation and

LISTE DES PUBLICATIONS

- Restoration Studies. In *Proceedings of the 14th Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage* (Goslar Germany, Germany, 2016), GCH '16, Eurographics Association, pp. 207–210.
- [10] PAMART, A., MORLET, F., DE LUCA, L., AND VERON, P. A robust and versatile pipeline for automatic photogrammetric-based registration of multimodal cultural heritage documentation. *Remote Sensing* 12, 12 (Jun 2020), 2051.
- [11] PAMART, A., PONCHIO, F., ABERGEL, V., ALAOU M'DARHRI, A., CORSINI, M., DELLEPIANE, M., MORLET, F., SCOPIGNO, R., AND DE LUCA, L. a complete framework operating spatially-oriented rti in a 3d/2d cultural heritage documentation and analysis tool. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 422 (2019), 573–580.
- [12] PAMART, A., PONCHIO, F., ABERGEL, V., ALAOU M'DARHRI, A., CORSINI, M., DELLEPIANE, M., MORLET, F., SCOPIGNO, R., AND DE LUCA, L. A complete framework operating spatially-oriented rti in a 3d/2d cultural heritage documentation and analysis tool. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W9* (2019), 573–580.
- [13] PAMART, A., ROUSSEL, R., HUBERT, E., COLOMBINI, A., SALERI, R., MOUADDIB, E. M., CASTRO, Y., LE GOÏC, G., AND MANSOURI, A. A semantically enriched multimodal imaging approach dedicated to conservation and restoration studies. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLVI-2/W1-2022* (2022), 415–420.

REFERENCES

- [RefAbas et al., 2016] Abas, A., Yusof, Y., and Ahmad, F. K. (2016). Improving Data Capacity of QR Code Version 40 Using Multiplexing and Multilayered Techniques : Embedding Text Based Short Story in QR Code. 22 :2841–2846.
- [RefAbdel-Aziz, 1971] Abdel-Aziz, Y. (1971). Direct linear transformation from comparator coordinates into object space in close-range photogrammetry. In *Proceedings of the ASP Symposium on Close-Range Photogrammetry, 1971*, pages 1–18. American Society of Photogrammetry.
- [RefAbdelmalek, 2004] Abdelmalek, A. A. (2004). Edgar morin, sociologue et théoricien de la complexité : des cultures nationales à la civilisation européenne. *Sociétés*, 86(4) :99–117.
- [RefAbergel, 2020] Abergel, V. (2020). *Relevé numérique d’art pariétal : définition d’une approche innovante combinant propriétés géométriques, visuelles et sémantiques au sein d’un environnement de réalité mixte*. Theses, HESAM Université.
- [RefAdamopoulos and Rinaudo, 2019] Adamopoulos, E. and Rinaudo, F. (2019). 3D interpretation and fusion of multidisciplinary data for heritage science : A review. In *27th CIPA International Symposium-Documenting the Past for a Better Future*, volume 42, pages 17–24. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- [RefAdamopoulos and Rinaudo, 2021] Adamopoulos, E. and Rinaudo, F. (2021). Close-range sensing and data fusion for built heritage inspection and monitoring—a review. *Remote Sensing*, 13(19) :3936.
- [RefAdamopoulos et al., 2017] Adamopoulos, E., Tsilimantou, E., Keramidis, V., Apostolopoulou, M., Karoglou, M., Tapinaki, S., Ioannidis, C., Georgopoulos, A., and Moropoulou, A. (2017). Multi-sensor documentation of metric and qualitative information of historic stone structures. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 4.
- [RefAdrian et al., 2014] Adrian, J., Buglio, D. L., and Luca, L. D. (2014). Evaluating the Curvature Analysis as a Key Feature for the Semantic Description of Architectural Elements. In Klein, R. and Santos, P., editors, *Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage - Short Papers / Posters*. The Eurographics Association.
- [RefAgarwal et al., 2009] Agarwal, S., Snavely, N., Simon, I., Seitz, S. M., and Szeliski, R. (2009). Building rome in a day. In *Computer Vision, 2009 IEEE 12th International Conference on*, pages 72–79. IEEE.
- [RefAhn and Schultes, 1997] Ahn, S. J. and Schultes, M. (1997). A new circular coded target for the automation of photogrammetric 3d-surface measurements. *Optical 3-D measurement techniques IV*, pages 225–234.

REFERENCES

- [RefAicardi et al., 2018] Aicardi, I., Chiabrando, F., Lingua, A. M., and Noardo, F. (2018). Recent trends in cultural heritage 3d survey : The photogrammetric computer vision approach. *Journal of Cultural Heritage*.
- [RefAiger et al., 2008] Aiger, D., Mitra, N. J., and Cohen-Or, D. (2008). 4-points congruent sets for robust pairwise surface registration. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, volume 27, page 85. ACM.
- [RefAkkus et al., 2023] Akkus, C., Chu, L., Djakovic, V., Jauch-Walser, S., Koch, P., Loss, G., Marquardt, C., Moldovan, M., Sauter, N., Schneider, M., Schulte, R., Urbanczyk, K., Goschenhofer, J., Heumann, C., Hvingelby, R., Schalk, D., and Aßenmacher, M. (2023). Multimodal deep learning. (arXiv :2301.04856). arXiv :2301.04856 [cs, stat].
- [RefAl-Barakati et al., 2014] Al-Barakati, A., White, M., and Patoli, Z. (2014). The application of workflow management to digital heritage resources. 34(5) :660–671.
- [RefAlbertin et al., 2021] Albertin, F., Ruberto, C., Cucci, C., Callieri, M., Potenziani, M., Siotto, E., Pingi, P., Scopigno, R., Bettuzzi, M., Brancaccio, R., Morigi, M. P., Castelli, L., Taccetti, F., Marcello, P., Stefani, L., and Vita, F. (2021). “Ecce Homo” by Antonello da Messina, from non-invasive investigations to data fusion and dissemination. *Scientific Reports*, 11 :15868.
- [RefAlbuerne et al., 2018] Albuerne, A., Grau-Bove, J., and Strlic, M. (2018). *The Role of Heritage Data Science in Digital Heritage*, volume 11196 of *Lecture Notes in Computer Science*, page 616–622. Springer International Publishing, Cham.
- [RefAlliez et al., 2017] Alliez, P., Forge, F., de Luca, L., Pierrot-Deseilligny, M., and Preda, M. (2017). Culture 3d cloud : A cloud computing platform for 3d scanning, documentation, preservation and dissemination of cultural heritage. *ERCIM NEWS*, (111) :35–35.
- [RefAlsadik, 2014] Alsadik, B. (2014). *Guided close range photogrammetry for 3D modelling of cultural heritage sites*. PhD thesis, University of Twente. ITC Dissertation ; 260.
- [RefAlsadik et al., 2012] Alsadik, B. S., Gerke, M., and Vosselman, G. (2012). Optimal Camera Network Design for 3D Modeling of Cultural Heritage. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, I-3 :7–12.
- [RefAndrews et al., 2012] Andrews, P., Zaihrayeu, I., and Pane, J. (2012). A classification of semantic annotation systems. *Semantic Web*, 3(3) :223–248.
- [RefAntinozzi and Fiorillo, 2022] Antinozzi, S. and Fiorillo, F. (2022). Optimized Configurations for Micro-photogrammetric Surveying Adaptable to Macro Optics and Digital Microscope. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVI-2/W1-2022 :25–32.
- [RefAntova, 2019] Antova, G. (2019). Application of Areal Change Detection Methods Using Point Clouds Data. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*, 221 :012082.
- [RefApollonio et al., 2014] Apollonio, F., Ballabeni, A., Gaiani, M., and Remondino, F. (2014). Evaluation of feature-based methods for automated network orientation. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 45.
- [RefApollonio et al., 2018] Apollonio, F. I., Basilissi, V., Callieri, M., Dellepiane, M., Gaiani, M., Ponchio, F., Rizzo, F., Rubino, A. R., Scopigno, R., and Sobra’, G. (2018). A 3d-centered information

REFERENCES

- system for the documentation of a complex restoration intervention. *Journal of Cultural Heritage*, 29 :89–99.
- [RefApollonio and Giovannini, 2015] Apollonio, F. I. and Giovannini, E. C. (2015). A paradata documentation methodology for the uncertainty visualization in digital reconstruction of ch artifacts. *SCIRES-IT - SCIENTIFIC RESEARCH AND INFORMATION TECHNOLOGY*, 5(11) :1–24.
- [RefAron et al., 2006] Aron, M., Simon, G., and Berger, M.-O. (2006). Utilisation d’un capteur inertiel comme aide au suivi basé vision. In *15ème congrès francophone Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle-RFIA 2006*.
- [RefAzaoui, 2019] Azaoui, B. (2019). Multimodalité, Transmodalité et Intermodalité : Considérations Épistémologiques et Didactiques. *Revue de recherches en littérature médiatique multimodale*, 10.
- [RefBaltsavias, 1999] Baltsavias, E. P. (1999). A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2) :83–94.
- [RefBarazzetti et al., 2018] Barazzetti, L., Previtali, M., and Roncoroni, F. (2018). Can we use low-cost 360 degree cameras to create accurate 3d models? *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2 :69–75.
- [RefBarazzetti et al., 2009] Barazzetti, L., Remondino, F., and Scaioni, M. (2009). Combined use of photogrammetric and computer vision techniques for fully automated and accurate 3D modeling of terrestrial objects. In Remondino, F., Shortis, M. R., and El-Hakim, S. F., editors, *Videometrics, Range Imaging, and Applications X*, volume 7447, page 74470M. International Society for Optics and Photonics, SPIE.
- [RefBarazzetti et al., 2010] Barazzetti, L., Remondino, F., Scaioni, M., Lo Brutto, M., Rizzi, A., and Brumana, R. (2010). Geometric and radiometric analysis of paintings. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(Part 5).
- [RefBarbero-García et al., 2018] Barbero-García, I., Cabrelles, M., Lerma, J. L., and Marqués-Mateu, Á. (2018). Smartphone-based close-range photogrammetric assessment of spherical objects. *The Photogrammetric Record*, 33(162) :283–299.
- [RefBares et al., 2020] Bares, A., Keefe, D. F., and Samsel, F. (2020). Close Reading for Visualization Evaluation. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 40(4) :84–95.
- [RefBarsanti et al., 2014] Barsanti, S. G., Remondino, F., Fenández-Palacios, B. J., and Visintini, D. (2014). Critical Factors and Guidelines for 3D Surveying and Modelling in Cultural Heritage. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 3(1) :141–158.
- [RefBekele et al., 2021] Bekele, M. K., Champion, E., McMeekin, D. A., and Rahaman, H. (2021). The influence of collaborative and multi-modal mixed reality : Cultural learning in virtual heritage. *Multimodal Technologies and Interaction*, 5(1212) :79.
- [RefBentkowska-Kafel and MacDonald, 2017] Bentkowska-Kafel, A. and MacDonald, L. (2017). *Digital Techniques for Documenting and Preserving Cultural Heritage*. Arc Humanities Press.
- [RefBerchtold et al., 2020] Berchtold, W., Liu, H., Steinebach, M., Klein, D., Senger, T., and Thenee, N. (2020). JAB Code - A Versatile Polychrome 2D Barcode. 2020(3) :207–1–207–7.
- [RefBergerot et al., 2022] Bergerot, L., Blaise, J.-Y., Pamart, A., and Dudek, I. (2022). Visual cross-examination of architectural and acoustic data : the 3d integrator experiment. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 46 :81–88.

REFERENCES

- [RefBernsen, 1994] Bernsen, N. O. (1994). Foundations of multimodal representations : A taxonomy of representational modalities. *Interacting with Computers*, 6(4) :347–371.
- [RefBertacchi et al., 2018] Bertacchi, S., Al Jawarneh, I. M., Apollonio, F. I., Bertacchi, G., Cancilla, M., Foschini, L., Grana, C., Martuscelli, G., and Montanari, R. (2018). Sacher project : A cloud platform and integrated services for cultural heritage and for restoration. In *Proceedings of the 4th EAI International Conference on Smart Objects and Technologies for Social Good - Goodtechs '18*, page 283–288, Bologna, Italy. ACM Press.
- [RefBesl and McKay, 1992] Besl, P. J. and McKay, N. D. (1992). Method for registration of 3-d shapes. In *Sensor Fusion IV : Control Paradigms and Data Structures*, volume 1611, pages 586–607. International Society for Optics and Photonics.
- [RefBianchi et al., 2018] Bianchi, M. G., Casula, G., Cuccuru, F., Fais, S., Ligas, P., and Ferrara, C. (2018). Three-dimensional imaging from laser scanner, photogrammetric and acoustic non-destructive techniques in the characterization of stone building materials. In *Advances in Geosciences*, volume 45, page 57–62. Copernicus GmbH.
- [RefBianchini and Russo, 2018] Bianchini, C. and Russo, M. (2018). Massive 3d acquisition of ch. In *2018 3rd Digital Heritage International Congress (DigitalHERITAGE) held jointly with 2018 24th International Conference on Virtual Systems & Multimedia (VSMM 2018)*, pages 1–8.
- [RefBianco et al., 2013] Bianco, G., Bruno, F., and Muzzupappa, M. (2013). Multispectral data cube acquisition of aligned images for document analysis by means of a filter-wheel camera provided with focus control. *Journal of Cultural Heritage*, 14(3) :190–200.
- [RefBiasotti et al., 2015] Biasotti, S., Cerri, A., Falcidieno, B., and Spagnuolo, M. (2015). 3d artifacts similarity based on the concurrent evaluation of heterogeneous properties. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 8(4) :19.
- [RefBlaise et al., 2004] Blaise, J.-Y., Domenico, F. D., Luca, L. D., and Dudek, I. (2004). Acquisition de données VS gestion de connaissances patrimoniales : le cas des vestiges du théâtre antique d’arles. In *Actes des quatrièmes journées Extraction et Gestion des Connaissances, Clermont Ferrand, France, 20-23 janvier 2004, 2 Volumes*, volume RNTI-E-2 of *Revue des Nouvelles Technologies de l’Information*, page 561–566. Cépaduès-Éditions.
- [RefBlaise and Dudek, 2017] Blaise, J. Y. and Dudek, I. (2017). What comes before a digital output ? eliciting and documenting cultural heritage research processes. *International Journal of Culture and History (EJournal)*, 3(1) :86–97.
- [RefBlaise et al., 2022] Blaise, J.-Y., Dudek, I., Pamart, A., Bergerot, L., Vidal, A., Fargeot, S., Aramaki, M., Ystad, S., and Kronland-Martinet, R. (2022). Acquisition and integration of spatial and acoustic features : a workflow tailored to small-scale heritage architecture. *ACTA IMEKO*, 11(2) :1. Publisher : IMEKO International Measurement Confederation.
- [RefBorder et al., 2018] Border, R., Gammell, J. D., and Newman, P. (2018). Surface Edge Explorer (SEE) : Planning Next Best Views Directly from 3D Observations. *arXiv :1802.08617 [cs]*.
- [RefBoström et al., 2007] Boström, H., Andler, S. F., Brohede, M., Johansson, R., Karlsson, E., Laere, J. V., Niklasson, L., Nilsson, M., Persson, A., and Ziemke, T. (2007). On the definition of information fusion as a field of research. Technical report.

REFERENCES

- [RefBourmaud, 2007] Bourmaud, G. (2007). L'organisation systémique des instruments : méthodes d'analyse, propriétés et perspectives de conception ouvertes. In *Colloque de l'Association pour la Recherche Cognitive - ARCo'07 : Cognition - Complexité - Collectif*, page 61.
- [RefBoutsi et al., 2019] Boutsi, A.-M., Ioannidis, C., and Soile, S. (2019). An Integrated Approach to 3D Web Visualization of Cultural Heritage Heterogeneous Datasets. *Remote Sensing*, 11(21) :2508.
- [RefBoutsi et al., 2023] Boutsi, A.-M., Tallis, I., Pastos, I., Verykokou, S., and Ioannidis, C. (2023). 5dmeteora framework : Management and web publishing of cultural heritage data. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-M-1-2023 :33–40.
- [RefBowker et al., 2016] Bowker, G. C., Timmermans, S., Clarke, A. E., and Balka, E. (2016). *Boundary objects and beyond : Working with Leigh Star*.
- [RefBriard et al., 2023] Briard, T., Jean, C., Aoussat, A., and Véron, P. (2023). Integrating sensors in products : a new tool for design education. *Proceedings of the Design Society*, 3 :2345–2354.
- [RefBrown, 1992] Brown, L. G. (1992). A Survey of Image Registration Techniques. *ACM Computing Surveys*, 24 :325–376.
- [RefBrunetti et al., 2016] Brunetti, B., Miliani, C., Rosi, F., Doherty, B., Monico, L., Romani, A., and Sgamellotti, A. (2016). Non-invasive Investigations of Paintings by Portable Instrumentation : The MOLAB Experience. *Topics in Current Chemistry*, 374(1).
- [RefBruseker et al., 2017] Bruseker, G., Carboni, N., and Guillem, A. (2017). Cultural heritage data management : the role of formal ontology and cidoc crm. *Heritage and archaeology in the digital age : acquisition, curation, and dissemination of spatial cultural heritage data*, page 93–131.
- [RefBuglio and Derycke, 2015] Buglio, D. L. and Derycke, D. (2015). Reduce to understand : A challenge for analysis and three-dimensional documentation of architecture. *Envisioning Architecture : Image, Perception and Communication of Heritage*.
- [RefBuglio et al., 2015] Buglio, D. L., Lardinois, V., and Luca, L. D. (2015). What do thirty-one columns say about a “theoretical” thirty-second? *J. Comput. Cult. Herit.*, 8(1).
- [RefBuitelaar et al., 2008] Buitelaar, P., Cimiano, P., Frank, A., Hartung, M., and Racioppa, S. (2008). Ontology-based information extraction and integration from heterogeneous data sources. *International Journal of Human-Computer Studies*, 66(11) :759–788.
- [RefCalantropio et al., 2018] Calantropio, A., Deseilligny, M. P., Rinaudo, F., and Rupnik, E. (2018). Evaluation of photogrammetric block orientation using quality descriptors from statistically filtered tie points. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2 :185–191.
- [RefCalvet et al., 2016] Calvet, L., Gurdjos, P., Griwodz, C., and Gasparini, S. (2016). Detection and accurate localization of circular fiducials under highly challenging conditions. In *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 562–570.
- [RefCambien, 2008] Cambien, A. (2008). *Une introduction à l'approche systémique : appréhender la complexité*. report, Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU).
- [RefCantó et al., 2022] Cantó, A., Lerma, J. L., Martínez Valle, R., and Villaverde, V. (2022). Multi-light photogrammetric survey applied to the complex documentation of engravings in palaeolithic rock art : the cova de les meravelles (gandia, valencia, spain). *Heritage Science*, 10(1) :169.

REFERENCES

- [RefCapurro and Verheul, 2023] Capurro, Carlotta, P. G. and Verheul, J. (2023). Digital heritage infrastructures as cultural policy instruments : Europeana and the enactment of european citizenship. *International Journal of Cultural Policy*, 0(0) :1–21.
- [RefCaradonna et al., 2018] Caradonna, G., Tarantino, E., Scaioni, M., and Figorito, B. (2018). Multi-image 3d reconstruction : A photogrammetric and structure from motion comparative analysis. In *International Conference on Computational Science and Its Applications*, pages 305–316. Springer.
- [RefCarboni, 2020] Carboni, N. (2020). *Conceptualization and semantic description in digitized tangible / intangible Cultural Heritage Content*. PhD thesis, National Technical University of Athens.
- [RefCarboni et al., 2016] Carboni, N., Bruseker, G., Guillem, A., Castañeda, D. B., Coughenour, C., Domajnko, M., de Kramer, M., Calles, M. R., Stathopoulou, E., and Suma, R. (2016). Data provenance in photogrammetry through documentation protocols. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3 :57.
- [RefCarboni and De Luca, 2019] Carboni, N. and De Luca, L. (2019). An ontological approach to the description of visual and iconographical representations. *Heritage*, 2(2) :1191–1210.
- [RefCaron et al., 2012] Caron, G., Dame, A., and Marchand, E. (2012). L’information mutuelle pour l’estimation visuelle directe de pose. In *RFIA 2012 (Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle)*, pages 978–2–9539515–2–3, Lyon, France. Session ”Articles”.
- [RefCaron et al., 2014] Caron, G., Dame, A., and Marchand, E. (2014). Direct model based visual tracking and pose estimation using mutual information. *Image and Vision Computing*, 32(1) :54–63.
- [RefCastanedo, 2013] Castanedo, F. (2013). A review of data fusion techniques. *The Scientific World Journal*, 2013 :1–19.
- [RefCatharia et al., 2023] Catharia, O., Richard, F., Vignoles, H., Véron, P., Aoussat, A., and Segonds, F. (2023). Smartphone lidar data : A case study for numerisation of indoor buildings in railway stations. *Sensors*, 23(4).
- [RefCera, 2022] Cera, V. (2022). Multisensor data fusion for culture heritage assets monitoring and preventive conservation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVI-2-W1-2022 :151–157.
- [RefCerreta and Savino, 2020] Cerreta, M. and Savino, V. (2020). *Circular Enhancement of the Cultural Heritage : An Adaptive Reuse Strategy for Ercolano Heritagescape*, volume 12251 of *Lecture Notes in Computer Science*, page 1016–1033. Springer International Publishing, Cham.
- [RefChaban et al., 2019] Chaban, A., Tornari, V., Deiana, R., Andrianakis, M., Giovannacci, D., and Detalle, V. (2019). A Combined Non-Invasive Approach to the Study of A Mosaic Model : First Laboratory Experimental Results. *Journal of Imaging*, 5(6) :58.
- [RefChabin, 2020] Chabin, M.-A. (2020). La recherche en archivistique à l’épreuve de la société numérique. *Archives*, 49(1-2) :141–160.
- [RefChane et al., 2013a] Chane, C. S., Mansouri, A., Marzani, F. S., and Boochs, F. (2013a). Integration of 3D and multispectral data for cultural heritage applications : Survey and perspectives. *Image and Vision Computing*, 31(1) :91–102.
- [RefChane et al., 2013b] Chane, C. S., Schütze, R., Boochs, F., and Marzani, F. S. (2013b). Registration of arbitrary multi-view 3D acquisitions. *Computers in industry*, 64(9) :1082–1089.

REFERENCES

- [RefChang et al., 2011] Chang, C.-T., Gorissen, B., and Melchior, S. (2011). Fast oriented bounding box optimization on the rotation group $so(3)$. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 30(5) :1–16.
- [RefCharrier et al., 2023] Charrier, Q., Hakam, N., Benfriha, K., Meyrueis, V., Liotard, C., and Aoussat, A. (2023). A roadmap for monitoring cyber-physical systems through the digital twin using an iot sensing architecture. Preprint [10.2139/ssrn.4406361](https://doi.org/10.2139/ssrn.4406361).
- [RefChatzifoti, 2016] Chatzifoti, O. (2016). On the popularization of digital close-range photogrammetry : A handbook for new users.
- [RefChen et al., 2015] Chen, C., Li, Y., Liu, W., and Huang, J. (2015). Sirf : Simultaneous satellite image registration and fusion in a unified framework. *IEEE Transactions on Image Processing*, 24(11) :4213–4224.
- [RefChen et al., 2022] Chen, H., Gao, F., Zhu, Q., Yan, Q., Hua, D., and Stanič, S. (2022). Storage method of multi-channel lidar data based on tree structure. *Scientific Reports*, 12(1) :9075.
- [RefChen and Medioni, 1992] Chen, Y. and Medioni, G. (1992). Object modelling by registration of multiple range images. *Image and vision computing*, 10(3) :145–155.
- [RefChiranthi and Shigeo, 2018] Chiranthi, W. and Shigeo, S. (2018). Metadata model for organizing digital archives of tangible and intangible cultural heritage, and linking cultural heritage information in digital space. *Library and Information Science Research E-Journal*, 28(2).
- [RefChristophe and Brédif, 2019] Christophe, S. and Brédif, M. (2019). Rendu et représentation graphiques d’informations spatio-temporelles. In *Journées Françaises d’Informatique Graphique et de Réalité Virtuelle*, page sciencesconf.org :jfigrv2019 :297341, Marseille, France. workshop.
- [RefCiortan et al., 2016] Ciortan, I. M., Pintus, R., Marchioro, G., Daffara, C., Giachetti, A., and Gobetti, E. (2016). A Practical Reflectance Transformation Imaging Pipeline for Surface Characterization in Cultural Heritage. In Catalano, C. E. and Luca, L. D., editors, *Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage*. The Eurographics Association.
- [RefCoburn et al., 2010] Coburn, E., Light, R., McKenna, G., Stein, R., and Vitzthum, A. (2010). Lido—lightweight information describing objects. *Specification Version*, 1.
- [RefColace et al., 2013] Colace, F., De Santo, M., Greco, L., Chianese, A., Moscato, V., and Picariello, A. (2013). Chis : Cultural heritage information system. *International Journal of Knowledge Society Research (IJKSR)*, 4(4) :18–26.
- [RefComino Trinidad et al., 2020] Comino Trinidad, M., Chica, A., and Andujar, C. (2020). Easy Authoring of Image-Supported Short Stories for 3D Scanned Cultural Heritage. In Spagnuolo, M. and Melero, F. J., editors, *Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage*. The Eurographics Association.
- [RefCondorelli et al., 2021] Condorelli, F., Rinaudo, F., Salvatore, F., and Tagliaventi, S. (2021). A comparison between 3d reconstruction using nerf neural networks and mvs algorithms on cultural heritage images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B2-2021 :565–570.
- [RefCoppola, 1990] Coppola, G. (1990). Fulvio Cairoli Giuliani. Archeologia documentazione grafica, 1986. *Archéologie médiévale*, 20(1) :494–495.

REFERENCES

- [RefCorsini et al., 2009] Corsini, M., Dellepiane, M., Ponchio, F., and Scopigno, R. (2009). Image-to-geometry registration : a mutual information method exploiting illumination-related geometric properties. In *Computer Graphics Forum*, volume 28, pages 1755–1764. Wiley Online Library.
- [RefCosentino, 2015] Cosentino, A. (2015). Panoramic, macro and micro multispectral imaging : An affordable system for mapping pigments on artworks. *Journal of Conservation and Museum Studies*.
- [RefCouper, 2017] Couper, M. (2017). Birth and diffusion of the concept of paradata. *Advances in Social Research*, 18 :14–26.
- [RefCramereri et al., 2020] Cramereri, F., Shephard, G. E., and Heron, P. J. (2020). The misuse of colour in science communication. *Nature communications*, 11(1) :5444.
- [RefCroce, 2022] Croce, V. (2022). *Transfert et repérage d’annotations sémantiques pour le patrimoine architectural. Un système méthodologique combinant Intelligence Artificielle, H-BIM et plateformes d’annotations collaboratives reality-based*. These de doctorat, Paris, HESAM.
- [RefCroce, 2023] Croce, V. (2023). Digital heritage classification via machine learning and h-bim. *Nexus Network Journal*, 25(1) :415–421.
- [RefCroce et al., 2023a] Croce, V., Caroti, G., De Luca, L., Piemonte, A., and Véron, P. (2023a). Neural radiance fields (NERF) : Review and potential applications to digital cultural heritage. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-2–2023 :453–460.
- [RefCroce et al., 2023b] Croce, V., Caroti, G., Piemonte, A., De Luca, L., and Véron, P. (2023b). H-BIM and Artificial Intelligence : Classification of Architectural Heritage for Semi-Automatic Scan-to-BIM Reconstruction. *Sensors*, 23(5) :2497.
- [RefCrombez et al., 2018] Crombez, N., Seulin, R., Morel, O., Fofi, D., and Demonceaux, C. (2018). Multimodal 2D image to 3D model registration via a mutual alignment of sparse and dense visual features. In *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 6316–6322. IEEE.
- [RefCundiff, 2004] Cundiff, M. V. (2004). An introduction to the metadata encoding and transmission standard (mets). *Library Hi Tech*, 22(1) :52–64.
- [RefDaffara et al., 2018] Daffara, C., Gobbetti, E., and Giachetti, A. (2018). A dicom-inspired metadata architecture for managing multimodal acquisitions in cultural heritage. In *Digital Cultural Heritage : Final Conference of the Marie Sk-Curie Initial Training Network for Digital Cultural Heritage, ITN-DCH 2017, Olimje, Slovenia, May 23–25, 2017, Revised Selected Papers*, volume 10605, page 37. Springer.
- [RefDandolo et al., 2019] Dandolo, C. L. K., Lopez, M., Fukunaga, K., Ueno, Y., Pillay, R., Giovannacci, D., Du, Y. L., Bai, X., Menu, M., and Detalle, V. (2019). Toward a multimodal fusion of layered cultural object images : complementarity of optical coherence tomography and terahertz time-domain imaging in the heritage field. *Appl. Opt.*, 58(5) :1281–1290.
- [RefD’Andrea and Fernie, 2013] D’Andrea, A. and Fernie, K. (2013). CARARE 2.0 : A metadata schema for 3D cultural objects. In *2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, volume 2, pages 137–143.

REFERENCES

- [RefDavis and Heravi, 2021] Davis, E. and Heravi, B. (2021). Linked data and cultural heritage : A systematic review of participation, collaboration, and motivation. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 14(2) :1–18.
- [RefDe Luca et al., 2010a] De Luca, L., Busarayat, C., Stefani, C., Renaudin, N., Florenzano, M., and Véron, P. (2010a). An iconography-based modeling approach for the spatio-temporal analysis of architectural heritage. In *Shape Modeling International Conference (SMI), 2010*, pages 78–89. IEEE.
- [RefDe Luca et al., 2010b] De Luca, L., Busarayat, C., Stefani, C., Veron, P., and Florenzano, M. (2010b). NUBES : describing, analysing, documenting and sharing digital representations of heritage buildings. In *Conference on Semantic 3D Media and Content*, page 2 p., Sophia Antipolis, France. INRIA.
- [RefDe Luca and Lievaux, 2023] De Luca, L. and Lievaux, P. (2023). Un projet européen de Cloud collaboratif pour le patrimoine culturel. *Culture et recherche*, (144).
- [RefDe Luca and Lo Buglio, 2014] De Luca, L. and Lo Buglio, D. (2014). *Geometry vs Semantics : Open Issues on 3D Reconstruction of Architectural Elements*, pages 36–49. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [RefDeGol et al., 2018] DeGol, J., Bretl, T., and Hoiem, D. (2018). Improved structure from motion using fiducial marker matching. In *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*, pages 273–288.
- [RefDegrigny et al., 2020] Degrigny, C., Joseph, E., Sitnik, R., Brambilla, L., and Mansouri, A. (2020). Description of adopted strategies of acquisition according to ESR projects. Deliverable D3.1.
- [RefDegrigny et al., 2016] Degrigny, C., Piqué, F., Papiashvili, N., Guery, J., Mansouri, A., Le Goïc, G., Detalle, V., Martos-Levif, D., Mounier, A., Wefers, S., et al. (2016). Technical study of germolles’ wall paintings : the input of imaging technique. *Virtual Archaeology Review*, 7(15) :1–8.
- [RefDeligiorgi et al., 2021] Deligiorgi, M., Maslioukova, M. I., Averkiou, M., Andreou, A. C., Selvaraju, P., Kalogerakis, E., Patow, G., Chrysanthou, Y., and Artopoulos, G. (2021). A 3d digitisation workflow for architecture-specific annotation of built heritage. *Journal of Archaeological Science : Reports*, 37 :102787.
- [RefDibble et al., 2007] Dibble, H. L., Marean, C. W., and McPherron, S. P. (2007). The use of barcodes in excavation projects : examples from mossel bay (south africa) and roc de marsal (france). *The SAA Archaeological Record*, 7(1) :33–38.
- [RefDimitriou et al., 2016] Dimitriou, N., Drosou, A., and Tzovaras, D. (2016). Scan4Reco : Towards the Digitized Conservation of Cultural Heritage Assets via Spatiotemporal (4D) Reconstruction and 3D Printing. In Catalano, C. E. and Luca, L. D., editors, *Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage*. The Eurographics Association.
- [RefDimoulas, 2022] Dimoulas, C. A. (2022). Cultural heritage storytelling, engagement and management in the era of big data and the semantic web. *Sustainability*, 14(22) :812.
- [RefDondero, 2010] Dondero, M. G. (2010). Sémiotique de l’image scientifique. *Signata. Annales des sémiotiques / Annals of Semiotics*, (11) :111–175.
- [RefDragoni et al., 2017] Dragoni, M., Tonelli, S., and Moretti, G. (2017). A knowledge management architecture for digital cultural heritage. *J. Comput. Cult. Herit.*, 10(3).

REFERENCES

- [RefDudek and Blaise, 2002] Dudek, I. and Blaise, J.-Y. (2002). 3D models as visual interfaces in the documentation of the architectural heritage : experiment on the defensive system of cracow. page 746. ACTA Press.
- [RefDudek and Blaise, 2023] Dudek, I. and Blaise, J.-Y. (2023). Research workflows, paradata, and information visualisation : feedback on an exploratory integration of issues and practices - MEMORIA IS. *Peer Community in Archaeology*.
- [RefDudek et al., 2022] Dudek, I., Blaise, J.-Y., Rabefandroana, M., Bénistant, P., and Renaudin, N. (2022). MEMORIA - nomenclature of activities. Technical report, CNRS - UMR 3495 MAP.
- [RefDulecha et al., 2020] Dulecha, T. G., Fanni, F. A., Ponchio, F., Pellacini, F., and Giachetti, A. (2020). Neural reflectance transformation imaging. *The Visual Computer*, 36(10) :2161–2174.
- [RefDutagaci et al., 2010] Dutagaci, H., Cheung, C. P., and Godil, A. (2010). A benchmark for best view selection of 3d objects. In *Proceedings of the ACM workshop on 3D object retrieval*, pages 45–50. ACM.
- [RefDutailly et al., 2023] Dutailly, B., Portais, J.-C., and Granier, X. (2023). RIS3D : A Referenced Information System in 3D. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 15(4) :73 :1–73 :20.
- [RefD’Andrea and Fernie, 2013] D’Andrea, A. and Fernie, K. (2013). 3D ICONS metadata schema for 3D objects. *Newsletter di Archeologia CISA*, 4 :159–181.
- [RefEgels, 2011] Egels, Y. (2011). La photogrammétrie, principes généraux et terminologie. *Collection EDYTEM. Cahiers de géographie*, 12(1) :41–50.
- [RefElias et al., 2011] Elias, M., Mas, N., and Cotte, P. (2011). Review of several optical non-destructive analyses of an easel painting. Complementarity and crosschecking of the results. *Journal of Cultural Heritage*, 12(4) :335–345.
- [RefErenoglu et al., 2017] Erenoglu, R. C., Akcay, O., and Erenoglu, O. (2017). An UAS-assisted multi-sensor approach for 3D modeling and reconstruction of cultural heritage site. *Journal of Cultural Heritage*, 26 :79–90.
- [RefErmine, 2000] Ermine, J.-L. (2000). *Les systèmes de connaissances*. Hermes Science Publication.
- [RefEscobar et al., 2020] Escobar, P., Candela, G., Trujillo, J., Marco-Such, M., and Peral, J. (2020). Adding value to linked open data using a multidimensional model approach based on the rdf data cube vocabulary. *Computer Standards & Interfaces*, 68 :103378.
- [RefEslami et al., 2018] Eslami, S. M. A., Jimenez Rezende, D., Besse, F., Viola, F., Morcos, A. S., Garnelo, M., Ruderman, A., Rusu, A. A., Danihelka, I., Gregor, K., Reichert, D. P., Buesing, L., Weber, T., Vinyals, O., Rosenbaum, D., Rabinowitz, N., King, H., Hillier, C., Botvinick, M., Wierstra, D., Kavukcuoglu, K., and Hassabis, D. (2018). Neural scene representation and rendering. *Science*, 360(6394) :1204–1210.
- [RefEsteban et al., 2005] Esteban, J., Starr, A., Willetts, R., Hannah, P., and Bryanston-Cross, P. (2005). A review of data fusion models and architectures : towards engineering guidelines. *Neural Computing and Applications*, 14(4) :273–281.
- [RefFan et al., 2016] Fan, X., Zhang, L., Brown, B., and Rusinkiewicz, S. (2016). Automated view and path planning for scalable multi-object 3D scanning. *ACM Transactions on Graphics*, 35(6) :1–13.

REFERENCES

- [RefFarella et al., 2019a] Farella, E., Torresani, A., and Remondino, F. (2019a). Sparse point cloud filtering based on covariance features. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42(2/W15).
- [RefFarella et al., 2019b] Farella, E. M., Torresani, A., and Remondino, F. (2019b). Quality features for the integration of terrestrial and uav images. In *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume XLII-2-W9, pages 339–346. Copernicus GmbH.
- [RefFernandez et al., 2019] Fernandez, P. D. M., Guerrero-Peña, F. A., Ren, T. I., and Leandro, J. J. G. (2019). Fast and robust multiple colorchecker detection using deep convolutional neural networks. *Image and Vision Computing*, 81 :15–24. arXiv : 1810.08639.
- [RefFerrazzi, 2021] Ferrazzi, S. (2021). The notion of “cultural heritage” in the international field : Behind origin and evolution of a concept. *International Journal for the Semiotics of Law - Revue internationale de Sémiotique juridique*, 34(3) :743–768.
- [RefFrancioni, 2007] Francioni, F. (2007). Des bien culturel au patrimoine culturel : l’évolution dynamique d’un concept et de son extension. In Yusuf, A., editor, *L’action normative a l’UNESCO*, volume 1, pages 231–247. Élaboration de règles internationales sur l’éducation.
- [RefFraser, 1984] Fraser, C. S. (1984). Network design considerations for non-topographic photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 50(8) :1115–1126.
- [RefFrohlich et al., 2018] Frohlich, R., Gubo, S., Lévai, A., and Kato, Z. (2018). *3D–2D Data Fusion in Cultural Heritage Applications*, page 111–130. Springer, Singapore.
- [RefFuchs, 2006] Fuchs, A. (2006). *Outils Numériques Pour Le Relevé Architectural et La Restitution Archéologique*. PhD thesis, Université Henri Poincaré-Nancy I.
- [RefFurner, 2020] Furner, J. (2020). Definitions of “metadata” : A brief survey of international standards. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 71(6) :E33–E42.
- [RefGaiani et al., 2015] Gaiani, M., Apollonio, F. I., Clini, P., and Quattrini, R. (2015). A mono-instrumental approach to high-quality 3d reality-based semantic models application on the palladio library. In *2015 Digital Heritage*, volume 2, pages 29–36.
- [RefGao et al., 2020] Gao, J., Li, P., Chen, Z., and Zhang, J. (2020). A survey on deep learning for multimodal data fusion. *Neural Computation*, 32(5) :829–864.
- [RefGarozzo et al., 2021] Garozzo, R., Santagati, C., Spampinato, C., and Vecchio, G. (2021). Knowledge-based generative adversarial networks for scene understanding in cultural heritage. *Journal of Archaeological Science : Reports*, 35 :102736.
- [RefGattet et al., 2015] Gattet, E., Devogelaere, J., Raffin, R., Bergerot, L., Daniel, M., Jockey, P., and De Luca, L. (2015). A versatile and low-cost 3D acquisition and processing pipeline for collecting mass of archaeological findings on the field. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(5) :299.
- [RefGattet, 2017] Gattet, (2017). Mercurio - Système et Procédé de Numérisation Tridimensionnelle d’un Objet. (brevet) fr 3 059 416 : <https://data.inpi.fr/brevets/W02018096116?q=Gattet#W02018096116>.

REFERENCES

- [RefGeorgiev and Georgiev, 2017] Georgiev, I. and Georgiev, I. (2017). An Information Technology Framework for the Development of an Embedded Computer System for the Remote and Non-Destructive Study of Sensitive Archaeology Sites. *Computation*, 5(2) :21. Publisher : MDPI.
- [RefGeorgopoulos, 2018] Georgopoulos, A. (2018). Contemporary Digital Technologies at the Service of Cultural Heritage. In Chanda, B., Chaudhuri, S., and Chaudhuri, S., editors, *Heritage Preservation : A Computational Approach*, pages 1–20. Springer Singapore, Singapore.
- [RefGeorgopoulos and Stathopoulou, 2017] Georgopoulos, A. and Stathopoulou, E. K. (2017). *Data Acquisition for 3D Geometric Recording : State of the Art and Recent Innovations*, pages 1–26. Springer International Publishing, Cham.
- [RefGiachetti et al., 2017] Giachetti, A., Ciortan, I., Daffara, C., Marchioro, G., Pintus, R., and Gobbetti, E. (2017). A novel framework for highlight reflectance transformation imaging. *Computer Vision and Image Understanding*.
- [RefGiang et al., 2017] Giang, N. T., Pierrot-Deseilligny, M., Muller, J.-M., and Thom, C. (2017). Second iteration of photogrammetric pipeline to enhance the accuracy of image pose estimation. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42.
- [RefGirao et al., 2009] Girao, P. S., Postolache, O., and Pereira, J. M. (2009). Data fusion, decision-making, and risk analysis : Mathematical tools and techniques. *Data Modeling for Metrology and Testing in Measurement Science*, page 1–50.
- [RefGirardeau-Montaut, 2022] Girardeau-Montaut, D. (2022). Cloudcompare (version 2.12.4) [gpl software].
- [RefGodding et al., 1993] Godding, R., Sacher, G., and Siedler, G. (1993). Multispectral analysis of digital image data in architectural photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 29 :794–794.
- [RefGonzalez-Aguilera et al., 2018] Gonzalez-Aguilera, D., López-Fernández, L., Rodriguez-Gonzalvez, P., Hernandez-Lopez, D., Guerrero, D., Remondino, F., Menna, F., Nocerino, E., Toschi, I., Ballabeni, A., et al. (2018). Graphos—open-source software for photogrammetric applications. *The Photogrammetric Record*, 33(161) :11–29.
- [RefGonzález-de Santos et al., 2018] González-de Santos, L., Díaz-Vilariño, L., Balado, J., Martínez-Sánchez, J., González-Jorge, H., Sánchez-Rodríguez, A., González-de Santos, L. M., Díaz-Vilariño, L., Balado, J., Martínez-Sánchez, J., González-Jorge, H., and Sánchez-Rodríguez, A. (2018). Autonomous Point Cloud Acquisition of Unknown Indoor Scenes. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(7) :250.
- [RefGottardi and Guerra, 2018] Gottardi, C. and Guerra, F. (2018). Spherical images for cultural heritage : survey and documentation with the nikon km360. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2 :385–390.
- [RefGoy et al., 2020] Goy, A., Colla, D., Magro, D., Accornero, C., Loreto, F., and Radicioni, D. P. (2020). Building semantic metadata for historical archives through an ontology-driven user interface. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 13(3) :1–36.
- [RefGranshaw and Fraser, 2015] Granshaw, S. I. and Fraser, C. S. (2015). Computer vision and photogrammetry : Interaction or introspection? *The Photogrammetric Record*, 30(149) :3–7.

REFERENCES

- [RefGrazioso et al., 2020] Grazioso, M., Di Maro, M., and Cutugno, F. (2020). " what's that called ?" : a multimodal fusion approach for cultural heritage virtual experiences. In *Proceedings of the Second Symposium on Psychology-Based Technologies*, VOL-2730, Naples, Italy. CEUR Workshop Proceedings.
- [RefGreenberg, 2005] Greenberg, J. (2005). Understanding metadata and metadata schemes. *Understanding metadata and metadata schemes*, 40(3-4) :17-36.
- [RefGrifoni et al., 2022] Grifoni, E., Bonizzoni, L., Gargano, M., Melada, J., Ludwig, N., Bruni, S., and Mignani, I. (2022). Hyper-dimensional Visualization of Cultural Heritage : A Novel Multi-analytical Approach on 3D Pomological Models in the Collection of the University of Milan. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 15(2) :1-15.
- [RefGrifoni et al., 2018] Grifoni, E., Legnaioli, S., Nieri, P., Campanella, B., Lorenzetti, G., Pagnotta, S., Poggialini, F., and Palleschi, V. (2018). Construction and comparison of 3d multi-source multi-band models for cultural heritage applications. *Journal of Cultural Heritage*, 34 :261-267. Technoheritage 2017.
- [RefGrilli et al., 2023] Grilli, E., Daniele, A., Bassier, M., Remondino, F., and Serafini, L. (2023). Knowledge enhanced neural networks for point cloud semantic segmentation. *Remote Sensing*, 15(1010) :2590.
- [RefGrilli et al., 2021] Grilli, E., Poux, F., and Remondino, F. (2021). Unsupervised object-based clustering in support of supervised point-based 3d point cloud classification. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B2-2021 :471-478.
- [RefGrillo et al., 2010] Grillo, A., Lentini, A., Querini, M., and Italiano, G. F. (2010). High Capacity Colored Two Dimensional codes. In *Proceedings of the International Multiconference on Computer Science and Information Technology*, pages 709-716. IEEE.
- [RefGriwodz et al., 2018] Griwodz, C., Calvet, L., and Halvorsen, P. (2018). Popsift : a faithful sift implementation for real-time applications. In *Proceedings of the 9th ACM Multimedia Systems Conference*, pages 415-420. ACM.
- [RefGruen, 1988] Gruen, A. (1988). Towards real-time photogrammetry. *Photogrammetria*, 42(5-6) :209-244.
- [RefGruen, 1998] Gruen, A. (1998). Real-time photogrammetry : The fast road to virtual worlds? *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32 :1-8.
- [RefGruen, 2008] Gruen, A. (2008). Reality-based generation of virtual environments for digital earth. *International Journal of Digital Earth*, 1(1) :88-106.
- [RefGrussenmeyer et al., 2002] Grussenmeyer, P., Drap, P., and Gaillard, G. (2002). Arpenteur 3.0 : Recent developments in web based photogrammetry. In *ISPRS, Commission VI : Education and Communications.*, pages 1-7.
- [RefGuarnieri et al., 2006] Guarnieri, A., Remondino, F., and Vettore, A. (2006). Digital photogrammetry and TLS data fusion applied to Cultural Heritage 3D modeling. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 36 :1-6.

REFERENCES

- [RefGuidi et al., 2009] Guidi, G., Russo, M., Ercoli, S., Remondino, F., Rizzi, A., and Menna, F. (2009). A Multi-Resolution Methodology for the 3D Modeling of Large and Complex Archeological Areas. *International Journal of Architectural Computing*, 7(1) :39–55.
- [RefGuillem et al., 2023] Guillem, A., Gros, A., and Deluca, L. (2023). Faire parler les claveaux effondrés de la cathédrale Notre-Dame de Paris. In *Humanistica 2023, Données et patrimoine*, Genève, Switzerland. Association francophone des humanités numériques.
- [RefGuillerme, 2011] Guillerme, A. (2011). Françoise Choay, Le patrimoine en questions : anthologie pour un combat. *Documents pour l'histoire des techniques. Nouvelle série*, (20) :248–249.
- [RefGuo et al., 2009] Guo, H., Fan, X., and Wang, C. (2009). A digital earth prototype system : Deps/cas. *International Journal of Digital Earth*, 2(1) :3–15.
- [RefGutiérrez and Servigne, 2007] Gutiérrez, C. and Servigne, S. (2007). Métadonnées spatiotemporelles temps réel. *Ingénierie des systèmes d'information*, 12(2) :97–119.
- [RefHackel et al., 2017] Hackel, T., Wegner, J. D., and Schindler, K. (2017). Joint classification and contour extraction of large 3d point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 130 :231–245.
- [RefHall and Garga, 1999] Hall, D. L. and Garga, A. K. (1999). Pitfalls in data fusion (and how to avoid them). In *Proceedings of the Second International Conference on Information Fusion (Fusion'99)*, volume 1, pages 429–436.
- [RefHall et al., 2008] Hall, D. L., McNeese, M., Llinas, J., and Mullen, T. (2008). A framework for dynamic hard/soft fusion. In *11th International Conference on Information Fusion*, pages 1–8. IEEE.
- [RefHall and Steinberg, 2001] Hall, D. L. and Steinberg, A. (2001). Dirty secrets in multisensor data fusion. In Hall, D., . L.-J., editor, *Multisensor Data Fusion (1st ed.)*. CRC Press, Boca Raton.
- [RefHänsch et al., 2014] Hänsch, R., Weber, T., and Hellwich, O. (2014). Comparison of 3D interest point detectors and descriptors for point cloud fusion. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-3 :57–64.
- [RefHartley and Mundy, 1993] Hartley, R. I. and Mundy, J. L. (1993). Relationship between photogrammetry and computer vision. In *Integrating photogrammetric techniques with scene analysis and machine vision*, volume 1944, pages 92–106. International Society for Optics and Photonics.
- [RefHartmann et al., 2016] Hartmann, W., Havlena, M., and Schindler, K. (2016). Recent developments in large-scale tie-point matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115 :47–62.
- [RefHasnain and Rebholz-Schuhmann, 2018] Hasnain, A. and Rebholz-Schuhmann, D. (2018). Assessing fair data principles against the 5-star open data principles. In Gangemi, A., Gentile, A. L., Nuzzolese, A. G., Rudolph, S., Maleshkova, M., Paulheim, H., Pan, J. Z., and Alam, M., editors, *The Semantic Web : ESWC 2018 Satellite Events*, pages 469–477, Cham. Springer International Publishing.
- [RefHastedt et al., 2018] Hastedt, H., Rofallski, R., Luhmann, T., Rosenbauer, R., Ochsner, D., and Rieke-Zapp, D. (2018). Prototypic development and evaluation of a medium format metric camera. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2 :441–448.

REFERENCES

- [RefHedeard et al., 2019] Hedeard, S. B., Brøns, C., Drug, I., Saulins, P., Bercu, C., Jakovlev, A., and Kjær, L. (2019). Multispectral photogrammetry : 3d models highlighting traces of paint on ancient sculptures. In *DHN*, pages 181–189.
- [RefHeller et al., 2015] Heller, J., Havlena, M., Jancosek, M., Torii, A., and Pajdla, T. (2015). 3d reconstruction from photographs by cmp sfm web service. In *Machine Vision Applications (MVA), 2015 14th IAPR International Conference on*, pages 30–34. IEEE.
- [RefHermon et al., 2012] Hermon, S., Niccolucci, F., and Ronzino, P. (2012). A Metadata Schema for Cultural Heritage Documentation. In *Electronic Imaging & the Visual Arts : EVA 2012 Florence, 9-11 May 2012*. Firenze University Press, Firenze.
- [RefHess et al., 2015] Hess, M., Petrovic, V., Meyer, D., Rissolo, D., and Kuester, F. (2015). Fusion of multimodal three-dimensional data for comprehensive digital documentation of cultural heritage sites. In *2015 Digital Heritage*, volume 2, pages 595–602. IEEE.
- [RefHey and Trefethen, 2003] Hey, T. and Trefethen, A. (2003). The Data Deluge : An e-Science Perspective. In *Wiley Series in Communications Networking & Distributed Systems*, pages 809–824. John Wiley & Sons, Ltd.
- [RefHill and Whitty, 2021] Hill, G. N. and Whitty, M. A. (2021). Embedding metadata in images at time of capture using physical Quick Response (QR) codes. 58(3) :102504.
- [RefHirschmuller, 2005] Hirschmuller, H. (2005). Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference on*, volume 2, pages 807–814. IEEE.
- [RefHuang et al., 2021] Huang, X., Mei, G., Zhang, J., and Abbas, R. (2021). A comprehensive survey on point cloud registration. arXiv :2103.02690 [cs].
- [RefHuber and Hebert, 2003] Huber, D. F. and Hebert, M. (2003). Fully automatic registration of multiple 3d data sets. *Image and Vision Computing*, 21(7) :637–650.
- [RefHuisman et al., 2019] Huisman, M., Hammer, M., Rigano, A., Boehm, U., Chambers, J. J., Gaudreault, N., North, A. J., Pimentel, J. A., Sudar, D., Bajcsy, P., Brown, C. M., Corbett, A. D., Faklaris, O., Lacoste, J., Laude, A., Nelson, G., Nitschke, R., Grunwald, D., and Strambio-De-Castillia, C. (2019). A perspective on Microscopy Metadata : Data provenance and quality control.
- [RefHuvila, 2013] Huvila, I. (2013). The unbearable complexity of documenting intellectual processes : Paradata and virtual cultural heritage visualisation. *Human IT : Journal for Information Technology Studies as a Human Science*, 12(1).
- [RefIoannou et al., 2012] Ioannou, Y., Taati, B., Harrap, R., and Greenspan, M. (2012). Difference of normals as a multi-scale operator in unorganized point clouds. In *2012 Second International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization & Transmission*, pages 501–508. IEEE.
- [RefJames et al., 2017] James, M. R., Robson, S., and Smith, M. W. (2017). 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry : precision maps for ground control and directly georeferenced surveys : 3-D uncertainty-based change detection for SfM surveys. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(12) :1769–1788.

REFERENCES

- [RefJancosek and Pajdla, 2011] Jancosek, M. and Pajdla, T. (2011). Multi-view reconstruction preserving weakly-supported surfaces. In *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011 IEEE Conference on*, pages 3121–3128. IEEE.
- [RefJancosek and Pajdla, 2014] Jancosek, M. and Pajdla, T. (2014). Exploiting visibility information in surface reconstruction to preserve weakly supported surfaces. *International scholarly research notices*, 2014.
- [RefJankowski and Hachet, 2013] Jankowski, J. and Hachet, M. (2013). A Survey of Interaction Techniques for Interactive 3D Environments. In *Eurographics 2013 - STAR*, Girona, Spain.
- [RefJaspe-Villanueva et al., 2021] Jaspe-Villanueva, A., Ahsan, M., Pintus, R., Giachetti, A., Marton, F., and Gobetti, E. (2021). Web-based exploration of annotated multi-layered relightable image models. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 14(2) :1–29.
- [RefJaud et al., 2016] Jaud, M., Passot, S., Le Bivic, R., Delacourt, C., Grandjean, P., and Le Dantec, N. (2016). Assessing the accuracy of high resolution digital surface models computed by photoscan and micmac in sub-optimal survey conditions. *Remote Sensing*, 8(6) :465.
- [RefJeanson, 2020] Jeanson, L. (2020). *Apports à La Construction d’outillage Informatique Pour Les Études Liées Au Patrimoine*. These de doctorat, Ecole centrale de Nantes.
- [RefJeanson et al., 2019] Jeanson, L., Laroche, F., and Kerouanton, J.-L. J. (2019). Proposition méthodologique de gestion de la complexité et de l’hétérogénéité par le recours au web sémantique dans une perspective d’étude patrimoniale. In *16ème colloque national AIP Primeca-s. mart, Les Karellis*.
- [RefJewitt et al., 2016] Jewitt, C., Bezemer, J., and O’Halloran, K. (2016). *Introducing Multimodality*. Routledge.
- [RefJia and Lichti, 2018] Jia, F. and Lichti, D. D. (2018). An efficient hierarchical viewpoint planning strategy for terrestrial laser scanner networks. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-2 :137–144.
- [RefJones et al., 2020] Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., and Hicks, B. (2020). Characterising the digital twin : A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29 :36–52.
- [RefJu et al., 2022] Ju, Y., Lam, K.-M., Xie, W., Zhou, H., Dong, J., and Shi, B. (2022). Deep learning methods for calibrated photometric stereo and beyond : A survey. (arXiv :2212.08414). arXiv :2212.08414 [cs].
- [RefJuarez et al., 2021] Juarez, M. G., Botti, V. J., and Giret, A. S. (2021). Digital twins : Review and challenges. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 21(3) :030802.
- [RefJusoh and Almajali, 2020] Jusoh, S. and Almajali, S. (2020). A systematic review on fusion techniques and approaches used in applications. *IEEE Access*, 8 :14424–14439.
- [RefKaragiannis et al., 2009] Karagiannis, G. T., Vavliakis, K. N., Sotiropoulou, S., Damtsios, A., Alexiadis, D. S., and Salpistis, C. (2009). Using signal processing and semantic web technologies to analyze byzantine iconography. *IEEE Intelligent Systems*, 24.
- [RefKaraszewski et al., 2013] Karaszewski, M., Adamczyk, M., Sitnik, R., Michoński, J., Załuski, W., Bunsch, E., and Bolewicki, P. (2013). Automated full-3D digitization system for documentation of

REFERENCES

- paintings. In Pezzati, L. and Targowski, P., editors, *SPIE Optical Metrology 2013*, page 87900X, Munich, Germany.
- [RefKarmacharya et al., 2018] Karmacharya, A., Wefers, S., and Boochs, F. (2018). Knowledge Based Optimal Recommendation of Spatial Technologies for Documentation of Buildings. In Ioannides, M., Martins, J., Žarnić, R., and Lim, V., editors, *Advances in Digital Cultural Heritage*, Lecture Notes in Computer Science, pages 65–77. Springer International Publishing.
- [RefKe and Roumeliotis, 2017] Ke, T. and Roumeliotis, S. I. (2017). An efficient algebraic solution to the perspective-three-point problem. pages 4618–4626.
- [RefKesäniemi et al., 2022] Kesäniemi, J., Koho, M., and Hyvönen, E. (2022). *Using Wikibase for Managing Cultural Heritage Linked Open Data Based on CIDOC CRM*, volume 1652 of *Communications in Computer and Information Science*, page 542–549. Springer International Publishing, Cham.
- [RefKhaleghi et al., 2013] Khaleghi, B., Khamis, A., Karray, F. O., and Razavi, S. N. (2013). Multisensor data fusion : A review of the state-of-the-art. *Information Fusion*, 14(1) :28–44.
- [RefKharroubi et al., 2021] Kharroubi, A., Van Wersch, L., Billen, R., and Poux, F. (2021). Tesseræ3D : a benchmark for tesseræ semantic segmentation in 3D point clouds. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V-2-2021 :121–128.
- [RefKhoury and Kamat, 2009] Khoury, H. M. and Kamat, V. R. (2009). Evaluation of position tracking technologies for user localization in indoor construction environments. *Automation in Construction*, 18(4) :444–457.
- [RefKinsman, 2016] Kinsman, T. (2016). An Easy to Build Reflectance Transformation Imaging (RTI) System. *Journal of Biocommunication*, 40(1).
- [RefKlein, 2004] Klein, L. A. (2004). *Sensor and Data Fusion : A Tool for Information Assessment and Decision Making*. SPIE, 1000 20th Street, Bellingham, WA 98227-0010 USA.
- [RefKniaz et al., 2019] Kniaz, V. V., Remondino, F., and Knyaz, V. A. (2019). Generative adversarial networks for single photo 3D reconstruction. In *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume XLII-2-W9, page 403–408. Copernicus GmbH.
- [RefKohler et al., 2013] Kohler, J., Noll, T., Reis, G., and Stricker, D. (2013). A full-spherical device for simultaneous geometry and reflectance acquisition. In *2013 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV)*, pages 355–362, Clearwater Beach, FL, USA. IEEE.
- [RefKrátký et al., 2021] Krátký, V., Petráček, P., Nascimento, T., Čadilová, M., Škobrtal, M., Stoudek, P., and Saska, M. (2021). Safe Documentation of Historical Monuments by an Autonomous Unmanned Aerial Vehicle. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(11) :738.
- [RefKrátký et al., 2020] Krátký, V., Petráček, P., Spurný, V., and Saska, M. (2020). Autonomous Reflectance Transformation Imaging by a Team of Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2) :2302–2309.
- [RefKrijnen and Beetz, 2020] Krijnen, T. and Beetz, J. (2020). An efficient binary storage format for ifc building models using hdf5 hierarchical data format. *Automation in Construction*, 113 :103134.
- [RefLahat et al., 2015] Lahat, D., Adali, T., and Jutten, C. (2015). Multimodal data fusion : an overview of methods, challenges, and prospects. *Proceedings of the IEEE*, 103(9) :1449–1477.

REFERENCES

- [RefLaroche, 2017] Laroche, F. (2017). *KLM for Heritage*. Habilitation à diriger des recherches, Université de Nantes.
- [RefLarsson et al., 2017] Larsson, V., Kukelova, Z., and Zheng, Y. (2017). Making minimal solvers for absolute pose estimation compact and robust. In *2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pages 2335–2343. IEEE.
- [RefLeigh Star, 2010] Leigh Star, S. (2010). This is not a boundary object : Reflections on the origin of a concept. *Science, Technology, & Human Values*, 35(5) :601–617.
- [RefLepetit et al., 2005] Lepetit, V., Fua, P., et al. (2005). Monocular model-based 3d tracking of rigid objects : A survey. *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, 1(1) :1–89.
- [RefLi et al., 2021a] Li, S., Ge, X., Hu, H., and Zhu, Q. (2021a). Laplacian fusion approach of multi-source point clouds for detail enhancement. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 171 :385–396.
- [RefLi et al., 2018] Li, W., Wang, C., Zai, D., Huang, P., Liu, W., Wen, C., and Li, J. (2018). A Volumetric Fusing Method for TLS and SFM Point Clouds. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(9) :3349–3357.
- [RefLi et al., 2021b] Li, Y., Liu, P., Li, H., and Huang, F. (2021b). A Comparison Method for 3D Laser Point Clouds in Displacement Change Detection for Arch Dams. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(3) :184.
- [RefLimp et al., 2010] Limp, W. F., Payne, A., Winters, S., Barnes, A., and Cothren, J. (2010). Approaching 3D Digital Heritage Data from a Multi- technology, Lifecycle Perspective. page 8.
- [RefLiu and Ram, 2017] Liu, J. and Ram, S. (2017). Improving the Domain Independence of Data Provenance Ontologies : A Demonstration Using Conceptual Graphs and the W7 Model. *Journal of Database Management*, 28(1) :43–62.
- [RefLiu and Heer, 2018] Liu, Y. and Heer, J. (2018). Somewhere over the rainbow : An empirical assessment of quantitative colormaps. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, page 1–12, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- [RefLivingstone, 2007] Livingstone, D. N. (2007). Science, site and speech : scientific knowledge and the spaces of rhetoric. *History of the Human Sciences*, 20(2) :71–98.
- [RefLlamas et al., 2017] Llamas, J., M. Lerones, P., Medina, R., Zalama, E., and Gómez-García-Bermejo, J. (2017). Classification of architectural heritage images using deep learning techniques. *Applied Sciences*, 7(10) :992.
- [RefLo Buglio, 2016] Lo Buglio, D. (2016). *Caractérisation de formes architecturales : une approche expérimentale intégrant complexité et intelligibilité des représentations numériques*. PhD thesis, Université Libre de Bruxelles.
- [RefLo Buglio and De Luca, 2011] Lo Buglio, D. and De Luca, L. (2011). Critical review of 3D digitization methods and techniques applied to the field of architectural heritage : Methodological and cognitive issues. The Eurographics Association.
- [RefLouie, 2010] Louie, A. (2010). Multimodality Imaging Probes : Design and Challenges. *Chemical Reviews*, 110(5) :3146–3195.

REFERENCES

- [RefLow, 2004] Low, K.-L. (2004). Linear least-squares optimization for point-to-plane ICP surface registration. *Chapel Hill, University of North Carolina*, 4(10).
- [RefLowe, 2004] Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, 60(2) :91–110.
- [RefLuxman et al., 2022] Luxman, R., Castro, Y. E., Chatoux, H., Nurit, M., Siatou, A., Le Goïc, G., Brambilla, L., Degrieny, C., Marzani, F., and Mansouri, A. (2022). LightBot : A Multi-Light Position Robotic Acquisition System for Adaptive Capturing of Cultural Heritage Surfaces. *Journal of Imaging*, 8(5) :134.
- [RefMacchia et al., 2022] Macchia, A., Biribicchi, C., Rivaroli, L., Aureli, H., Cerafogli, E., Colasanti, I. A., Carnazza, P., Demasi, G., and La Russa, M. F. (2022). Combined Use of Non-Invasive and Micro-Invasive Analytical Investigations to Understand the State of Conservation and the Causes of Degradation of I Tesori del Mare (1901) by Plinio Nomellini. *Methods and Protocols*, 5(3) :52.
- [RefMacDonald et al., 2016] MacDonald, L., Toschi, I., Nocerino, E., Hess, M., Remondino, F., and Robson, S. (2016). Accuracy of 3D reconstruction in an illumination dome. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B5 :69–76.
- [RefMahdavi and Wolosiuk, 2019] Mahdavi, A. and Wolosiuk, D. (2019). Integration of operational data in building information modelling : From ontology to application. *E3S Web Conf.*, 111 :05021.
- [RefMaietti et al., 2018] Maietti, F., Di Giulio, R., Balzani, M., Piaia, E., Medici, M., and Ferrari, F. (2018). 3D Data Acquisition and Modelling of Complex Heritage Buildings. In Ioannides, M., editor, *Digital Cultural Heritage*, volume 10605, pages 1–13. Springer International Publishing, Cham.
- [RefMakadia et al., 2006] Makadia, A., Patterson, A., and Daniilidis, K. (2006). Fully automatic registration of 3d point clouds. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2006 IEEE Computer Society Conference on*, volume 1, pages 1297–1304. IEEE.
- [RefMalik and Guidi, 2018] Malik, U. S. and Guidi, G. (2018). Massive 3d digitization of sculptures : Methodological approaches for improving efficiency. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, 364(1) :012015.
- [RefMallison and Wings, 2014] Mallison, H. and Wings, O. (2014). Photogrammetry in Paleontology – A practical guide. *Journal of Paleontological Techniques*, 12 :31.
- [RefManuel, 2016] Manuel, A. (2016). *Annotation sémantique 2D/3D d’images spatialisées pour la documentation et l’analyse d’objets patrimoniaux*. These de doctorat, Paris, ENSAM.
- [RefManuel et al., 2014] Manuel, A., De Luca, L., and Veron, P. (2014). A Hybrid Approach for the Semantic Annotation of Spatially Oriented Images. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 3(2) :305–320.
- [RefManuel et al., 2018] Manuel, A., M’Darhri, A. A., Abergel, V., Rozar, F., and De Luca, L. (2018). A semi-automatic 2d/3d annotation framework for the geometric analysis of heritage artefacts. In *2018 3rd Digital Heritage International Congress (DigitalHERITAGE)*, pages 1–7. IEEE.
- [RefMarelli et al., 2023] Marelli, D., Morelli, L., Farella, E. M., Bianco, S., Ciocca, G., and Remondino, F. (2023). Enrich : Multi-purpose dataset for benchmarking in computer vision and photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 198 :84–98.

REFERENCES

- [RefMarkiewicz et al., 2021] Markiewicz, J., Bochenska, A., Kot, P., Lapinski, S., and Muradov, M. (2021). The Integration of The Multi-Source Data for Multi-Temporal Investigation of Cultural Heritage Objects. In *2021 14th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)*, pages 63–68, Sharjah, United Arab Emirates. IEEE.
- [RefMartin, 2005] Martin, A. (2005). *La fusion d'informations*. Number Réf. : 1484.
- [RefMartin-Beaumont et al., 2013] Martin-Beaumont, N., Nony, N., Deshayes, B., Pierrot-Deseilligny, M., and De Luca, L. (2013). Photographer-friendly work-flows for image-based modelling of heritage artefacts. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W2 :421–424.
- [RefMasciotta et al., 2023] Masciotta, M. G., Sanchez-Aparicio, L. J., Oliveira, D. V., and Gonzalez-Aguilera, D. (2023). Integration of Laser Scanning Technologies and 360° Photography for the Digital Documentation and Management of Cultural Heritage Buildings. *International Journal of Architectural Heritage*, 17(1) :56–75.
- [RefMasiero et al., 2018a] Masiero, A., Fissore, F., Guarnieri, A., Pirotti, F., Visintini, D., Vettore, A., Masiero, A., Fissore, F., Guarnieri, A., Pirotti, F., Visintini, D., and Vettore, A. (2018a). Performance evaluation of two indoor mapping systems : Low-cost uwb-aided photogrammetry and backpack laser scanning. *Applied Sciences*, 8(3) :416.
- [RefMasiero et al., 2018b] Masiero, A., Fissore, F., Guarnieri, A., and Vettore, A. (2018b). Indoor photogrammetry aided with UWB navigation. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2 :683–690.
- [RefMathys et al., 2019] Mathys, A., Jadinon, R., and Hallot, P. (2019). Exploiting 3D multispectral texture for a better feature identification for cultural heritage. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-2/W6 :91–97.
- [RefMatrone et al., 2020] Matrone, F., Grilli, E., Martini, M., Paolanti, M., Pierdicca, R., and Remondino, F. (2020). Comparing machine and deep learning methods for large 3D heritage semantic segmentation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(9) :535.
- [RefMazzacca et al., 2023] Mazzacca, G., Karami, A., Rigon, S., Farella, E. M., Trybala, P., and Remondino, F. (2023). NERF for heritage 3D reconstruction. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-2-2023 :1051–1058.
- [RefMeghini et al., 2017] Meghini, C., Scopigno, R., Richards, J., Wright, H., Geser, G., Cuy, S., Fihn, J., Fanini, B., Hollander, H., Niccolucci, F., Felicetti, A., Ronzino, P., Nurra, F., Papatheodorou, C., Gavrilis, D., Theodoridou, M., Doerr, M., Tudhope, D., Binding, C., and Vlachidis, A. (2017). Ariadne : A research infrastructure for archaeology. 10(3).
- [RefMelgar and Farias, 2019] Melgar, M. E. V. and Farias, M. C. Q. (2019). High density two-dimensional color code. 78(2) :1949–1970.
- [RefMengiste et al., 2022] Mengiste, E., Prieto, S. A., and García de Soto, B. (2022). Comparison of TLS and Photogrammetric 3D Data Acquisition Techniques : Considerations for Developing Countries. In *39th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*.
- [RefMenna et al., 2017] Menna, F., Nocerino, E., Morabito, D., Farella, E. M., Perini, M., and Remondino, F. (2017). An open source low-cost automatic system for image-based 3D digitization. *ISPRS -*

REFERENCES

- International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W8 :155–162.
- [RefMenna et al., 2022] Menna, F., Torresani, A., Battisti, R., Nocerino, E., and Remondino, F. (2022). A modular and low-cost portable VSLAM system for real-time 3D mapping : From indoor and outdoor spaces to underwater environments. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-2/W1-2022 :153–162.
- [RefMerkel, 2014] Merkel, D. (2014). Docker : Lightweight linux containers for consistent development and deployment. *Linux J.*, 2014(239).
- [RefMessaoudi, 2017] Messaoudi, T. (2017). *Proposition d’une ontologie de domaine dédiée à l’annotation d’images spatialisées pour le suivi de la conservation du patrimoine culturel bâti*. Theses, Ecole nationale supérieure d’arts et métiers - ENSAM.
- [RefMessaoudi et al., 2018] Messaoudi, T., Véron, P., Halin, G., and De Luca, L. (2018). An ontological model for the reality-based 3D annotation of heritage building conservation state. *Journal of Cultural Heritage*, 29 :100–112.
- [RefMi and Pollock, 2018] Mi, X. and Pollock, B. M. (2018). Metadata Schema to Facilitate Linked Data for 3D Digital Models of Cultural Heritage Collections : A University of South Florida Libraries Case Study. 56(2-3) :273–286.
- [RefMoropoulou et al., 2013] Moropoulou, A., Labropoulos, K. C., Delegou, E. T., Karoglou, M., and Bakolas, A. (2013). Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage. *Construction and Building Materials*, 48 :1222–1239.
- [RefMorreale et al., 2019] Morreale, L., Romanoni, A., and Matteucci, M. (2019). Predicting the next best view for 3d mesh refinement. In Strand, M., Dillmann, R., Menegatti, E., and Ghidoni, S., editors, *Intelligent Autonomous Systems 15*, pages 760–772, Cham. Springer International Publishing.
- [RefMoulon et al., 2013] Moulon, P., Monasse, P., and Marlet, R. (2013). Global fusion of relative motions for robust, accurate and scalable structure from motion. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, pages 3248–3255.
- [RefMoulon et al., 2016] Moulon, P., Monasse, P., Perrot, R., and Marlet, R. (2016). Openmvg : Open multiple view geometry. In *International Workshop on Reproducible Research in Pattern Recognition*, pages 60–74. Springer.
- [RefMouragnon et al., 2006] Mouragnon, E., Lhuillier, M., Dhome, M., Dekeyser, F., and Sayd, P. (2006). 3D reconstruction of complex structures with bundle adjustment : an incremental approach. In *Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on*, pages 3055–3061. IEEE.
- [RefMuetzelfeldt, 2004] Muetzelfeldt, R. (2004). *Position Paper on Declarative Modelling in Ecological and Environmental Research*. Community Research General Information. Office for Official Publ. of the European Communities, Luxembourg.
- [RefMusiani and Schafer, 2016] Musiani, F. and Schafer, V. (2016). Patrimoine et patrimonialisation numériques. *RESET*, (6).

REFERENCES

- [RefMutanen, 2007] Mutanen, A. (2007). La méthodologie des sciences de l'ingénieur comme combinaison d'aspects épistémiques, éthiques et esthétiques.
- [RefMünster, 2023] Münster, S. (2023). Advancements in 3d heritage data aggregation and enrichment in europe : Implications for designing the jena experimental repository for the dfg 3d viewer. *Applied Sciences*, 13(17).
- [RefNespeca and De Luca, 2016] Nespeca, R. and De Luca, L. (2016). Analysis, thematic maps and data mining from point cloud to ontology for software development. In *XXIII ISPRS Congress*, volume XLI-B5 of *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Prague, Czech Republic.
- [RefNex et al., 2015] Nex, F., Gerke, M., Remondino, F., Przybilla, H.-J., Bäumker, M., and Zurhorst, A. (2015). Isprs benchmark for multi-platform photogrammetry. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-3/W4 :135–142.
- [RefNiang et al., 2017] Niang, C., Marinica, C., Markhoff, B., Leboucher, E., Malavergne, O., Bouiller, L., Darrieumerlou, C., and Laissus, F. (2017). Supporting semantic interoperability in conservation-restoration domain : The parcours project. *J. Comput. Cult. Herit.*, 10(3).
- [RefNiccolucci et al., 2023] Niccolucci, F., Markhoff, B., Theodoridou, M., Felicetti, A., and Hermon, S. (2023). The heritage digital twin : a bicycle made for two. the integration of digital methodologies into cultural heritage research. *arXiv preprint arXiv :2302.07138*.
- [RefNicolae et al., 2014] Nicolae, C., Nocerino, E., Menna, F., and Remondino, F. (2014). Photogrammetry applied to Problematic artefacts. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5 :451–456.
- [RefNigay and Coutaz, 1993] Nigay, L. and Coutaz, J. (1993). A design space for multimodal systems : Concurrent processing and data fusion. In *Proceedings of the INTERACT '93 and CHI '93 Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '93, pages 172–178, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- [RefNigay and Coutaz, 1996] Nigay, L. and Coutaz, J. (1996). Espaces conceptuels pour l'interaction multimédia et multimodale. *Technique et science informatiques*, 15(9) :1195–1225.
- [RefNilsson et al., 2007] Nilsson, D., Pletinckx, D., Van Gool, L., and Vergauwen, M. (2007). The arc 3d webservice. *EPOCH Knowhow book*, available at <http://www.her-it-age.net/>, ISBN, pages 978–91.
- [RefNishanbaev et al., 2021] Nishanbaev, I., Champion, E., and McMeekin, D. A. (2021). A Web GIS-Based Integration of 3D Digital Models with Linked Open Data for Cultural Heritage Exploration. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(10) :684.
- [RefNocerino et al., 2020] Nocerino, E., Menna, F., and Hänsch, R. (2020). Lightcam : Enlightening the camera obscura – where photogrammetry, computer and robotic vision meet. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B5-2020 :63–67.
- [RefNocerino et al., 2014] Nocerino, E., Menna, F., and Remondino, F. (2014). Accuracy of typical photogrammetric networks in cultural heritage 3D modeling projects. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5 :465–472.

REFERENCES

- [RefNocerino et al., 2017] Nocerino, E., Poiesi, F., Locher, A., Tefera, Y. T., Remondino, F., Chippendale, P., and Van Gool, L. (2017). 3d reconstruction with a collaborative approach based on smartphones and a cloud-based server. In *International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences : Proceedings of the ISPRS Commission V Mid-Term Symposium 'Close Range Image Measurement Techniques'*, volume 42, pages 187–194. Copernicus.
- [RefNocerino et al., 2018] Nocerino, E., Rieke-Zapp, D. H., Trinkl, E., Rosenbauer, R., Farella, E., Morabito, D., and Remondino, F. (2018). Mapping vis and uvl imagery on 3d geometry for non-invasive, non-contact analysis of a vase. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42(2) :773–780.
- [RefNony et al., 2012] Nony, N., De Luca, L., Godet, A., Pierrot-Deseilligny, M., Remondino, F., Van Dongen, A., and Vincitore, M. (2012). Protocols and assisted tools for effective image-based modeling of architectural elements. In *Progress in Cultural Heritage Preservation : 4th International Conference, EuroMed 2012, Limassol, Cyprus, October 29–November 3, 2012. Proceedings 4*, pages 432–439. Springer.
- [RefNova et al., 2023] Nova, N. A., González, R. A., Beltrán, L. C., and Nieto, C. E. (2023). A knowledge management system for sharing knowledge about cultural heritage projects. *Journal of Cultural Heritage*, 63 :61–70.
- [RefNova Arévalo et al., 2023] Nova Arévalo, N., González, R. A., Beltrán, L. C., and Nieto, C. E. (2023). A Knowledge Management System for Sharing Knowledge About Cultural Heritage Projects. *SSRN Electronic Journal*.
- [RefOrtega-Alvarado et al., 2022] Ortega-Alvarado, L. M., García-Fernández, Á.-L., Conde-Rodríguez, F., and Jurado-Rodríguez, J. M. (2022). Integrated and interactive 4D system for archaeological stratigraphy. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 14(10) :203.
- [RefOspina-Bohórquez et al., 2023] Ospina-Bohórquez, A., Del Pozo, S., Courtenay, L. A., and González-Aguilera, D. (2023). Handheld stereo photogrammetry applied to crime scene analysis. *Measurement*, 216 :112861.
- [RefOussama Meski and Furet, 2021] Oussama Meski, Farouk Belkadi, F. L. M. R. and Furet, B. (2021). A generic knowledge management approach towards the development of a decision support system. *International Journal of Production Research*, 59(22) :6659–6676.
- [RefPaiz-Reyes et al., 2020] Paiz-Reyes, E., Brédif, M., and Christophe, S. (2020). Geometric distortion of historical images for 3D visualization. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V-2-2020 :649–655.
- [RefPalma et al., 2010] Palma, G., Corsini, M., Dellepiane, M., and Scopigno, R. (2010). Improving 2d-3d registration by mutual information using gradient maps. In *Eurographics Italian Chapter Conference*, pages 89–94.
- [RefPandya and Galiyawala, 2014] Pandya, K. H. and Galiyawala, H. J. (2014). A survey on qr codes : in context of research and application. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4(3) :258–262.
- [RefPavoni et al., 2022] Pavoni, G., Giuliani, F., De Falco, A., Corsini, M., Ponchio, F., Callieri, M., and Cignoni, P. (2022). On assisting and automatizing the semantic segmentation of masonry walls. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 15(2) :1–17.

REFERENCES

- [RefPepe et al., 2022] Pepe, M., Alfio, V. S., Costantino, D., and Herban, S. (2022). Rapid and Accurate Production of 3D Point Cloud via Latest-Generation Sensors in the Field of Cultural Heritage : A Comparison between SLAM and Spherical Videogrammetry. *Heritage*, 5(3) :1910–1928.
- [RefPersson and Nordberg, 2018] Persson, M. and Nordberg, K. (2018). Lambda twist : An accurate fast robust perspective three point (p3p) solver. In *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*, pages 318–332.
- [RefPeteler et al., 2015] Peteler, F., Gattet, E., Bromblet, P., Guillon, O., Vallet, J., and Luca, L. D. (2015). Analyzing the evolution of deterioration patterns : A first step of an image-based approach for comparing multitemporal data sets. In *2015 Digital Heritage*, volume 2, page 113–116.
- [RefPetras et al., 2017] Petras, V., Hill, T., Stiller, J., and Gäde, M. (2017). Europeana – a Search Engine for Digitised Cultural Heritage Material. *Datenbank-Spektrum*, 17(1) :41–46.
- [RefPicollo et al., 2020] Picollo, M., Cucci, C., Casini, A., and Stefani, L. (2020). Hyper-spectral imaging technique in the cultural heritage field : New possible scenarios. *Sensors*, 20(1010) :2843.
- [RefPintus et al., 2016] Pintus, R., Ciortan, I. M., Giachetti, A., and Gobbetti, E. (2016). Practical Free-form RTI Acquisition with Local Spot Lights.
- [RefPintus et al., 2017] Pintus, R., Gobbetti, E., Callieri, M., and Dellepiane, M. (2017). *Techniques for Seamless Color Registration and Mapping on Dense 3D Models*, pages 355–376. Springer International Publishing, Cham.
- [RefPitzalis et al., 2011] Pitzalis, D., Niccolucci, F., and Cord, M. (2011). Using lido to handle 3D cultural heritage documentation data provenance. In *9th International Workshop on Content-Based Multimedia Indexing (CBMI 2011)*, page 37–42, Madrid, Spain.
- [RefPlumejeaud-Perreau et al., 2019] Plumejeaud-Perreau, Quinton, E., Pignol, C., Linyer, H., Ancelin, J., Cipièrre, S., Heintz, W., Rouan, M., Damy, S., and Bretagnolle, V. (2019). Towards better traceability of field sampling data. 129 :82–91.
- [RefPomerleau et al., 2013] Pomerleau, F., Colas, F., Siegwart, R., and Magnenat, S. (2013). Comparing icp variants on real-world data sets. *Autonomous Robots*, 34(3) :133–148.
- [RefPonchio et al., 2020] Ponchio, F., Callieri, M., Dellepiane, M., and Scopigno, R. (2020). Effective annotations over 3d models. *Computer Graphics Forum*, 39(1) :89–105.
- [RefPonciano et al., 2021] Ponciano, J.-J., Prudhomme, C., and Boochs, F. (2021). From acquisition to presentation—the potential of semantics to support the safeguard of cultural heritage. *Remote Sensing*, 13(1111) :2226.
- [RefPorter, Samantha Thi, 2016] Porter, Samantha Thi (2016). *A Portable, Low-Cost, Open-Design Rig for Reflectance Transformation Imaging*. Data Repository for the University of Minnesota, <http://doi.org/10.13020/D66C7Q>.
- [RefPotenziani et al., 2015] Potenziani, M., Callieri, M., Dellepiane, M., Corsini, M., Ponchio, F., and Scopigno, R. (2015). 3dhop : 3d heritage online presenter. *Computers & Graphics*, 52 :129–141.
- [RefPoux and Billen, 2019] Poux, F. and Billen, R. (2019). Voxel-based 3D Point Cloud Semantic Segmentation : Unsupervised Geometric and Relationship Featuring vs Deep Learning Methods. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(5) :213.

REFERENCES

- [RefPoux et al., 2017] Poux, F., Neuville, R., Van Wersch, L., Nys, G.-A., and Billen, R. (2017). 3D Point Clouds in Archaeology : Advances in Acquisition, Processing and Knowledge Integration Applied to Quasi-Planar Objects. *Geosciences*, 7(4) :96.
- [RefPoux and Ponciano, 2020] Poux, F. and Ponciano, J.-J. (2020). Self-learning ontology for instance segmentation of 3d indoor point cloud. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume XLIII. Copernicus, Goettingen, Germany.
- [RefPratikakis et al., 2010] Pratikakis, I., Spagnuolo, M., Theoharis, T., and Veltkamp, R. (2010). Semantics-driven approach for automatic selection of best views of 3d shapes.
- [RefPérouse de Montclos, 1972] Pérouse de Montclos, J.-M. (1972). *Architecture : méthode et vocabulaire - Ministère des affaires culturelles, Inventaire général des monuments et des richesses artistiques de la France*. Principes d’analyse scientifique. Imprimerie nationale, Paris.
- [RefQuan and Lan, 1999] Quan, L. and Lan, Z. (1999). Linear n-point camera pose determination. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 21(8) :774–780.
- [RefQuantin et al., 2016] Quantin, M., Hervy, B., Laroche, F., and Bernard, A. (2016). Supervised process of un-structured data analysis for knowledge chaining. *Procedia CIRP*, 50 :436–441. 26th CIRP Design Conference.
- [RefQuantin et al., 2023] Quantin, M., Tournon, S., Grimaud, V., Laroche, F., and Granier, X. (2023). Combining fair principles and long-term archival of 3d data. In *ACM Web3D conference*. ACM.
- [RefRabardel, 1995] Rabardel, P. (1995). *Les hommes et les technologies ; approche cognitive des instruments contemporains*. Armand Colin.
- [RefRabardel and Bourmaud, 2003] Rabardel, P. and Bourmaud, G. (2003). From computer to instrument system : A developmental perspective. *Interacting with Computers*, 15(5) :665–691.
- [RefRaco, 2023] Raco, F. (2023). From survey to integrated digital documentation of the cultural heritage of museums : A protocol for the anastylosis of archaeological finds. Preprint Available at SSRN :<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4379421>.
- [RefRadanovic et al., 2021] Radanovic, M., Khoshelham, K., and Fraser, C. (2021). A platform for multilayered documentation of cultural heritage. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V-4-2021 :9–15.
- [RefRahrig et al., 2023] Rahrig, M., Herrero Cortell, M. , and Lerma, J. L. (2023). Multiband photogrammetry and hybrid image analysis for the investigation of a wall painting by paolo de san leocadio and francesco pagano in the cathedral of valencia. *Sensors*, 23(4) :2301.
- [RefRam and Liu, 2008] Ram, S. and Liu, J. (2008). A Semiotics Framework for Analyzing Data Provenance Research. 2(3) :221–248.
- [RefRam and Liu, 2009] Ram, S. and Liu, J. (2009). A new perspective on semantics of data provenance. In *Proceedings of the First International Conference on Semantic Web in Provenance Management*, VOL-526, page 35–40, Aachen, DEU. CEUR Workshop Proceedings.
- [RefRamm et al., 2022] Ramm, R., Heinze, M., Kühmstedt, P., Christoph, A., Heist, S., and Notni, G. (2022). Portable solution for high-resolution 3D and color texture on-site digitization of cultural heritage objects. *Journal of Cultural Heritage*, 53 :165–175.

REFERENCES

- [RefRamos and Remondino, 2015] Ramos, M. M. and Remondino, F. (2015). Data fusion in Cultural Heritage - A Review. *XL-5/W7* :359–363.
- [RefRei et al., 2023] Rei, L., Mladenic, D., Dorozynski, M., Rottensteiner, F., Schleider, T., Troncy, R., Lozano, J. S., and Salvatella, M. G. (2023). Multimodal metadata assignment for cultural heritage artifacts. *Multimedia Systems*, 29(2) :847–869.
- [RefRemondino et al., 2012] Remondino, F., Del Pizzo, S., Kersten, T. P., and Troisi, S. (2012). Low-cost and open-source solutions for automated image orientation—a critical overview. In *Euro-Mediterranean Conference*, pages 40–54. Springer.
- [RefRemondino and El-Hakim, 2006] Remondino, F. and El-Hakim, S. (2006). Image-based 3D Modeling : A Review. *The Photogrammetric Record*, 21(115) :269–291.
- [RefRemondino and Fraser, 2006] Remondino, F. and Fraser, C. (2006). Digital camera calibration methods : considerations and comparisons. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 36(5) :266–272.
- [RefRemondino et al., 2017] Remondino, F., Nocerino, E., Toschi, I., and Menna, F. (2017). A critical review of automated photogrammetric processing of large datasets. In *26th International CIPA Symposium 2017*, volume 42, pages 591–599.
- [RefRemondino et al., 2014] Remondino, F., Spera, M. G., Nocerino, E., Menna, F., and Nex, F. (2014). State of the art in high density image matching. *The Photogrammetric Record*, 29(146) :144–166.
- [RefRemondino and Stylianidis, 2016] Remondino, F. and Stylianidis, E. (2016). *3D Recording, Documentation and Management of Cultural Heritage*, volume 2. Whittles Publishing Dunbeath, UK.
- [RefReser, 2012] Reser, G. (2012). What Not to Embed : Is it better not to embed certain cultural heritage metadata in images? 39(1).
- [RefRichards-Rissetto and von Schwerin, 2017] Richards-Rissetto, H. and von Schwerin, J. (2017). A catch 22 of 3d data sustainability : Lessons in 3d archaeological data management & accessibility. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 6 :38–48.
- [RefRieck, 2012] Rieck, M. Q. (2012). An algorithm for finding repeated solutions to the general perspective three-point pose problem. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 42(1) :92–100.
- [RefRodríguez-González et al., 2019] Rodríguez-González, P., Guerra Campo, Á., Muñoz-Nieto, Á. L., Sánchez-Aparicio, L. J., and González-Aguilera, D. (2019). Diachronic reconstruction and visualization of lost cultural heritage sites. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(2) :61.
- [RefRodríguez-González et al., 2018] Rodríguez-González, P., Muñoz-Nieto, A., del Pozo, S., Sanchez-Aparicio, L., Mills, J., Fieber, K., Haynes, I., Guidi, G., Micoli, L., and Barsanti, S. (2018). *4D Reconstruction of Cultural Heritage Sites*. MDPI.
- [RefRoncella et al., 2012] Roncella, R., Re, C., and Forlani, G. (2012). Performance evaluation of a structure and motion strategy in architecture and cultural heritage. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-5/W16 :285–292.
- [RefRosu et al., 2015] Rosu, A.-M., Assenbaum, M., De la Torre, Y., and Pierrot-Deseilligny, M. (2015). Coastal digital surface model on low contrast images. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(3) :307.

REFERENCES

- [RefRouger, 1994] Rouger, É. (1994). Nouveaux apports de l’image numérique en archéologie. *ArchéoSciences, revue d’Archéométrie*, 18(1) :19–22.
- [RefRoussel and De Luca, 2023] Roussel, R. and De Luca, L. (2023). An approach to build a complete digital report of the notre dame cathedral after the fire, using the aioli platform. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-2-2023 :1359–1365.
- [RefRuiz de Oña et al., 2023] Ruiz de Oña, E., Barbero-García, I., González-Aguilera, D., Remondino, F., Rodríguez-Gonzálvez, P., and Hernández-López, D. (2023). Photomatch : An open-source tool for multi-view and multi-modal feature-based image matching. *Applied Sciences*, 13(99) :5467.
- [RefRupnik et al., 2017] Rupnik, E., Daakir, M., and Pierrot Deseilligny, M. (2017). MicMac – a free, open-source solution for photogrammetry. 2(1) :14.
- [RefRusinkiewicz and Levoy, 2001] Rusinkiewicz, S. and Levoy, M. (2001). Efficient variants of the ICP algorithm. In *3-D Digital Imaging and Modeling, 2001. Proceedings. Third International Conference on*, pages 145–152. IEEE.
- [RefRéby et al., 2023] Réby, K., Guillem, A., and De Luca, L. (2023). Hybrid construction of knowledge graph and deep learning experiments for notre-dame de paris’ data. *Representation Challenges. Augmented Reality and Artificial Intelligence in Cultural Heritage and Innovative Design Domain*.
- [RefSaint-Aubin, 1992] Saint-Aubin, J.-P. (1992). *Le relevé et la représentation de l’architecture*. Number 2 in Documents & Méthodes. Inventaire général - ELP.
- [RefSaleh, 2018] Saleh, E. I. (2018). Image embedded metadata in cultural heritage digital collections on the web : An analytical study. *Library Hi Tech*, 36(2) :339–357.
- [RefSalvi et al., 2002] Salvi, J., Armangué, X., and Batlle, J. (2002). A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation. *Pattern recognition*, 35(7) :1617–1635.
- [RefSamaan, 2016] Samaan, M. (2016). *La photogrammétrie rapprochée au service de l’archéologie préventive*. PhD thesis, Université Paris-Est.
- [RefSanderson et al., 2013] Sanderson, R., Ciccacese, P., and Van De Sompel, H. (2013). Designing the W3C open annotation data model. In *Proceedings of the 5th Annual ACM Web Science Conference*, page 366–375, Paris France. ACM.
- [RefSantos et al., 2017] Santos, P., Ritz, M., Fuhrmann, C., Monroy, R., Schmedt, H., Tausch, R., Domajnko, M., Knuth, M., and Fellner, D. (2017). Acceleration of 3D Mass Digitization Processes : Recent Advances and Challenges. In Ioannides, M., Magnenat-Thalmann, N., and Papagiannakis, G., editors, *Mixed Reality and Gamification for Cultural Heritage*, pages 99–128. Springer International Publishing.
- [RefSantos et al., 2020] Santos, P., Tausch, R., Domajnko, M., Ritz, M., Knuth, M., and Fellner, D. (2020). Automated 3D Mass Digitization for the GLAM Sector. *Archiving Conference*, 17(1) :55–59.
- [RefSchroer and Mudge, 2017] Schroer, C. and Mudge, M. (2017). A Context Metadata Collection and Management Tool for Computational Photography Projects. 2017(1) :99–104.
- [RefSchutz, 2016] Schutz, M. (2016). Potree : Rendering large point clouds in web browsers. Master’s thesis, Institute of Computer Graphics and Algorithms, Vienna University of Technology, Favoritenstrasse 9-11/E193-02, A-1040 Vienna, Austria.

REFERENCES

- [RefSchutz, 2022] Schutz, M. (2022). Github - potree/potreeconverter : Create multi res point cloud to use with potree.
- [RefSchönberger and Frahm, 2016] Schönberger, J. L. and Frahm, J.-M. (2016). Structure-from-motion revisited. In *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 4104–4113.
- [RefScott, 2023] Scott, E. M. (2023). Framing data science, analytics and statistics around the digital earth concept. *Environmetrics*, 34(2) :e2732.
- [RefShah et al., 2014] Shah, R., Deshpande, A., and Narayanan, P. (2014). Multistage sfm : Revisiting incremental structure from motion. In *3DV*, pages 417–424.
- [RefShi et al., 2016] Shi, W., Kotoula, E., Akoglu, K., Yang, Y., and Rushmeier, H. (2016). CHER-Ob : A Tool for Shared Analysis in Cultural Heritage. In Catalano, C. E. and Luca, L. D., editors, *Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage*. The Eurographics Association.
- [RefShih and Faig, 1988] Shih, T. and Faig, W. (1988). A solution for space resection in closed form. *Int. Archive of Photogrammetry and Remote Sensing*, 27(B5) :547–556.
- [RefSiatou et al., 2022] Siatou, A., Nurit, M., Castro, Y., Goïc, G. L., Brambilla, L., Degryny, C., and Mansouri, A. (2022). New methodological approaches in reflectance transformation imaging applications for conservation documentation of cultural heritage metal objects. *Journal of Cultural Heritage*, 58 :274–283.
- [RefSimmhan et al., 2005] Simmhan, Y. L., Plale, B., and Gannon, D. (2005). A survey of data provenance in E-science. 34(3) :31–36.
- [RefSitnik et al., 2016] Sitnik, R., Bunsch, E., Mączkowski, G., Załuski, W., Lech, K., Michoński, J., Krzesłowski, J., and Foryś, P. (2016). Towards automated, high resolution 3D scanning of large surfaces for cultural heritage documentation. *Electronic Imaging*, 28(21) :3DIPM-051.1–3DIPM-051.7.
- [RefSkinner, 2014] Skinner, J. (2014). Metadata in archival and cultural heritage settings : A review of the literature. *Journal of Library Metadata*, 14(1) :52–68.
- [RefSmith and Singh, 2006] Smith, D. and Singh, S. (2006). Approaches to multisensor data fusion in target tracking : A survey. *IEEE transactions on knowledge and data engineering*, 18(12) :1696–1710.
- [RefSnavely et al., 2008] Snavely, N., Seitz, S. M., and Szeliski, R. (2008). Modeling the world from internet photo collections. *International journal of computer vision*, 80(2) :189–210.
- [RefSoler et al., 2017] Soler, F., Melero, F. J., and Luzón, M. V. (2017). A complete 3d information system for cultural heritage documentation. *Journal of Cultural Heritage*, 23 :49–57.
- [RefSona et al., 2014] Sona, G., Pinto, L., Pagliari, D., Passoni, D., and Gini, R. (2014). Experimental analysis of different software packages for orientation and digital surface modelling from uav images. *Earth Science Informatics*, 7(2) :97–107.
- [RefSpanò et al., 2018] Spanò, A., Chiabrando, F., Sammartano, G., and Teppati Losè, L. (2018). Integrated imaging approaches supporting the excavation activities. multi-scale geospatial documentation in hierapolis (TK). *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2 :1075–1082.

REFERENCES

- [RefStal et al., 2013] Stal, C., De Roo, B., De Maeyer, P., Nuttens, T., and De Wulf, A. (2013). Considerations on the fusion of multi-sensor spatial data for cultural heritage. In *Geographic Information Science, 16th AGILE conference, Proceedings*.
- [RefStamatopoulos and Fraser, 2014] Stamatopoulos, C. and Fraser, C. (2014). Automated target-free network orientation and camera calibration. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2(5).
- [RefStathopoulou and Remondino, 2019] Stathopoulou, E.-K. and Remondino, F. (2019). Semantic photogrammetry – boosting image-based 3D reconstruction with semantic labeling. In *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume XLII-2-W9, page 685–690. Copernicus GmbH.
- [RefStathopoulou and Remondino, 2023] Stathopoulou, E. K. and Remondino, F. (2023). A survey on conventional and learning-based methods for multi-view stereo. *The Photogrammetric Record*.
- [RefStathopoulou et al., 2019] Stathopoulou, E. K., Welponer, M., and Remondino, F. (2019). Open-source image-based 3d reconstruction pipelines : Review, comparison and evaluation. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42 :331–338.
- [RefSteinberg et al., 1999] Steinberg, A. N., International, E., Blvd, W., Bowman, C. L., and White, F. E. (1999). Revisions to the jdl data fusion model.
- [RefSteiner and Koch, 2015] Steiner, E. and Koch, C. (2015). A Digital Archive of Cultural Heritage Objects : Standardized Metadata and Annotation Categories. 20(1-2) :255–260.
- [RefStrlič, 2018] Strlič, M. (2018). Heritage science : A future-oriented cross-disciplinary field. *Angewandte Chemie International Edition*, 57(25) :7260–7261.
- [RefSugimoto et al., 2002] Sugimoto, S., Baker, T., and Weibel, S. L. (2002). Dublin core : Process and principles. In Lim, E.-P., Foo, S., Khoo, C., Chen, H., Fox, E., Urs, S., and Costantino, T., editors, *Digital Libraries : People, Knowledge, and Technology*, Lecture Notes in Computer Science, page 25–35, Berlin, Heidelberg. Springer.
- [RefSuwardhi et al., 2015] Suwardhi, D., Menna, F., Remondino, F., Hanke, K., and Akmalia, R. (2015). Digital 3d borobudur-integration of 3d surveying and modeling techniques. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(5) :417.
- [RefTaketomi et al., 2017] Taketomi, T., Uchiyama, H., and Ikeda, S. (2017). Visual SLAM algorithms : a survey from 2010 to 2016. *IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications*, 9(1) :16.
- [RefTeppati Losè et al., 2018] Teppati Losè, L., Chiabrando, F., and Spanò, A. (2018). Preliminary evaluation of a commercial 360 multi-camera rig for photogrammetric purposes. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2 :1113–1120.
- [RefTeppati Losè et al., 2022] Teppati Losè, L., Spreafico, A., Chiabrando, F., and Giulio Tonolo, F. (2022). Apple LiDAR Sensor for 3D Surveying : Tests and Results in the Cultural Heritage Domain. *Remote Sensing*, 14(17) :4157.
- [RefTetzlaff and Meyer, 2016] Tetzlaff, M. and Meyer, G. (2016). Using Flash Photography and Image-Based Rendering to Document Cultural Heritage Artifacts. In Catalano, C. E. and Luca, L. D., editors, *Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage*. The Eurographics Association.

REFERENCES

- [RefTheiler et al., 2014] Theiler, P. W., Wegner, J. D., and Schindler, K. (2014). Keypoint-based 4-points congruent sets—automated marker-less registration of laser scans. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 96 :149–163.
- [RefThwaites, 2013] Thwaites, H. (2013). *Digital Heritage : What Happens When We Digitize Everything ?*, pages 327–348. Springer London, London.
- [RefToldo et al., 2015] Toldo, R., Gherardi, R., Farenzena, M., and Fusiello, A. (2015). Hierarchical structure-and-motion recovery from uncalibrated images. *Computer Vision and Image Understanding*, 140 :127–143.
- [RefTombari and Di Stefano, 2014] Tombari, F. and Di Stefano, L. (2014). Interest points via maximal self-dissimilarities. In *Asian Conference on Computer Vision*, pages 586–600. Springer.
- [RefToschi et al., 2014] Toschi, I., Capra, A., De Luca, L., Beraldin, J.-A., and Cournoyer, L. (2014). On the evaluation of photogrammetric methods for dense 3d surface reconstruction in a metrological context. II-5 :371–378.
- [RefTournon et al., 2021] Tournon, S., Baillet, V., Chayani, M., Dutailly, B., Granier, X., and Grimaud, V. (2021). The French National 3D Data Repository for Humanities : Features, Feedback and Open Questions. In *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA) 2021*, Digital Crossroads, Lymassol (virtual), Cyprus.
- [RefTriggs et al., 1999] Triggs, B., McLauchlan, P. F., Hartley, R. I., and Fitzgibbon, A. W. (1999). Bundle adjustment—a modern synthesis. In *International workshop on vision algorithms*, pages 298–372. Springer.
- [RefTschauer and Salinas, 2006] Tschauer, H. and Salinas, V. S. (2006). Stratigraphic modeling and 3D spatial analysis using photogrammetry and octree spatial decomposition. In *Digital Discovery. Exploring New Frontiers in Human Heritage. CAA2006. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Proceedings of the 34th Conference, Fargo, United States*, pages 257–270.
- [RefTurk, 2014] Turk, M. (2014). Multimodal interaction : A review. *Pattern Recognition Letters*, 36 :189–195.
- [RefUsamentiaga et al., 2014] Usamentiaga, R., Venegas, P., Guerediaga, J., Vega, L., Molleda, J., and Bulnes, F. (2014). Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. *Sensors*, 14(7) :12305–12348.
- [RefUueni and Hiiop, 2017] Uueni, A. and Hiiop, H. (2017). The combination of 3d and multispectral imaging for scientific visualization—tool for conservation and heritage specialists. In *Archiving Conference*, volume 2017, page 133–137. Society for Imaging Science and Technology.
- [RefVallet et al., 2013] Vallet, J.-M., Detalle, V., De Luca, L., Bodnar, I.-L., Guillon, O., Trichereau, B., Mouhoubi, K., Beaumont, N. M., Syvilay, D., Giovannacci, D., Stefani, C., Walker, G., Feillou, M., Vif, D. M.-L., Marron, P., and De Banes Gardonne, F. (2013). Development of a NDT toolbox dedicated to the conservation of wall paintings : Application to the frescoes chapel in the Charterhouse of Villeneuve-lez-Avignon (France). In *2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, pages 67–74, Marseille, France. IEEE.
- [RefVan der Perre et al., 2016] Van der Perre, A., Hameeuw, H., Boschloos, V., Delvaux, L., Proesmans, M., Vandermeulen, B., Van Gool, L., and Watteuw, L. (2016). Towards a combined use of ir,

REFERENCES

- uv and 3d-imaging for the study of small inscribed and illuminated artefacts. In *Lights On ... Cultural Heritage and Museums!*, page 163–192. FLUP, University of Porto; Porto.
- [RefVan Dongen et al., 2022] Van Dongen, A., Eeckhout, P., and Lo Buglio, D. (2022). Crossed experiments of low-altitude surveys for the detection of buried structures. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVI-2/W1-2022 :505–512.
- [RefVanDerHorn and Mahadevan, 2021] VanDerHorn, E. and Mahadevan, S. (2021). Digital twin : Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems*, 145 :113524.
- [RefVaret-Pietri, 2000] Varet-Pietri, M.-M. (2000). *L'ingénierie de la connaissance : la nouvelle épistémologie appliquée*, volume 696. Presses Univ. Franche-Comté.
- [RefVavliakis et al., 2020] Vavliakis, K. N., Karagiannis, G. T., and Mitkas, P. A. (2020). Semantic web in cultural heritage after 2020. In *Proceedings of the 11th International Semantic Web Conference (ISWC)*, pages 11–15, Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag.
- [RefVerhoeven et al., 2016] Verhoeven, G., Nowak, M., and Nowak, R. (2016). Pixel-level image fusion for archaeological interpretative mapping. In *8th International congress on archaeology, computer graphics, cultural heritage and innovation*, page 404–407. Editorial Universitat Politècnica de València.
- [RefVerhoeven et al., 2021] Verhoeven, G. J., Santner, M., and Trinks, I. (2021). From 2D (to 3D) to 2.5D – not all gridded digital surfaces are created equally. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, VIII-M-1–2021 :171–178.
- [RefVerhoeven, 2016] Verhoeven, G. J. J. (2016). Basics of photography for cultural heritage imaging. In Stylianidis, E. and Remondino, F., editors, *3D recording, documentation and management of cultural heritage*, pages 127–251. Whittles Publishing, Caithness, Scotland, UK.
- [RefVerykokou and Ioannidis, 2023] Verykokou, S. and Ioannidis, C. (2023). An overview on image-based and scanner-based 3d modeling technologies. *Sensors*, 23(2).
- [RefVIGIE, 2022] VIGIE (2022). *Study on Quality in 3D Digitisation of Tangible Cultural Heritage : Mapping Parameters, Formats, Standards, Benchmarks, Methodologies, and Guidelines : Final Study Report*. Publications Office, LU.
- [RefViola and Wells III, 1997] Viola, P. and Wells III, W. M. (1997). Alignment by maximization of mutual information. *International Journal of Computer Vision*, 24(2) :137–154.
- [RefVisser et al., 1997] Visser, P. R., Jones, D. M., Bench-Capon, T. J., and Shave, MJR. (1997). An analysis of ontology mismatches ; heterogeneity versus interoperability. In *AAAI 1997 Spring Symposium on Ontological Engineering, Stanford CA., USA*, pages 164–72.
- [RefVu et al., 2018] Vu, Q., Payan, C., Debieu, E., Lasaygues, P., Bagnéris, M., Pamart, A., Cherblanc, F., and Bromblet, P. (2018). Ultrasonic imaging of antique statue combining laser vibrometry and photogrammetry.
- [RefVurpillot et al., 2019] Vurpillot, D., Verriez, Q., and Thivet, M. (2019). Aspectus : A flexible collaboration tool for multimodal and multiscale 3d data exploitation. *Studies in Digital Heritage*, 2(2) :150–165.
- [RefWald, 2002] Wald, L. (2002). *Data fusion : definitions and architectures ; fusion of images of different spatial resolutions*. Les Presses de l'École des Mines, Paris.

REFERENCES

- [RefWaldhäusl and Ogleby, 1994] Waldhäusl, P. and Ogleby, CL. (1994). 3 x 3 rules for simple photogrammetric documentation of architecture. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 30 :426–429.
- [RefWang and Olson, 2016] Wang, J. and Olson, E. (2016). Apriltag 2 : Efficient and robust fiducial detection. In *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 4193–4198.
- [RefWang et al., 2018a] Wang, X., Rottensteiner, F., and Heipke, C. (2018a). Robust image orientation based on relative rotations and tie points. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 4(2).
- [RefWang et al., 2018b] Wang, Z., Shi, W., Akoglu, K., Kotoula, E., Yang, Y., and Rushmeier, H. (2018b). Cher-ob : A tool for shared analysis and video dissemination. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 11(4) :1–22.
- [RefWebb et al., 2018] Webb, E. K., Robson, S., MacDonald, L., Garside, D., and Evans, R. (2018). Spectral and 3D cultural heritage documentation using a modified camera. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2 :1183–1190.
- [RefWeinmann et al., 2017] Weinmann, M., Jutzi, B., Mallet, C., and Weinmann, M. (2017). Geometric features and their relevance for 3d point cloud classification. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-1/W1 :157–164.
- [RefWenzel et al., 2013] Wenzel, K., Rothmel, M., Fritsch, D., and Haala, N. (2013). Image acquisition and model selection for multi-view stereo. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W1 :251–258.
- [RefWhite et al., 2007] White, M., Petridis, P., Liarakapis, F., and Plecinckx, D. (2007). Multimodal mixed reality interfaces for visualizing digital heritage. *International Journal of Architectural Computing*, 5(2) :321–337.
- [RefWolf et al., 2014] Wolf, P. R., Dewitt, B. A., and Wilkinson, B. E. (2014). *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*. McGraw-Hill Education.
- [RefXu et al., 2019] Xu, J., Ma, Y., He, S., and Zhu, J. (2019). 3D-GIoU : 3D Generalized Intersection over Union for Object Detection in Point Cloud. *Sensors*, 19(19) :4093.
- [RefYang et al., 2020] Yang, X., Grussenmeyer, P., Koehl, M., Macher, H., Murtiyoso, A., and Landes, T. (2020). Review of built heritage modelling : Integration of HBIM and other information techniques. *Journal of Cultural Heritage*, 46 :350–360.
- [RefYeh et al., 2016] Yeh, C.-K., Matsuda, N., Huang, X., Li, F., Walton, M., and Cossairt, O. (2016). A streamlined photometric stereo framework for cultural heritage. In *European Conference on Computer Vision*, pages 738–752. Springer.
- [RefZhang and Hu, 2005] Zhang, C.-X. and Hu, Z.-Y. (2005). A general sufficient condition of four positive solutions of the p3p problem. *Journal of Computer Science and Technology*, 20(6) :836–842.
- [RefZhang et al., 2018a] Zhang, Q., Liu, Y., Blum, R. S., Han, J., and Tao, D. (2018a). Sparse representation based multi-sensor image fusion for multi-focus and multi-modality images : A review. *Information Fusion*, 40 :57–75.

- [RefZhang et al., 2018b] Zhang, Y., Li, K., Chen, X., Zhang, S., and Geng, G. (2018b). A multi feature fusion method for reassembly of 3D cultural heritage artifacts. *Journal of Cultural Heritage*, 33 :191–200.
- [RefZhang, 1994] Zhang, Z. (1994). Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. *International journal of computer vision*, 13(2) :119–152.
- [RefZhao et al., 2023] Zhao, L., Zhang, H., and Mbachu, J. (2023). Multi-sensor data fusion for 3d reconstruction of complex structures : A case study on a real high formwork project. *Remote Sensing*, 15(5) :1264.
- [RefZhu et al., 2018] Zhu, S., Zhang, R., Zhou, L., Shen, T., Fang, T., Tan, P., and Quan, L. (2018). Very large-scale global sfm by distributed motion averaging. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 4568–4577.
- [RefZitova and Flusser, 2003] Zitova, B. and Flusser, J. (2003). Image registration methods : a survey. *Image and vision computing*, 21(11) :977–1000.
- [RefZunjic, 2017] Zunjic, I. (2017). La Valeur Universelle Exceptionnelle (VUE). Étude d’impact sur le concept du patrimoine. page 49.

Table des illustrations

1	Diag. structure de la thèse (Pamart, 2024)	1
2	Fusion d'imagerie. Source (Pamart, 2016 p.208)	9
2	Idem	10
I.1	Diagramme du domaine de l'étude au sein de ses champs disciplinaires et thématiques (Pamart, 2023)	17
I.2	Numérisation multimodale sur retable de L. Brea (Pamart, 2019 p.580)	19
I.3	Diag. de la multimodalité (Pamart, 2022 p.2 :8)	21
I.4	Diag. chaîne opératoire multimodale (Pamart, 2023)	23
I.5	Diag. système cyclique (Pamart, 2023)	23
I.6	Diag. méthodologie et contributions (Pamart, 2023)	24
I.7	Diag. structure globale de la thèse (Pamart, 2023)	24
I.8	Approche analytique VS systémique. Source : (Cambien, 2008 p.20)	25
I.9	Idem Figure I	29
II.1	Schéma d'ensemble du chapitre d'état de l'art (Pamart, 2024)	32
II.2	Tableau multimodal(ité)/multimodal(ity). Source (Azaoui, 2019 p.4)	33
II.3	Recalage Multimodal. Source (Brown, 1992 p.6)	34
II.4	Diag. processus et multimodalité (Pamart, 2023)	36
II.5	Capture écran enquête VIGIE (Pamart, 2023)	40
II.6	Captures d'écran rapport VIGIE. Source (VIGIE, 2022)	40
II.7	Taxonomie des activités "Remote Sensing" pour le SI MEMORIA (Pamart, 2023). Source (Dudek et al., 2022 p.17)	42
II.8	(a1) Vol drone VISIR (a2) Montage multimodal VISIR (a3) Nuage de point VISIR . Sources (Pamart, 2019) - (b1) Protocole d'acquisition spatio-acoustique (b2) Instrumentation in-situ (b3) Résultat du relevé dans l'intégrateur 3D (Blaise et Bergerot, 2022)	49
II.9	Diag. fusion imagerie multimodale. Source (Manuel, 2016)	60
II.10	(a) Classification de la fusion de Dasarathy. Source (Castanedo, 2013 p.3) - (b) Terminologie de la fusion du JDL. Source (Steinberg et al., 1999 p.3)	61
II.11	(a) Classification de la fusion de Whyte. Source (Castanedo, 2013 p.3) - (b) Représentation de la fusion d'après (Martin 2005 p.15)	62
II.12	Taxonomie de la fusion d'après (Khaleghi et al., 2013 p.3)	64
II.13	Exemple de fusion de données. Source (Cera, 2022 p.156)	67

TABLE DES ILLUSTRATIONS

II.14 Fusion de données AGILE selon (Stal, 2013 p.2)	68
II.15 Taxonomie de la Fusion pour le SI MEMORIA (Pamart, 2023)	69
II.16 Diag. enrichissement visuel, géométrique et sémantique (Pamart, 2023)	73
II.17 Diag. roue des activités associées à l'analyse et l'interprétation des données du SI MEMO- RIA. Source (Dudek et al., 2022 p.156)	74
II.18 Diag. connaissances et documentation d'un objet patrimonial (Croce, 2022 p.9)	77
II.19 (a) Pyramide CIDOC-CRM. Source : https://www.cidoc-crm.org/node/191 - (b) Mo- délisation CIDOC-CRM. Source (Karagiannis et al., 2009 p.9)	80
II.20 Diag. modèle W7. Source (Liu and Ram, 2017 p.46)	81
II.21 Diag. méthode d'enrichissement de modèle 3D pour le web-sémantique. Source (Ponciano, 2021 p.5)	82
II.22 Diag. 4V du Big Data. Source (Bouzegehoub, 2014 p.5)	84
II.23 Diag. structure des attributs au sein d'un nuage de points. Source (Nespeca, 2015 p.351)	84
II.24 (a) Liste et formules des descripteurs géométriques. Source (Croce, 2022 p.130) - (b) Capture d'écran des descripteurs géométriques disponibles dans CloudCompare V.2.12.3 (Pamart, 2023)	86
II.25 Diag. annotations 2D/3D. Source (Ponchio et al., 2020 p.4)	87
II.26 Modèle d'annotation web du W3C. Source : https://www.w3.org/TR/annotation-model/	88
II.27 (a) Schéma d'annotation AIOLI. Source (Abergel et al., 2023) - (b) Diag. des approches d'annotation. Source (Croce, 2022 p.99)	89
II.28 Infographie sur les standards de métadonnées. Source (Riley, 2018) : https://jennriley.com/metadatamap/	90
II.29 Mème sur la prolifération des standards. Source : https://xkcd.com/927/	91
II.30 (a) Principe FAIR. Source : https://www.ccdc.cam.ac.uk/solutions/about-the-csd/fair-data-principles/ - (b) Principe LOD. Source https://data.e-stat.go.jp/loaw/en/outline/abstract - (c) Mapping FAIR X LOD. Source (Hasnain 2018 p.474)	93
II.31 Nuage LOD entre 2007 et 2023. Source : https://lod-cloud.net/(version du 2022-11-03)	96
III.1 Approches déclaratives et procédurales. Source (Muetzelfeldt, 2004 p.18)	106
IV.1 Photogrammétrie multimodale du tryptique de Venasque, projet Fiatlux (Pamart, 2016 p.208)	115
IV.2 Photogrammétrie multimodale au château de Germolles, Action COST-COSCH (Pamart, 2016 p.209)	117
IV.3 Schéma de l'arbalète. Source (Pamart, 2017 p.561)	119
IV.4 Photos de l'arbalète. Source (Pamart, 2017 p.561)	119
IV.5 Arbalète robotisée pour une acquisition photogrammétrique multimodale sur site en 2021 (Pamart, 2021)	120
IV.6 Schéma traitement Fiatlux. Source (Pamart, 2016 p.209)	121
IV.7 Schéma traitement Arbalète. Source (Pamart, 2017 p.563)	121
IV.8 Orthophotomosaïque multibande (Pamart, 2016 p.565)	124
IV.9 Diag. des chaînes opératoires multimodales (Pamart, 2020 p.2)	127
IV.10 Diag. procédure de traitement TACO (Pamart, 2020 p.5)	133

TABLE DES ILLUSTRATIONS

IV.11	Diag. module CULBUTO (Pamart, 2020 p.6)	134
IV.12	Expérimentation fusion photogrammétrique double-face, retable de Brea (Pamart, 2020 p.6)	135
IV.13	Photogrammétrie multi-temporelle sur la sculpture de l'Arbre-Serpent (Pamart, 2020 p.10)	142
IV.14	Photogrammétrie multi-focale (Pamart, 2020 p.10)	142
IV.15	Photogrammétrie multi-échelle sur l'oeuvre Zett (Pamart, 2020 p.11)	142
IV.16	Recalage par résection spatiale, Veille-Charité de Marseille (Pamart, 2020 p.11)	143
IV.17	Recalage par résection spatiale, du portail de la cathédrale Saint-Trophime d'Arles (Pamart, 2020 p.16)	143
IV.18	Photogrammétrie terrestre et aérienne, Temple de Neptune de Paestum (Pamart, 2020 p.13)	145
IV.19	Photogrammétrie du plan-relief de Lys (Pamart, 2020 p.13)	146
IV.20	Diag. photogrammétrie multi-couche (Pamart, 2016 p.565)	150
V.1	Recalage photogrammétrique par résection spatiale (Pamart, 2019 p.577)	156
V.2	Schéma du frustum de caméra multi-couche (V. Abergel, 2019)	157
V.3	Capture d'écran du prototype AIOLI/SO-RTI (Pamart, 2019 p.576). Auteur V. Abergel	158
V.4	Capture d'écran du prototype AIOLI/SO-RTI (Pamart, 2019). Auteur V. Abergel	158
V.5	Diag. fusion de données (Pamart, 2023 p.4)	167
V.6	Diag. chaîne opératoire et fusion de données patrimoniales (Pamart, 2023 p.5)	169
V.7	Vues d'ensemble de la collection de données NDF, Chapelle de La Brigue (Pamart, 2023 p.6)	171
V.8	Diag. historiographie collection NDF basée MEMoS (Pamart, 2023 p.7)	171
V.9	Diag. de recouvrement et de recalage basée MEMoS (Pamart, 2023 p.8)	174
V.10 (a - l)	Modèle MEFI multi-échelle sur données NDF (Pamart, 2023 p.10)	176
V.11 (a-b-c-d)	Diag. des composantes de MEFI (Pamart, 2023 p.11)	178
V.12 (a-b)	Nuage de points NDF enrichi avec MEFI (Pamart, 2023 p.12)	180
V.13 (a-b)	Diag. filtrage basé MEFI (Pamart, 2023 p.13)	181
V.14 (a-b)	Captures d'écran prototype de visionneuse MEFI (Pamart, 2023 p.14). Auteure V. Abergel	184
V.15	Diag. stratégie de fusion de données patrimoniales (Pamart, 2023)	188
VI.1	Tableau des modalités d'imageries multimodales du corpus SUMUM (Pamart, 2022 p.416)	195
VI.2	Capture d'écran de la scène AIOLI sur l' <i>Expansion Contrôlée</i> (Pamart, 2022 p.419)	196
VI.3	Capture d'écran de la scène AIOLI sur <i>L'Arbre aux Serpents</i> (Pamart, 2022 p.419)	197
VI.4	Capture d'écran de la scène AIOLI sur <i>Zett</i> (Pamart, 2022 p.418)	197
VI.5	Diag. flux de travail SUMUM (Pamart, 2022 p.418)	199
VI.6	Tableau récapitulatif des progiciels (Pamart, 2022 p.2 :4)	206
VI.7	Capture d'écran ND-ArchéoGRID (Pamart, 2022 p.2 :7)	208
VI.8	Schéma synthétique de l'écosystème MEMoS (Pamart, 2022 p.2 :10)	210
VI.9	Diag. mapping MEMoS en CIDOC-CRM (Pamart, 2022 p.2 :12)	213
VI.10	Modèle MEMoS en JSON, QR-code et JAB (Pamart, 2022 p.2 :14)	216
VI.11	Intégration de QR-code sur une peinture murale de la chapelle de La Brigue (Pamart, 2022 p.2 :15)	217

TABLE DES ILLUSTRATIONS

VI.12Intégration de QR-code sur une peinture de l'Académie des arts de Berne (Pamart, 2022 p.2 :16)	218
VI.13Intégration de QR-code sur des fragments de l'anneau de compression de Notre-Dame de Paris (Pamart, 2022 p.2 :17)	219
VI.14Représentation basée MEMoS de la numérisation multimodale de la Chapelle Saint-Martial du Palais des Papes d'Avignon (Pamart, 2022 p.2 :18)	221
VI.15Comparaison multitemporelle MEMoS sur une instrumentation de la Chapelle NDF de La Brigue (Pamart, 2022 p.2 :19)	222
VI.16Diag. MEMoS en JSON-LD sérialisé avec le Linked Art Data Model (Pamart, 2022 p.2 :20). Auteure I. Cao.	223
VI.17Diag. activités de numérisation basées MEMoS (Pamart, 2023 p.7)	229
VII.1Diag. signature morphologique basée sur la courbure (Pamart, 2015)	234
VII.2(a) Diag. fusion de données spatio-acoustique SESAMES (Pamart, 2023) - (b) Diag. signatures morphologiques (Pamart, 2023)	236
VII.3Diag. Système de degré 5. Source (Cambien, 2008 p.28)	237
VII.4Diag. système complet de numérisation multimodale (Pamart, 2023)	237
VII.5Diag. système de numérisation intermodale (Pamart, 2023)	239
A1 QR-code pointant vers le code source de TACO	287
A2 QR-code pointant vers le code source de MS2AIOLI	287
A3 Scène <i>Arbre-serpents</i> dans SPRITZ (Pamart, 2023)	294
A4 Scène <i>Zett</i> dans SPRITZ (Pamart, 2023)	295
A5 Scène <i>Expansion contrôlée</i> dans SPRITZ (Pamart, 2023)	295
A6 Capture d'écran de la plateforme ARCHES (Pamart, 2023)	296
A7 Logiciel DLN :CC (Guide utilisateur V1.0, 2023 p.22)	297
A8 Logiciel CherOb (Shi et al., 2016 p.4)	298
A9 Capture d'écran CollecScience. Source RBDD. (2021, 20 mai). Collec-Science (CS) : Démonstration du logiciel (vidéo), in Collec-Science. Canal-U. https://www.canal-u.tv/83527 . (Consultée le 25 octobre 2023)	299
C1 Différences entre le modèle MEMoS et son implémentation (Pamart, 2023). Créé avec https://github.com/benjamine/jsondiffpatch	302
C2 QR-code pointant vers l'enregistrement vidéo de la soutenance	303
C3 QR-code pointant vers la présentation en PDF	303

Annexes

A SPATIALISATION

Code source TACO

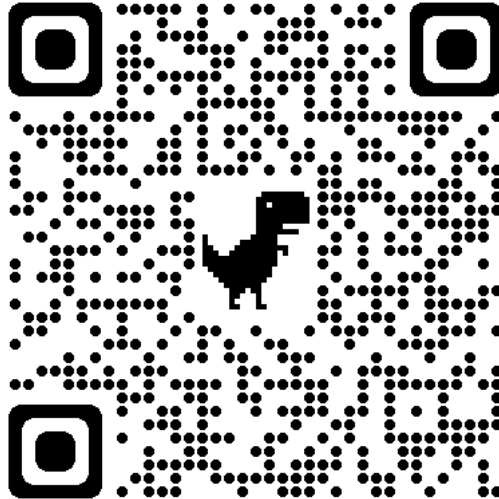


FIGURE A1 – Flashez le QR-code pour accéder au dépôt GitHub du code source de TACO à l'adresse : <https://gitlab.huma-num.fr/apamart/taco>

Code source MS2AIOLI

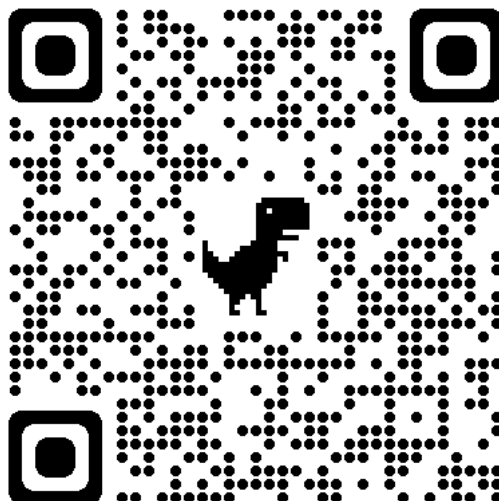


FIGURE A2 – Flashez le QR-code pour accéder au dépôt GitHub du code source de MS2AIOLI à l'adresse : <https://gitlab.huma-num.fr/apamart/ms2aioli>

B FUSION

Formule de MEFI

Définition des variables globales :

Le calcul de l'indicatrice de fusion MEFI nécessite de définir en amont ;

- une méthode calcul de densité de nuage de points 3D, et
- une plage d'Echelles d'Observation EO_l bornée par des niveaux l minimal EO_{Min} et optimal EO_{Opt} selon une unité de mesure donnée (par exemple 0.004 pour 4mm exprimé en m), enfin
- un *Octree* permettant d'exprimer les échelles d'observations suivant les modulations de sa structure de sous-division selon 21 niveaux de profondeur $Prof$ et taille de cellules correspondante $CellSize$.

Définition de la densité : La méthode qui semble le plus adapté pour le calcul de MEFI celle selon laquelle la densité est estimée en comptant pour chaque point le nombre de voisins N_v (à l'intérieur d'une sphère de rayon R), tel que ;

$$\text{Densité} = \frac{N_v}{\frac{4}{3}\pi R^3}$$

- La Densité exprime le voisinage local de chaque point.
- N_v représente le nombre de voisins comptés à l'intérieur d'une sphère de rayon R pour chaque point du nuage de points..
- R est le rayon de la sphère utilisée pour définir le voisinage autour de chaque point.
- $\frac{4}{3}\pi R^3$ représente le volume de la sphère de rayon R .
- La densité est calculée en divisant le nombre de voisins N_v par le volume de la sphère, ce qui permet de mesurer la densité des points dans le voisinage défini.

Définition des Echelles d'Observation par un Octree : Un *Octree* peut être défini comme une structure de données hiérarchique utilisée pour partitionner l'espace 3D. Il est représenté par la formule mathématique suivante :

$$\text{Octree} = \{\text{Cell}_{Prof} \mid Prof = 1, 2, \dots, 21\}$$

Ce faisant, une Echelle d'Observation donnée OE correspond une taille de cellule $CellSize$ pour chaque niveau de profondeur $Prof$:

$$CellSize_{Prof} + 1 = \frac{1}{2} \cdot CellSize_{Prof}$$

- L'*Octree* est une structure de subdivision spatiale par niveau de profondeur comprenant un ensemble de cellules, où chaque cellule représente une région dans l'espace 3D.
- Chaque cellule peut avoir jusqu'à huit cellules enfants, d'où le nom "octree", car chaque cellule peut être subdivisée en huit sous-régions.
- L'indice *Prof* indique le niveau de profondeur de chaque cellule dans l'octree, allant de 1 à 21, où 21 est le niveau de profondeur maximal de l'octree.
- *CellSize* correspond à la taille de la cellule pour un niveau de profondeur donné de l'Octree.

ÉTAPE 1 - Préparation des nuages sources :

Étant donné un nuage de points P définit tel que ;

$$P = \{(x_i, y_i, z_i, a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}) \mid i = 1, 2, \dots, n_j\}$$

Et une liste de nuages de points LN nettoyés et se recouvrant tel que ;

$$LN = \{(P_j), \dots, (P_N) \mid j = 1, 2, \dots, N\}$$

- LN représente la liste de nuages de points 3D.
- Chaque point du nuage est composé de coordonnées XYZ (x_i, y_i, z_i) ainsi qu'une série de m attributs $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}$. Ces attributs comprennent des descripteurs géométriques tels que la Densité (p-ex DR, DE) ainsi que d'autres constantes (p-ex R) permettant de calculer $MEFI$ lui aussi stocké sous cette forme de champs scalaire au sein des attributs de nuages de points de la liste LN .
- n_j est le nombre de points total dans le nuage de points P_j .
- N est le nombre de nuages de points.

Pour chaque point (p) des nuages sources de la liste LN on calcule une densité mise à l'échelle dérivée d'une densité relative comme suit ;

$$DE(p) = \frac{DR(p)}{R}$$

- $DE(p)$ représente la Densité mise à l'Échelle du point p au sein des nuages de LN .

B. FUSION

- $DR(p)$ représente la Densité Relative du point p au sein des nuages de LN , exprimant le nombre de voisins compris dans un Rayon de voisinage R .
- R représente le Rayon de Voisinage Local utilisé pour la calculer Densité Relative. Ce rayon est calculé automatiquement (dans CloudCompare) par approximation de la densité moyenne de chaque nuage. Il est utilisé pour mettre à l'échelle les densités relatives propre à chaque nuage.

Ainsi pour chaque nuage de la liste LN on obtient pour chaque point les champs scalaires DE , DR , R et certains nuages sont dotées manuellement d'un Score Multimodal SM s'ils sont issus d'une combinaison de sources (par exemple pour nuage combinant visible et infrarouge, $SM = 2$).

ÉTAPE 2 - Calcul de MEFI :

Les nuages de la liste LN peuvent être fusionnés, cette opération s'effectue sur les coordonnées spatiales ainsi que sur les champs scalaires portant le même nom. Ainsi, un Nuage Fusionné NF est calculé par l'union des points p_i des nuages issus de la liste LN , tel que ;

$$NF = \bigcup_{i=1}^{N_{Total}} p_i$$

- NF représente le résultat de la fusion des points (p) des nuages de la liste LN par l'union des points et de leurs attributs. Il comprend les coordonnées XYZ et tous les attributs hérités des nuages de points originaux dans la liste ainsi que d'un Index de Nuage Original gardant la trace de la position du nuage source dans l'arborescence comprise entre 1 et N nuages de la liste (notamment utilisé pour interrelier les fiches de description MEMoS de chaque source).
- p_i représente un point au sein du nuage NF , où i s'étend de 1 à N_{Total} soit le nombre total de points au sein des nuages P dans la liste LN tel que $N_{Total} = \sum_{j=1}^N n_j$.
- L'opération \bigcup désigne l'opération d'union, qui combine tous les points de chaque nuage de points P_j dans le nuage de points résultant NF .

$MEFI$ est calculé sur chaque point (p) du nuage NF pour une échelle d'observation EO à partir de la normalisation de différentes Densités Fusionnées DF dont l'impact est pondéré par des Poids W normalisés entre 0 et 1 tel que ;

$$MEFI = Norm(DF) \cdot W$$

- $MEFI$ est l'indice de fusion multimodal pour chaque point de NF .
- $Norm$ est une opération de normalisation par mise à l'échelle des caractéristiques (Max Feature Scaling) obtenu par la formule suivante $Norm(DF) = \frac{DF \cdot 255}{\max DF}$.
- DF est la Densité Fusionnée obtenue pour chaque point (p) de NF en calculant $DF(p) = \frac{DR(p)}{EO}$.
- W représente la moyenne arithmétique de K Poids W_k tel que $W = \frac{W_1 + W_2 + \dots + W_k}{K}$.

En prenant deux Poids dérivés de la Densité mise à l'Échelle DE et du Score Multimodal SM , cela donne ;

$$MEFI = Norm(DF) \cdot \frac{W_1 + W_2}{2}$$

- Le poids W_1 est une intensité calculée à partir de $\log DE$ et normalisée entre 0 et 1. La fonction logarithme permet d'amoindrir l'impact des valeurs aberrantes et de l'écart type de densité au sein des nuages.
- Le poids W_2 est une intensité calculée à partir de \sqrt{SM} et normalisée entre 0 et 1. La racine carrée permet d'amoindrir l'impact des valeurs aberrantes et de l'écart type de densité au sein des nuages.

Il peut être nécessaire d'appliquer des opérations supplémentaires pour améliorer le champ scalaire de $MEFI$. Un filtrage bilatéral prenant pour paramètres $\sigma_{Spat} = R$ et $\sigma_{Scal} = 255$ (valeur maximale de $MEFI$) permet de réduire l'impact des valeurs aberrantes et le bruit si les poids ne suffisent pas. Après filtrage, une normalisation supplémentaire peut aussi être nécessaire pour s'assurer que l'indice $MEFI$ final est bien étalonné sur la plage $[0, 255]$.

ÉTAPE 3 -Visualisation de MEFI :

Il est recommandé de sous échantillonner le nuage NF enrichi en prenant pour valeur d'échantillonnage l'Échelle d'Observation optimale (EO_{Opt}). Au stade actuel de développement $MEFI$ n'est pas calculé pour chaque niveau de l'octree mais pour une plage d'Echelle d'Observation (EO_l) définit entre une borne minimale EO_{Min} et une borne optimale EO_{Opt} . Cette fenêtre d'observation est exprimée en Octree par la paire $[Prof_L, CellSize_L]$ variant sur différents niveaux de subdivision L tel que ;

$$[Prof_{Opt}, CellSize_{Opt}] \leftarrow [Prof_L, OS_{Opt}]$$

La visualisation d'un Octree dans CloudCompare⁸ permet d'interpoler les valeurs de $MEFI$, au delà de la fenêtre d'observation, pour chaque niveau de profondeur de l'octree.

8. Le chantier CloudCompare au format .bin comprenant les nuages et les différentes étapes de calcul est disponible au lien suivant <https://page.hn/ycspjk>. Le pseudocode permettant de reproduire le calcul est donné ci-après

Pseudocode de MEFI

Data : : List of N registered and overlapping Point Cloud Data (PCD).

Results : : Single PCD enhanced with Multimodal Fusion Index.

STEP ZERO | Variables definition :

Define a *Multimodal Score* (MS) for each PCD using "*ModalityLayers*" value stored in MEMoS-
json (or set default value to 1)

Get $OctreeLevel_{Max} = 21$

Define a minimal *Observation Scale* : $OS_{Min} \leftarrow 0.005$

Set $CellSize_{min} \leftarrow OS_{Min}$ corresponding to the size of the cell at $OctreeLevel_{max}$

Get an optimal *Observation Scale* (OS_{Opt}) and $OctreeLevel_L$ within $[1, 21]$ knowing that ;

$$Cell_{Size}(OctreeLevel + 1) = \frac{1}{2} \cdot Cell_{Size}(OctreeLevel)$$

Define $[OctreeLevel_{Opt}, CellSize_{Opt}] \leftarrow [OctreeLevel_L, OS_{Opt}]$

Define $MEFI_{Max} = 255$

Define R as the variable LocalNeighborhoodRadius (LNR) used in CloudCompare for Geometric
Features computation.

STEP ONE | Preparation of each data source for fusion :

for each cloud in PCD list **do**

 Edit.Octree.**Compute** with Cell Size at max level = $CellSize_{min}$

Get R from automatic estimation of LNR in

 Tools.Other.**ComputeGeometricFeatures.Density**[NumberOfNeighbors]

if R is lower than OS_{Min} **then**

 | Edit.Other.**RemoveDuplicatePoints** with R as MinDistanceBetweenPoint

end

Get R from automatic estimation of LNR in

 Tools.Other.**ComputeGeometricFeatures.Density**[NumberOfNeighbors]

if R is still lower than OS_{Min} **then**

 | Edit.**Subsample**[Method :Octree] PCD using SubdivisionLevel = $OctreeLevel_{Max}$

end

 Tools.Other.**ComputeGeometricFeatures.Density**[NumberOfNeighbors] and **name** the sca-
lar fields "Relative Density" (RD)

 Edit.ScalarFields.**AddConstantSF** named "R" with value of LocalNeighborhoodRadius (R)

 Edit.ScalarFields.**AddConstantSF** named "Multimodal Score" with value of Multimodal
Score (MS)

 Edit.ScalarFields.**Arithmetic** to **Compute Scaled Density** (SD) : $SD = \frac{RD}{R}$

 Edit.**Subsample**[Method :Octree] PCD using SubdivisionLevel = $OctreeLevel_{Opt}$

end

B. FUSION

STEP TWO | Compute point cloud fusion enhanced with multimodal index :

Edit.**Merge** subsampled PCD and generate Original Cloud Index as Scalar Field = Yes

Tools.Other.**ComputeGeometricFeatures.Density**[NumberOfNeighbors] with LocalNeighborhoodRadius = R and **name** the scalar fields Merged Densities (MD)

Edit.ScalarFields.**Arithmetic** to **Equalize** *Merged Density* (EMD) using $\frac{MD \cdot 255}{\max MD} = EMD$

Edit.ScalarFields.**Arithmetic** to **Compute then normalize** between $[0,1]$ the K *Weights Intensities* :

$$W_1 = \log ScaledDensity, W_2 = \sqrt{MultimodalScore}, \dots W_K$$

Edit.ScalarFields.**Arithmetic** to **Combine** *Weights intensities* (W) as arithmetic mean :

$$W = \frac{W_1 + W_2 + \dots + W_k}{K}$$

Edit.ScalarFields.**Arithmetic** to **Compute** *Multimodal Enhancement Fusion Index* ($MEFI$) :

$$MEFI = EMD \cdot W$$

{Optionnal}Edit.ScalarFields**BilateralFilter** to **smooth** the scalar field values using the parameters :

$$\sigma_{Spat} = R \text{ and } \sigma_{Scal} = MEFI_{Max}$$

Edit.ScalarFields.**Arithmetic** to **Normalize** $MEFI$ using Max Feature Scaling :

$$Norm(MEFI) = \frac{MEFI \cdot 255}{MEFI_{Max}}$$

{Recommended}Edit.**Subsample**[Method-Octree] enhanced PCD using SubdivisionLevel = $OctreeLevel_{Opt}$

Processing note : The data processing is made by the functions and features accessible on the GUI version of CloudCompare (v2.12.3). The functions are quoted as CloudCompare.Menu.Tab.Function[options], e.g. as an example Edit.ScalarFields.Arithmetic. The name of the variable within CloudCompare are expressed InCamelCase, e.g. LocalNeighborhoodRadius while the self defined variables are given in *Italic*. In **Bold** the main operation to follow for each step or substep.

C ENRICHISSEMENT

Scènes 2D/3D enrichies (AÏOLI → SPRITZ)

Les contributions [5.2](#) (p.[153](#)) et [6.2](#) (p.[194](#)) ont introduits des modèles dont l'enrichissement provient de scénario d'annotation sémantique construit au sein de la plateforme AÏOLI. Ce processus aboutit à la création de scènes nécessitant des interactions complexes entre différentes ressources (nuage, images orientées, annotations spatialisées, fiches de descriptions, autres fichiers liées, etc.). La construction de scènes toujours plus complexes ont imposés de distinguer un environnement d'exploration avancées (SPRITZ), à celui permettant le processus d'annotation (AÏOLI) devenu impropre à la visualisation de ces scènes. En complément d'une interaction avancée, SPRITZ offre la possibilité de combiner différents projets et filtrer les groupes d'annotations, pour *in fine* proposer une expérience de visualisation personnalisée. SPRITZ utilise les scènes publiques d'AÏOLI pour étendre l'accessibilité et le partage de ce que nous avons nommés représentations numériques à haute valeur sémantique (cf. section [6.2.3](#) p.[200](#)). Les trois cas d'étude de SUMUM sont présentés ci-dessous, sous la forme d'une illustration dont la légende contient un URL pour accéder à la scène en question sur la visionneuse SPRITZ⁹.

L'arbre-Serpent de Niki de Saint-Phalle, Angers.



FIGURE A3 – Capture d'écran du modèle *Arbre-serpents* enrichi au sein de la visionneuse publique Spritz à l'adresse : <https://page.hn/iagip1>

9. N.B. La scène se charge automatiquement néanmoins la volumétrie des données nécessaires à l'affichage induit des temps de chargement dont la longueur est relative au débit de la connexion internet. Patience et à éviter en connexion en itinérance.

C. ENRICHISSEMENT

Zett de Victor Vasarely, Aix-en-Provence.

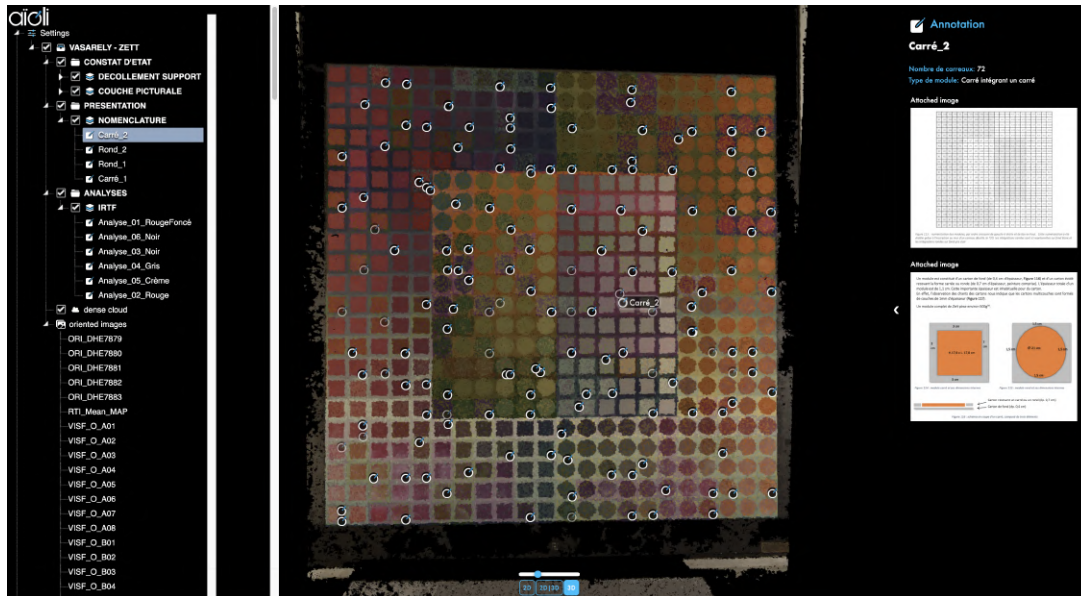


FIGURE A4 – Capture d'écran du modèle *Zett* enrichi au sein de la visionneuse publique Spritz à l'adresse : <https://page.hn/lpgz8q>

Expansion contrôlée de César Marseille.

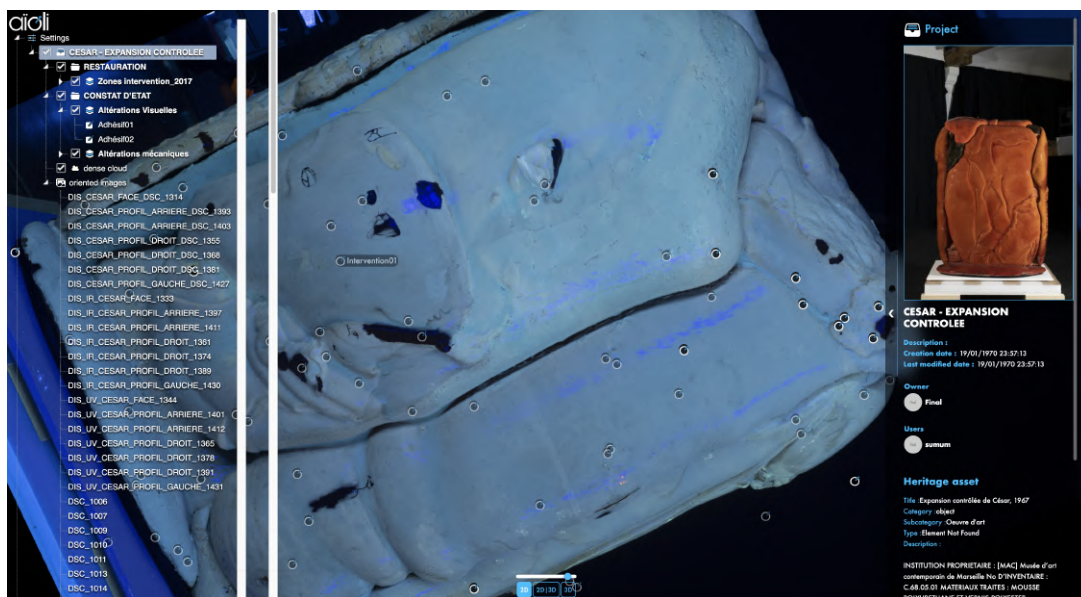


FIGURE A5 – Capture d'écran du modèle *Expansion contrôlée* enrichi au sein de la visionneuse publique Spritz à l'adresse : <https://page.hn/57msg>

Revue des progiciels

Annexe extraite depuis la publication [7] (cf. section 6.3.3 et Fig. VI.6 p.205) avec modifications et ajouts destinés à la mise à jour des informations et son orientation vers le cadre de cette thèse.

Arches (Getty Conservation Institute)

Arches se définit comme une plateforme d'inventaire et de gestion dédiée aux institutions et aux experts du patrimoine (www.archesproject.org) qui officie désormais en version 7.1. Il s'agit d'un logiciel spécifique conçu dans le but premier de fournir un soutien efficace à la conservation et à la gestion du patrimoine. Arches est un système communautaire complet, gratuit et open source (AGPL3), disponible en ligne et hors ligne avec un support mobile. Il permet de créer différentes instances de plateforme dédiées des projets ou des corpus spécifique. Il comprend plusieurs fonctionnalités comme la visualisation basée sur le SIG, les vocabulaires contrôlés, le support d'annotation ou la conformité CIDOC-CRM. Une extension appelée [Arches for Science](#) est en cours de développement pour couvrir plus spécifiquement les problématiques des sciences de la conservation. Deux éléments installent cette solution comme bon exemple. Arches s'appuie depuis 2013 sur une communauté de développement Open Source nécessaire à sa maintenance et son évolution. Cette solution est issue et supportée à l'échelle d'une institution.

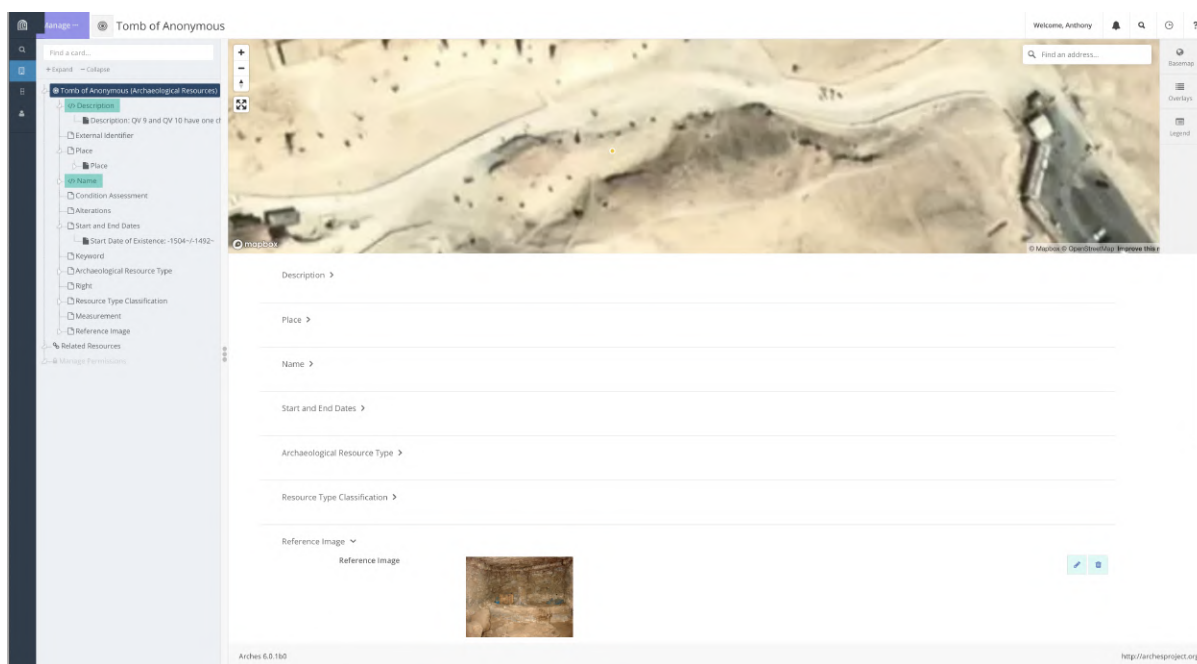


FIGURE A6 – Capture d'écran de la plateforme de démonstration : <https://demo.archesproject.org/>

Digital Lab Notebook Context Capture (Cultural Heritage Imaging)

Récemment, la fondation Cultural Heritage Imaging (CHI) a fait une première tentative de transposer le cahier de laboratoire pour les projets patrimoniaux avec le développement de Digital Lab Notebook : Context Capture (DLN :CC). DLN :CC est un logiciel "stand-alone" à code source ouvert publié sous la licence GNU version 3. L'objectif de ce logiciel est de documenter la fabrication de toutes les ressources numériques liées à un projet CH [Schroer and Mudge, 2017]. DLN :CC permet une documentation enrichie par le biais de métadonnées opérant à trois différents niveaux : projet, session et ensemble de capture. Ainsi, les utilisateurs peuvent collecter, organiser et réutiliser les informations de l'interface graphique stockées (uniquement localement) dans une base de données PostgreSQL. Conscient du virement actuel des experts du patrimoine vers les données ouvertes, le logiciel intègre un moteur de mise en correspondance X3ML lié à un modèle conceptuel en description conforme à CIDOC-CRM pour exporter un projet et les ressources liées au format RDF. Il présente également une caractéristique intéressante, à savoir le formatage des données dans un paquet d'informations de soumission (SIP) dans des formats conformes aux normes internationales, à savoir METS et BagIt wrapper. DLN :CC est resté depuis 2018 dans une version beta dont certains bogues et limites (limitées à quelques techniques de photographie computationnelle) ont restreint son utilisation et sa diffusion plus large. Le logiciel est désormais disponible en version 1.0. En point positif, il faut noter que cette solution est délivrée avec une documentation utilisateur claire disponible sous différents formats (fichier PDF, forum, vidéos, etc.).

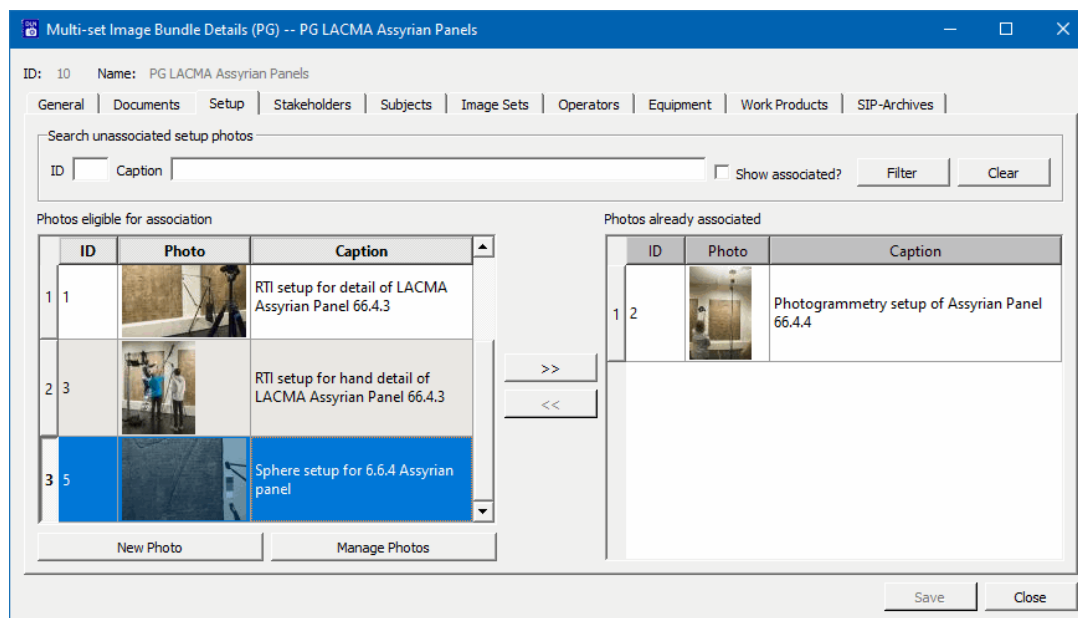


FIGURE A7 – Capture d'écran du logiciel, extrait du Guide utilisateur V1.0 (p.22).

CherOb (Université de Yale)

CherOb (CULTURAL HERITAGE-Object, CO) est un logiciel open-source visant à améliorer l'analyse croisée de projets CH basée sur la visualisation 2D et 3D avec des annotations associées [Shi et al., 2016, Wang et al., 2018b]. CO s'appuie sur le concept d'entité du patrimoine culturel sur lequel la plateforme agrège de multiples sources provenant de différentes techniques d'imagerie (images 2D et 3D, thermographie, tomographie). À l'aide d'un visualiseur à fenêtre divisée, CO interprète simultanément plusieurs ressources, mais ne semble pas fournir d'outil intégré pour relier les données 2D/3D par le biais d'annotations spatialisées. Ce logiciel comprend un gestionnaire de métadonnées, mais est limité à une seule norme, proposant aux utilisateurs d'utiliser uniquement le schéma descriptif Getty Categories for the Description of Works of Art (CDWA). Néanmoins, une étude de cas fournie dans le manuel du logiciel montre un exemple intéressant d'utilisation de l'intégration de QR codes pour automatiser l'extraction d'informations. En outre, CO comprend une fonction de génération de vidéos capable de créer des récits virtuels utiles à des fins de diffusion. Contrairement à l'exemple suivant, CO n'inclut pas de composant de conservation à long terme, à l'exception du XML créé et utilisé pour générer un rapport PDF. Il est surprenant de constater que, malgré l'abondance de fonctionnalités pertinentes et intéressantes mises en œuvre pour améliorer les analyses à vocation patrimoniales, le système CO ne présente pas encore de capacités ou d'ouverture vers le LOD.

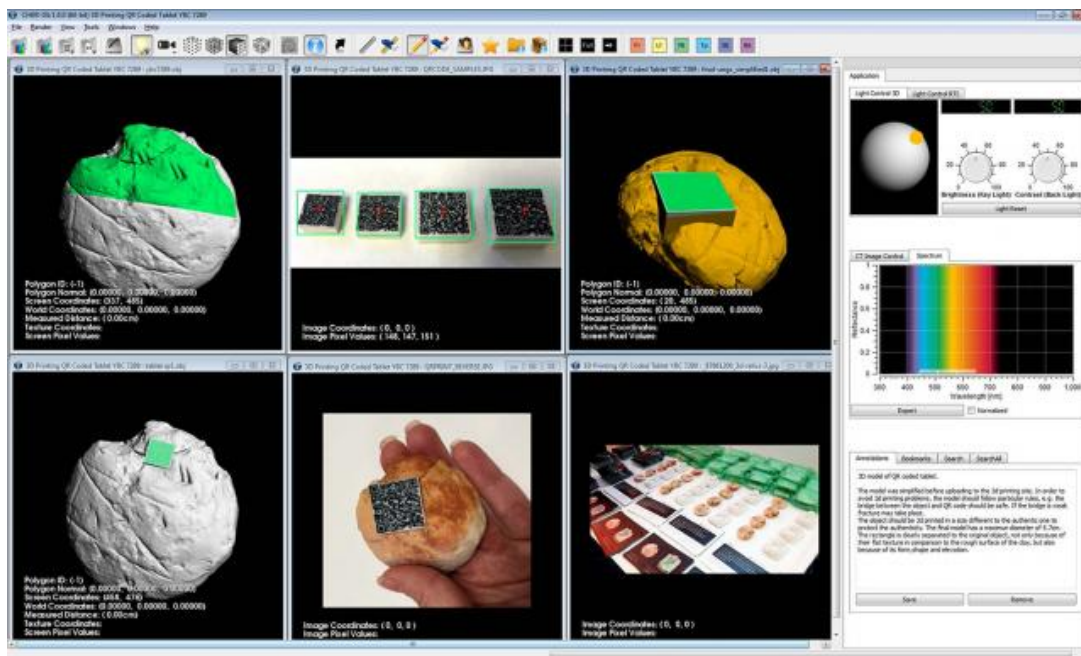


FIGURE A8 – Capture d'écran du logiciel, depuis [Shi et al., 2016] (p.4)

Collec-Science (INRAE)

Collec-Science (CS, www.collec-science.org) est un logiciel collaboratif dédié à la gestion des données des échantillons collectés dans le cadre d'expérimentations scientifiques développé par Eric Quiton¹⁰. Le domaine d'application est celui des sciences de la terre et de la biologie. CS est une solution open-source distribuée sous une licence AGPL. Ce logiciel est néanmoins utilisé pour la gestion de prélèvements archéologiques¹¹. Il permet de gérer l'enregistrement, le stockage, la conservation et le partage de deux types d'éléments, les conteneurs et les échantillons, selon de nombreuses configurations possibles. Un objet étiqueté est associé à des métadonnées libres ou normalisées pour assurer la provenance et la traçabilité des données à travers les lieux visités au cours de son cycle de vie. CS est adapté aux échantillons collectés sur le terrain et l'étiquetage par QR code est intégré pour identifier et suivre tout objet. Une instance de CS (service et base de données associée) est généralement accessible sur le web pour des scénarios collaboratifs, mais elle peut aussi être installée localement pour permettre son utilisation dans des lieux éloignés où la connexion internet n'est pas accessible ou stable [Plumejeaud-Perreau et al., 2019]. Malgré les similitudes de ses objectifs de collecte-stockage-(ré)utilisation, il semble que le cadre CS ne soit pas facilement transposable au domaine d'application patrimonial en raison de la terminologie rigide nécessaire à son domaine d'origine.

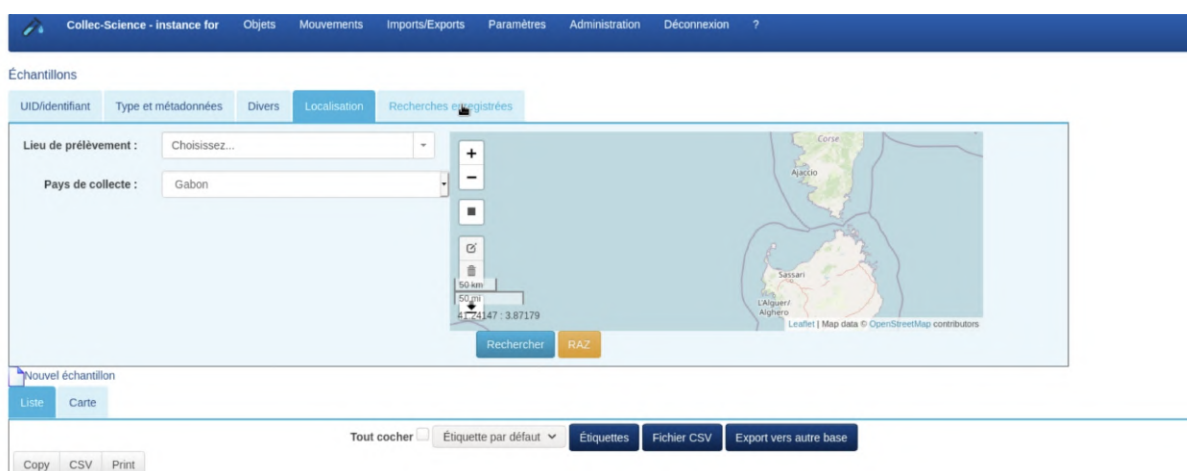


FIGURE A9 – Capture d'écran du logiciel, extraite des vidéos de présentation disponibles à l'adresse : <https://www.canal-u.tv/chaines/rbdd/collec-science>

10. Quinton, E. (2021). Eric Quinton, (v2.6.0) [Logiciel]. Irstea/collec. <http://doi.org/10.5281/zenodo.1745363>

11. Cf. présentation de Christophe Tuffery (INRAP) à l'adresse suivante : <https://www.collec-science.org/utilisation/presentations/presentations-realisees-lors-du-seminaire-collec-science-des-18-et-19-mars-2019-a-besancon>

Modèle de description MEMoS en JSON

```
1 {
2 "Activity" : {
3   "WHO" : {
4     "Group" : "Affiliation",
5     "actors" : [
6       "Name Surname",
7       "Name Surname"
8     ]
9   },
10  "WHERE" : {
11    "HeritageObject" : "Name",
12    "HeritageAsset" : "ID",
13    "Place" : "Toponym",
14    "GeoRef" : {
15      "type" : "LatLong",
16      "Lat" : 0,
17      "Long" : 0
18    }
19  },
20  "WHEN" : {
21    "Date" : "DD-MM-YYYY"
22  },
23  "WHAT" : {
24    "UUID" : "Title",
25    "InventoryNb" : "",
26    "Attribute" : "any",
27    "Location" : "useful",
28    "subLocation" : "information",
29    "ZoneOfInterest" : {
30      "Scale" : "Unit",
31      "OverlapWith" : "Null"
32    },
33    "ObjectOfInterest" : {
34      "Degradation" : false
35      "DegType" : "NA",
36      "DegAppellation" : "NA"
37    }
38  },
39  "HOW" : {
40    "Modality" : {
```

C. ENRICHISSEMENT

```
41     "Technique" : "Imaging",
42     "subTechnique" : "Technical info",
43     "Protocol" : {
44         "Automation" :false
45         "RAW" :true
46         "Support" :true
47         "Lighting" :false
48         "ColorChart" :true
49         "Target" :true
50         "Measures" :true
51     }
52 },
53     "Processing" : {
54         "Instruction" :false
55         "Software" : "MySoftware",
56         "Method" : "Report"
57     }
58 },
59     "WHICH" : {
60         "Camera" : {
61             "Type" : "Photo",
62             "Brand" : "Model",
63             "Specs" : "Lens, etc"
64         },
65         "Light" : {
66             "SourceType" : "LED",
67             "Number" : 0,
68             "Natural" :true
69         },
70         "Metering" : {
71             "Measurement" : "Telemetric",
72             "Device" : "Model",
73             "TargetType" : "Artificial a/o natural",
74             "GCPs" :true
75         }
76     },
77     "WHY" : {
78         "Project" : "MEMoS",
79         "ProjectType" : "Research"
80     }
81 }
```

C. ENRICHISSEMENT

Exemple sur un cas concret

```
{
  Activity: {
    HOW: {
      Modality: {
        NBCom: 146,
        Processing: {
          "Type": "Processing",
          "Subtype": "Semi-Automatic Processing via Metashape",
          "SoftwareVersion": "Agiisoft Metashape 2.0.2"
        },
        Protocol: {
          Automation: false true,
          ColorCheck: true,
          Lightings: false,
          Measures: true,
          NbImgPerSubset: {
            "subsetA": {
              "total": 74,
              "used": 74
            },
            "subsetB": {
              "total": 72,
              "used": 72
            }
          },
          NbSubsets: 2,
          RAW: true,
          Support: true,
          Targets: true
        },
        Technique: "Imaging" "Photogrammetry",
        subTechnique: "Technical-info"
      },
      Processing: {
        "Instruction": false,
        "Software": "MySoftware",
        "Method": "Report"
      }
    },
    WHAT: {
      Attribute: "any",
      InventoryNb: 2,
      Location: "useful",
      ObjectAppellation: "Indéterminé NDP_4000",
      ObjectInventoryIdentifier: "NDP_4000",
      ObjectOfInterest: {
        "Degradation": false,
        "DegType": "NA",
        "DegAppellation": "NA"
      },
      ObjectType: "Indéterminé",
      UUID: "title",
      ZoneOfInterest: {
        "State": "limit",
        "OverlapWith": "null"
      },
      sublocation: "information"
    },
    WHEN: {
      Date: "DD-MM-YYYY",
      EndTime: "26/09/2023+ +18:21:09",
      StartTime: "26/09/2023+ +17:42:37"
    },
    WHERE: {
      Georef: {
        "type": "LatLong",
        "Lat": 0,
        "Long": 0
      },
      HeritageAsset: "ID",
      HeritageObject: "Name",
      Location: "MAP, Campus CNRS Joseph Aiguier, 13009 Marseille",
      Places: "Toponym"
    },
    WHICH: {
      Camera: {
        "type": "Photo",
        "brand": "Model",
        "Specs": "Lens, etc"
      },
      Images: {
        "ProcessingFormat": "JPG",
        "ColorCalib": "luminance linearized with rawtherapee for raw sources",
        "Processed": {
          "HomothetyError": "0.0019108401416763263",
          "RMSError": "0.6818716197275927 (pix)",
          "Sigma0/SUW": "0.130577999986649",
          "MainAxis": "X",
          "crs": "ENGCRS[\"Local coordinates (m)\", EDATUM[\"Local Datum\"], CS[cartesian,2], LENGTHUNIT[\"metre\",1, ID[\"EPSG\",9001]]]",
          "FinalQuality": "medium",
          "DenseCloud": "4200002 points",
          "Mesh": "913586 faces",
          "Sampled": "False",
          "ExportFormats": "Obj, Ply, Aioli, Nexus, Potree",
          "AioliScale": "5 times reality"
        }
      },
      Lights: {
        "SourceType": "LED",
        "Number": 0,
        "Natural": true
      },
      Meterings: {
        "Measurement": "Telemetric",
        "Device": "Model",
        "TargetType": "Artificial-a/o-natural",
        "CCPs": true
      },
      Setup: "nDame Routines"
    },
    WHO: {
      Affiliation: "CNRS - ERC nDame_Heritage",
      Group: "Affiliation",
      Operator: "Cotte Florent",
      actors: {
        "Name-Surname":
        "Name-Surname"
      }
    },
    WHY: {
      Context: "Chantier Scientifique de Notre-Dame / GT Bois",
      Objective: "Numérisation des artefacts issus du chantier de Notre-Dame",
      Project: "MEMoS \"nDame_Heritage",
      ProjectType: "Research"
    }
  }
}
```

FIGURE C1 – Visualisation des différences entre le modèle MEMoS et son implémentation pour tracer les activités de traitement au sein de l'ERC NDame.

D SOUTENANCE

Ci-dessous aux liens suivants les documents relatifs à la soutenance de thèse du 16 janvier 2024 sont mis à disposition.

Enregistrement vidéo - YouTube

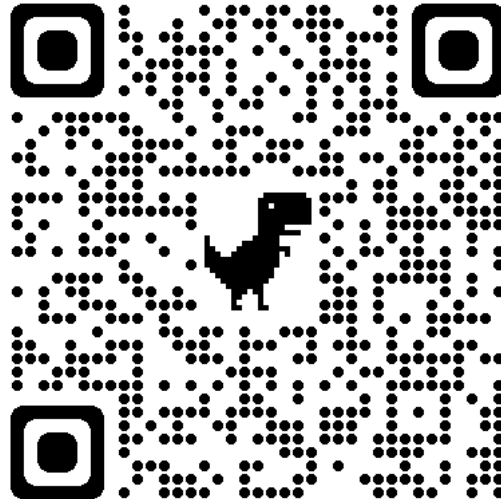


FIGURE C2 – *Flashez le QR-code pour accéder au lien YouTube à l'adresse : <https://page.hn/ms0uzx>*

Support de présentation - PDF

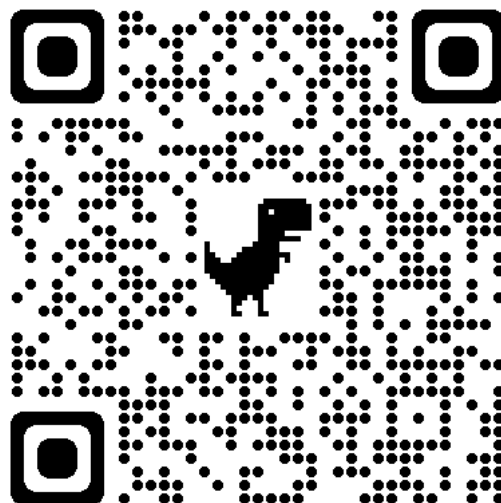


FIGURE C3 – *Flashez le QR-code pour accéder au document à l'adresse : <https://page.hn/cf5z66>*

Anthony Pamart
Spatialisation, Fusion et
Enrichissement d'Imagerie
Multimodale pour les Sciences du
Patrimoine

Résumé

À l'heure où l'Objet Patrimonial Numérique s'installe comme une notion en effervescence pour les Sciences du Patrimoine, l'ensemble des méthodes et des outils mobilisés pour sa création se heurtent au défi de l'imagerie multimodale. Celle-ci impose la mise en coopération d'une variété de ressources numériques (comprenant une multiplicité de capteurs, d'échelles d'observations, de couches spectrales ou temporelles) dans l'objectif de permettre une croisée des regards et des expertises. Cette thèse propose d'explorer des stratégies de numérisation 2D et 3D dédiées aux approches multimodales. Les contributions principales se basent sur la mise en interaction de thématiques telles que la Spatialisation, la Fusion et l'Enrichissement des données. Différentes approches sont proposées afin de mieux articuler les phases instrumentales, computationnelles et analytiques visant à augmenter le potentiel informatif des modélisations 2D/3D multi-sources. Les pistes explorées sont appuyées par une série de travaux et d'expérimentations faisant émerger des synergies possibles orientées vers la corrélation de données spatio-temporelles sémantiquement enrichies basées sur des numérisations multimodales.

Patrimoine Culturel, Numérisation du patrimoine, Imagerie Multimodale, Spatialisation 3D, Fusion de données

Résumé en anglais

At a time when the Digital Heritage object is an emerging concept for Heritage Science, all the methods and tools used to create it are facing the challenge of Multimodal Imaging. The latter requires the cooperation of a variety of digital resources (including multiple sensors, scales of observation, spectral or temporal layers) in order to feed and cross views and expertise. This thesis explores 2D and 3D digitization strategies dedicated to multimodal approaches. The main contributions are based on the interaction of themes such as Spatialization, Fusion and Data Enrichment. Different approaches are proposed aiming to better articulate the instrumental, computational and analytical phases in order to increase the informative potential of multi-source 2D/3D modelling. The tracks explored are substantiated by a series of works and experiments that point to possible synergies for exploring the correlation of semantically enriched spatiotemporal data based on multimodal digitization.

Cultural Heritage, Digital Heritage, Multimodal Imaging, 3D Spatialization, Data Fusion