

--

Projet ANR-17-CE38-0004

SUMUM

Stratégies de docUmentation Multiéchelle, multiModale du patrimoine culturel et naturel : acquisition, traitement, étude et diffusion.

Programme PRC 2017

A	IDENTIFICATION	2
B	RESUME CONSOLIDE PUBLIC	2
B.1	Instructions pour les résumés consolidés publics	2
B.2	Résumé consolidé public en français	2
B.3	Résumé consolidé public en anglais	4
C	MEMOIRE SCIENTIFIQUE	5
C.1	Résumé du mémoire	5
C.2	Enjeux et problématique, état de l'art	6
C.3	Approche scientifique et technique	7
C.4	Résultats obtenus	8
C.5	Exploitation des résultats	13
C.6	Discussion & Conclusions	14
C.7	Références.....	15
D	LISTE DES LIVRABLES	17
E	IMPACT DU PROJET.....	18
E.1	Indicateurs d'impact.....	18
E.2	Liste des publications et communications	19
E.3	Liste des éléments de valorisation.....	20
E.4	Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires)	22



A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	SUMUM
Titre du projet	Stratégies de documentation MU lti-échelle et MU ltimodale du patrimoine culturel et Naturel
Coordinateur du projet (société/organisme)	Alamin Mansouri, Université de Bourgogne Franche Comté (COMUE UBFC), Laboratoire ImViA
Date de début du projet	01/03/2018
Date de fin du projet	30/06/2022
Labels et correspondants des pôles de compétitivité (pôle, nom et courriel du corresp.)	
Site web du projet, le cas échéant	http://www.anr-sumum.fr/

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	M. Alamin Mansouri
Téléphone	0667697849
Adresse électronique	alamin.mansouri@u-bourgogne.fr
Date de rédaction	30/09/2022

Si différent du rédacteur, indiquer un contact pour le projet	
Civilité, prénom, nom	
Téléphone	
Adresse électronique	

Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique)	<ul style="list-style-type: none"> - ImViA (Alamin Mansouri) - LabCom-CICRP/MAP (Anthony Pamart et Emilie Hubert) - Mis (El Mustapha El Mouaddib) - Greyc (Abderrahim El Moatazbillah)
---------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

B RESUME CONSOLIDE PUBLIC

Ce résumé est destiné à être diffusé auprès d'un large public pour promouvoir les résultats du projet, il ne fera donc pas mention de résultats confidentiels et utilisera un vocabulaire adapté mais n'excluant pas les termes techniques. Il en sera fourni une version française et une version en anglais. Il est nécessaire de respecter les instructions ci-dessous.

B.1 INSTRUCTIONS POUR LES RESUMES CONSOLIDES PUBLICS

Les résumés publics en français et en anglais doivent être structurés de la façon suivante.

B.2 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN FRANÇAIS

Capter forme et apparence des surfaces du patrimoine culturel : quels défis et quelles solutions ?

Des stratégies de numérisation pilotées par le besoin au plus près et au service des œuvres

Lors de la numérisation des objets du patrimoine, le respect de leur intégrité est un principe de base. L'étude de leur dimension matérielle et de leur interaction avec l'environnement nécessite de limiter l'échantillonnage et le recours à des moyens d'observation non invasive. C'est pourquoi les sciences et technologies d'imagerie de la forme (3D) et plus récemment de l'apparence jouent un rôle de premier plan. La rencontre entre les sciences du numérique et les besoins en conservation des patrimoines culturels constituent pour ces sciences de nouveaux défis et domaines de validations, et pour les acteurs du patrimoine de nouvelles formes d'appréhension et opportunités de valorisation. Les marqueurs du projet SUMUM sont le développement et la mise en œuvre d'une approche multiX (multi-échelle, multimodale et multi-temporelle) adaptée à la complexité de l'information des surfaces et de leur apparence, pilotée au plus proche des besoins et des demandes des end-users (suivi de changement, visualisation,...) en proposant des stratégies d'acquisition innovantes et des outils partagés de traitement adaptable à la grande variété des besoins et des demandes des acteurs du patrimoine.

Les sciences de l'image au service de l'expertise et la conservation-restauration du patrimoine culturel

SUMUM a proposé des stratégies innovantes (sur le plan instrumental et sur le plan des traitements associés) pour la numérisation/modélisation des objets du patrimoine et de l'apparence de leurs surfaces en vue de leur conservation-restauration. La mise en oeuvre de nos approches s'est réalisée à travers 4 campagnes d'acquisition sur des objets complexes et de natures différentes ; à savoir les œuvres de Victor Vasarely (Aix-en-Provence), L'arbre aux serpents de Niki de saint Phalle (Angers) et une sculpture de Cesar (Marseille). Au préalable, un travail de documentation et de définition des besoins et des possibilités a été mené pour élaborer les scénarios et avoir des références. Lors de ces campagnes, nous avons déployé différentes modalités d'acquisition (photogrammétrie terrestre et aérienne via un drone, RTI, photographie technique, polarimétrie, colorimétrie, scanner LiDAR, imagerie spectrale, etc.). Un travail important de traitement tenant compte de la nature multi-échelle et multimodale a été effectué et a permis une intégration à la plateforme AIOLI, facilitant ainsi l'annotation, la propagation de traitement et également la valorisation et la diffusion des résultats.

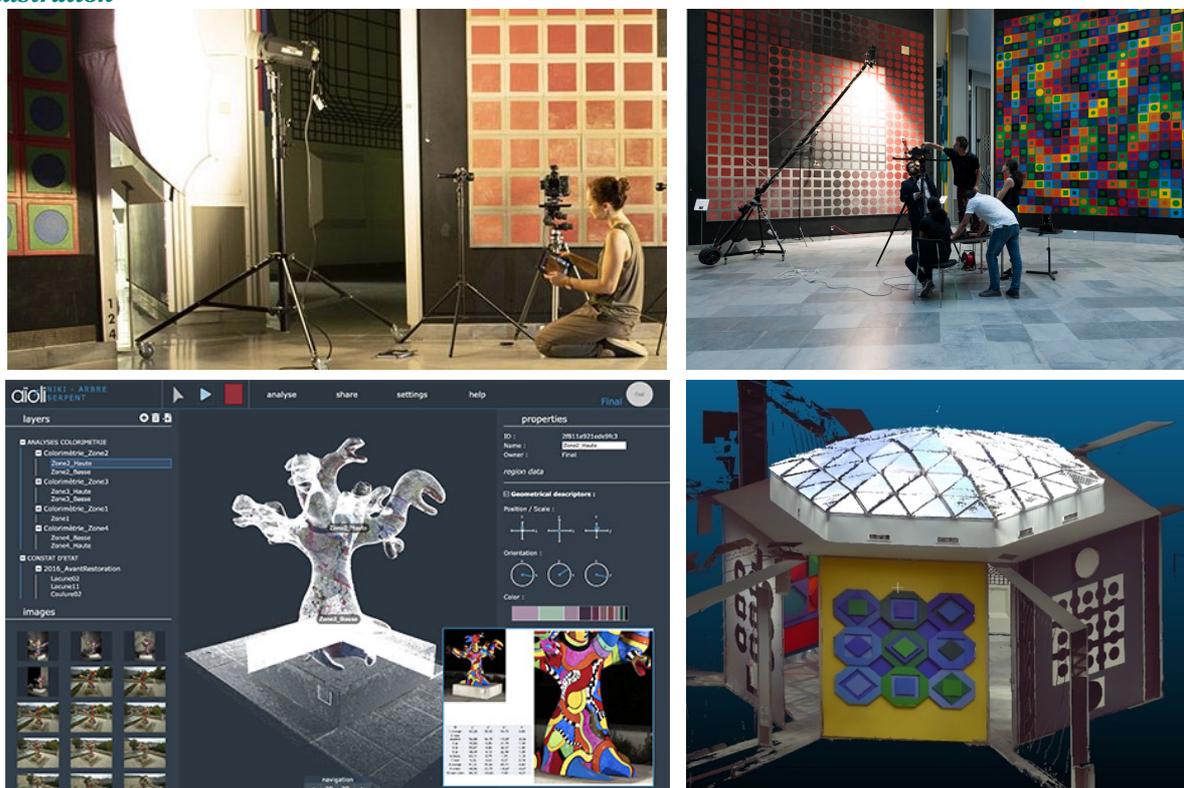
Résultats majeurs du projet

Différentes stratégies et systèmes innovants de numérisation de la forme et de l'apparence couplant différentes modalités d'imagerie à différents échelles d'observation ont été imaginés, développés et mises en oeuvre. L'exploitation des données qui en résultent, montre leur pertinence au regard des attentes des parties prenantes (conservation et restauration) car leur permettant une appréhension plus partagée et plus réaliste et des explorations fines des surfaces en terme d'échelle. Les données issues de ces approches ont été intégrées et diffusées à l'intention des experts et du grand public. Les résultats du projet ont impulsé de nouvelles collaborations et de nouveaux projets à l'échelle nationale et européenne.

Production scientifique

- 3 thèses soutenues
- 24 publications ;
- 4 logiciels implémentant les nouveaux traitements et analyses ont été réalisés et leurs codes sources sont distribués sous licence libre (librairie TACO : <https://page.hn/5oot7b> Code source MS2AIOLI : <https://page.hn/s9anv5>, Moteur TACO intégré à la plateforme AIOLI (www.aioli.cloud/), logiciel de traitement LiDaR <https://github.com/nsviel/Lidium> et enfin SpeXRTI, un logiciel de traitement et reconstruction RTI-Multispectrale ;
- 7 bases de données issues des campagnes d'acquisition multiX (dont 3 ont été mises en ligne).

Illustration



Déploiement de stratégies de numérisation et traitement innovantes, respectueuses et à la taille des oeuvres

Informations factuelles

SUMUM est un projet de recherche et développement expérimental coordonné par Alamin Mansouri (Laboratoire ImViA-Dijon). Trois autres partenaires sont associés : Labcom CICRP-MAP à Marseille, le laboratoire MIS à Amiens et le laboratoire Greyc à Caen. Le projet a commencé en mars 2018 et a duré 42 mois. Il a bénéficié d'une aide de 687k€ pour un coût global de l'ordre de 1754k€.

B.3 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN ANGLAIS

Capturing shape and appearance of cultural heritage surfaces: what challenges and solutions?

Digitization strategies driven by the need, as close as possible to and in the service of the artefacts

When digitizing cultural heritage objects, the respect of their integrity is a basic principle. The study of their material and their interaction over time and the environment requires to limit sampling and the use of non-invasive means of observation. This is why the sciences and technologies of imaging capturing the the form (3D) and more recently of the appearance play a leading role. The encounter between digital sciences and the needs in conservation of cultural heritage constitute for these sciences new challenges and fields of validation, and for the actors of the heritage new forms of apprehension and opportunities of valorization. The markers of the SUMUM project consist in the development and implementation of a multi-scale and multimodal approach adapted to the complexity of surface information and their appearance, driven as closely as possible by the needs and demands of end-users (monitoring of change, visualization, etc.) by proposing adapted acquisition strategies and shared processing tools adaptable to the wide variety of needs and demands of heritage actors.

Imaging sciences at the service of expertise and conservation-restoration of cultural heritage objects

SUMUM has proposed innovative strategies (on both instrumental and associated processing sides) for the digitization/modeling of heritage objects and the appearance of their surfaces in view of their conservation-restoration. The implementation of our approaches was carried out through 4 acquisition campaigns on complex objects of different natures; namely the works of Victor Vasarely (Aix-en-Provence), The Snakes tree of Niki de saint Phalle (Angers) and a sculpture of Cesar (Marseille). Beforehand, a documentation study and definition of the needs and possibilities was carried out to elaborate the strategies and to have references. During these campaigns, we deployed different acquisition modalities (terrestrial and aerial photogrammetry via a drone, RTI, technical photography, polarimetry, colorimetry, LiDAR scanner, spectral imaging, etc.). An important processing work taking into account the multi-scale and multimodal nature of the data was carried out and allowed an integration to the AIOLI platform, thus facilitating the annotation, the processing propagation and also the valorization and the diffusion of the results.

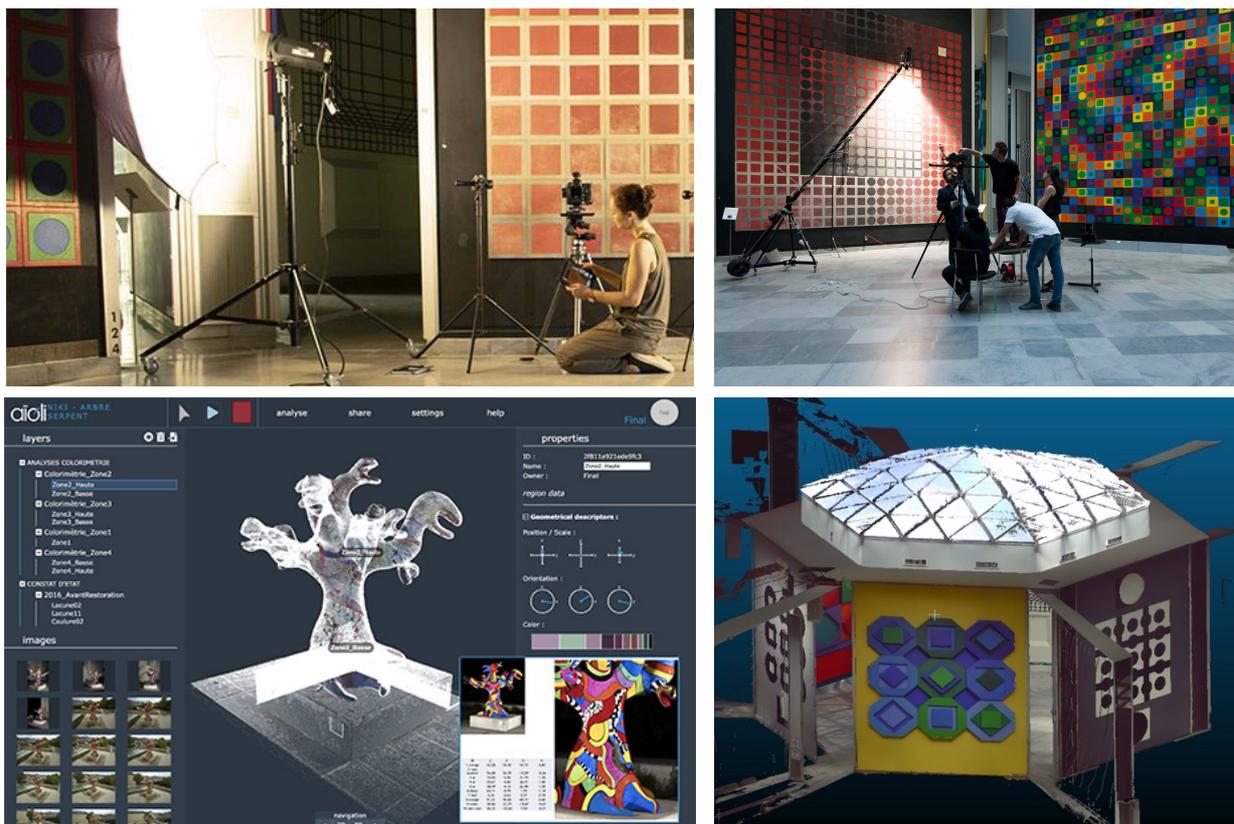
Major results

Innovative strategies and systems of digitization of shape and appearance coupling different imaging modalities at different scales of observation have been imagined, developed and implemented. The exploitation of the resulting data show their relevance with regard to the expectations of the stakeholders (conservation and restoration) because they allow a more shared and realistic apprehension and explorations of surfaces more progressive in terms of scale. Data from these approaches have been integrated and disseminated to experts and the general public. The results of the project have stimulated new collaborations leading to new projects on a national and European scale.

Scientific production

3 softwares implementing the new treatments and analyses have been realized and their source codes are distributed under an open source license (TACO library: <https://page.hn/5oot7b> MS2AIOLI source code: <https://page.hn/s9anv5>, TACO engine integrated to the AIOLI platform (www.aioli.cloud/), LiDaR data processing software <https://github.com/nsviel/Lidium>. Besides, 26 papers have been published and 3 are in progress. Several databases from multimodal acquisition campaigns have been put online.: <https://page.hn/5oot7b>

Illustration



Deployment of innovative digitization and processing strategies for complex and large cultural heritage artefacts

About the project

SUMUM is an experimental research and development project coordinated by Alamin Mansouri (ImViA-Dijon Laboratory). Three other partners are associated: Labcom CICRP-MAP in Marseille, MIS laboratory in Amiens and Greyc laboratory in Caen. The project started in March 2018 and lasted 42 months. It received 687k€ in funding for an overall cost of around 1754k€.

C MEMOIRE SCIENTIFIQUE

Mémoire scientifique confidentiel : oui / non

C.1 RESUME DU MEMOIRE

Ce résumé peut être repris du résumé consolidé public.

Lors de la numérisation des objets du patrimoine, le respect de leur intégrité est un principe de base. L'étude de leur dimension matérielle et de leur interaction avec le temps ainsi que l'environnement nécessite de limiter l'échantillonnage et le recours à des moyens d'observation non invasive. C'est pourquoi les sciences et technologies d'imagerie de la forme (3D) et plus récemment de l'apparence jouent un rôle de premier plan. La rencontre entre les sciences du numérique et les besoins en conservation des patrimoines culturels constituent pour ces sciences de nouveaux défis et domaines de validations, et pour les acteurs du patrimoine de nouvelles formes d'appréhension et opportunités de valorisation. Les marqueurs du projet SUMUM consistent en le développement et la mise en œuvre d'une approche multiX (multi-échelle, multimodale et multi-temporelle) adaptée à la complexité de l'information des surfaces et de leur apparence, pilotée au plus proche des besoins et des demandes des end-users (suivi de changement, visualisation,...) en proposant des stratégies d'acquisition innovantes et des outils partagés de traitement adaptable à la grande variété des besoins et des demandes des acteurs du patrimoine.

C.2 JEUX ET PROBLÉMATIQUE, ETAT DE L'ART

Le projet SUMUM s'est placé dans un cadre de recherche instrumentale (Stratégies et réalisations de relevés) et méthodologiques (méthodes de préparation des données, de traitement, d'analyse et de représentation). Il s'est construit selon quatre grands « domaines », ou axes de recherche, entre lesquels il existe de nombreuses passerelles :

- (i) Les stratégies de relevés 3D multi-échelle et multi-modaux.
- (ii) L'acquisition, la modélisation et la représentation de l'apparence des surfaces
- (iii) La fusion et l'intégration des données multi-échelles, multi-modales et sémantiques
- (iv) Le traitement unifié des données multimodales (approche basée sur les graphes)

Dans ce cadre de documentation des objets du patrimoine, quelle qu'en soit la taille, il est souvent nécessaire d'acquérir numériquement la forme 3D que ce soit par des techniques actives ou passives [1-4]. Actuellement, la précision des dispositifs d'acquisition 3D d'objets de grande taille, notamment la photogrammétrie et les scanner LiDAR, permet d'obtenir une bonne estimation de la géométrie des scènes scannées. En revanche, les informations concernant le rendu des couleurs de la scène scannée et les informations de texture des matériaux (matière, rugosité) demeurent des champs d'investigation [5-6]. Dans le cas des scanners LiDAR, se pose le problème de la variabilité de la résolution entre différents scans dû au fait que le signal d'intensité utilisé par les scanners dépend de beaucoup de facteurs dont l'angle d'incidence, la distance et la rugosité de la surface pour ne citer que les paramètres les plus influents. Difficilement interprétable, l'intensité est utilisée uniquement pour des applications très spécifiques [7-8]. Le vrai problème est que ces mesures se basent sur une hypothèse très restrictive ; à savoir des surfaces lambertiennes, qui ne se vérifie pas toujours dans le monde réel [9-11]. D'autres modèles existent comme celui dans [7] utilisant un modèle de réflectance de type Oren-Nayar basé sur des micro-facettes pour tenir compte du relief de pierres. En outre, la couleur, même sous forme de HDR [6], étant un attribut dépendant de l'éclairage ambiant et du capteur utilisé, elle ne permet pas une description invariante et *device-independent* de la surface d'un objet. Pour pallier cette difficulté, quelques recherches ont proposé d'acquérir une texture multispectrale simultanément de l'acquisition 3D pour garantir cette invariance [4,12-13]. Néanmoins, ces systèmes combinant acquisition 3D et multispectrale ne prennent pas explicitement en compte le lien existant dans l'apparence entre la position de l'éclairage et la position du capteur (multispectrale ou couleur). Seule l'acquisition d'une BRDF est la traduction complète d'une telle relation mais qui, en pratique, s'avère complexe à mettre en œuvre et très coûteuse en temps de calcul et en quantité de données. C'est ainsi que la technique RTI (Reflectance Transformation Imaging) [14-16], dont le principe consiste à varier les directions d'éclairages connaît un succès. L'information obtenue de cette technique apporte donc une description plus complète de l'apparence, qualifiée de composante angulaire de réflectance. Cette information discrète de *réflectance angulaire* peut alors être décrite avec des fonctions numériques continues, par la mise en œuvre, en chaque pixel, de méthodes d'interpolation ou d'approximation des nuages de points de réflectance angulaire discrets acquis [17-20].

En général pour le relevé 3D dans le cas des grands objets, les techniques actives restent les plus utilisées [21-23] comme le LiDAR. Mais, il n'est pas rare de devoir compléter des données Lidar (aéroporté ou non) par des acquisitions complémentaires avec d'autres modalités dont la densité d'informations sera liée aux outils complémentaires mis en œuvre et aux modalités d'acquisition. La stratégie consiste alors à utiliser de plus en plus d'instruments d'acquisitions 3D de différentes natures sur différents vecteurs (terrestres, drones, etc. moyennant une adaptation des stratégies de relevés. La stratégie d'acquisition pourrait aussi inclure d'autres éléments comme l'utilisation conjointe de capteurs 3D et des techniques multi-éclairages (RTI et Multispectrales) permettant de mieux représenter l'apparence et de discriminer et caractériser les surfaces.

Par ailleurs, le recours à des acquisitions multi-échelle et multimodales nécessite en effet une mise en cohérence géométrique et conceptuelle afin de réunir au sein d'une représentation multi-dimensionnelle et intégrée toutes les informations acquises selon l'échelle et d'en suivre son évolution [24]. La mise en cohérence géométrique englobe deux problèmes connus et traités en image [25-26] mais qui sont actualisés dans le cas des données multimodales et multi-échelle. Ces problèmes sont le recalage et le mosaïquage multi-échelle et multitemporel.

Les informations sémantiques constituent un autre volet de la multi-modalité très important dans la gestion du patrimoine qu'il semble nécessaire à intégrer au même titre que les informations images ou 3D et de les soumettre également au processus de fusion et de mise en cohérence spatialisée [27-31]. Les modèles 3D peuvent aussi être annotés. L'idée est d'associer l'annotation à des parties du modèle 3D, c'est-à-dire à des surfaces [32], des régions ou encore à des objets de la scène [33]. Les solutions existantes d'annotation sémantique d'images et de modèle 3D se révèlent aujourd'hui encore insuffisantes pour aborder ce problème complexe qu'est l'annotation d'artefacts patrimoniaux.

Les images offrent un support plus facile d'utilisation pour l'aspect de sélection des annotations. En parallèle, les modèles 3D reflètent des informations géométriques importantes. Des travaux ont donc essayé de combiner les informations 2D et les informations 3D [34]. Ceux-ci reposent sur l'utilisation d'une relation spatiale entre les images et une représentation 3D ce qui permet de pouvoir établir un lien entre 2D et 3D et par conséquent de

permettre une propagation automatique des annotations. D'autre part, De Luca et al. [35] montrent notamment que la spatialisation des informations peut aussi permettre de gérer le suivi d'évolution temporel sur un objet.

Au-delà des aspects fusion, annotation et mise en cohérence des données multimodales, le traitement et analyse sur ces données constituent un verrou à lever. Autrement dit, il y a nécessité d'unifier autant que possible, la représentation et les traitements dans un même cadre méthodologique adapté au traitement des données multimodales et massives. Le formalisme de traitement sur graphe semblait pertinent. En effet, dans le cas des images, où selon la construction du graphe, il est possible de mettre en avant les interactions locales ou non-locales des données, ce qui permet de développer ou retrouver aisément des outils pour le traitement local et non-local des images [36-40].

C.3 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Le projet SUMUM, implique fortement les end-users à travers le CICRP et notamment dans les phases de définition des besoins et cahier des charges ainsi que dans la phase interprétation, évaluation et valorisation. De surcroît, le projet est autour de plusieurs cas d'étude ayant des objectifs concrets (évaluations de changement, modélisation, visualisation). Du point de vue scientifique et technique, nous avons construit un programme de recherche répondant aux limitations identifiées et s'articulant autour des axes cités ci-haut.

- Les stratégies de relevés 3D multi-échelle et multi-modaux : Afin d'assurer une représentation la plus fidèle possible, l'information doit donc être analysée (et parfois mesurée) dans une démarche multi-échelle. De plus, dans le cadre du projet SUMUM, il nous est apparu pertinent de permettre la mise en œuvre des acquisitions et des traitements de plusieurs modalités d'imagerie. La multi-modalité se déclinait selon deux formes/objectifs : MM2 dans le cas d'objets de grandes dimensions et qui a pour but d'affiner la reconstruction 3D, par la fusion de différents types/sources d'informations. Et la multimodalité appelée MM1 qui vise à enrichir l'information scientifique disponible sur une zone ou une région d'intérêt.
- L'acquisition, la modélisation et la représentation de l'apparence des surfaces. Nous avons développé une approche instrumentale et computationnelle visant à acquérir les paramètres les plus déterminants dans l'apparence visuelle des surfaces ; à savoir, la forme, la rugosité et l'influence de la géométrie de l'éclairage. D'un point de vue instrumental, cela a nécessité le développement de protocoles d'acquisition et instruments dédiés, permettant : 1) Une acquisition pilotable et auto-adaptative de la composante angulaire de réflectance 2) Élargir le champ des acquisitions stéréo-photométriques en lumière blanche au domaine spectral 3) Intégrer une méthode de modélisation multi-échelle de la réflectance dédiée à ces informations multimodales 4) Combiner les informations de réflectance angulaire et spectrale en un espace unique de représentation et d'interpolation, pour transformer les données discrètes acquises en une modélisation continue de l'apparence
- La fusion et l'intégration des données multi-échelles, multi-modales et sémantiques. Pour ce faire, nous avons orienté le travail vers l'élaboration des stratégies de fusion de données multimodales pour lesquelles la photogrammétrie s'installe — sur base de nos expériences SUMUM — comme une base solide pour relier et articuler des ressources multidimensionnelles (de la 1D à la 4D+, soit de la mesure ponctuelle au clone numérique quasi-synchrone). Concernant l'aspect sémantique, sur base des documents et rapports fournis par le CICRP, une transposition numérique spatialisée a été faite sur une sélection de 3 œuvres pilotes. Ces chantiers pionniers permettent de relier des relevés multi-modaux aux observations faites par les professionnels des sciences du patrimoine.
- Le traitement des données multimodales représentées en graphes. En effet, le traitement des données multimodales nécessite l'élaboration de nouveaux modèles et le développement de méthodologies adaptées à la multimodalité et aux objectifs de leur exploitation. Pour répondre à ce problème, nous avons opté pour le traitement sur graphe notamment pour tout ce qui concerne les traitements usuels (inpainting, colorisation, simplification) en les accélérant et en les optimisant avec les approches récentes (Deep Learning). Ce formalisme a aussi été investigué pour de nouveaux problèmes que soulève les données multimodales tels les périmètres internes. S'agissant des traitements concernant le recalage, le mosaïquage et annotations, ils ont, quant à eux, été unifiés dans la plateforme AIOLI.

Du point de vue de l'implémentation du projet, nous avons construit le projet autour de six tâches comme illustré sur la figure 1. Cette structuration permettait la cohérence entre les objectifs scientifiques et les contraintes qu'impliquent le travail pluridisciplinaire et sur des objets patrimoniaux rares et fragiles.

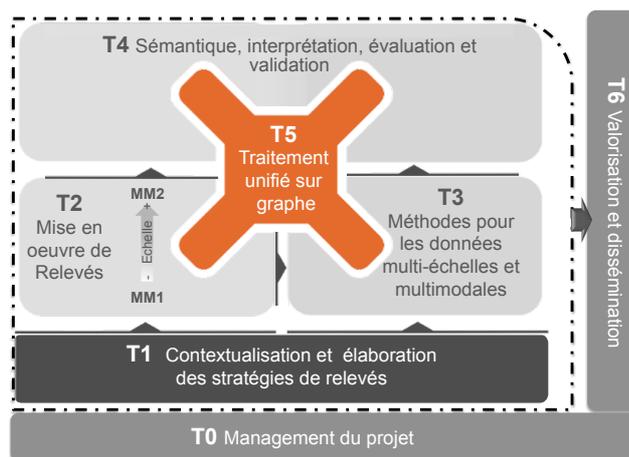


Figure 1 : Implémentation du projet SUMUM

C.4 RESULTATS OBTENUS

La présentation des résultats s'articule autour des 4 axes de recherche que nous avons défini dans la section précédente.

(i) Stratégies de relevés 3D multi-échelle et multi-modaux : sur le plan de l'acquisition, 4 campagnes d'acquisition synchronisées entre les partenaires ont été menées sur des objets complexes et de natures différentes ; à savoir les œuvres de Victor Vasarely (Aix-en-Provence), L'arbre aux serpents de Niki de saint Phalle (Angers) et une sculpture de Cesar (Marseille). Au préalable, un travail de documentation et de définition des besoins et des possibilités a été mené (en collaboration avec l'école supérieure des Arts (département conservation-restauration) de Liège concernant des œuvres de Vasarely) pour élaborer les scénarios et avoir des références. Lors de ces campagnes, nous avons déployé différentes modalités d'acquisition (photogrammétrie terrestre mais aussi aérienne via un drone, RTI, Imagerie technique (Couleur, UV, IR), polarimétrie, mesures colorimétriques, scanner 3D LiDAR, imagerie multispectrale, etc.). Les œuvres de Vasarely ont fait l'objet de deux campagnes d'acquisition pour ainsi pouvoir étudier le changement mais aussi se confronter aux problèmes de recalage et de suivi multi-temporels. Ces campagnes d'acquisitions nous ont permis de construire une base de données multimodales, multi-échelles et multi-temporelles que nous partageons pour le besoin de l'étude entre les partenaires et qui a été mise à la disposition de la communauté ultérieurement. En termes de méthodes pour la reconstruction 3D MM1 et MM2, les résultats les plus importants concernent :

- 1) L'exploitation, après calibrage adapté, du signal intensité du LiDAR. Les méthodes développées permettent d'améliorer la reconstruction des nuages de points 3D et rendent possible l'exploitation de l'intensité renvoyée par le scanner.
- 2) Les méthodes de reconstruction 3D s'affranchissant du calibrage fort. L'ensemble de ces travaux ont été réalisés avec un formalisme suffisamment générique pour qu'ils puissent être utilisés sur tous types de capteurs visuels sténopés. Ainsi, afin de reconstruire le 3D d'une scène, il a fallu dans un premier temps calibrer le capteur. Pour ce faire, nous avons développé une méthode d'autocalibrage optimale stratifiée d'une caméra mobile. La méthode proposée est suffisamment générique pour être appliquée sur tous types de capteurs visuels à plan d'image euclidien. Nous montrons que sous ces hypothèses, chaque paire d'images fournit un nouveau polynôme quartique dans le plan inconnu à l'infini. Les paramètres d'étalonnage et donc une reconstruction métrique sont obtenus en résolvant un simple système d'équations linéaires qui permet d'assurer l'optimalité de la solution. Lorsque que l'on ajoute deux hypothèses supplémentaires (paramètres intrinsèques constants et connaissance vague de l'orientation de la caméra), nous avons démontré que nous pouvions fournir une reconstruction métrique de la scène.

Production scientifique associée

Revue internationale

[SA1] N. Sanchiz-Viel, E Bretagne, EM Mouaddib, P. Dassonville. Radiometric Correction of Laser Scanning Intensity Data Applied For Terrestrial Laser Scanning.. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Elsevier, 2021, 172, pp.1-16. .

Conférences internationales

[AD1] D. Adlakha, A. Habed, F. Morbidi, C. Demonceaux, M. De Mathelin. Stratified Autocalibration of Cameras with Euclidean Image Plane. In British Machine Vision Conference (BMVC 2020), Manchester, Septembre 2020.

[AD2] D. Adlakha, A. Habed, F. Morbidi, C. Demonceaux, M. De Mathelin. QUARCH: A new quasi-affine reconstruction stratum from vague relative camera orientation knowledge. In IEEE Int. Conf. on Computer Vision (ICCV 2019), Octobre 2019, Séoul, Corée du Sud.

Conférences nationales

[SA2] N. Sanchiz-Viel. (2019). Numérisation 3D d'oeuvres du patrimoine : Recalage basé intensité. Groupe d'intérêt scientifique de Recherche en Automatisation Intégrée et Systèmes Homme-Machine (GRAISyHM).

[SA3] N. Sanchiz-Viel (2021). Mise en correspondance basée intensité pour le recalage de nuages de points issue de LiDAR. Conférence francophone ORASIS, journées francophones des jeunes chercheurs en vision par ordinateur.

Thèses

[SA4] N. Sanchiz, Correction radiométrique et recalage de nuages de points pour la reconstruction tridimensionnelle d'œuvres du patrimoine culturel, Thèse de doctorat de l'université de Picardie Jules Verne, soutenue le 5 juillet 2021.

[AD3] D. Adlakha, Exploitation de connaissances partielles sur le mouvement et la géométrie des caméras en vision 3D non calibrée. Thèse de doctorat de l'Université de Strasbourg, 12 décembre 2022.

Bases de données

- Modèle 3D de la sculpture l'Arbre-serpents de Niki de Saint Phale (10 scans haute résolution, 7.7 Go de données brutes (equ. 21,2 Go traité), 379 millions de points)
- Modèle 3D de la sculpture de César
- Modèle 3D du musée Vasarely (14 scans haute résolution, 10.5 Go de données brutes (equ. 52 Go traité), 559 millions de points)

Logiciels

Lidium : logiciel de traitement et reconstruction de données LiDAR

<https://github.com/nsviel/Lidium>

(ii) L'acquisition, la modélisation et la représentation de l'apparence des surfaces : Afin de s'adapter à la complexité (taille et matériaux) des œuvres qui constituent nos cas d'étude, nous avons mis en place des méthodes d'acquisition RTI originales. Trois méthodes mises en œuvre sont illustrées sur la Figure 2



Figure 2. Trois systèmes d'acquisition RTI développés et exploités dans le cadre du projet SUMUM

Cependant, l'adaptation des techniques d'imagerie RTI aux objets complexes et/ou de grande implique des modélisations et traitements appropriés. Ainsi nous avons 1) étudié comment la distribution non-uniforme des positions de la source lumineuse affecte la reconstruction et le relighting des données RTI et nous avons ainsi proposé une solution reposant sur l'estimation de la densité locale de la distribution des positions de la source lumineuse afin de la pondérer et ainsi calibrer les distributions non homogènes d'acquisition. 2) nous avons montré l'insuffisance des approches reposant sur la considération d'une seule direction d'éclairage pour tous les points d'une scène. Pour pallier ce problème, nous avons proposé une approche qui exploite le modèle d'une source de lumière ponctuelle et proche et d'en déduire une correction propre à chaque pixel (pixelwise). 3) Enfin, nous avons approfondi deux domaines sous étudiés dans le cadre RTI, à savoir l'acquisition de grands objets (multi-échelle et stitching) et l'extension de la technique à l'éclairage multispectral, en proposant l'adaptation et l'amélioration de l'approche tant d'un point de vue instrumental que méthodologique. La figure 3 montre la méthode proposée pour l'exploitation conjointe des composantes angulaire et spectrale

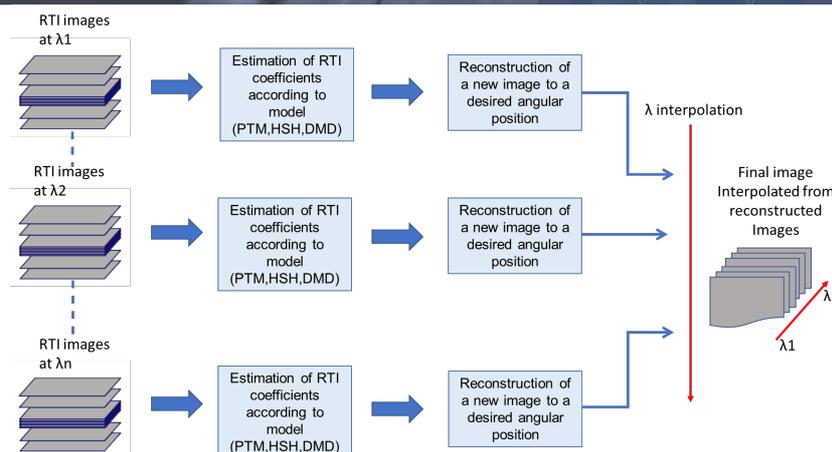


Figure 3 : Reconstruction conjointe des informations angulaires et spectrales par interpolation d'images [CA3]

Production scientifique associée

Revue internationale

[LU1] R Luxman, Y Castro, H Chatoux, M Nurit, A Siatou, G Le Goïc, L Brambilla, Ch. Degrigny, A. Mansouri, LightBot: A Multi-Light Position Robotic Acquisition System for Adaptive Capturing of Cultural Heritage Surfaces, Journal of Imaging 8 (5), 134, 2022

[SI1] A Siatou, M Nurit, Y Castro, G Le Goïc, L Brambilla, C Degrigny, A. Mansouri New methodological approaches in Reflectance Transformation Imaging applications for conservation documentation of cultural heritage metal objects, Journal of Cultural Heritage 58, 274-283, 2022

[CA1] Y. Castro, G. Le Goïc, H. Chatoux, R. Luxman, M. Nourit V. Brost and A. Mansouri “New pixel-wise illumination processing for Reflectance Transformation Imaging”. Under review in the journal The visual computer. (soumis 06-2022).

[CA2] Y. Castro, M. Nurit, G. Pitard, A. Zendagui, G. Le Goïc, V. Brost, A. Boucher, A. Mansouri, A. Pamart and L. De luca. “Calibration of spatial distribution of light sources in Reflectance Transformation Imaging based on adaptive local density estimation”. Journal of Electronic Imaging, 2020.

Conférences internationales

[CA3] Y. Castro, A. Siatou, M. Rossé, H. Chatoux, R. Luxman, G. Le Goïc, and A. Mansouri. “Extended framework for Multispectral RTP”, ARCHIVING 2022

[PA3] A. Pamart, R. Roussel, E. Hubert, A. Colombini, R. Saleri, E. M. Mouaddib, Y. Castro, G. Le Goïc and A. Mansouri. “A Semantically Enriched Multimodal Imaging Approach Dedicated to Conservation and Restoration Studies”. Workshop 3D-ARCH “3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures”.

[LU2] R. Luxman, Y. Castro, G. Le Goïc, M. Nurit, A. Siatou, L. Bambrilla, C. Degrigny and A. Mansouri. “LightBot: A multi-light robotic acquisition system for adaptive capturing of Cultural Heritage surfaces and its applicability on performing RTI data stitching”. The 1st Workshop on e-Heritage and Robotics, Prague, Czech Republic, 2021.

[CA4] Y. Castro, G. Pitard, G. Le Goïc, V. Brost, A. Mansouri, A. Pamart, J.M. Vallet and L. De Luca. “A new method for calibration of the spatial distribution of light positions in free-form RTI acquisitions”. Proceedings Volume 11058, In Optics for Arts, Architecture, and Archaeology VII . 2020, Munich, Germany

[CA5] Y. Castro, G. Pitard, A. Zendagui, G. Le Goïc, V. Brost, A. Boucher and A. Mansouri. “Light spatial distribution calibration based on local density estimation for reflectance transformation imaging”. Proceedings Volume 11172, 14th International Conference On Quality Control By Artificial Vision QCAV 2019, Mulhouse, France.

Thèses

[CA6] Yuly Castro Cartagena, A multi-light approach for documenting and modeling the appearance of large cultural heritage objects, Thèse en instrumentation et informatique de l'image de l'Université Bourgogne Franche-Comté

Logiciels

SpeXRTI : logiciel de reconstruction et visualisation des données d'apparence RTI-Multispectrale [CA3]

Prototypes

LightBot : Système d'acquisition RTI à base de bras robotisé [LU1]

(iii) La fusion et l'intégration des données multi-échelles, multi-modales et annotations sémantiques : La fusion et l'intégration des données multimodales, multi-échelle et multi-temporelle (MultiX) requiert leur alignement et mise en cohérence spatial et photométrique. Ainsi des méthodes de recalage 2D/3D, 3D/3D et fusion MultiX/3D ont été mis en œuvre. 1/ Recalage 2D/3D. Il s'agit d'un recalage de photos sur les nuages de points par une approche dense (utilisation de toutes les intensités). Ce travail a permis d'améliorer l'apparence des nuages 3D et leur rendu. 2/ Recalage 3D/3D par le biais de correction du signal d'intensité produit par les scanners LiDAR. En effet, l'intensité est une quantité associée à chaque point 3D. Elle est indépendante des conditions d'éclairage, mais dépendante de la distance et de la direction des surfaces. Le travail a consisté à modéliser le comportement de cette intensité, à proposer une méthode de correction des biais introduits par la distance et par l'angle d'incidence. Cette correction améliore la lisibilité des nuages de points et rend possible l'utilisation de l'intensité dans les processus d'assemblage (recalage 3D-3D) des nuages de points. C'est ce que nous avons fait en utilisant une méthode basée sur le descripteur SIFT 3D et nous avons montré que la correction améliore nettement la mise en correspondance entre les nuages et donc le recalage. 3/ Recalage MultiX/3D. Des méthodes robustes de propagation de mappage ont été mises en place en utilisant les données photogrammétriques comme base pour relier et articuler des sources multidimensionnelles (de la 1D à la 4D+, soit de la mesure ponctuelle au clone numérique quasi-synchrone). Cela permet d'avoir à la fin dans le même référentiel les données MultiX et permettre d'explorer des pistes de fusion. Ceci a donné lieu au développement de la librairie TACO, permettant d'automatiser le traitement de données photogrammétriques collaborative par le biais d'une implémentation au sein de la plateforme d'annotations sémantiques spatialisées AIOLI. Les deux modules de la librairie sont basés sur MICMAC, une solution photogrammétrique libre et open-source développée par l'ING et l'ENSG. Le mode initial permet le traitement 100% et robuste d'un premier jeu d'image (testé et validé jusqu'à 800 images) aboutissant à la spatialisation des caméras et à la reconstruction dense de la géométrie sous forme d'un nuage de points. Le mode incrémental permet de recalculer sur une reconstruction initiale (ou n-1 incrémental), une ou un bloc d'images supplémentaires avec une grande flexibilité sur le type et la variation des données entrantes (en termes de couches multimodales).

Ce dernier mode n'étant pas encore implémenté dans AIOLI (car il impose une restructuration lourde de l'architecture logicielle pour permettre l'instanciation de multiples nuages dans une même scène), le traitement incrémental des données a été effectué en local, puis importé dans la plateforme pour un travail d'annotation. Cette étape d'annotation a été effectuée sur base des ressources documentaires fournis par le CICRP, notamment les constats d'état et les rapports élaborés par les restaurateurs.

Chaque œuvre a été documentée ainsi en suivant une emphase multi-scalaire (Zett), multi-temporelle (Arbre aux serpents) ou multi-spectrale (Expansion contrôlée) en phase avec les propriétés de l'œuvre et ses problématiques en termes de conservation-restauration. La figure 4 montre un exemple de l'environnement AIOLI de fusion et annotation avec comme exemple les données issues de la campagne d'acquisition de l'arbre aux serpents.

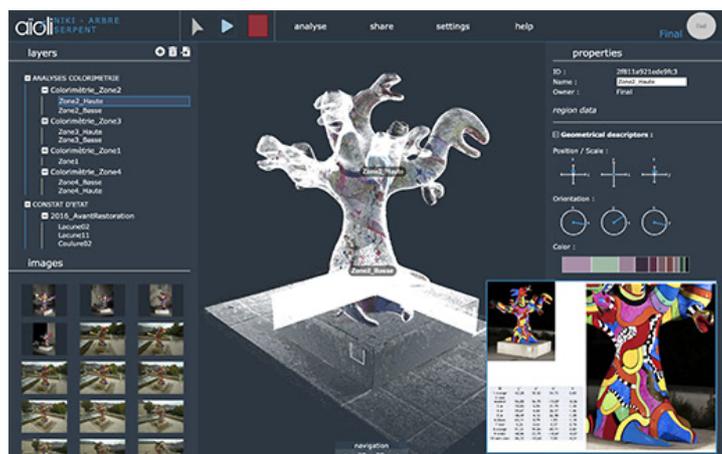


Figure 4. Plateforme d'annotations sémantiques spatialisées AIOLI

Production scientifique associée

Revues internationales

[PA1] A. Pamart, F. Morlet, L. De Luca, and P. Veron. 2020. A Robust and Versatile Pipeline for Automatic Photogrammetric-Based Registration of Multimodal Cultural Heritage Documentation. *Remote Sensing* 12, 12 (January 2020), 2051. DOI:

[CA2] Y. Castro, M. Nurit, G. Pitard, A. Zendagui, G. Le Goïc, V. Brost, A. Boucher, A. Mansouri, A. Pamart and L. De Luca. "Calibration of spatial distribution of light sources in Reflectance Transformation Imaging based on adaptive local density estimation". *Journal of Electronic Imaging*, 2020.

[PA2] A. Pamart, F. Morlet, and L. de Luca. 2019. A FULLY AUTOMATED INCREMENTAL PHOTGRAMMETRIC PROCESSING DEDICATED FOR COLLABORATIVE REMOTE-COMPUTING WORKFLOW. In *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Copernicus GmbH, 565–571. DOI:<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-565-2019>

Conférences internationales

[PA3] A. Pamart, R. Roussel, E. Hubert, A. Colombini, R. Saleri, E. M. Mouaddib, Y. Castro, G. Le Goïc, and A. Mansouri. 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, (February 2022), 415–420. DOI:<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-2-W1-2022-415-2022>

[CA4] Y. Castro, G. Pitard, G. Le Goïc, V. Brost, A. Mansouri, A. Pamart, J.M. Vallet and L. De Luca. "A new method for calibration of the spatial distribution of light positions in free-form RTI acquisitions". *Proceedings Volume 11058, In Optics for Arts, Architecture, and Archaeology VII*. 2020, Munich, Germany

Bases de données

- Chantier multimodal AIOLI « Zett » de Victor Vasarely : <https://page.hn/qaxsdt>
- Chantier multimodal AIOLI « Expansion contrôlée » de Cesar : <https://page.hn/wzldwg>
- Chantier multimodal AIOLI « Arbre-aux-Serpents » de Niki de Saint-Phalle : <https://page.hn/mw4rp5>

Logiciels

- Code source de la librairie TACO : <https://page.hn/5oot7b>
- Code source du script MS2AIOLI : <https://page.hn/s9anv5>

Prototypes

- Site web AIOLI : www.aioli.cloud/
- Portail AIOLI : <https://absinthe.aioli.map.cnrs.fr/index>

(iv) Le traitement unifié des données multimodales : Que ce soit en échelle large ou localisée, les données multimodales issues des acquisitions et/ou processus de fusion peuvent prendre la forme de nuages de points 3D auxquels sont associés différentes modalités et qui sont naturellement représentables sous forme de graphes. En se basant sur cette structure, nous avons exploité le cadre unifié EdP pour le traitement et l'analyse d'images 2D ou de nuages de points 3D. Ce cadre est basé sur l'utilisation des (Équations aux différences Partielles) sur graphes. Dans ce cadre nous considérons un ensemble d'opérateurs sur graphes allant de la construction de panoramas pour la visualisation/navigation, la restauration à la segmentation d'images 2D ou nuages de points 3D. Par ailleurs, les traitements sur graphe restent coûteux en ressources de calcul dans le cadre du formalisme variationnel conventionnel. Ainsi nous avons montré que les algorithmes de signaux sur graphes pouvaient être interprétés et implémentés comme des réseaux de neurones sur graphe (GNN, pour Graph Neural Network) d'un type particulier (récurif), appelé Message Passing Network (MPN). Ceci a pour avantage la possibilité d'apprendre des réseaux de neurones sur graphes de manière à reproduire ce traitement beaucoup plus rapidement. L'avantage de ces réseaux de neurones est leur capacité de traitement extrêmement rapide des données. Une des difficultés de cette démarche est en premier de pouvoir définir un GNN qui soit suffisamment générique pour traiter le type de signaux présentes auparavant (nuages de points avec attributs). De nombreux travaux ont été proposés en ce sens, notamment pour la classification et la manipulation de nuage de points. La seconde difficulté est l'apprentissage des paramètres du réseau afin de reproduire les résultats des approches usuelles de traitement sur graphe. Pour cela, nous avons testé différentes stratégies et obtenu des résultats intéressants pour la diffusion et la compression de nuages de points, en réussissant à reproduire (approximativement mais de manière très fidèle) par un GNN le traitement exact obtenu par optimisation, avec un gain en vitesse. Ainsi et grâce à cette nouvelle approche, nous avons pu transposer les

traitements usuels utiles aux restaurateurs conservateurs sur processeur GPU (Geometric Pytorch), ce qui a permis de diminuer drastiquement le temps de calculs. Parmi les traitements implémentés nous pouvons citer la restauration des données manquantes (inpainting géométrique ou sur nuage de points), la coloration de maillages, de nuages de points 3D à partir de l'information géométrique (grand intérêt pour les restaurateurs du patrimoine qui disposent d'information partielles sur les couleurs d'un objet et souhaitent restituer les couleurs originelles), la segmentation et classification semi-supervisée et la reconstruction et visualisation de surfaces 3D adaptative et progressive. D'autres travaux de traitement de données multimodales sur graphes ont été initiés et donnent des résultats encourageants tels les périmètres non locaux et courbures.

Production scientifique associée

Revue internationale

[BO1] I El Bouchairi, A Elmoataz, J Fadili, NONLOCAL PERIMETERS AND CURVATURE FLOWS ON GRAPHS WITH APPLICATIONS IN IMAGE PROCESSING AND HIGH-DIMENSIONAL DATA CLASSIFICATION, journal SIAM JOURNAL on Imaging Sciences 5SIIMS), 2022

Conférences internationales

[AZ1] A Azad, J Rabin, A Elmoataz, Variational Models for Signal Processing with Graph Neural Networks, In Proceedings of the 8th International Conference Scale Space and Variational Methods in Computer Vision (SSVM), May 16-20, 2021.

[AZ2] A Azad, Learning Label Initialization for Time-Dependent Harmonic Extension, In Proceedings of The 31st International Joint Conference On Artificial Intelligence (IJCAI), 2021

Conférences nationales

[MO1] A ELMOATAZ, F LOZES, Un cadre unifiant le traitement d'images et de nuages de points 3D : applications à la tapisserie de Bayeux, GTETSI, 2019.

Logiciels

- Librairie de traitements sur graphe portée sur GPU
- 3 logiciels déposés à l'APP

C.5 EXPLOITATION DES RESULTATS

Tout au long du projet SUMUM, des actions de transfert de résultats vers les end-users (via le partenaire CICRP) ont été accomplies. Ils prennent la forme de données acquises et les conclusions tirées concernant les cas d'étude.

Les résultats ont également été valorisés dans le cadre d'événements à destination de scientifiques ou du grand public. A titre d'exemples, une session spéciale sur la documentation du patrimoine a été organisée dans le cadre de la conférence internationale ICISP2018 ainsi que la présentation de résultats partiels lors de conférences nationales (Gretsi, ORASIS, Etc.) et internationales (Archive, ICCV, O3A, IJCAI, BMVC, EI, VSS, etc.). Concernant les événements à destination du grand public, nous pouvons citer l'organisation conjointe de conférence et de démonstration avec la fondation Vasarely lors des journées européennes du patrimoine ainsi que la participation d'une journée sur la culture numérique au nom de SUMUM

Une actions de communications à destination des professionnels et grand public à travers une capsule vidéo basée sur l'article « A Semantically Enriched Multimodal Imaging Approach Dedicated to Conservation and Restoration Studies », diffusée sur la chaîne YouTube de l'ANR suite à l'actualité ANR sur SUMUM :

<https://page.hn/tv0emi>

Les résultats du projet ont aussi été exploités dans le cadre de modules d'enseignements pour les étudiants de master et notamment sur les méthodes de reconstruction 3D appliquées au patrimoine (Dijon et Amiens) ainsi que sur la numérisation de l'apparence (Dijon).

En outre, dans le cadre d'une training school du projet H2020 MSCA-ITN appelé CHANGE organisée à Dijon, nous avons entraîné les 15 ESR recrutés sur ce projets sur nos méthodes d'acquisition et de traitement de données multimodales destinées à modéliser l'apparence des surfaces. <https://change-itn.eu/2022/05/16/change-school-france/>

Enfin, la capitalisation sur les résultats de SUMUM a permis de construire de nouvelles collaborations et de répondre avec succès à de nouveaux projets (Cf. section suites du projet)

C.6 DISCUSSION & CONCLUSIONS

Le projet SUMUM a réussi à remplir ses principaux objectifs (collaboration et création de synergies pluridisciplinaires, production scientifique et technique, innovation technologique, transfert et diffusion de connaissances, formation par la recherche) et ce malgré les difficultés liées en particulier à la pandémie et qui ont eu un impact sur le calendrier et sur la mise en œuvre de certaines campagnes d'acquisition à des fins de suivi.

Nous avons en effet montré la pertinence de notre approche pluridisciplinaire et multiX (X=échelle, modalités, temporalités, etc.) autour et au service de cas concrets. Nous avons revisité des protocoles d'acquisition 3D/RTI/spectral et les leurs traitements associés pour les rendre plus rigoureux scientifiquement et métrologiquement valides. Ainsi nous avons obtenu des résultats importants concernant nos quatre objectifs scientifiques que nous avons validés dans le cadre d'articles scientifiques et livrables. [PA3] synthétise la démarche et les apports et les synergies entre l'ensemble des partenaires scientifiques lors du projet SUMUM. Cette publication, initiée et coordonnée par le LabCom CICRP/MAP, restitue l'ensemble du travail d'acquisition, traitement et diffusion sur les œuvres de Vasarely a été co-signée par une grande partie du consortium du projet.

Par ailleurs, quelques développements n'ont pas pu être achevés ou ont été substitués par d'autres qui apparaissent plus pertinents au vu de l'évolution des sujets de recherche. A titre d'exemple, il était important de se concentrer dans un premier temps sur l'autocalibrage du capteur avant de reconstruire la scène dans le cadre de la tâche T2. Nous avons atteint cet objectif mais malheureusement nous n'avons pas été en mesure d'utiliser la reconstruction en ligne afférente en fonction du déplacement de la caméra pour proposer la prise de vue optimale suivante et ainsi reconstruire avec le plus faible nombre d'images la scène (NBV). Cette première étape ayant pris plus de temps que prévu du fait de la contrainte de la généralité de l'approche. Concernant la tâche T4 et ses livrables, il est à noter que le travail d'intégration est accompli sur sur les 3 œuvres sélectionnées pour les chantiers pilotes, mais un seul présente des qualités optimales en termes de dissémination (Zett). En effet, la quasi-planarité de l'œuvre de Vasarely offre une expérience d'annotation et de visualisation supérieure aux deux autres essais. Ceci est le contre-effet d'avoir i) choisi des œuvres complexes pour la numérisation 3D ii) élaboré et appliqué des stratégies d'acquisitions multimodales aussi innovantes qu'exigeantes. Cependant nous nous servirons très certainement de cette expérience pour faire évoluer nos outils afin d'étendre le potentiel des bases de données multimodales spatialisées dans le domaine de la conservation / restauration. Une perspective prometteuse serait que l'objet 3D annoté ou que l'annotation elle-même déposée en données ouvertes puisse faire l'objet d'une citation lors de futur constat d'état ou travail de restauration par le biais d'identifiants pérennes (DOI, ARK, etc). Dans l'état, ces clones numériques accessibles au grand nombre par lien public seront mis à disposition des ayants-droits à des fins documentaires et muséographiques.

Le projet SUMUM a également permis d'identifier des nouvelles pistes de recherche et de nouvelles opportunités de collaborations permettant de nouvelles actions et de nouveaux projets. Nous pouvons citer le projet EU H2020 MSCA -ITN CHANGE, qui se focalise sur la détection, par l'imagerie, du changement que subissent les objets du patrimoine. Le projet CHANGE a abouti en novembre 2022 au dépôt d'un projet Horizon EU MSCA DN-EJD UNCHANGE qui a pour objectif de comprendre et inverser virtuellement le changement. Deux autres projets impliquant des partenaires dans SUMUM ont été obtenu : le premier est un projet ANR-21 GMI (guide muséal inclusif) et le deuxième est un projet BPI Innov-2022, intitulé IA4Road.

Enfin, du point de vue investigation scientifique, la modélisation par l'imagerie et les outils de l'intelligence artificielle, de la perception visuelle des experts (conservateurs-restaurateurs) et sa restitution via des technologies VR/AR nous semble très pertinente. Cela passera par le lien (à établir) entre mesures faites par l'image et les expériences psychosensorielles s'inspirant des domaines de l'industrie.

C.7 REFERENCES

- [11] M. Pieraccini, G. Guidi, C. Atzeni, 3D digitizing of cultural heritage, *Journal of Cultural Heritage*. 2 (2001) 63–70. doi:10.1016/S1296-2074(01)01108-6.
- [12] G. Pavlidis, A. Koutsoudis, F. Arnaoutoglou, V. Tsioukas, C. Chamzas, Methods for 3D digitization of Cultural Heritage, *Journal of Cultural Heritage*. 8 (2007) 93–98. doi:10.1016/j.culher.2006.10.007.
- [13] G. Sansoni, M. Trebeschi, F. Docchio, State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation, *Sensors* 2009, Vol. 9, Pages 568–601. 9 (2009) 568–601. doi:10.3390/s90100568.
- [14] C. Simon Chane, A. Mansouri, F.S. Marzani, F. Boochs, Integration of 3D and multispectral data for cultural heritage applications: Survey and perspectives, *Image and Vision Computing*. 31 (2013) 91–102. doi:10.1016/j.imavis.2012.10.006.
- [15] M. Guarneri, M. Ferri de Collibus, G. Fornetti, M. Francucci, M. Nuvoli, R. Ricci, Remote Colorimetric and Structural Diagnosis by RGB-ITR Color Laser Scanner Prototype, *Advances in Optical Technologies*. 2012 (2012) 1–6. doi:10.1155/2012/512902.
- [16] R.K. Mantiuk, K. Myszkowski, H.P. Seidel, *High Dynamic Range Imaging*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ, USA, 2015. doi:10.1002/047134608X.W8265.
- [17] D. Carrea, A. Abellan, F. Humair, B. Matasci, M.-H. Derron, M. Jaboyedoff, Correction of terrestrial LiDAR intensity channel using Oren–Nayar reflectance model: An application to lithological differentiation, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 113 (2016) 17–29. doi:10.1016/j.isprsjprs.2015.12.004.
- [18] J.U.H. Eitel, L.A. Vierling, D.S. Long, Simultaneous measurements of plant structure and chlorophyll content in broadleaf saplings with a terrestrial laser scanner, *Remote Sensing of Environment*. 114 (2010) 2229–2237. doi:10.1016/j.rse.2010.04.025.
- [19] B. Höfle, N. Pfeifer, Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 62 (2007) 415–433. doi:10.1016/j.isprsjprs.2007.05.008.
- [20] Wei Fang, Xianfeng Huang, Fan Zhang, Deren Li, Intensity Correction of Terrestrial Laser Scanning Data by Estimating Laser Transmission Function, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*. 53 (2015) 942–951. doi:10.1109/TGRS.2014.2330852.
- [21] M. Guarneri, L. De Dominicis, M. Ferri de Collibus, G. Fornetti, M. Francucci, M. Nuvoli, et al., Imaging topological radar technology as a general purpose instrument for remote colorimetric assessment, structural security, cataloguing, and dissemination, *Studies in Conservation*. 60 (2015) S134–S142. doi:10.1179/0039363015Z.000000000218.
- [22] A. Mansouri, A. Lathuiliere, F.S. Marzani, Y. Voisin, P. Gouton, Toward a 3D Multispectral Scanner: An Application to Multimedia, *IEEE MultiMedia*. 14 (2007).
- [23] N. Brusco, S. Capeleto, M. Fedel, A. Paviotti, L. Poletto, G.M. Cortelazzo, et al., A System for 3D Modeling Frescoed Historical Buildings with Multispectral Texture Information, *Machine Vision and Applications*. 17 (2006) 373–393. doi:10.1007/s00138-006-0026-2.
- [24] G. Palma, M. Corsini, P. Cignoni, R. Scopigno, M. Mudge, Dynamic shading enhancement for reflectance transformation imaging, *Journal on Computing and Cultural Heritage [JOCCH]*. 3 (2010) 6–20. doi:10.1145/1841317.1841321.
- [25] M. Mudge, J.P. Voutaz, C. Schroer, M. Lum, Reflection Transformation Imaging and Virtual Representations of Coins from the Hospice of the Grand St. Bernard, *Vast*. (2005).
- [26] M. Mudge, T. Malzbender, A. Chalmers, *Academia.edu*, Eurographics (2008).
- [27] G. Le Goïc, H. Favreliere, S. Samper, F. Formosa, PTMS developments for the appearance control on high-added value surfaces, (2011) p1–1.
- [28] G. Earl, P.J. Basford, A.S. Bischoff, A. Bowman, C. Crowther, J. Dahl, et al., Reflectance transformation imaging systems for ancient documentary artefacts, (2011).
- [29] S. Duffy, Polynomial texture mapping at Roughing Linn rock art site, in: 2010.
- [30] M. Corsini, M. Dellepiane, M. Callieri, *Academia.edu*, Bar International (2006).
- [31] G. Guidi, F. Remondino, M. Russo, F. Menna, A. Rizzi, 3D Modeling of Large and Complex Site Using Multi-sensor Integration and Multi-resolution Data, *Vast*. (2008).
- [32] M.J. Starek, H. Mitasova, E. Hardin, K. Weaver, M. Overton, R.S. Harmon, Modeling and analysis of landscape evolution using airborne, terrestrial, and laboratory laser scanning, *Geosphere*. 7 (2011) 1340–1356. doi:10.1130/GES00699.1.
- [33] O.W. Brown, C.H. Hugenholtz, Quantifying the effects of terrestrial laser scanner settings and survey configuration on land surface roughness measurement, *Geosphere*. 9 (2013) 367–377. doi:10.1130/GES00809.1.
- [34] J.D. Meneely, B.J. Smith, J. Curran, A. Ruffell, Download Limit Exceeded, *ICOMOS Scientific Symposium*. (2009).
- [35] P. Theologou, I. Pratikakis, T. Theoharis, Unsupervised Spectral Mesh Segmentation Driven by Heterogeneous Graphs, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 39 (2017) 397–410. doi:10.1109/TPAMI.2016.2544311.
- [36] P. Salonia, A. Negri, Historical buildings and their decay: data recording, analysing and transferring in an ITC environment, *International Archives of* (2003).
- [37] J.M. Vallet, V. Detalle, L. De Luca, I.-L. Bodnar, O. Guillon, B. Trichereau, et al., 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), IEEE, 2013; pp. 67–74. doi:10.1109/DigitalHeritage.2013.6744731.
- [38] C. Stefani, X. Brunetaud, S. Janvier-Badosa, K. Beck, L. De Luca, M. Al-Mukhtar, Developing a toolkit for mapping and displaying stone alteration on a web-based documentation platform, *Journal of Cultural Heritage*. 15 (2014) 1–9. doi:10.1016/j.culher.2013.01.011.
- [39] K. Petridis, D. Anastopoulos, C. Saathoff, N. Timmermann, Y. Kompatsiaris, S. Staab, M-OntoMat-Annotizer: Image Annotation Linking Ontologies and Multimedia Low-Level Features, in: *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems*, Springer, Berlin, Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2006; pp. 633–640. doi:10.1007/11893011_80.
- [40] D. Pandya, B. Shah, Comparative Study on Automatic Image Annotation, *International Journal of Emerging* (n.d.).
- [41] Jia Li, J.Z. Wang, Real-Time Computerized Annotation of Pictures, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 30 (2008) 985–1002. doi:10.1109/TPAMI.2007.70847.
- [42] F. Robbiano, M. Attene, M. Spagnuolo, Part-Based Annotation of Virtual 3D Shapes - IEEE Xplore Document, (2007).
- [43] S. Havemann, V. Settgest, R. Berndt, Ø. Eide, D.W. Fellner, The arrigo showcase reloaded—towards a sustainable link between 3D and semantics, *Journal on Computing and Cultural Heritage [JOCCH]*. 2 (2009) 4–13. doi:10.1145/1551676.1551680.
- [44] N. Snaveley, S.M. Seitz, R. Szeliski, N. Snaveley, S.M. Seitz, R. Szeliski, Photo tourism: exploring photo collections in 3D, *ACM*, 2006. doi:10.1145/1141911.1141964.
- [45] L. De Luca, C. Busarayat, C. Stefani, An iconography-based modeling approach for the spatio-temporal analysis of architectural heritage, *Shape Modeling* (2010).
- [46] G. Gilboa, S. Osher, Nonlocal Operators with Applications to Image Processing, *Multiscale Modeling & Simulation*. 7 (2008) 1005–1028. doi:10.1137/070698392.
- [47] R.R. Coifman, M. Maggioni, Diffusion wavelets, *Applied and Computational Harmonic Analysis*. 21 (2006) 53–94. doi:10.1016/j.acha.2006.04.004.

[48] D.K. Hammond, P. Vandergheynst, R. Gribonval, Wavelets on graphs via spectral graph theory, *Applied and Computational Harmonic Analysis*. 30 (2011) 129–150. doi:10.1016/j.acha.2010.04.005.
[49] L. Grady, J.R. Polimeni, *Discrete Calculus - Applied Analysis on Graphs for Computational Science*, (2010).

doi:10.1007/978-1-4939-9629-2.
[50] A. Elmoataz, M. Toutain, D. Tenbrinck, On the p -Laplacian and ∞ -Laplacian on Graphs with Applications in Image and Data Processing, *SIAM J. Imaging Sciences*. 8 (2015) 2412–2451. doi:10.1137/15M1022793

D LISTE DES LIVRABLES

N°	Titre	Nature*	Date de livraison		Partenaires
			Prévue initialement	Livré	
L0.1	Accord de consortium	Accord	T0+1	T0+12	<u>Tous</u>
L0.2	Site Web pour le projet	Site web	T0+4	T0-1	<u>LE2I (ImViA)</u>
L0.3	Compte-rendus des réunions	CR	Au fil des réunions	Au fil des réunions (11CR au total)	<u>LE2I (ImViA)</u>
L1.1	Définition des besoins et contraintes selon les cas d'étude	Rapport	T0+4	T0+4	<u>CICRP/LABCO M</u>
L1.2	Modélisation et documentation semi-automatique (rapport + charte COSCHKR)	Rapport (Charte)	T0+6	T0+24	<u>LE2I (ImViA)</u>
L1.3	Élaboration de protocoles de relevés	Rapport de planification	T0+6	T0+6	<u>CICRP/LABCO M/LE2I(ImViA)</u>
L2.1	Élaboration d'une approche Next-Best-View générique (rapport)	Rapport	T0+6	T0+36	<u>MIS-ImViA</u>
L2.2	Parcours optimal de scène décomposée en zones en fonction des critères de L2.1.	Rapport/Algo	T0+18	abandonné	<u>MIS-ImViA</u>
L2.3	Démonstrateur pour l'acquisition locale {information 3D et attributs d'apparence}	Prototype	T0+18	V1 à T0+3 & V2 à T0+16	<u>LE2I(ImViA)</u>
L2.4	Protocole de tracking spatial et temporel pour le suivi de changement	Rapport	T0+18	Abandonné pour cause de COVID	<u>CICRP/LABCO M/LE2I(ImViA)</u>
L3.1	Méthodes de recalage et mosaïquage d'images multimodales (prototypes de fonctions)	Rapport/Algo	T0+24	T0+18	<u>MIS-ImViA</u>
L3.2	Méthode de fusion et de représentation des données SP/3D/MS	Prototypes de fonctions	T0+24	T0+30	<u>CICRP/LABCO M/LE2I(ImViA)</u>
L3.3	Méthodes de traitement multi-échelle et multimodale	p Prototypes de fonctions	T0+24	T0+36	<u>LE2I (ImViA)</u>
L3.4	Fonctions d'extraction de SM	Prototypes de fonctions	T0+24	T0+24	<u>LE2I(ImViA)</u>
L4.1	Outils d'annotation/propagation sémantique 2D/3D interactives	Librairie	T0+12	T0+24	<u>CICRP/LABCO M</u>
L4.2	Grille d'interprétation	Rapport			
L4.3	Outils d'évaluation objective et sensorielle	(prototype de fonctions + protocole de test)	T0+24	T0+36 (pour des raisons liées au COVID, les tests psychovisuels ont été reportés puis abandonnés et substitués par validation des experts)	<u>LE2I(ImViA)</u> <u>CICRP/LABCO M</u>
L4.4	Base documentaire (documents et rapports)	Fdocuments et rapport	T0+36	T0+24	<u>CICRP/LABCO M</u>
L5.1	Structure de données multimodales en graphes	Rapport de description	T0+12	T0+12	<u>Greyc</u>
L5.2(V1)	Librairie de fonctions implémentant les prototypes de fonctions de la tâche T3	Librairie	T0+30	T0+18	<u>Greyc</u>
L5.3	Librairie de fonctions usuelles implémentant les EdP pour des données multimodales	Librairie	T0+30	T0+30	<u>Greyc</u>
L5.4	Logiciel + fonctions /WebServices des outils pour la manipulation de données multimodales sur graphe	Logiciel	T0+42	T0+42 (la partie webservice pour le traitement sur graphe est abandonnée au profit d'intégration à la plateforme AIOLI)	<u>Greyc</u> <u>MAP/LABCOM</u>

Le rouge dans le tableau marque les livrables qui ont été reportés et en vert ceux qui ont été avancés. En noir ceux qui ont été livrés à temps.

E IMPACT DU PROJET

Ce rapport rassemble des éléments nécessaires au bilan du projet et plus globalement permettant d'apprécier l'impact du programme à différents niveaux.

E.1 INDICATEURS D'IMPACT

Nombre de publications et de communications (à détailler en E.2)

Comptabiliser séparément les actions monopartenaïres, impliquant un seul partenaire, et les actions multipartenaïres résultant d'un travail en

		Publications multipartenaïres	Publications monopartenaïres
International	Reuves à comité de lecture	4	4
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)	5	5
France	Reuves à comité de lecture		
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)		4
Actions de diffusion	Articles vulgarisation		
	Conférences vulgarisation	2	
	Autres	2 (- Training school dans le cadre du projet MSCA ITN CHANGE - Participation à la nuit des chercheurs)	

Autres valorisations scientifiques (à détailler en E.3)

Ce tableau dénombre et liste les brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet, du savoir faire, des retombées diverses en précisant les partenariats éventuels. Voir en particulier celles annoncées dans l'annexe technique).

	Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables)
Brevets internationaux obtenus	
Brevet internationaux en cours d'obtention	
Brevets nationaux obtenus	
Brevet nationaux en cours d'obtention	
Licences d'exploitation (obtention / cession)	Un système multimodal RTI a été mis en œuvre dans le laboratoire ImViA et qui a impliqué en partie des ressources de SUMUM. Ce système a fait l'objet d'une cession de licence, via SAYENS à une entreprise française.
Créations d'entreprises ou essaimage	Co-portage et co-fondation de la start-up NORM3D en 2020, https://norm3d.com/
Nouveaux projets collaboratifs	
Colloques scientifiques	- Digital Cultural Heritage @ ICISP2018 et ICISP 2020 (www.icisp-conf.org) - International Workshop on Nonlocal Models, PDEs and Applications 13 - 14 May 2019 Caen, Normandy, France https://npde-vpa2019.sciencesconf.org/
Autres (préciser)	- Journée de la culture numérique https://jncn2018.greyc.fr o Conférence tout public de Serge Haroche Prix Nobel de physique. o Une dizaine d'ateliers sur le numérique pour 400 collégiens.

E.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Revue internationale

[LU1] R Luxman, Y Castro, H Chatoux, M Nurit, A Siatou, G Le Goïc, L Brambilla, Ch. Degryny, A. Mansouri, LightBot: A Multi-Light Position Robotic Acquisition System for Adaptive Capturing of Cultural Heritage Surfaces, *Journal of Imaging* 8 (5), 134, 2022

[SI1] A Siatou, M Nurit, Y Castro, G Le Goïc, L Brambilla, C Degryny, A. Mansouri New methodological approaches in Reflectance Transformation Imaging applications for conservation documentation of cultural heritage metal objects, *Journal of Cultural Heritage* 58, 274-283, 2022

[BO1] I El Bouchairi, A Elmoataz, J Fadili, NONLOCAL PERIMETERS AND CURVATURE FLOWS ON GRAPHS WITH APPLICATIONS IN IMAGE PROCESSING AND HIGH-DIMENSIONAL DATA CLASSIFICATION, *journal SIAM JOURNAL on Imaging Sciences* 5SIIMS), 2022

[CA1] Y. Castro, G. Le Goïc, H. Chatoux, R. Luxman, M. Nourit V. Brost and A. Mansouri “New pixel-wise illumination processing for Reflectance Transformation Imaging”. Under review in the journal *The visual computer*. (soumis 06-2022).

[SA1] N. Sanchiz-Viel, E Bretagne, EM Mouaddib, P. Dasonvalle. Radiometric Correction of Laser Scanning Intensity Data Applied For Terrestrial Laser Scanning.. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Elsevier, 2021, 172, pp.1-16.

[CA2] Y. Castro, M. Nurit, G. Pitard, A. Zendagui, G. Le Goïc, V. Brost, A. Boucher, A. Mansouri, A. Pamart and L. De luca. “Calibration of spatial distribution of light sources in Reflectance Transformation Imaging based on adaptive local density estimation”. *Journal of Electronic Imaging*, 2020.

[PA1] A. Pamart, F. Morlet, L. De Luca, and P. Veron. 2020. A Robust and Versatile Pipeline for Automatic Photogrammetric-Based Registration of Multimodal Cultural Heritage Documentation. *Remote Sensing* 12, 12 (January 2020), 2051. DOI:<https://doi.org/10.3390/rs12122051>

[CA2] Y. Castro, M. Nurit, G. Pitard, A. Zendagui, G. Le Goïc, V. Brost, A. Boucher, A. Mansouri, A. Pamart and L. De luca. “Calibration of spatial distribution of light sources in Reflectance Transformation Imaging based on adaptive local density estimation”. *Journal of Electronic Imaging*, 2020.

[PA2] A. Pamart, F. Morlet, and L. de Luca. 2019. A FULLY AUTOMATED INCREMENTAL PHOTGRAMMETRIC PROCESSING DEDICATED FOR COLLABORATIVE REMOTE-COMPUTING WORKFLOW. In *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Copernicus GmbH, 565–571. DOI:<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-565-2019>

Conférences internationales

[PA3] A. Pamart, R. Roussel, E. Hubert, A. Colombini, R. Saleri, E. M. Mouaddib, Y. Castro, G. Le Goïc, and A. Mansouri. 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, (February 2022), 415–420. DOI:<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-2-W1-2022-415-2022>

[CA3] Y. Castro, A. Siatou, M. Rossé, H. Chatoux, R. Luxman, G. Le Goïc, and A. Mansouri. “Extended framework for Multispectral RTP”, *ARCHIVING* 2022

[LU2] R. Luxman, Y. Castro, G. Le Goïc, M. Nurit, A. Siatou, L. Bambrilla, C. Degryny and A. Mansouri. “LightBot: A multi-light robotic acquisition system for adaptive capturing of Cultural Heritage surfaces and its applicability onperforming RTI data stitching”. *The 1st Workshop on e-Heritage and Robotics*, Prague, Czech Republic, 2021.

[AZ1] A Azad, J Rabin, A Elmoataz, Variational Models for Signal Processing with Graph Neural Networks, In *Proceedings of the 8th International Conference Scale Space and Variational Methods in Computer Vision (SSVM)*, May 16-20, 2021.

[AZ2] A Azad, Learning Label Initialization for Time-Dependent Harmonic Extension, In *Proceedings of The 31st International Joint Conference On Artificial Intelligence (IJCAI)*, 2021

[AD1] D. Adlakha, A. Habed, F. Morbidi, C. Demonceaux, M. De Mathelin. Stratified Autocalibration of Cameras with Euclidean Image Plane. In *British Machine Vision Conference (BMVC 2020)*, Manchester, Septembre 2020.

[AD2] D. Adlakha, A. Habed, F. Morbidi, C. Demonceaux, M. De Mathelin. QUARCH: A new quasi-affine reconstruction stratum from vague relative camera orientation knowledge. In *IEEE Int. Conf. on Computer Vision (ICCV 2019)*, Octobre 2019, Séoul, Corée du Sud.

[CA4] Y. Castro, G. Pitard, G. Le Goïc, V. Brost, A. Mansouri, A. Pamart, J.M. Vallet and L. De Luca. “A new method for calibration of the spatial distribution of light positions in free-form RTI acquisitions”. Proceedings Volume 11058, In Optics for Arts, Architecture, and Archaeology VII . 2020, Munich, Germany

[CA5] Y. Castro, G. Pitard, A. Zendagui, G. Le Goïc, V. Brost, A. Boucher and A. Mansouri. “Light spatial distribution calibration based on local density estimation for reflectance transformation imaging”. Proceedings Volume 11172, 14th International Conference On Quality Control By Artificial Vision QCAV 2019, Mulhouse, France.

Conférences nationales

[SA3] N. Sanchiz-Viel (2021). Mise en correspondance basée intensité pour le recalage de nuages de points issue de LiDAR. Conférence francophone ORASIS, journées francophones des jeunes chercheurs en vision par ordinateur.

[MO1] A ELMOATAZ, F LOZES, Un cadre unifiant le traitement d'images et de nuages de points 3D : applications a la tapisserie de Bayeux, GTETSI, 2019.

[SA2] N. Sanchiz-Viel. (2019). Numérisation 3D d'oeuvres du patrimoine : Recalage basé intensité. Groupe d'intérêt scientifique de Recherche en Automatisation Intégrée et Systèmes Homme-Machine (GRAISyHM).

Thèses

[CA6] Yuly Castro Cartagena, A multi-light approach for documenting and modeling the appearance of large cultural heritage objects, Thèse en instrumentation et informatique de l'image de l'Université Bourgogne Franche-Comté

[SA4] N. Sanchiz, Correction radiométrique et recalage de nuages de points pour la reconstruction tridimensionnelle d'œuvres du patrimoine culturel, Thèse de doctorat de l'université de Picardie Jules Verne, soutenue le 5 juillet 2021.

[AD3] D. Adlakha, Exploitation de connaissances partielles sur le mouvement et la géométrie des caméras en vision 3D non calibrée

E.3 LISTE DES ELEMENTS DE VALORISATION

Bases de données

- Chantier multimodal AIOLI « Zett » de Victor Vasarely : <https://page.hn/qaxsdt>
- Chantier multimodal AIOLI « Expansion contrôlée » de Cesar : <https://page.hn/wzldwg>
- Chantier multimodal AIOLI « Arbre-aux-Serpents » de Niki de Saint-Phalle : <https://page.hn/mw4rp5>
- Modèle 3D de la sculpture l'Arbre-serpents de Niki de Saint Phale (10 scans haute résolution, 7.7 Go de données brutes (equ. 21,2 Go traité), 379 millions de points)
- Modèle 3D de la sculpture de César
- Modèle 3D du musée Vasarely (14 scans haute résolution, 10.5 Go de données brutes (equ. 52 Go traité), 559 millions de points)

Logiciels

- Lidium : logiciel de traitement et reconstruction de données LiDAR <https://github.com/nsviel/Lidium>
- SpeXRTI : logiciel de reconstruction et visualisation des données d'apparence RTI-Multispectrale **[CA3]**
- Code source de la librairie TACO : <https://page.hn/5oot7b>
- Code source du script MS2AIOLI : <https://page.hn/s9anv5>
- Librairie de traitements sur graphe portée sur GPU
- 3 logiciels déposés à l'APP concernant le traitement sur graphe

Prototypes & plateformes à la disposition de la communauté

- Prototype d'acquisition FreeForm RTI pour les grandes œuvres **[CA6]**
- LightBot : Système d'acquisition RTI avec stitching à base de bras robotisé **[LU1]**
- Site web AIOLI : www.aioli.cloud/
- Portail AIOLI : <https://absinthe.aioli.map.cnrs.fr/index>

création d'entreprise, essaimage

- Cession, via SAYENS, de licence d'exploitation d'un dispositif Multi-RTI (matériel et logiciel).

- Participation à une action de recherche initié par l'entreprise Logiroad et en collaboration avec le CEREMA (Strasbourg)
- Co-portage et co-fondation de la start-up NORM3D en 2020, <https://norm3d.com/>

Nouveaux partenariats et projets

- Participation au projet IA4Road (BPI Innov-2022), porté par l'entreprise Logiroad. (partenaire impliqué : MIS) de l'UPJV)
- Participation au projet EU H20202 MSCA-ITN CHANGE avec Lead de Workpackage et organisation de training school (partenaire impliqué (ImViA de l'UBFC))
- Participation dépôt du projet Horizon EU MSCA DN-EJD UNCHANGE (partenaire impliqués LABCOM CICRP/MAP et ImViA)
- Intégration du MAP et de ImViA comme partenaires au sein du Consortium 3D SHS dans un groupe de travail sur la modélisation de l'apparence des matériaux
- Participation au projet ANR-21 GMI guide muséal inclusif (partenaire impliqué : Greyc)

E.4 BILAN ET SUIVI DES PERSONNELS RECRUTES EN CDD (HORS STAGIAIRES)

Ce tableau dresse le bilan du projet en termes de recrutement de personnels non permanents sur CDD ou assimilé. Renseigner une ligne par personne embauchée sur le projet quand l'embauche a été financée partiellement ou en totalité par l'aide de l'ANR et quand la contribution au projet a été d'une durée au moins égale à 3 mois, tous contrats confondus, l'aide de l'ANR pouvant ne représenter qu'une partie de la rémunération de la personne sur la durée de sa participation au projet. Les stagiaires bénéficiant d'une convention de stage avec un établissement d'enseignement ne doivent pas être mentionnés.

Les données recueillies pourront faire l'objet d'une demande de mise à jour par l'ANR jusqu'à 5 ans après la fin du projet.

Identification				Avant le recrutement sur le projet			Recrutement sur le projet				Après le projet				
Nom et prénom	Sexe H/F	Adresse email (1)	Date des dernières nouvelles	Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement	Lieu d'études (France, UE, hors UE)	Expérience prof. Antérieure, y compris post-docs (ans)	Partenaire ayant embauché la personne	Poste dans le projet (2)	Durée missions (mois) (3)	Date de fin de mission sur le projet	Devenir professionnel (4)	Type d'employeur (5)	Type d'emploi (6)	Lien au projet ANR (7)	Valorisation expérience (8)
Yuly Castro	F	yuly.castro-ct@gmail.com	-	M2	France	Assistante de laboratoire	UBFC	Doctorante	36	30/04/22	Salarié	PME	Ingénieur R&D	Non	Oui
Devesh AdhlaKha	H	deveshadlaxha@gmail.com	-	M2	France		UBFC	Doctorant	18	31/08/22	ATER	Enseignement et recherche publique	Attaché temporaire à l'enseignement et la recherche	oui	oui
Valageas Claire	F	clairevalageas@hotmail.com		M2	France		CICRP	Contractuelle	4	01/10/18					
Morlet François	H	francoismorlet@gmail.com		Doctorat	France		CICRP	IGE	12	31/10/19	Doctorant	Enseignement et recherche publique	doctorant	oui	oui
Nathan Sanchiz	M	nathan.sanchiz@u-picardie.fr		M2	France		UPJV	Doctorant	36	01/11/20	PostDoc	Enseignement et recherche publique	chercheur	Non	Oui
Azad Amitoz	H	amitoz.azad@unicaen.fr		M2	France		Greyc	Doctorant	36	01/02/22					