



HAL
open science

L'orfèvrerie à l'épreuve de la modélisation 3D -Valorisation, médiation et exploitation scientifique d'oeuvres médiévales

Marc Gil, Pierre Hallot

► **To cite this version:**

Marc Gil, Pierre Hallot. L'orfèvrerie à l'épreuve de la modélisation 3D -Valorisation, médiation et exploitation scientifique d'oeuvres médiévales. Les rencontres du Consortium 3D SHS, Florent Laroche; Xavier Granier; Mehdi Chayani; Caroline Delevoie, Dec 2019, Nantes, France. hal-02488959

HAL Id: hal-02488959

<https://hal.science/hal-02488959>

Submitted on 24 Feb 2020

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.



Les rencontres du Consortium 3D SHS

Création - Usage scientifique -
Conservation des données 3D

E. thesaurus : L'orfèvrerie à l'épreuve de la modélisation 3D - Valorisation, médiation et exploitation scientifique d'œuvres médiévales

Marc Gil¹
Pierre Hallot²

¹Auteur intervenant, (IRHiS–UMR 8529 [Univ. Lille, CNRS])

²DIVA - Unité de recherche Art, Archéologie et Patrimoine,
Université de Liège

marc.gil@univ-lille.fr
p.hallot@uliege.be

2-3-4 décembre 2019

Université de Nantes Faculté des Sciences
et Techniques (FST)

E. thesaurus : L'orfèvrerie à l'épreuve de la modélisation 3D - Valorisation, médiation et exploitation scientifique d'œuvres médiévales

Marc Gil¹, Pierre Hallot²,

*¹Auteur intervenant, (IRHiS-UMR 8529 [Univ. Lille, CNRS])
marc.gil@univ-lille.fr*

*²DIVA - Unité de recherche Art, Archéologie et Patrimoine, Université de Liège-
p.hallot@uliege.be*

MOTS CLES

*Orfèvrerie - Moyen Âge - Nord de la France - Pays mosans - Modélisation 3D - Hologramme -
Médiation - Musée*

RESUME

Le projet pluridisciplinaire e.thesaurus, fruit de la collaboration entre historiens de l'art (universités et musées) et chercheurs en sciences et techniques du numérique, a pour objet la modélisation 3D de pièces d'orfèvrerie médiévale à des fins de recherche fondamentale d'une part, et de médiation, de l'autre. Dans le temps du programme, il s'agit de proposer une méthodologie d'acquisition 3D dans des contextes particuliers, à l'aide des outils actuels, en respectant un triple objectif : reproductibilité, simplicité et bas coût pour un usage en interne dans les institutions muséales (base de données, archivage numérique et médiation). Notre article présente la genèse du projet, les premiers résultats et les perspectives de recherche pour la dernière étape du projet.

INTRODUCTION

E.thesaurus est né d'une collaboration entre l'UMR IRHiS de l'Université de Lille et l'unité de Géomatique et l'unité de recherche d'Art, Archéologie et Patrimoine de l'Université de Liège. Il rassemble une équipe franco-belge d'historiens de l'art, universitaires et conservateurs des musées, et de chercheurs en informatique et sciences appliquées¹. L'objectif global du projet est d'améliorer l'accessibilité des chefs-d'œuvre de l'orfèvrerie - produits à l'époque médiévale dans les régions du Nord de la France et de la Belgique actuelle - à des fins de recherche et de médiation. Son objet d'étude est donc l'orfèvrerie septentrionale des XIIe-XIIIe siècles, avec un axe majeur consacré à la modélisation 3D et à la restitution en réalité augmentée des objets.

Cet apport des technologies du numérique est essentiel pour une meilleure compréhension des techniques d'assemblage. Associée aux analyses physico-chimiques et par radiographie, l'étude doit permettre, in fine, d'approfondir notre compréhension des techniques de fabrication des objets et de leurs matériaux. Les informations ainsi recueillies viendront nourrir une base de données, consultable en ligne, où seront associées données informatives et analytiques aux modèles 3D des éléments étudiés².

E.thesaurus s'inscrit dans le cadre de deux appels à projets dont il a été lauréat en 2017-2018. Le premier appel a été lancé par la structure de recherche MAuVE (MédiACTIONS VisuElles) : culture numérique et création, soutenue par plusieurs universités et la Région

des Hauts-de-France, ainsi que par le CNRS. MAuVE porte sur la relation entre le numérique, la médiation culturelle et l'accès au savoir, et vise à soutenir des projets scientifiques produisant un impact sociétal³. Prévu à l'origine pour commencer à l'automne 2017, MAuVe ne s'est réellement concrétisé qu'en mars 2019 et doit s'achever en août 2020. Faute du démarrage à temps du CPER MAuVE, nous n'avons pu travailler, pendant un an, qu'avec l'apport d'autres financements d'appoint et d'abord grâce au budget du second appel à projet, relevant des projets « émergents » ISI-MESHS des Hauts-de-France⁴. ISI-MESHS a pour vocation de soutenir des projets innovants (nouvelles technologies, visualisation 3D) et interdisciplinaires (Sciences humaines/Sciences appliquées). Commencé en avril 2018, pour une durée de 18 mois, ce projet MESHS, s'est achevé en septembre 2019. Enfin en septembre 2019, e.thesaurus a été lauréat d'un appel à action lancé par Consortium 3D, qui va permettre de clore le projet sur une action de valorisation des résultats de recherche autour du Patrimoine 3D et de sa médiation. En définitive, c'est grâce à l'important volet de médiation patrimoniale du projet, que la recherche fondamentale a pu être financée.

I. LE CORPUS D'ETUDE (fig. 1-2)

Dans le temps de ces deux appels à projet (avril 2018-août 2020), il était impossible d'explorer la totalité des pièces d'orfèvrerie déjà repérée pour la période considérée. Dans un souci d'efficacité, il s'est agi de tester la méthode et les techniques d'acquisition des images en se focalisant d'abord sur trois œuvres exceptionnelles conservées au musée de l'Hôtel Sandelin à Saint-Omer : le Pied de croix de l'abbaye Saint-Bertin (v. 1170-1180)⁵, la croix-reliquaire de la Vraie Croix, provenant de l'abbaye de Clairmarais (v. 1210-1220)⁶, et une pyxide pédiculée ou boîte à hosties consacrées (v. 1220)⁷. Dans un second temps, deux autres pièces, conservées au Palais des Beaux-arts de Lille, doivent faire l'objet d'une modélisation au printemps 2020 : la Croix-reliquaire de Wasnes-au-Bac (v. 1220-1230)⁸ et l'Encensoir

au Hébreux (v. 1170)⁹.

FIGURE 1



Pied de croix de Saint-Bertin (31,5 x 29,5 x 29,5 cm); Croix-reliquaire de la Vraie Croix de Clairmarais (65,2 x 34,4 x 2,9 cm) ; Pyxide pédiculée (19 x 9,8 cm) © Musée de l'hôtel Sandelin, St-Omer

Pourquoi ces objets ?

Ces œuvres sont exceptionnelles à maints égards : richesse, éclat et raffinement des matériaux, expressivité des figures et des

compositions à la fois bi et tri-dimensionnelles, association complexe de matériaux et techniques d'exécution. Elles nous éclairent aussi bien sur les mentalités religieuses, la dévotion que sur les thèmes iconographiques de prédilection des objets liturgiques. Surtout ces œuvres sont représentatives de l'habileté des orfèvres-émailleurs des régions septentrionales au tournant du XIIe et du XIIIe siècle, et emblématiques du monde médiéval, notamment par leur iconographie.

FIGURE 2



*Croix de Wasnes-au-Bac (38,4 x 17,9 cm);
Encensoir au Hébreux (16 x 10,4 cm) © Palais des
Beaux-Arts, Lille*

Leur étude et leur numérisation sont donc un enjeu patrimonial de conservation des œuvres dont l'une, la croix-reliquaire de

Clairmarais, possède toujours un caractère liturgique et peut encore aujourd'hui être utilisée lors des processions. Surtout, ces objets, très complexes dans leur mode de fabrication, concentrent toutes les difficultés que l'on peut rencontrer lors de la numérisation par photogrammétrie ou par lasergrammétrie : dimensions, figures en ronde-bosse associées à des émaux, frises en relief ou ajourées, pierres précieuses, perles, verroterie, filigranes, nielle, argent, cuivre doré, bronze doré etc. La complexité géométrique, associée à des matériaux réfléchissant ou déviant les rayons lumineux (phénomènes de réflectance), rend la mise en œuvre des méthodologies classiques d'exploitation photo difficile. D'autres méthodes de mise en œuvre ont dû être envisagées.

II. OBJECTIFS, RESULTATS ATTENDUS

Par sa nature même, le projet e.thesaurus vise à développer une méthodologie d'acquisition, de stockage, de traitement et de diffusion d'information collectée sur un corpus d'orfèvrerie. Des résultats sont donc attendus à chaque phase du travail. Trois principaux sont escomptés :

1. Un processus d'acquisition photogrammétrique low-cost de pièces d'orfèvrerie ayant des propriétés de réflectances importantes et un niveau de détails très important. Le projet vise à diffuser la méthodologie d'acquisition en vue de la proposition d'un standard méthodologique ; les trois pièces du musée Sandelin de Saint-Omer devant servir d'objets étalons. La méthodologie a été présentée à Strasbourg, le 3 décembre 2019, par Pierre Hallot¹⁰ et vient de faire l'objet d'une publication¹¹.
2. Le développement de briques logicielles nécessaires à la diffusion d'un modèle maillé à l'aide d'un processus holographique. La méthode de diffusion devrait se baser sur l'interrogation du contenu d'une base de donnée non structurée liant une information sémantique à un modèle 3D.

3. Une première étape de création d'un e-corpus de l'orfèvrerie médiévale septentrionale. La restitution dans l'e-corpus (histoire de l'art, données archéométriques, 3D) devant être à terme de deux sortes :
- L'une simplifiée pour le grand public et les acteurs de la culture (médiation, diffusion de l'information, manipulation ludique de l'objet virtuel),
 - L'autre plus complexe, permettant un travail collaboratif d'équipes distantes de chercheurs (mise à jour et enrichissement des informations, manipulations du modèle numérique, annotation du modèle 3D à l'aide de sources documentaires).

III. PRINCIPAUX OBSTACLES A SURMONTER

Les techniques d'acquisition de données géométriques ont fortement évolué ces dernières années. L'amélioration des capacités techniques des outils informatiques, combinée aux développements technologiques de la photographie numérique et de la mesure au scanner laser, permet aujourd'hui d'obtenir des modèles 3D d'éléments construits assez rapidement et surtout avec une grande précision¹². Aujourd'hui nous assistons à un changement de l'échelle des éléments numérisés grâce aux progrès de ces technologies¹³, permettant d'adapter le processus de numérisation 3D à la sculpture mono ou polychrome¹⁴. Néanmoins, l'adaptation des techniques de numérisation à l'orfèvrerie pose trois obstacles majeurs qu'il convient de surmonter en vue de la réalisation d'un e.corpus : la réflectance des matériaux ; la précision géométrique sur ces éléments de petite ou très petite taille et l'uniformisation des couleurs et textures. Les œuvres orfèvrées sont majoritairement composées de métaux polis et dorés afin de refléter la lumière qui les frappe, conférant à cette lumière une puissante valeur symbolique.

Notre première hypothèse de travail était d'utiliser conjointement la lasergrammétrie et la photogrammétrie, pour réduire voire annuler

les effets de réflectance et d'assurer une bonne précision géométrique. Cette hypothèse de travail, qui partait d'un constat, la difficulté de modélisation des objets aussi complexes que les pièces d'orfèvrerie, revenait à celui déjà fait en 2006 par F. Remondino et S. El-Hakim : « We can safely say that at the moment, for all types of objects and sites, there is no single modeling technique able to satisfy all requirements, like high geometric accuracy, portability, full automation, photo-realism, low costs as well as flexibility and efficiency »¹⁵. Cette assertion était d'ailleurs à la même époque celle des chercheurs en charge de la modélisation 3D des objets du Trésor de la Cathédrale d'Essen (All.), pour laquelle avaient été testées trois méthodes de numérisation 3D, photogrammétrie, système par projection de franges lumineuses et scanner¹⁶.

Très rapidement, notre hypothèse de départ s'est révélée être une impasse. En effet, l'expérience que nous avons menée en laboratoire (plateforme IrDIVE)¹⁷, dès le mois de juillet 2018, sur un objet composite en bois et cuivre ciselé et gravé, a montré l'impossibilité, à partir d'un scanner 3D portable, de modéliser correctement un artefact à forte réflexion. Cependant, l'usage du scanner 3D n'est pas entièrement à rejeter. Elle se révèle très instructive dans le cas de l'étude de matériaux à la fois translucides et réfléchissants, telles les tesselles de mosaïques qui, pour certaines, s'apparentent, par leur composition, aux gemmes, à la verroterie et aux métaux précieux des pièces d'orfèvrerie¹⁸.

IV. CHOIX RAISONNE POUR UNE METHODOLOGIE D'ACQUISITION INNOVANTE

Précisons d'abord que le projet ne vise pas au développement technologique d'un nouvel outil d'acquisition. Il est orienté, au contraire, vers une recherche scientifique permettant la mise en œuvre de méthodologies et de processus de relevés à l'aide des outils actuels. À ce jour, cette réflexion, sur l'utilisation des technologies existantes et de la pertinence de leur utilisation dans les champs d'application de l'orfèvrerie, est une approche nouvelle et innovante. Un des résultats de ce projet de

recherche sera de proposer des méthodologies d'acquisition 3D dans ces contextes particuliers.

Ces méthodologies doivent être reproductibles afin, par la suite, d'alimenter un corpus complet, à la fois des pièces d'orfèvrerie des XIIe-XIIIe siècles, mais également de tout artéfact composé des mêmes types de matériaux ou présentant les mêmes particularités. Il est fondamental que cette méthodologie d'acquisition, simple et à bas coût¹⁹, puisse à terme être utilisée, en interne et en toute autonomie, par les services des musées pour compléter leurs propres corpus²⁰. Ainsi, les spécificités des objets nous ont conduits à la définition d'une méthodologie d'acquisition uniquement par photogrammétrie. Quatre caractéristiques majeures ont permis de choisir cette approche :

1. Les objets ne peuvent pas être déplacés hors des musées ou très difficilement, en raison de leur fragilité et de leur préciosité. Cela limite la possibilité d'utiliser une méthode d'acquisition qui nécessite de l'équipement lourd ou un laboratoire.
2. Les matériaux très réfléchissants de ces objets (fig. 3), limitent donc, nous l'avons dit, l'utilisation de dispositifs d'acquisition actifs tels que les lidars ou les détecteurs lumineux structurés, sans parler du coût d'acquisition de ces derniers, généralement bien au-delà des budgets des musées. Dans le cadre du projet, cette limitation doit être prise en compte car tous les artéfacts numérisés sont destinés à être développés et produits par les conservateurs eux-mêmes pour alimenter la base de données e.thesaurus.

FIGURE 3



Détail du pied de croix de St-Bertin

3. La troisième difficulté concerne le niveau de détail qui doit être atteint par les modèles 3D (fig. 4). En effet, les œuvres d'art sélectionnées présentent un très haut niveau d'exécution et de finesse des parties qui les composent. Le niveau de détail ciblé est un facteur clé dans le choix de la méthodologie d'acquisition.
4. Enfin, les deux modèles (chercheurs ; grand public) nécessitent un rendu de texture fidèle. En termes de médiation, le rendu des couleurs assure que la matérialité de l'objet est bien perçue par le public sans erreur ou approximation. Le modèle destiné aux chercheurs peut lui inclure plusieurs couches d'informations colorimétriques, basées sur différentes conditions d'éclairage allant de la lumière naturelle à la lumière multispectrale ou polarisée. Sur la base de ces éléments, l'approche photogrammétrique nous a paru la plus à même de générer des modèles 3D de très haute qualité. En fonction de la qualité des résultats ou de l'évolution technique, d'autres méthodologies pourraient être testées. Enfin, la mise en œuvre d'une méthodologie de prises de vue, contrôlée d'un point de vue de la lumière, et l'utilisation de chartes de couleurs nous a aidé dans la normalisation des couleurs.

FIGURE 4



Les niveaux de détail (fruit grenu du pied de croix, ca. L. 10 x D. max. 9 mm)

Ainsi le processus d'acquisition par photogrammétrie, qui devait respecter à la fois l'objectif de maîtrise des coûts et celui du respect des couleurs « réelles », s'est fait en deux phases (mars et août 2019)²¹ : la première dans un contexte de lumière naturelle diffuse, avec usage d'une tente lumineuse et de flashes snods (ou dit aussi softbox) (**fig. 5**), la seconde étape avec une lumière par polarisation croisée, sans tente et sur fond neutre noir et avec deux sources lumineuses, l'une permanente (leds), l'autre par flashes avec filtres orientables, pour un meilleur contrôle directionnel de la lumière polarisée (**fig. 6**)²². L'usage d'un nuancier a permis de calibrer et de contrôler les couleurs d'une phase à l'autre. Sous lumière polarisée, les couleurs apparaissent plus contrastées que sous lumière naturelle diffuse (**fig. 7**)²³.

FIGURE 5



1ère phase : en contexte de lumière naturelle diffuse sous tente lumineuse et flashes à softbox (flashes snods)

FIGURE 6



2e phase : en lumière par polarisation croisée, sur fond noir mat (papier cartonné épais) et usage de deux sources lumineuses, l'une directe (leds), l'autre par flashes avec filtres polarisés orientables

FIGURE 7



a. Photogrammétrie sous lumière naturelle diffuse ;
 b. Sous lumière à polarisation croisée

V. ENRICHISSEMENT SEMANTIQUE DES VISUALISATIONS 3D (FIG. 8)

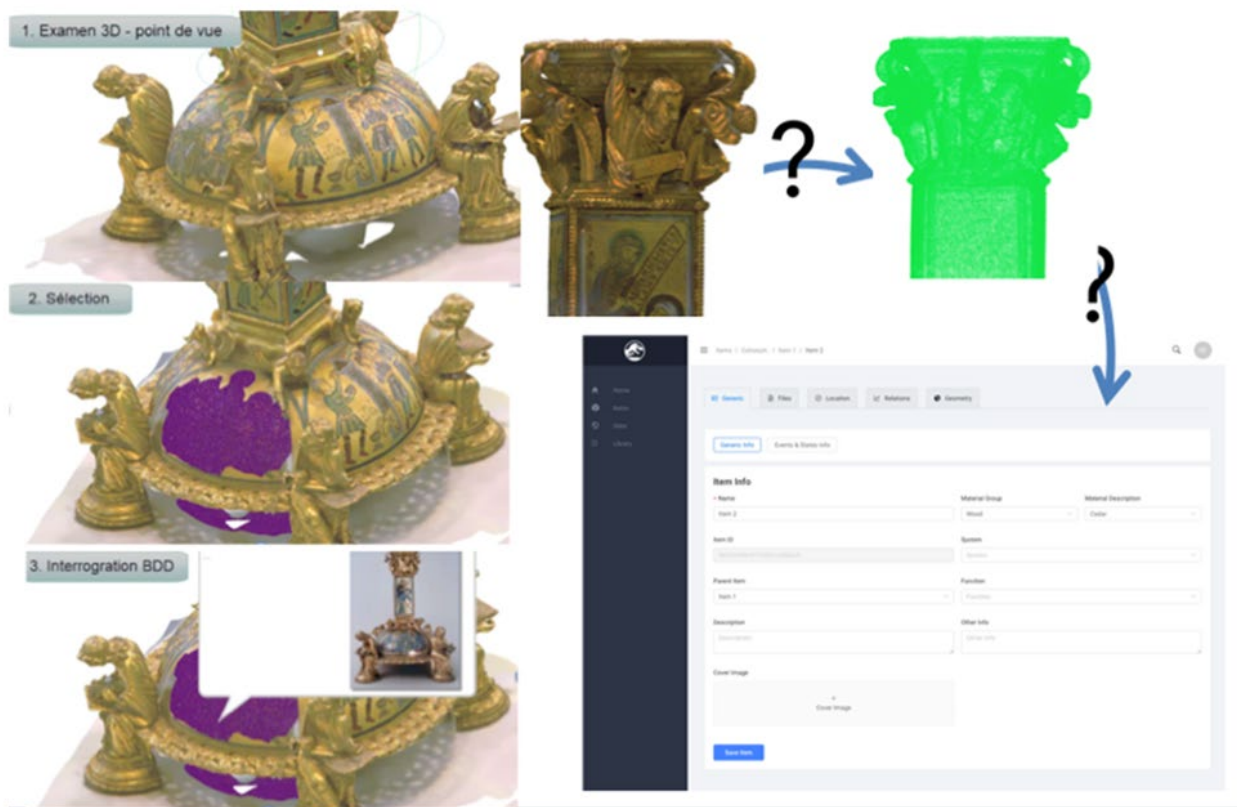
Les outils de visualisation, de représentation des données 3D sont conçus comme des outils de communication portants sur un objet tel qu'il est « réellement ». La multiplicité des types d'informations acquises lors de l'étude d'une pièce n'est jamais abordée. Les outils de visualisation 3D proposent une représentation photo-réaliste de tout ou partie de l'artefact. Cependant, il existe tout autre champ d'informations thématiques (thermographie, radiographie 2D, tomographie par rayon X (3D), sectorisation sémantique...) qui peuvent être représentés afin d'aider à l'étude ou la compréhension dans un espace virtuel. La prochaine étape du projet e.thesaurus, avant la restitution finale à l'automne 2020, est de travailler sur la modélisation 2D et/ou 3D des objets par radiographie ou tomographie RX, pour en comprendre la conception matérielle et la

structure interne. Au-delà de l'analyse de la structure de l'objet, afin d'en comprendre l'assemblage et les éventuelles modifications ou restaurations, la tomographie permet une restitution 3D des artefacts et ainsi de travailler le volet médiation scientifique en complément de la restitution en réalité augmentée par dispositif holographique²⁴.

L'usage conjoint de plusieurs techniques d'acquisition 3D (photogrammétrie, tomographie), associé à l'amélioration des outils d'interactions, devrait permettre à terme de répondre un second objectif essentiel du projet : permettre la représentation, dans l'espace 3D manipulable, des objets complexes, actuellement limitée à un tout petit nombre d'utilisateurs.

En effet, pour un utilisateur lambda, l'expérience de manipulation d'un objet dans un espace virtuel peut être décevante s'il ne sait pas quoi regarder sur l'objet qu'il manipule. L'amélioration des outils d'interactions passe, à notre sens, par la liaison de la représentation avec une description sémantique des parties représentées. On peut de la sorte imaginer un système où, en fonction de l'étape de description de l'objet, la représentation virtuelle qui lui est faite change de point de vue, se transforme géométriquement, ajoute ou supprime des éléments, propose des représentations de variables thématiques.

FIGURE 8



Base de données liant l'information thématique de l'objet à sa localisation en 3D sur le modèle (e-thesaurus 3D)

VI. MEDIATION SCIENTIFIQUE ET CULTURELLE PAR UN DISPOSITIF HOLOGRAPHIQUE INTERACTIF

Dans la phase actuelle du projet e.thesaurus, la société Holusion, spécialisée dans la conception et le développement de dispositifs holographiques a intégré le consortium de recherche. Dans le projet holomouseio développé récemment par cette société en partenariat avec l'université de Lille²⁵, les objets numérisés apparaissent en hologramme sur un module spécifique, tandis que des informations, décrivant l'objet, apparaissent sur une tablette tactile. Le système développe une interaction simple, l'utilisateur peut changer d'objet et de collection grâce à cette tablette. Pour le projet e.thesaurus, Holusion et l'équipe de recherche qui travaillent à la restitution 3D holographique des pièces d'orfèvrerie²⁶, veulent aller beaucoup plus loin en complexifiant l'interaction entre le dispositif

holographique et le public par l'interrogeabilité de l'objet directement sur l'hologramme, donc de présenter les artefacts de manière beaucoup plus poussée et précise. Ainsi, l'équipe souhaite mettre en avant des détails de l'objet invisibles à l'œil nu, et apporter des informations sur ceux-ci, impossibles à découvrir pour un non-initié. Ces informations seraient basées sur un système de requêtes sur l'objet, c'est à dire que l'utilisateur sélectionnerait, sur la tablette, une partie de l'objet, qui serait alors isolée et zoomée sur l'hologramme, tandis que l'information apparaîtrait sur la tablette et/ou sur l'hologramme directement à côté de la partie zoomée (hypothèse)²⁷. Cet aspect ludique d'interaction entre la machine et l'utilisateur est un moyen très apprécié et efficace de médiation et de mise en lumière des travaux de recherche en SHS.

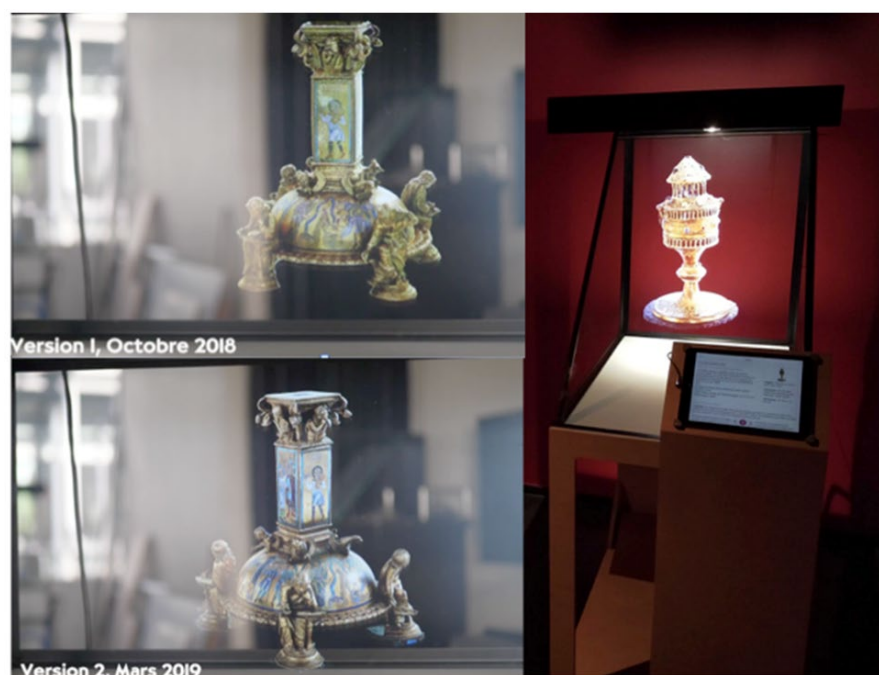
Du point de vue de la recherche fondamentale, l'objectif est que ces nouvelles fonctionnalités de la projection holographique

soient reproductibles à l'échelle d'un e.corpus, transposables pour d'autres types d'objets que des pièces d'orfèvrerie.

Du point de vue de la médiation, l'objectif est de proposer, par le dispositif d'hologrammes transportable, une découverte d'un patrimoine non seulement dans les musées mais aussi hors musée (« musée hors les murs »). L'objectif est, à terme, de rendre ainsi pérennes la sauvegarde et la (re)découverte

d'un patrimoine jusque-là seulement visible que dans les musées (fig. 9).

FIGURE 9



Dispositif holographique. Le musée hors les murs © e.thesaurus/Musée de l'hôtel Sandelin/Holusion

CONCLUSION

Ainsi, dans le temps restant du programme, nous visons essentiellement à la préparation de la base de données e.corpus et à la finalisation du dispositif des hologrammes. Il s'agit, d'une part de développer le corpus 3D via la numérisation d'autres objets possédant des propriétés complexes afin de finaliser la méthodologie d'acquisition, mais également d'approfondir l'étude matérielle des œuvres (analyse des matériaux et des techniques d'assemblage) ; de l'autre de développer les fonctionnalités de requêtes sur l'hologramme. À cette fin, un cahier de spécifications techniques doit être établi et priorisés en tâches

de développements. Les premières tâches critiques concernent l'affichage d'information sémantique associée à une partie du modèle lorsque celui-ci est sélectionné sur la tablette et la possibilité d'un déplacement libre du modèle holographique via la tablette. Le travail de développement réalisé à l'aide d'une liste de spécifications fonctionnelles assurera la pérennité du développement et d'adaptabilité à de nouveaux besoins identifiés par les partenaires en cours de projet.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient particulièrement le directeur et le personnel du musée de l'hôtel Sandelin à Saint-Omer, la Direction de la Culture de la Communauté d'Agglomération du Pays de Saint-Omer, le programme CPER MAuVE, la MESHS des Hauts-de-France (Lille), l'Université de Lille, L'IRHiS, la Structure fédérative de Recherche des Hauts-de-France, l'Equipex IddIVE (Plaine Images, Tourcoing), les collègues du projet e.thesaurus, la société Holusion et son directeur Thibault Guillaumont, par ailleurs, membre d'e.thesaurus.

NOTES

¹ Marc Gil et Christine Aubry, (IRHiS-UMR 8529 [Univ. Lille, CNRS]), Pierre Hallot (Univ. de Liège-DIVA) Frédéric Tixier (Univ. de Lorraine-CRULH), Christine Descatoire (musée de Cluny, Paris), Romain Saffré (musée de l'hôtel Sandelin, Saint-Omer), Laetitia Barragué-Zouita, Sophie Dutheil de Lamothe et Florence Raymond (Palais des Beaux-Arts, Lille), Philippe George et Julien Maquet (Trésor de la Cathédrale de Liège), Thibault Guillaumont (société Holusion).

² Le trésor de la cathédrale d'Essen (All.) a entrepris, dès 2005, un programme d'archivage par modélisation 3D de l'ensemble de sa collection (250 objets), cf. H.-J. Przybilla, J. Peipe 2005 et 2007.

³ Financé par le Contrat de Plan État-Région (CPER) 2017-2020, à hauteur de 4 millions d'euros, le projet MAuVE (cf. <http://mauve.univ-lille.fr>) a pour objectif de créer des outils numériques destinés à faciliter l'accès à la connaissance, dans tous les domaines liés au visuel (y compris en histoire, en archéologie, dans les arts anciens et contemporains, la psychologie, l'histoire de l'art, la mesure du regard, la réflexion sur l'image, etc.).

⁴ Contrat de plan État-Région (CPER), 2017-2021, ISI-MESHS « Interdisciplinarité-Structuration-Internationalisation », première vague d'appels à projets (2018-2019) mis en place par la Maison des Sciences de l'Homme et de la Société des Hauts-de-France (Lille), cf. <https://www.meshs.fr/page/isi-meshs>.

⁵ Saint-Omer, musée de l'hôtel Sandelin, Inv. 2800bis, cf. Saint-Omer 1992, notice 1 ; Paris-Saint-Omer 2013, cat. 47.

⁶ Saint-Omer, musée de l'hôtel Sandelin, Inv. D. 30 (dépôt de la confrérie Notre-Dame-des-Miracles), cf. Saint-Omer 1992, notice 2 ; Paris-Saint-Omer 2013, cat. 89.

⁷ Saint-Omer, musée de l'hôtel Sandelin, Inv. D 41, cf. Saint-Omer 1992, notice 3 ; Paris-Saint-Omer 2013, cat. 90-91.

⁸ Lille, Palais des Beaux-Arts, Inv. A 97, cf. Lavallée 1997, p. 86-88, fig. 4-5 ; Paris-Saint-Omer 2013, cat. 112.

⁹ Lille, Palais des Beaux-Arts, Inv. A 82, cf. Namur 2010, cat. 14 ; Paris-Saint-Omer 2013, cat. 26.

¹⁰ *6th International Workshop LowCost 3D - Sensors, Algorithms, Applications*, 2-3 décembre 2019. « LowCost 3D is a series of international workshops on low-cost three-dimensional sensor systems and tools. Ranging from low-cost acquisition devices like handheld scanning systems over inexpensive photogrammetric algorithms to processing software and applications. Started by Prof. Frank Neitzel from Technical University Berlin and Prof. Ralf Reulke from Humboldt-University in Berlin, the workshops were organized and hosted alternating between these two universities. Since 2011 four workshops took place in Berlin while in 2017 the 5th workshop was hosted by the HafenCity University Hamburg. In 2019 the 6th edition of the workshop will be held at INSA Strasbourg, France ». Communications par la *International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Spatial*, vol. XLII-2, cf. <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-2-W17/>

¹¹ P. Hallot et M. Gil 2019.

¹² *Museohub4 : Maquettes et Restitutions* (Palais des Beaux-Arts de Lille, 20 avril 2016) : https://museohub.hypotheses.org/files/2016/04/0419-20_Programme_MuseoHub4_Clic.pdf ; M. Gil, P. Hallot, C. Aubry (dir.), *Workshop : Patrimoine, modélisation numérique et systèmes d'acquisition d'informations : les enjeux actuels de la recherche. Retours d'expériences* (Université de Lille, 8 mars 2018) : <https://irhis.hypotheses.org/16375>. Voir, par ailleurs, le programme *E-Cathédrale* (2010-2025), dirigé par El Mustapha Mouaddib (Univ. de Picardie-Jules-Verne), qui vise la conservation, l'amélioration de l'accessibilité et la production de nouvelles connaissances sur le patrimoine monumental, par le numérique : <https://mis.u-picardie.fr/e-cathedrale/> ; cf. E. Mouaddib, G. Caron, D. Groux-Leclercq et F. Morbidi 2019. *Transept* (2016-2018) est un des projets du programme *E-Cathédrale*. Porté par Etienne Hamon, professeur d'histoire de l'architecture médiévale (ULille-IRHiS), il a pour objectif d'analyser et comprendre la déviation des axes horizontaux de la façade sud de la Cathédrale d'Amiens. Les résultats sont en cours de publication : <https://mis.u-picardie.fr/e-cathedrale/projets/transept/>.

¹³ T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle et I. Harley 2006 (2013).

¹⁴ ; Par exemple, le projet de recherche sur la sculpture du Val de Loire initié par Marion Boudon-Machuel (Université de Tours, CESR), <https://sculpture3d.univ-tours.fr> ; également, J. Rollier et A. Vilain (éd.) 2016.

¹⁵ F. Remondino et S. El-Hakim 2006.

¹⁶ Przybilla et Peipe 2007, p. 2.

¹⁷ Equipex IrDIVE (Innovation-research in Digital and Interactive Visual Environments / Recherche et

Innovation dans les Environnements Visuels Numériques et Interactifs), plaine-Image (Tourcoing), cf. <https://scv.hypotheses.org/irdive>

¹⁸ Modélisation à partir d'un scanner 3D des mosaïques carolingiennes de l'oratoire de Germigny-des-Prés (Loiret), par une équipe de géomaticiens et de professionnels du patrimoine F. Poux, R. Neuville, P. Hallot, L. Van Wersch, A. Luczfalvy Jancsó et R. Billen 2017.

¹⁹ Sur cette problématique des systèmes de modélisation 3D « low cost », nous renvoyons entre autres au workshop de Strasbourg, dont les actes ont été publiés en ligne dans les archives de l' *International Society of Photogrammetry and Remote Sensing.Spatial*, cf. supra note 10.

²⁰ Sous condition d'une formation de base d'un membre de l'équipe muséale, avec un budget minimum pour l'acquisition du matériel photographique de qualité.

²¹ Un premier essai de modélisation 3D (phase 0) avait été réalisé à partir de simples photographies prises à travers à la vitrine en mars 2018, sans paramétrage. Cette première campagne a donné lieu à un premier modèle 3D, utilisé pour un premier modèle d'holographique, destiné à l'exposition *Patrimoine & numérique*, en janvier 2019, à l'université de Lille, *Le Numérique : vers un patrimoine plus identifié et mieux partagé. Hologrammes, photogrammétrie, animations 360° et 3D hémisphériques, vitrines augmentées, applications mobiles...* (16 janv.-14 fév., espace Culture, Campus Cité scientifique).

²² Hallot et Gil 2019, p. 131-133.

²³ *Idem*, p. 132, fig. 9.

²⁴ Une première expérimentation, sur deux objets tests, va être menée en décembre 2019, en collaboration avec Jérôme Hosdez, ingénieur de recherche et la plateforme d'imagerie par rayons X ISIS4D de l'université de Lille, cf. <https://isis4d.univ-lille.fr>

²⁵ <https://holusion.com/fr/posts/2019-02-15-holomouseio>

²⁶ <https://www.youtube.com/watch?v=nUSCXB-x7eM>

²⁷ Voir le travail de médiation autour de trilobes par la société Holusion en partenariat avec L'UMR Evolution, Ecologie et Paléontologie (Evo-Eco-Paléo) de l'université de Lille. C'est une piste de recherche dans notre processus de réflexion sur un dispositif holographique interactif :

<https://holusion.com/fr/posts/2019-12-01-RECON>

BIBLIOGRAPHIE

P. Hallot et M. Gil 2019, « Methodology for 3D Acquisition of Highly Reflecting Goldsmithing Artefacts », in *International Society of Photogrammetry and Remote Sensing.Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W17, p. 129-134, <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-2-W17/129/2019>

M.-H. Lavallée 1997, « Les collections du musée des Beaux-Arts de Lille », *Revue du Louvre et des musées de France*, 3, p. 85-92

T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle et I. Harley 2006 (2013), *Close Range Photogrammetry. Principles, Techniques and Applications*, Whittles Publishing, Dunbeath. (2nd édition, mise à jour, *Close Range Photogrammetry and 3D Imaging*, Degruyter, 2013).

E. Mouaddib, G. Caron, D. Groux-Lecllet et F. Morbidi 2019, « Le patrimoine « in silico ». Exemple de la cathédrale d'Amiens », *In Situ. Revue des Patrimoines* [En ligne], 39 | 2019, *Imagerie numérique et patrimoine culturel : enjeux scientifiques et opérationnels* <http://journals.openedition.org/insitu/21576>.

F. Poux, R. Neuville, P. Hallot, L. Van Wersch, A. Luczfalvy Jancsó et R. Billen, « Digital Investigations of an Archaeological Smart Point Cloud : A Real Time Web-based Platform to Manage the Visualisation of Semantical Queries », *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-5/W1, p. 581-588 : <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-5-W1/581/2017/>

H.-J. Przybilla, J. Peipe 2005 : « Modeling the Golden Madonna », dans *Proceedings CIPA 2005 XX Int. Symposium*, Turin, p. 934-936.

H.-J. Przybilla, J. Peipe 2007 : 3D Modeling of Heritage Objects by Fringe Projection and Laser Scanning Systems », *XXI International CIPA Symposium*, 01-06 octobre 2007, Athènes, <https://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/5-C53/papers/FP122.pdf>

F. Remondino, S. El-Hakim 2006, « Image-based 3D modeling : A Review », *Photogrammetric Record*, vol. 21 -115, p. 269-291.

J. Rollier et A. Vilain (éd.) 2016, *Portails romans et gothiques menacés par les intempéries : le relevé laser au service du patrimoine* (actes du colloque, Paris, Institut national d'histoire de l'art, 25-26 novembre 2014), Paris, Ausonius éditions, Bordeaux (Collection Archéovision).

6th International Workshop LowCost 3D - Sensors, Algorithms, Applications, 2-3 décembre 2019. Communications publiées dans les archives de l'*International Society of Photogrammetry and Remote Sensing.Spatial*, vol. XLII-2, cf. <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-2-W17/>

CAT. D'EXPOSITION

Saint-Omer 1992 : G. Blazy (dir.) *Trésors des églises de l'arrondissement de Saint-Omer*, (Saint-Omer, musée de l'hôtel Sandelin, sept.-déc. 1992), Saint-Omer.

Paris-Saint-Omer 2013 : C. Descatoire et M. Gil (dir.), *Une renaissance, l'art entre Flandre et Champagne 1150-1250*, cat. d'expo. (Paris, Musée de Cluny-Saint-

Omer, musée de l'hôtel Sandelin, avril-juin 2013), Paris, RMN.

Namur 2010, *Dialogue avec l'invisible. L'art aux sources de l'Europe. Œuvres d'exception issues de la Communauté française de Belgique (VIII^e-XVII^e siècle)* (Namur, musée provincial des Arts anciens du Namurois, oct.2010-janv. 2011), Namur.