

LE JUMEAU NUMÉRIQUE DANS LE PATRIMOINE : FANTASME OU RÉALITÉ ?

Livre blanc

Mars 2025

Mise en page : Morgane Estavoyer - CMN

Crédits photos : si non précisés, Patrick Bergeot, Morgane Estavoyer ou Viviana Gobbato – CMN

Illustrations : © Marion Martin-Laprade

Livre blanc : retour d'expérience sur les numérisations 3D du Centre des monuments nationaux

Patrick Bergeot | patrick.bergeot@monuments-nationaux.fr
Directeur du programme « CMN Numérique » (PIA4)

Morgane Estavoyer | morgane.estavoyer@monuments-nationaux.fr
Cheffe de projet du programme « CMN Numérique » (PIA4)

TABLE DES MATIÈRES

I. Préambule	8
○ Contexte	8
○ Problématiques initiales	9
II. Remerciements et références	11
○ Remerciements	11
○ Projets pilotes	14
III. Le cadre	16
○ Le Centre des monuments nationaux	16
○ Le programme « CMN Numérique »	18
○ Enjeux pour l'écosystème	19
IV. Les catégories d'usages	22
○ Diffuser le patrimoine au plus grand nombre	22
○ Contribuer à la conservation des sites patrimoniaux	23
○ Accompagner les activités de recherche scientifique	24
V. Le processus général de numérisation	26
VI. Technologies d'acquisition	30
○ La lasergrammétrie	30
○ La photogrammétrie	31
○ Le géoréférencement	33

○ La lumière structurée	33
○ Et en pratique ?	34
○ Les modèles selon les usages	35
○ Nouvelles technologies de modélisation	35

VII. Recommandations pour numériser

39

○ Planning	39
○ Méthodologie projet	40
○ Considérations budgétaires	42
○ Expression de besoins	44
○ Acquisition	50
○ Reconstruction	50
○ Exploitation	52
○ Cession de droits	55

VIII. Pour conclure

55

○ Points clés d'un projet de numérisation	55
○ Réutiliser ?	56

IX. Le jumeau numérique : fantôme ou réalité ?

60

X. Bibliographie

62

ANNEXES

I. Projets menés par le Centre des monuments nationaux 65

○ Mont-Saint-Michel	66
○ Site archéologique de Glanum	70
○ Château d'Azay-le-Rideau	74
○ Château d'If	82
○ Abbaye de Montmajour	86
○ Tour Saint-Nicolas de La Rochelle	90
○ Grotte de Font-de-Gaume	94
○ Château de Champs-sur-Marne	108
○ Hôtel de la Marine	112
○ Arc de triomphe	116
○ Villa Savoye	124
○ Hôtel de Sully	128
○ Site de Cap Moderne	132
○ Empreinte environnementale de services immersifs	136

II. Quelques cas d'usages observés ou testés 143

III. *Guide méthodologique pour la rédaction d'un cahier des charges* 147

○ Contexte de l'opération	148
○ Périmètre de l'acquisition	148
○ Conditions d'exécution	154
○ Méthodologie	156
○ Préconisations	157
○ Livrables	167
○ Contrôle et validation des prestations	172
○ Conservation des prestations	173

○ Délais	177
○ Contenu de la proposition	177

IV. Glossaire 181

○ Termes techniques utilisés	182
○ Formats	190

V. Processus de numérisation d'un monument 193

CONTEXTE

En 2020 et 2021, le Centre des monuments nationaux a mené une expérimentation à grande échelle de visites guidées à distance de ses monuments. Cette offre, désormais pérennisée, permet aux participants – principalement des scolaires et des publics éloignés ou empêchés – de découvrir à distance et en direct un site patrimonial avec l'accompagnement d'un médiateur culturel qui soit se filme dans le monument, soit partage un support 360° (appelé communément « visite virtuelle ») spécialement conçu à cet effet. Tout au long de la visite, le public peut poser des questions et interagir avec le guide.



Visites guidées à distance

<https://www.monuments-nationaux.fr/enseignants-et-chercheurs/visites-guidees-a-distance-scolaires>

Pour aller plus loin, le Centre des monuments nationaux a candidaté avec succès à l'appel à projets « Numérisation du patrimoine et de l'architecture » du Programme d'Investissements d'Avenir (PIA4) opéré par le groupe Caisse des Dépôts et Consignations dans le cadre de France 2030.

Réunis sous la bannière du programme « CMN Numérique », plusieurs projets explorent depuis octobre 2022 les problématiques de valorisation de certaines représentations numériques des monuments – les visites virtuelles, les vidéos 360° et les modèles 3D – de la conception à la diffusion avec un accent tout particulier sur la réutilisation et la souveraineté. Les aspects sociaux et environnementaux n'ont pas été oubliés et ont donné lieu à des études spécifiques.

En accord avec les attendus de l'appel à projets, ce document partage les enseignements de deux ans de travail autour des modèles 3D et indique comment ils nous ont permis de répondre aux questions qui ont motivé le lancement du programme.

Pour une bonne compréhension, il s'efforce de rappeler de façon simplifiée quelques concepts techniques indispensables mais il ne peut pas se substituer à une formation ou à la littérature scientifique. Il ne prétend pas non plus à

l'exhaustivité et ne reflète que les expérimentations réalisées par l'équipe du programme « CMN Numérique » autour des modèles 3D de 2022 à 2024. Ce livre blanc ne développe pas les autres représentations numériques objets du programme, à savoir les vidéos 360° et visites virtuelles.

Enfin, comme usages et technologies ne cessent de progresser, il doit être compris comme l'état courant de nos réflexions au moment de sa rédaction, il se fera un plaisir d'évoluer en fonction de vos remarques, trouvailles ou désaccords : n'hésitez donc pas à nous écrire !

En annexes figurent :

- Le descriptif illustré des différents projets de numérisation 3D à la base de ce livre blanc
- Un tableau recensant quelques cas d'usages observés ou testés
- Le *Guide méthodologique pour la rédaction d'un cahier des charges* que nous avons élaboré pour standardiser nos pratiques
- Un glossaire reprenant les principaux termes techniques utilisés et les formats de données. Les mots de vocabulaire disponibles dans le glossaire sont soulignés en pointillés dans le livre blanc
- Un schéma récapitulatif du processus de numérisation d'un monument

PROBLÉMATIQUES INITIALES

Le programme « CMN Numérique » est né d'une question fondamentale : « **peut-on réutiliser un modèle 3D ?** ». Si c'est le cas et de surcroît, si ces modèles 3D sont monétisables, il devient intéressant pour une institution comme le Centre des monuments nationaux d'investir dans un plan de numérisations massif de ses sites afin de se constituer une bibliothèque de modèles 3D qui pourront être utilisés de différentes manières, à la façon d'un couteau suisse.

Pour certains acteurs de l'écosystème, c'est exactement la promesse du « jumeau numérique », ce « double numérique » du monument hyper détaillé et précis qui ensuite pourra être adapté ou simplifié au gré des besoins. Une deuxième question sous-jacente se posait donc : « **est-il possible de créer un jumeau numérique ?** ».

C'est pourquoi, le programme comportait avec la grotte de Font-de-Gaume un

cas d'usage spécifiquement axé sur la réutilisation. L'idée était de procéder en deux appels d'offre :

- Le premier visait à créer un modèle 3D scientifique très détaillé de la grotte à usage de conservation et de recherche, ce que certains qualifiaient de « jumeau numérique »
- Le deuxième devait, à partir de ce modèle 3D très détaillé, générer un modèle simplifié pour créer un support de visite à distance de la grotte

Enfin se posait une dernière question subsidiaire, celle de la pertinence du **BIM** (**Building Information Model**, en français « Modèle des données du bâtiment »), à savoir d'une maquette en 3D.

Deux ans et plus de douze projets de numérisations plus tard, certaines questions ont trouvé leurs réponses, d'autres non, d'autant plus que l'évolution rapide des technologies rend parfois incertaines les réponses d'hier. Ce qui était vrai il y a deux ans l'est peut-être moins aujourd'hui et il faut se garder de donner des réponses définitives.

Ce qui reste sûr, c'est que dans un monde à ressources financières contraintes, l'usage prévu pour un modèle 3D détermine encore largement la façon de numériser, et donc de créer le modèle.

Mais cette évolution rapide permet aussi de faire émerger de nouvelles pratiques et un type de modèle donné peut devenir maintenant utilisable pour un nouveau cas d'usage. Il est donc capital d'assurer la souveraineté de ses données et de privilégier des formats ouverts et pérennes, la meilleure garantie probablement contre l'obsolescence des logiciels. Il est aussi clé pour une institution culturelle de se mettre en mesure de suivre cette évolution, sous peine de perdre la maîtrise des coûts de numérisations devenues incontournables car désormais au cœur de tous ses métiers ou presque. La sensibilisation, la formation et la mise en pratique de ces techniques parfois encore nouvelles pour certaines institutions culturelles sont primordiales.

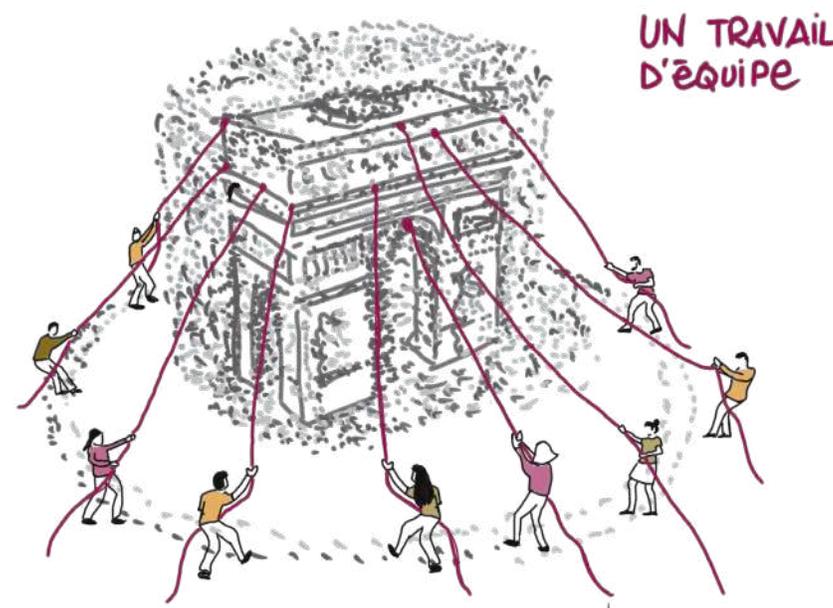
Enfin, il semble nécessaire pour avancer que tout l'écosystème culturel travaille de concert, les institutions publiques apportent la diversité de leurs cas d'usage, les sociétés privées importent les innovations par exemple du monde de l'industrie et les laboratoires de recherche défrichent de nouvelles façons de faire.

REMERCIEMENTS ET RÉFÉRENCES

REMERCIEMENTS

Ce document est le fruit de nombreux échanges en interne, avec plusieurs acteurs de l'écosystème culturel, partenaires, laboratoires de recherche, prestataires et collègues d'autres institutions.

Un grand merci à toutes celles et ceux qui ont pris le temps de nous expliquer patiemment des concepts parfois très abstraits, qui ont généreusement partagé leur expertise et n'ont pas hésité à nous donner leurs retours d'expérience.



Remerciements spéciaux

Nous remercions plus particulièrement les équipes du CNRS UPR/MAP, de Dassault Systemes, du LERIA INNTO-ESTHUA et du Centre national de Préhistoire pour leur précieux accompagnement sur nos projets ainsi que les relecteur·rices de ce livre blanc. Nous remercions aussi nos mécènes pour leur soutien.

Mécènes et partenaires :

- Capture Solutions : Jonathan Choinard, Romain Sommero, Maxime Roger, Édouard Vivier et Pierre-Adrien Dolowy
- Dassault Systemes et leurs partenaires : Mehdi Tayoubi, Nicolas Serikoff, Benoît Marini et Bertrand Chazaly
- Geo Drone 3D et son partenaire : Grégoire Desrousseaux et Robin Lesourd
- HelloCapture : Frédéric André, Yann Cribier, Valentin Pajot, Virginie Cribier, Inès Cherief et Carole Martin
- IMA Solutions : Benjamin Moreno, Anthony Camps et Émilie Cazin
- Lay3rs : Xavier Aubert et Sébastien Malcotti
- Mira : Thomas Tassin, Marie Bonsergent, Mazéguéla Meite et Quentin de Fougeroux
- ZenT : Jérôme David

Partenaires institutionnels :

- Caisse des dépôts et consignations : Gilles Duffau, Pierre Abba, Manon Ayala et Constance de Villèle
- Lycée Jean Jaurès d'Argenteuil : Jeanne Ollivier et ses classes
- Ministère de la Culture - Direction générale des patrimoines et de l'architecture (DGPAT) : Anne Dubile et Pascal Liévaux
- Ministère de la Culture - Service du numérique (SNUM) : Romain Delassus, Héloïse Biard, Monica Craignou et Corinne Strazzieri
- Paris Musées : Isabelle Knafou
- Pass Culture : Kim Reed, Philippine de Fleurieu et les ambassadrices d'Île-de-France

Prestataires :

- Art Graphique et Patrimoine
- BIMOTEP
- Capture4CAD

- CIRRA Packaging
- Drones Center
- La Ferme 3D
- Méandre Technologie
- Rémi Flament EURL

Équipes de recherche :

- CEA-List : Jérémie Le Garrec, Claude Andriot et Olivier Gomez
- Centre Inria de l'université de Bordeaux, projet Manao : Romain Pacanowski
- Centre national de Préhistoire (CNP) : Geneviève Pinçon, Oscar Fuentes, Priscilia Barbuti et Xavier Margarit
- Consortium 3DHN : Florent Laroche, Mehdi Chayani, Xavier Granier et les membres du bureau
- Institut de Recherche sur l'Architecture Antique (IRAA) : Nathalie André et Pierre Drap
- Institut de Recherche XLIM : Daniel Meneveau et Benjamin Bringier
- Unité de recherche « Modèles et simulations pour l'Architecture et le Patrimoine » (MAP/ CNRS) : Livio de Luca, Anthony Pamart, Adeline Manuel, Violette Abergel, Roxane Roussel et Laurent Bergerot
- Université d'Amiens : El Mustapha Mouaddib
- Université d'Angers : Olivier Hû
- Université catholique de l'Ouest : Caroline Creton
- Université Libre de Bruxelles : Aurélien Sinzobahamvya et Adrien Fita-Codina
- Université de Salamanque : Miguel Angel Maté Gonzalez

Autres participant·es à la revue de notre *Guide méthodologique pour la rédaction d'un cahier des charges* le 25 juillet 2024 :

- Centre Pompidou : Antoine Immarigeon et Margaux Caron
- DRAC Hauts-de-France : Frédéric Nowicki
- Musée d'archéologie nationale : Thomas Sagory

- Paris Musées : Scarlett Greco

Autres projets :

- Citadelle de Besançon : Gaëlle Cavalli
- Institut national de recherches archéologiques préventives (INRAP) : Richard Cottiaux, Sylvie Eusèbe et Christophe Tardy
- Palais des Doges de Venise : Elena Marchetti, Chiara Squarcina, Monica Rosina, Arianna Abbate, Luca Donati et Daniele d'Anza
- Projet CEPiR (Cas d'Étude Pour un Immersif Responsable) : Landia Egal, Marie-Véronique Gauduchon et Amaury La Burthe
- Reconstitution Cosquer et 3D ROC (Roc aux Sorciers) : Laurent Delbos et Stéphane Kyles

PROJETS PILOTES

Le document s'appuie notamment sur les projets de numérisation suivants* :

- Mont-Saint-Michel : numérisation du Mont pour créer une expérience de réalité virtuelle réaliste en location based entertainment (LBE)
- Site archéologique de Glanum : numérisation et reconstitution du site pour créer une visite à distance en 3D temps réel
- Château d'Azay-le-Rideau : numérisation et reconstitution pour créer une expérience 3D temps réel collaborative multi-supports à distance, évaluation et documentation de la chaîne opératoire
- Château d'If : test d'une nouvelle technologie d'acquisition 3D en mobilité
- Abbaye de Montmajour : numérisation et comparaison de plusieurs techniques de reconstruction 3D
- Tour Saint-Nicolas de la Rochelle : réconciliation de plusieurs modèles 3D pour faciliter le suivi de chantier via une plateforme en ligne et aide au diagnostic

//////////

* Les projets détaillés sont disponibles à l'annexe [Projets menés par le Centre des monuments nationaux, page 65](#)

- Grotte de Font-de-Gaume : numérisation à des fins scientifiques et création d'un support 360° pour réaliser des visites guidées à distance. Test d'une visite virtuelle pour un accès hors ligne aux modèles 3D
- Château de Champs-sur-Marne : numérisation de décors et d'objets des collections, comparaison de différents matériels et test d'une visite virtuelle à usage professionnel : suivi de projet, maintenance, domanial
- Hôtel de la Marine : acquisition par plusieurs dispositifs puis comparaison et reconstruction par les techniques NeRF et 3D Gaussian Splatting
- Arc de triomphe : numérisation du monument et d'objets. Réalisation d'une mallette pédagogique avec impressions 3D
- Hôtel de Sully : numérisation pour faire une démonstration lors de l'exposition « Le patrimoine passé au scan ! » en septembre 2024
- Villa Savoye : numérisation et réalisation d'une visite virtuelle à usages professionnels : domanial et événementiel
- Site de Cap Moderne : numérisation à des fins de conservation et de médiation



**

//////////

** VGAD : visite guidée à distance. Le CMN propose cette offre de médiation pour les publics éloignés ou empêchés, comme les scolaires ou encore les EHPADs. Un médiateur culturel guide en direct les visiteurs dans le monument. Il peut soit se filmer en déambulant dans le site, soit partager une visite virtuelle (photos 360° ou vidéo 360°) conçue à cet effet. Les interactions entre public et médiateur sont encouragées.

LE CADRE

LE CENTRE DES MONUMENTS NATIONAUX

Le Centre des monuments nationaux (CMN) est un **établissement public administratif sous tutelle du ministère de la Culture**. Créé en 1914 sous le nom de « Caisse nationale des monuments historiques et préhistoriques », c'est le premier opérateur public culturel et touristique avec 11 millions de visiteurs.

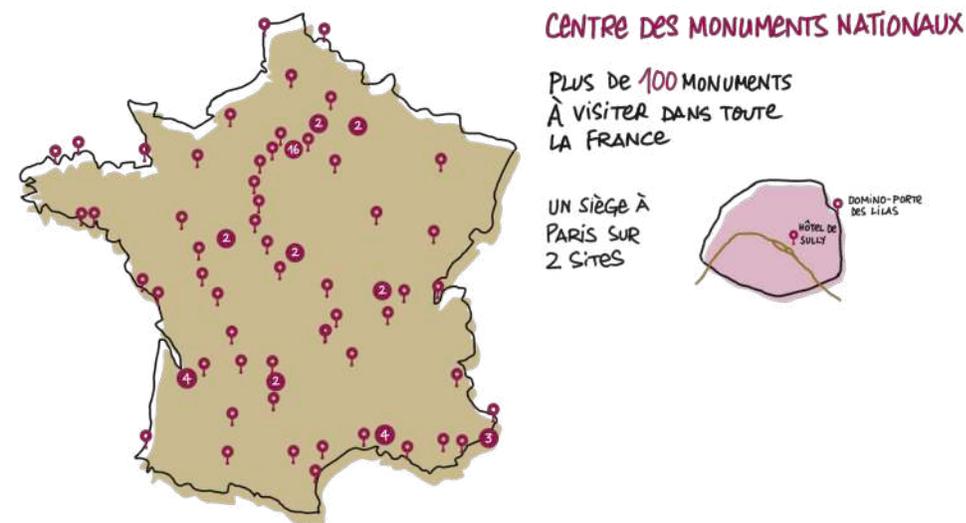
L'établissement a en charge un réseau de plus de 110 monuments et 83 parcs et jardins répartis dans tous l'Hexagone :

- De tailles, d'époques et de typologies différentes, parmi lesquelles : châteaux, abbayes, grottes, villas...
- Du paléolithique avec la grotte de Pair-non-Pair aux villas contemporaines du XX^e siècle en passant par le château d'Azay-le-Rideau, le château et remparts de la cité de Carcassonne, l'abbaye du Mont-Saint-Michel, le château de Villeneuve-Lembron, la Sainte-Chapelle ou encore le monastère de Saorge

Les missions de l'établissement sont :

- **Conserver, restaurer et entretenir** cent-dix monuments et les biens culturels placés sous sa responsabilité en y conduisant des opérations visant à prévenir leur dégradation et à garantir leur transmission aux générations futures
- Ouvrir à la visite et animer les monuments. Le CMN a pour vocation de **rendre ces monuments accessibles au plus grand nombre**, notamment aux publics éloignés de la culture ou en situation de handicap et de contribuer à la politique d'éducation artistique et culturelle par l'accueil de nombreux publics scolaires
- Favoriser, avec **près de 400 manifestations par an** (expositions, spectacles, animations, etc), la participation des monuments nationaux à la vie culturelle et au développement du tourisme. De nombreux liens existent avec les collectivités territoriales et les réseaux d'institutions culturelles
- **Assurer une mission d'éditeur public** sous la marque Éditions du patrimoine et contribuer ainsi fortement à la connaissance et à la promotion du patrimoine

Le Centre des monuments nationaux est organisé en un siège, qui héberge dans deux localisations parisiennes les différentes directions centrales, et 45 circonscriptions regroupant un ou plusieurs sites.



Hôtel de Sully, siège du Centre des monuments nationaux © Agence Galimey - CMN

LE PROGRAMME « CMN NUMÉRIQUE »

Commencé en octobre 2022, le programme « CMN Numérique » se terminera en octobre 2025. Il vise d'une part, à **rationaliser et optimiser la création et l'exploitation** de certaines représentations numériques des monuments – notamment les modèles 3D – et d'autre part à **tester de nouveaux champs de valorisation** de celles-ci auprès du grand public et des professionnels avec deux forts enjeux : la réutilisation et la souveraineté.

Les résultats sont revus par des pairs et partagés au fur et à mesure avec l'écosystème culturel, le monde de la recherche et auprès du grand public par la diffusion d'une newsletter bi-mensuelle LinkedIn et la présentation de l'exposition « Le patrimoine passé au scan ! » à l'Hôtel de Sully (septembre 2024).

Le programme s'articule autour de six volets :

- **Tester de nouvelles expériences pour toucher de nouveaux publics** : un modèle 3D permet-il de créer une nouvelle expérience susceptible de toucher de nouveaux publics ? Cet axe comprend le développement d'expériences immersives du château d'Azay-le-Rideau et du site archéologique de Glanum
- **Poursuivre le développement des visites guidées à distance** avec notamment :
 - L'homogénéisation du catalogue de supports de visite à distance en les convertissant au même format
 - La création d'une plateforme de streaming interactive capable de gérer plusieurs types de supports de visite virtuelle
 - La déclinaison des supports de visite sous d'autres formats
- **Adresser de nouveaux marchés**, notamment celui des décors virtuels : quels sont les moyens de monétiser les modèles 3D ?
- **Améliorer l'empreinte environnementale des expériences numériques**
- **Standardiser la production, le stockage et la visualisation des représentations numériques** des monuments en créant des guides méthodologiques pour la rédaction de cahiers des charges, en testant plusieurs technologies de numérisation, en identifiant une stratégie de stockage et en explorant les usages pour le patrimoine
- **Tester les possibilités de réutilisation des représentations numériques** : sous quelles conditions un modèle 3D produit pour un certain usage peut-il être

réutilisé dans un autre cadre ? Le cas d'étude retenu est la grotte de Font-de-Gaume

Comme indiqué, l'une des questions à l'origine du programme était de déterminer plus largement si le Centre des monuments nationaux avait intérêt à se constituer une bibliothèque de « jumeaux numériques » de ses monuments via un plan massif de numérisation.

Le consortium comprend deux partenaires privés : Mira et My Tour Live.

Plusieurs autres partenaires publics et privés participent activement aux projets, parmi lesquels le Centre national de Préhistoire, l'unité de recherche « Modèles et simulations pour l'Architecture et le Patrimoine » du CNRS Sciences Humaines et Sociales de Marseille, le laboratoire d'Étude et de Recherche en Informatique de l'Université d'Angers, le lycée Jean Jaurès d'Argenteuil, ZenT, IMA Solutions, HelloCapture, Geo Drone 3D, Capture Solutions, Dassault Systèmes et Lay3rs.

Enfin, le Centre des monuments nationaux fait également appel à des prestataires dont la contribution est essentielle à la réussite des projets.

Pour suivre l'actualité du programme « CMN Numérique »



Notre site internet

<https://www.monuments-nationaux.fr/innovation/programme-cmn-numerique-pia4>



Notre newsletter bi-mensuelle sur LinkedIn

<https://www.linkedin.com/build-relation/newsletter-follow?entityUrn=7076933948903174144>

ENJEUX POUR L'ÉCOSYSTÈME

Texte rédigé par Caroline Creton, maître de conférence en Sciences de l'Information et de la Communication à l'Université catholique de l'Ouest (UCO Nantes), CHUS, laboratoire PREFics

Depuis les années 1990 et le déploiement des technologies de l'information et de la communication, les institutions patrimoniales et les musées sont devenus des terrains d'expérimentation des nouvelles technologies. Parmi celles-ci,

la modélisation 3D occupe une place croissante, avec des attentes et des perspectives variées, celles de la conservation, de la recherche scientifique et de la médiation culturelle.

Tout d'abord, en capturant des monuments dans leurs moindres détails, les modélisations 3D permettent de préserver numériquement des biens menacés par les effets du temps, les catastrophes naturelles ou les guerres et conflits. Ces modélisations participent, de fait, à patrimonialiser pour les générations futures des monuments que les contemporains perçoivent comme essentiels.

Ensuite, les modélisations 3D, notamment lorsqu'il s'agit de reconstitutions à l'instar des intérieurs d'un château devenu vide, constituent un réel travail scientifique pour représenter au plus juste des lieux qui ont profondément changé d'usages. Néanmoins, les choix interprétatifs réalisés lors de la modélisation 3D influencent fortement la représentation finale et questionnent les historiens, les conservateurs du patrimoine pour savoir : quelle version du patrimoine privilégier ? Quels éléments intégrer ou omettre ? Ces décisions qui peuvent s'appuyer sur un travail scientifique rigoureux, peuvent toutefois courir le risque de transmettre une vision biaisée ou partielle, influençant la perception des publics.

Par ailleurs, les modélisations 3D peuvent enrichir l'expérience des publics lorsqu'elles sont utilisées à des fins de médiation, au travers de dispositifs variés : visites virtuelles, jeux, projections avec un trame narrative ou reconstitutions. Ces technologies, à l'instar d'autres générations de dispositifs numériques, sont souvent porteuses de promesses : renouveler les publics, attirer un public jeune et offrir des expériences qualifiées d'inédites ou d'immersives. Toutefois, il est essentiel de dépasser les discours promotionnels pour analyser en profondeur leur réelle plus-value. Les dispositifs technologiques, à eux seuls, ne sauraient résoudre des enjeux aussi complexes que celui de la démocratisation culturelle. Néanmoins, ils peuvent transformer notre rapport au patrimoine en stimulant les sens, en suscitant des émotions ou en enrichissant la compréhension cognitive des visiteurs.

Pour les institutions patrimoniales, plusieurs enjeux se dessinent. Tout d'abord, le développement de la modélisation 3D a fait naître tout un écosystème, plus ou moins spécialisé dans le secteur culturel, commercialisant des modélisations 3D. La maîtrise du suivi des projets, de l'élaboration du cahier des charges à la gestion des mises à jour, en passant par les questions de propriété intellectuelle

et de partage des fichiers source, constitue un réel enjeu. En outre, une collaboration entre expert-es du patrimoine, ingénieur-es, chercheur-euses en sciences humaines et services d'évaluation des publics s'impose. Cette approche concertée permettrait d'éviter les écueils d'autres générations de dispositifs coûteux, parfois peu adaptés aux attentes des publics. Chaque projet devrait s'accompagner d'une réflexion approfondie sur l'usage et les finalités des modélisations 3D.

En somme, les modélisations 3D représentent un des outils pour enrichir la relation au patrimoine, rendre accessible certains sites, à l'instar des grottes. Leur déploiement, lorsqu'il est réfléchi, peut contribuer à renouveler les pratiques de conservation, à nourrir la recherche et à offrir des expériences culturelles intéressantes pour les publics.

LES CATÉGORIES D'USAGES

Les usages des modèles 3D peuvent se ranger en trois catégories principales : la **diffusion**, la **conservation** et la **recherche**.

DIFFUSER LE PATRIMOINE AU PLUS GRAND NOMBRE

Les modèles 3D sont valorisés dans les dispositifs de médiation culturelle auprès des visiteurs. Disponibles sous différentes formes, ces représentations numériques facilitent la compréhension des sites patrimoniaux. Par exemple, les restitutions de décors historiques et de monuments aujourd'hui disparus sont fréquemment utilisées, comme au site archéologique de Glanum, au domaine national de Saint-Cloud ou encore à l'abbaye de Cluny. Des vidéos créées à partir de modèles 3D d'objets des collections ou de monuments enrichissent les expositions. Les visiteurs peuvent interagir avec des modèles 3D par le biais de bornes tactiles installées dans les parcours de visite ou en manipulant des reproductions physiques obtenues par impression 3D.



Avatar se déplaçant dans une bulle autour du château d'Azay-le-Rideau. Expérience 3D temps réel réalisée sur la base d'un modèle 3D © Mira - CMN

CONTRIBUER À LA CONSERVATION DES SITES PATRIMONIAUX

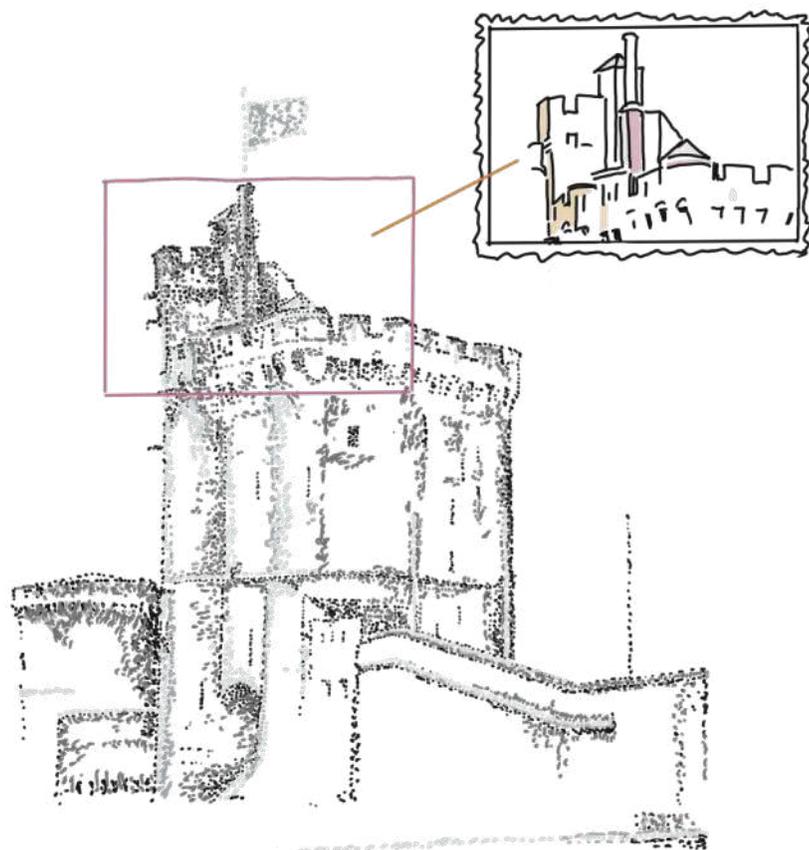
Les modèles 3D sont des outils efficaces pour aider à la préservation des sites patrimoniaux. Ils permettent de visualiser le monument en trois dimensions, de générer des données précises telles que des mesures, des coupes, des élévations ou des plans détaillés et d'offrir une documentation qui sert d'archive pour les années à venir. Combinée à des photographies, cette représentation numérique, qui capture le monument à un instant précis, peut permettre aux équipes de suivre l'évolution de son état et d'anticiper les dégradations potentielles, surtout ses déformations. Enfin, les opérations de numérisation ont tout intérêt à se concentrer sur le plan de sauvegarde, qui liste les éléments de décor et les objets remarquables à sauver en priorité en cas de sinistre, et à cibler ceux qui seraient les plus difficiles à déplacer. La représentation numérique aidera ainsi en cas de dommage à les restaurer, voire à les reconstituer.



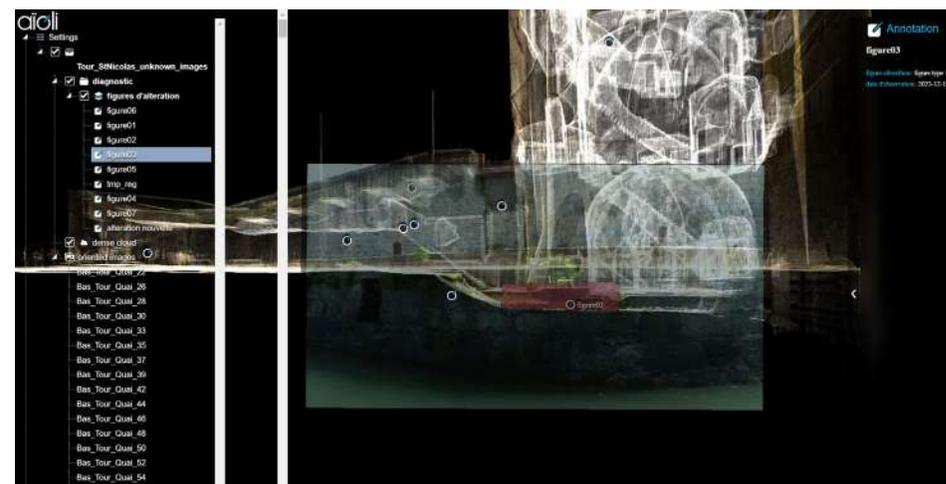
Ortho-image de la façade ouest du château de Champs-sur-Marne © HelloCapture - CMN

ACCOMPAGNER LES ACTIVITÉS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE

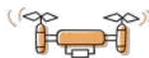
Les modèles 3D ouvrent de nouvelles perspectives aux professionnels dans l'étude des sites patrimoniaux. Par exemple, dans le cadre du chantier scientifique de Notre-Dame de Paris, les chercheurs travaillent de manière collaborative en rattachant leurs références et leurs données au modèle 3D, indépendamment de leur domaine d'expertise, qu'il s'agisse d'architecture, d'histoire ou de physique. Dans certains cas, il convient de faire vivre cette représentation numérique dans le temps pour comparer le monument à plusieurs états différents – avant et après restauration par exemple – et identifier des signaux d'alerte potentiels. Enfin, dans le cas de sites d'accès difficile, comme les grottes ornées où les chercheurs disposent de peu de temps à l'intérieur des cavités, ils peuvent travailler de manière extensive en laboratoire sur la représentation numérique.



LOGICIEL AÏOLI



Visualisation du nuage de points de la tour Saint-Nicolas de La Rochelle sur le logiciel Aïoli, développé par le CNRS pour le chantier scientifique de Notre-Dame de Paris. Les photographies prises sur plusieurs années sont replacées au fur et à mesure sur le modèle 3D, permettant ainsi aux équipes de se repérer plus facilement © BIMOTEP (modèle 3D) et CNRS (logiciel) - CMN



Un modèle 3D peut se définir comme une représentation numérique en trois dimensions d'un objet. Comme l'illustre le schéma de l'annexe [Processus de numérisation d'un monument, page 193](#), cette représentation est plus ou moins conforme à la réalité et peut correspondre à différentes étapes du processus général de numérisation :

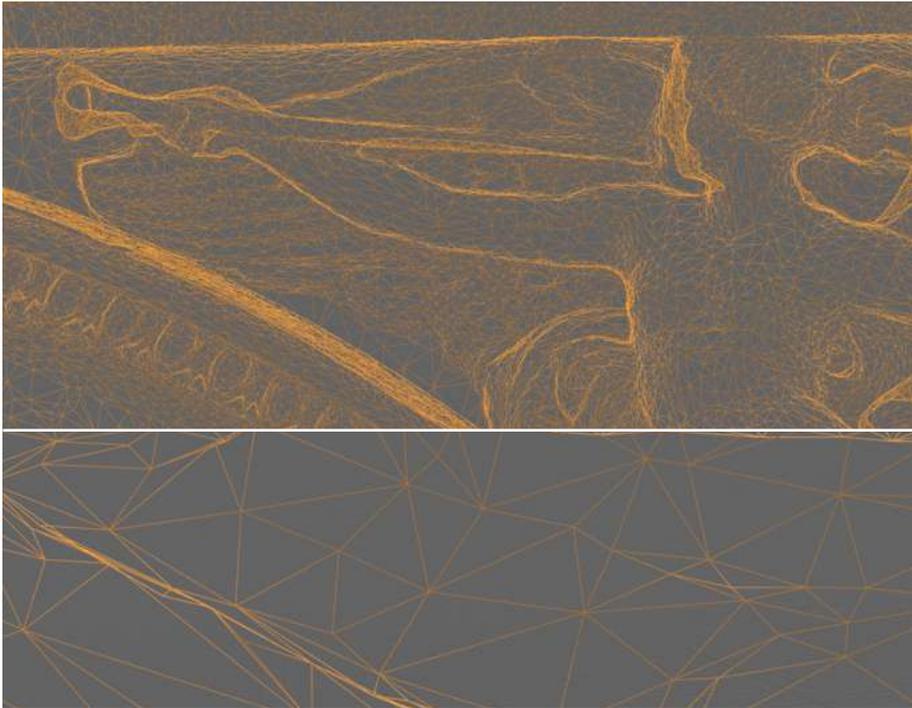
1. Dans sa forme la plus simple, le **nuage de points**, le modèle 3D est constitué de l'ensemble des points de laser capturés par le scanner ou des points obtenus par traitement photogrammétrique. C'est la source la plus fiable de données
2. On peut ensuite relier des points pour former des triangles ou des polygones (quadrilatères, hexagones...) afin de créer un **maillage** qui modélise ainsi les surfaces de l'objet et reproduit plus explicitement son volume. À noter que tous les points ne sont pas forcément utilisés
3. Enfin, en s'aidant de photographies, on va appliquer de la couleur et des matières sur ce maillage, de manière à reproduire de façon réaliste l'aspect de l'objet : le modèle 3D devient un **modèle maillé texturé**. Ce type de maillage texturé peut introduire des approximations des surfaces
4. La technique du **3D temps réel**, très utilisée pour les jeux vidéos, représente et anime un environnement en trois dimensions en calculant chaque image en temps réel en fonction de la position et de la direction du regard de l'utilisateur. Ainsi, l'ensemble de l'environnement virtuel est calculé et reproduit au fur et à mesure des déplacements de l'utilisateur. La puissance des ordinateurs étant limitée, il est capital d'optimiser ce type de représentation et d'établir les meilleurs compromis entre rendu visuel et poids informatique
 - Des modèles maillés texturés peuvent servir à des expériences 3D temps réel et être directement intégrés s'ils ne sont pas trop complexes
 - Dans le cas contraire, il convient de simplifier ces modèles texturés
 - Certains objets comme des arbres, des fleurs, un miroir ou une étendue d'eau sont difficiles à reconstruire en 3D. Dans ce cas là, il faudra les reconstituer par infographie ou aller les chercher via des banques d'objets 3D (en anglais : *assets*). Il est aussi possible de reconstituer

par infographie des bâtiments ou scènes complètes. Dans ce cas, on parlera alors plutôt de « **reconstitution 3D** » ou « **restitution 3D** »

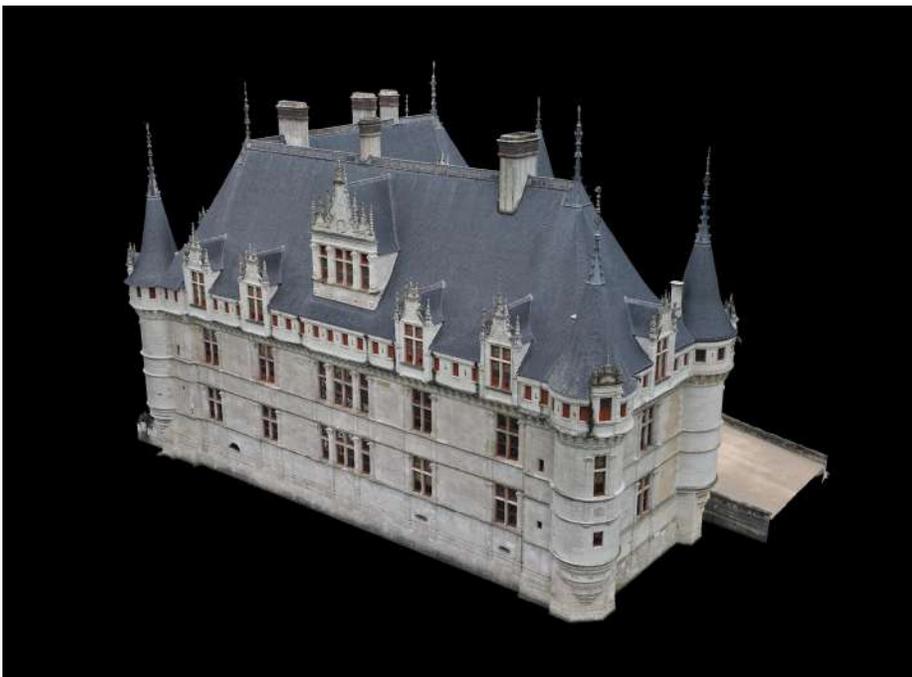
5. Le monde de l'industrie utilise de plus en plus le **BIM** (*Building Information Model*, en français « Modèle des données du bâtiment » ou *Building Information Modelling*, en français « Modélisation des données du bâtiment »), à savoir une maquette en 3D plus ou moins simplifiée selon un **LOD** (*Level of detail*, en français « Niveau de détail ») et enrichie d'informations structurées concernant ses composants. Ce type de modèle, partagé avec toutes les parties prenantes, facilite les processus de conception, de construction et d'exploitation d'un bâtiment. La maquette permet ainsi facilement de visualiser le réseau d'eau du bâtiment ou d'isoler toutes les occurrences d'un élément particulier (exemple : les portes). Après la construction, elle est enrichie par exemple de tous les rapports d'intervention sur le bâtiment



1. Nuage de points du monastère de Saorge (projet en cours) © Geo Drone 3D - CMN



2. Détail du modèle triangulé de l'Arc de triomphe © Art Graphique et Patrimoine - CMN



3. Modèle maillé texturé du château d'Azay-le-Rideau © IMA Solutions - CMN



4. Reconstitution 3D du château d'Azay-le-Rideau © Mira - CMN



5. Modélisation BIM du château de Champs-sur-Marne © HelloCapture - CMN

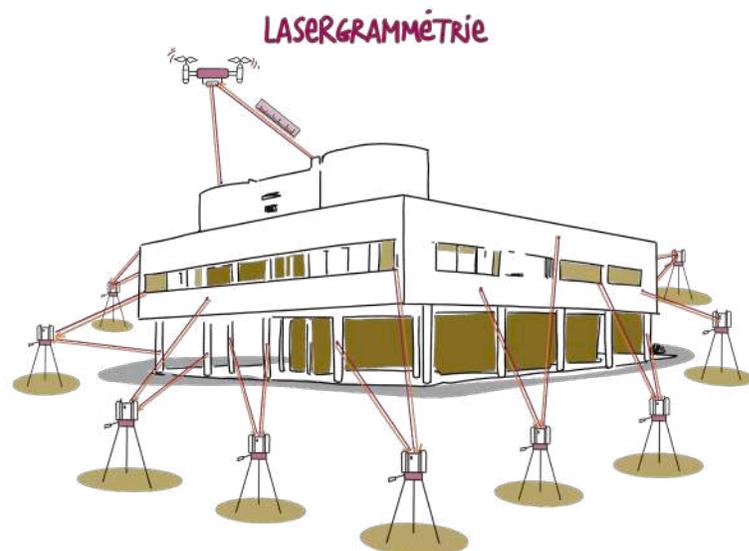
TECHNOLOGIES D'ACQUISITION

Deux technologies sont principalement utilisées pour numériser un monument en trois dimensions : la lasergrammétrie et la photogrammétrie. Quant aux objets, la pratique au Centre des monuments nationaux sera plus généralement d'utiliser la lumière structurée.

LA LASERGRAMMÉTRIE

De manière schématique, la **lasergrammétrie** consiste à balayer le monument avec un scanner. L'analyse de l'impact des impulsions laser émises sur le monument permet d'en déterminer notamment les dimensions et de produire un nuage de points en trois dimensions. C'est la technique de choix pour établir les dimensions et la géométrie d'un site.

Le scanner est habituellement placé sur un trépied que l'on déplace de station en station pour couvrir toute la surface à numériser mais il est aussi possible de l'embarquer sur un drone, un avion, un sac à dos, un casque ou encore un chien-robot. L'intérêt de ces scanners mobiles, dits à localisation et numérisation simultanées (SLAM, en anglais : *Simultaneous Localisation And Mapping*) est qu'ils permettent d'aller beaucoup plus vite. Par exemple, nous avons pu scanner en trois heures les extérieurs proches et l'intérieur du château de Champs-sur-Marne, ce qui au trépied nécessiterait au moins trois jours.



Centre des monuments nationaux



Acquisition par lasergrammétrie : acrotère de l'Arc de triomphe, grotte de Font-de-Gaume et Hôtel de Sully © CMN (1 et 3) et Agence Galimey - CMN (2)

LA PHOTOGRAMMÉTRIE

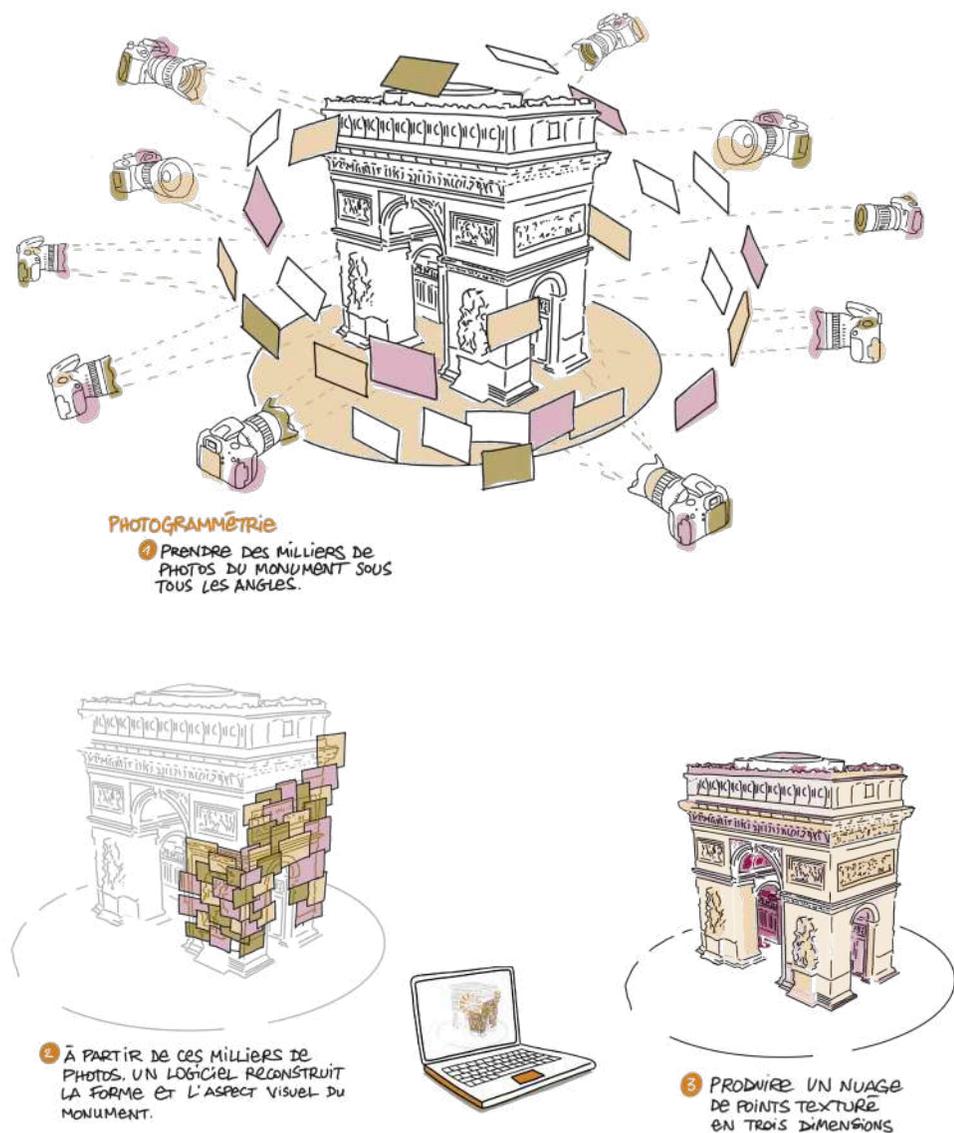
La **photogrammétrie**, quant à elle, consiste à prendre des milliers de photographies du monument sous tous les angles. À partir de ces photographies, un logiciel spécifique reconstruit la forme et l'aspect visuel du bâtiment et produit un modèle en trois dimensions. Elle permet de restituer au mieux les textures, à savoir l'aspect visuel : par exemple le grain de la pierre, la patine du métal, la décoloration des peintures, le gravier...

Les photographies peuvent être prises avec un appareil photo numérique, ce qui nécessite souvent un investissement moindre qu'un scanner, ou avec un drone

Le jumeau numérique dans le patrimoine : fantôme ou réalité ?

qui permet d'accéder aux parties non visibles depuis le sol et d'aller beaucoup plus vite qu'en déplaçant un trépied.

Toutefois, sauf si le site peut être entièrement acquis par drone avec la précision et la qualité nécessaires, l'acquisition photogrammétrique sera en pratique beaucoup plus longue et coûteuse. Il faut aussi noter que la photogrammétrie demande une mise à l'échelle qui peut être complexe. Il est donc toujours intéressant de questionner son intérêt au regard des usages envisagés.



LE GÉORÉFÉRENCEMENT

Reposant sur le positionnement par satellite, le **géoréférencement** permet de rattacher le modèle 3D à un système de coordonnées géographiques reconnu. Il localise ainsi le modèle sur une carte.

Il garantit un alignement correct du modèle et évite de le construire avec des ondulations ou des déformations. Pour un site étendu, ces dernières peuvent atteindre quelques mètres par rapport à la réalité. Il permet de comparer, comme nous l'avons fait pour les tours de La Rochelle, des numérisations successives et donc, d'évaluer l'évolution dans le temps du monument. Enfin, dans le cadre d'une numérisation partielle, le modèle aura plus de chance de pouvoir être complété ultérieurement.



Mesure d'une position de géoréférencement avec une antenne GNSS (géolocalisation et navigation par un système de satellites), monastère de Saorge et site de Cap Moderne © CMN

LA LUMIÈRE STRUCTURÉE

Une autre technique, très précise et utilisée surtout pour les objets, est la **lumière structurée** : le scanner envoie sur l'objet un motif lumineux bien défini de lumière blanche ou bleue puis capture ses déformations au contact de l'objet. L'analyse de ces déformations permet de reconstruire l'objet en 3D.



LES MODÈLES SELON LES USAGES

Le terme « modèle 3D » est générique et embarque plusieurs typologies telles que le nuage de points, le modèle maillé non texturé, le modèle maillé texturé ou encore le rendu 3D.

Le type de modèle 3D nécessaire dépend de l'usage souhaité. Il n'est pas toujours possible d'extraire une partie d'un modèle complet et parfois, simplifier un modèle est aussi coûteux que d'en produire un nouveau !

Pour des plans, des coupes, des élévations ou des ortho-images, le plus important est généralement de restituer avec exactitudes les dimensions, à savoir la géométrie du site. Un nuage de points produit par lasergrammétrie est donc suffisant. Selon la configuration du site, sachant que les scanners aéroportés (drone, avion ou ULM) ne sont pas très utilisés pour les sites patrimoniaux, il arrive que le nuage de points soit issu des photographies prises par un drone.

Pour des maquettes ou objets imprimés en 3D, il est important de restituer les surfaces. Et si l'exactitude des couleurs n'est pas primordiale, il faut un modèle maillé hermétique, c'est-à-dire sans trous.

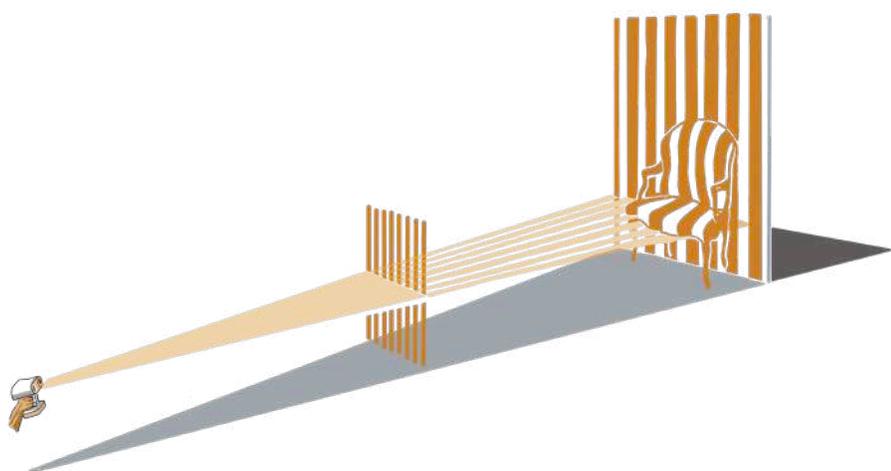
Pour tous les cas où les couleurs, ou plus généralement les textures, doivent être restituées avec fidélité, un modèle maillé texturé est indispensable. C'est le cas par exemple **pour une expérience immersive, des tablettes de réalité augmentée, une borne tactile ou encore un jeu vidéo**. Une acquisition par photogrammétrie ou lumière structurée sera alors nécessaire. En effet, aujourd'hui, la lasergrammétrie ne permet pas de restituer des textures avec la même qualité que la photogrammétrie.

Enfin **pour restituer des éléments dynamiques** comme l'eau, le feuillage ou des oiseaux, il faudra pour un usage de médiation de préférence utiliser des éléments reconstitués par infographie ou tirés de bibliothèques d'objets 3D.

NOUVELLES TECHNOLOGIES DE MODÉLISATION

Par exception, trois de nos projets avaient pour principale finalité de tester une technologie d'acquisition sans exploitation particulière.

Depuis quelques années sont apparues de nouvelles technologies qui révolutionnent la chaîne de reconstruction 3D et donc l'acquisition, car elles



Numérisation d'un objet des collections (Hôtel de Sully) par lumière structurée et schéma explicatif de la lumière structurée © CMN

ET EN PRATIQUE ?

Ces technologies sont souvent combinées. La lasergrammétrie permet d'aligner correctement les photos et d'éviter que le modèle résultant n'ondule. Souvent, lors de projets de numérisation dans nos monuments, les prestataires réalisent un nuage de points sur lequel ils « plaquent » une photogrammétrie qui, elle, couvre plus ou moins le site patrimonial. C'est le cas par exemple au château d'Azay-le-Rideau, à l'Arc de triomphe ou encore sur le site archéologique de Glanum. Pour un objet, des photographies pourront être « plaquées » sur le modèle créé à partir de lumière structurée afin de lui fournir une belle texture.

sont capables de reconstruire de façon hyper-réaliste un monument avec beaucoup moins de données d'entrée. Par exemple, là où une photogrammétrie traditionnelle exige des milliers de photographies, elles pourront se satisfaire de quelques centaines.

Les deux principales sont les champs de rayonnement neuronaux, appelés **NeRF pour Neural Radiance Fields** en anglais, apparus en 2020 et les **3D Gaussian Splatting (3DGS)** annoncées en août 2023. Nous les avons testées et comparées dans des monuments aux caractéristiques très différentes, d'abord l'abbaye de Montmajour située près d'Arles, puis à l'Hôtel de la Marine, place de la Concorde à Paris qui, avec son éclairage nocturne et ses nombreuses surfaces réfléchissantes (dorures, vaisselle en métal, miroirs...), présentait des défis techniques intéressants.

Les deux bénéfices principaux de ces nouvelles technologies innovantes en très rapide progression résident en la réduction spectaculaire du temps d'acquisition, un facteur très limitant dans les monuments qui ne peuvent pas être fermés au public en journée ou d'accès difficile pour des raisons de conservation, ainsi que la possibilité d'isoler des éléments, ce qui évite de les numériser séparément et promet de pouvoir démeubler virtuellement un lieu. D'autres technologies similaires, qui parfois les combinent, apparaissent régulièrement, comme TRIPS, SMERF ou Plenoxels.

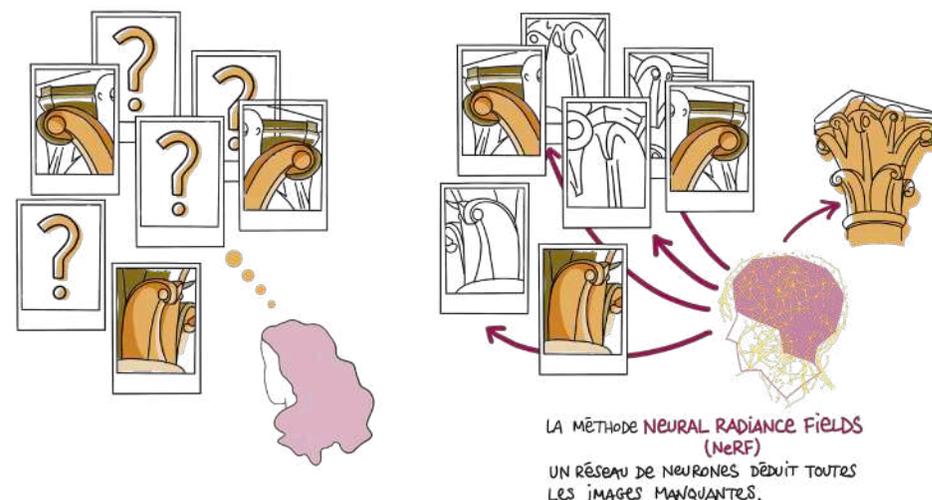
Parmi les limitations, au moment de nos tests – ce qui peut être moins vrai aujourd'hui, ces technologies évoluant très rapidement :

- Le matériel nécessaire est plus lourd et plus coûteux
- La précision est moins bonne qu'une reconstruction issue d'une lasergrammétrie ou photogrammétrie
- Retravailler la géométrie ou l'aspect est plus compliqué

Neural Radiance Fields (NeRF)

La méthode **Neural Radiance Fields (NeRF)** utilise un réseau de neurones qui, à partir de quelques images judicieusement choisies, reconstruit le faisceau des rayons lumineux à travers la scène. À partir de ces rayons et du cheminement de la lumière, le réseau de neurones apprend le reste de la scène et déduit toutes les images manquantes pour générer une reconstitution complète en

trois dimensions. Une fois que le réseau de neurones a appris la scène, il est à même de la restituer en fonction de la position de l'utilisateur dans l'espace. La représentation de la scène est très riche et permet d'isoler un élément de la scène, par exemple un chapiteau du cloître de l'abbaye. Des algorithmes permettent d'extraire la géométrie de la scène à partir des informations contenues dans le réseau de neurones ; cependant, les ressources informatiques demandées sont considérables.



[Vidéo] NeRF réalisé à l'Hôtel de la Marine (janvier 2024)

<https://youtu.be/ZL1LoTRf6xo> © Lay3rs et CEA-List - CMN

3D Gaussian Splatting (3DGS)

Dans le cas des **3D Gaussian Splatting (3DGS)**, une approximation statistique au moyen de distributions gaussiennes permet, à partir d'une photographie, de reconstituer la répartition de ses couleurs dans l'espace. En recommençant, en affinant et en combinant plusieurs photographies, il deviendra ainsi possible de reconstruire toute une scène 3D avec une remarquable fidélité. Le procédé est encore plus rapide et beaucoup moins gourmand en ressources informatiques que la technologie NeRF mais il convient aujourd'hui surtout à des usages de médiation culturelle et scientifique.

RECOMMANDATIONS POUR NUMÉRISER

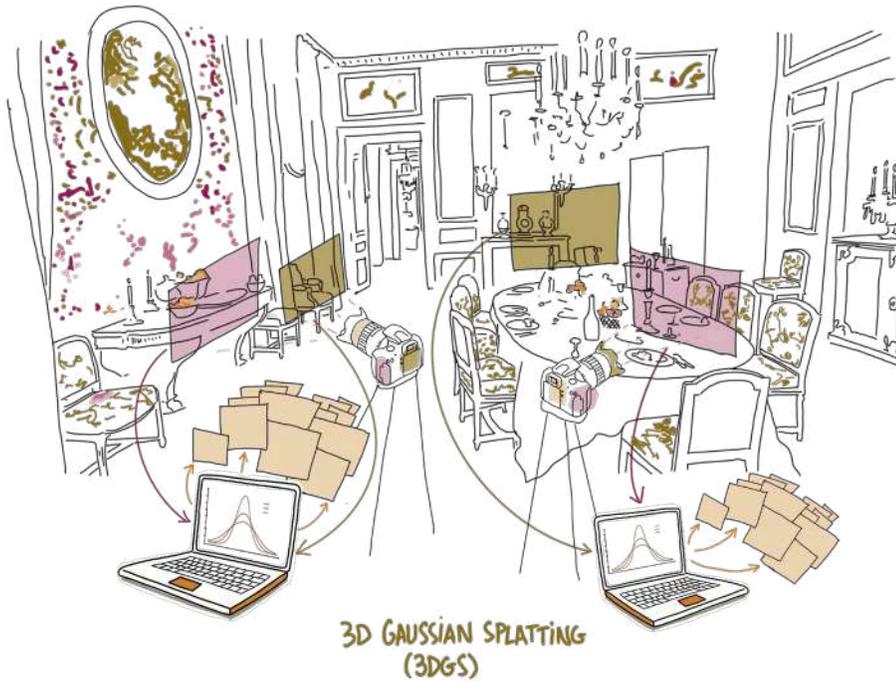
PLANNING

Un projet de numérisation ne se limite pas à la phase d'acquisition mais se décompose en plusieurs étapes (voir planning ci-dessous). Les principales sont l'expression des besoins, l'acquisition, la reconstruction 3D et l'exploitation.

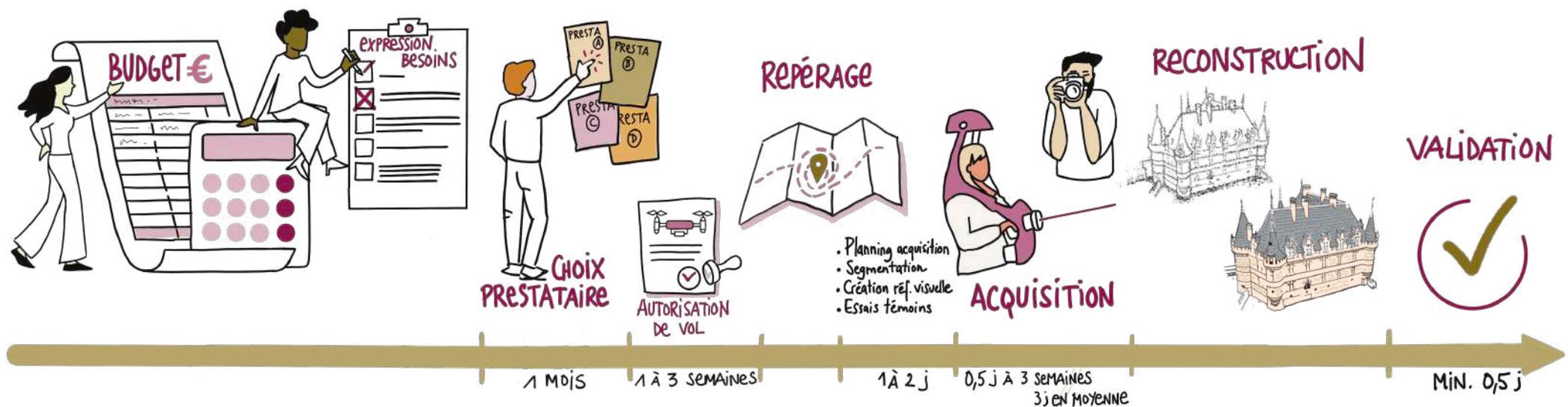
Comme indiqué précédemment, les usages souhaités détermineront les caractéristiques principales des modèles 3D, l'expression de besoins est donc capitale.

Préparer avec le prestataire un **planning détaillé**, si besoin heure par heure, des différentes opérations est recommandé, surtout si le site présente des impératifs de sécurité, de conservation et des contraintes de co-activité, notamment avec le public. Cela permet de prévoir par exemple les autorisations supplémentaires, les besoins en balisage, en agents supplémentaires en cas d'acquisition hors des horaires d'ouverture...

Dans le cas où l'acquisition dépend des conditions météorologiques, typiquement si elle se fait par drone, il est recommandé de prévoir d'emblée plusieurs créneaux, voire un plan B au cas où ce type d'acquisition s'avère finalement impossible.



[Vidéo] 3DGS réalisé à l'Hôtel de la Marine (janvier 2024)
<https://youtu.be/ocZaoaWGkao?feature=shared> © Lay3rs et CEA-List - CMN



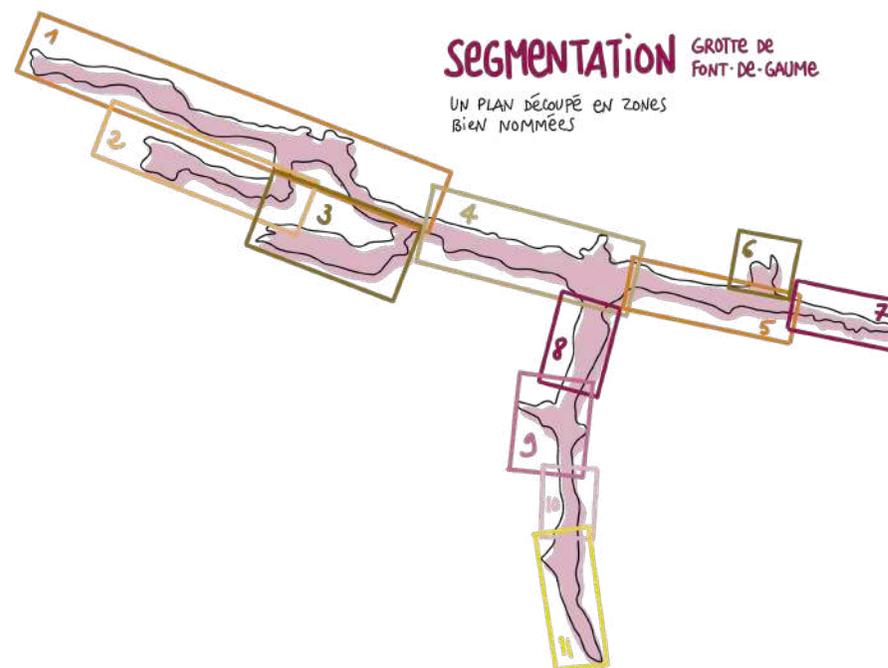
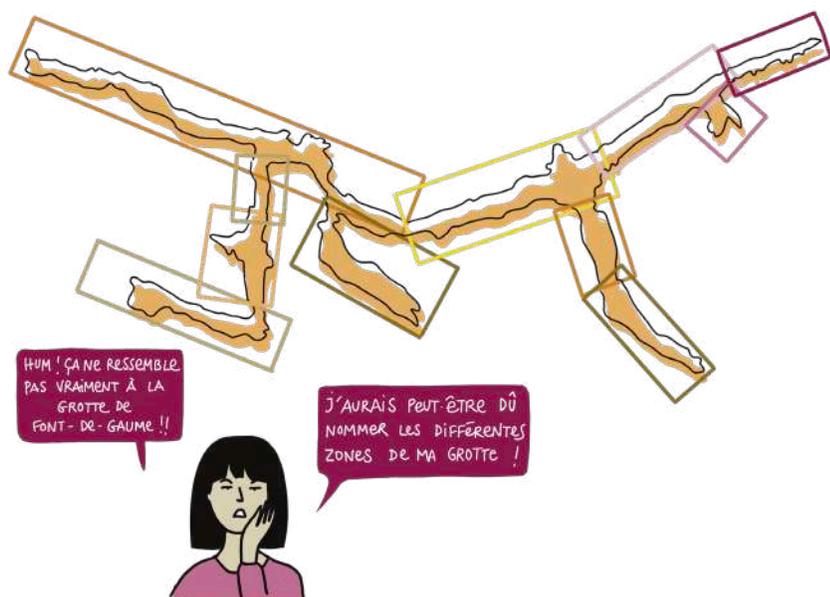
MÉTHODOLOGIE PROJET

L'enveloppe budgétaire disponible permettra de définir quels compromis sont envisageables pour **maximiser la réutilisabilité du modèle**. En principe, avec beaucoup de rigueur dans la production, chaque étape peut être réalisée par un prestataire différent : un premier prestataire peut réaliser l'acquisition, le second la reconstruction 3D et un troisième l'exploitation.

Toutefois, comme évoqué précédemment, il convient vraiment de partir des usages souhaités, ce qui déterminera les caractéristiques principales des modèles 3D. Par exemple, un prestataire ne pourra jamais réaliser des coupes avec une certaine précision à partir d'un nuage de points existant si ce nuage de points n'a pas été généré au minimum avec ladite précision.

Pour suivre l'avancement du projet, vérifier la complétude des livrables et valider leur conformité, il est recommandé d'**avoir une référence visuelle numérique initiale** : soit une visite virtuelle constituée de panoramas 360° soit une acquisition maîtresse faite rapidement avec un scanner mobile. Cette base de travail commune sera de préférence annotable pour permettre les échanges.

Pour stocker et archiver, il est capital de partager avec le futur prestataire un plan du site avec un découpage (« segmentation ») en zones. Le nommage de ces zones permettra d'**organiser les livrables** et de plus tard les retrouver facilement.



Il faut prévoir le matériel et les outils pour **suivre, visualiser et contrôler les livrables**. Il est préférable d'utiliser les mêmes logiciels que le prestataire, sous peine de ne pas voir par exemple les mêmes couleurs que lui. Dans l'exemple suivant, trois logiciels de rendus 3D ont été appliqués exactement aux mêmes données et conduisent à trois résultats visuellement différents. Certes, il peut être compliqué pour une institution culturelle d'investir dans du matériel spécialisé comme des écrans calibrés et certains éléments qualitatifs ne peuvent pas être objectivés.



Rendus (porche d'entrée de la grotte de Font-de-Gaume) différents selon le logiciel utilisé © Capture4CAD - CMN

Il est difficile par exemple de définir *a priori* le degré de simplification nécessaire : spécifier un nombre de polygones et/ou un pourcentage

d'échantillonnage ne suffit pas toujours. Le modèle résultant peut s'avérer bien trop lourd ou au contraire trop simplifié pour le besoin.

De même, décrire la qualité d'une texture est extrêmement complexe, il faut souvent en passer par un jugement visuel subjectif. Aussi est-il bon de **prévoir une mise au point itérative** pour arriver à la qualité attendue et de prévoir des réunions en présentiel pour s'affranchir des problèmes de réseau, de matériel informatique divergent et faciliter les échanges.

Enfin, en plus du repérage du site, **des essais témoins** peuvent être à prévoir :

- Pour valider une méthodologie d'acquisition
- Pour établir les références colorimétriques

Cela permettra aussi de finaliser le planning.

CONSIDÉRATIONS BUDGÉTAIRES

Acquisition 3D

Le coût dépend principalement des facteurs suivants :

- Topologie du lieu, principalement sa superficie et ses contraintes d'accès
- Technologie mise en œuvre qui dépend des livrables souhaités et du lieu
- Précision attendue, surtout si de la photogrammétrie est nécessaire

Par exemple :

- À superficie égale, produire un nuage de points coûtera moitié moins qu'un modèle texturé
- Un site entièrement numérisable par drone pourra être acquis par photogrammétrie en quelques heures, sous réserve d'une météo favorable, alors qu'il faudra plusieurs jours depuis le sol
- Avec un scanner de type SLAM, nous avons pu numériser les intérieurs et l'extérieur proche du château de Champs-sur-Marne en trois heures alors qu'il aurait fallu au moins trois jours avec un scanner monté sur trépied

Le plus rapide est donc de numériser avec un dispositif mobile, drone ou scanner SLAM. Pour avoir une idée des durées nécessaires, un drone peut couvrir un

château en deux heures. Un scanner SLAM progresse en général à la vitesse d'un piéton.

Avec un scanner fixe, il faut déplacer le trépied tous les 2 à 3 mètres et attendre à chaque fois entre 2 et 5 minutes, selon le type de matériel.

Le plus lent consiste à faire de la photogrammétrie depuis le sol. Alors que le scanner tourne sur lui-même tout seul, c'est en effet au photographe de déplacer son appareil pour prendre chaque portion du site sous tous les angles. Il lui faudra prendre d'autant plus de photos qu'une grande précision est demandée. En lasergrammétrie, on choisira simplement un matériel plus ou moins performant selon les besoins exprimés et les contraintes du lieu.

Si la même surface doit être couverte en lasergrammétrie et en photogrammétrie et que le drone n'est pas possible, cela coûtera ainsi au moins deux fois, voire trois fois plus cher que si une simple lasergrammétrie suffit. Avec un scanner mobile, un tarif de 1 à 2 € par m² est envisageable. Pour un château meublé, le différentiel sera encore plus grand, vu la multiplicité des détails à acquérir.

L'avènement de technologies comme le RTK rend le géoréférencement de moins en moins coûteux. Il y a deux ans (mi-2023), géoréférencer ajoutait environ 15 % au budget.

Reconstruction 3D

Certains logiciels sont capables de générer en 24 heures un nuage de points à partir des données brutes d'acquisition. Mais si la demande est un modèle maillé texturé, un délai de trois semaines est plus plausible, voire davantage en fonction du nombre d'allers-retours et de tests.

Les coûts augmenteront en fonction des traitements à effectuer sur le modèle 3D : décimation, bouchage de trous, élimination d'artefacts, homogénéisation des couleurs...

Sur nos projets, l'acquisition représente environ 50 % du budget et la reconstruction 40 %. Le reste correspond à la préparation administrative ou à la documentation.

Exploitation

Le coût d'adaptation d'un modèle 3D varie énormément selon ce qui est souhaité :

- Pour extraire des coupes, ortho-images et élévations, le coût est négligeable
- Pour une impression 3D, il pourra être négligeable si le modèle a été conçu dans ce but ou prohibitif si le modèle 3D est trop détaillé et/ou « troué ». Dans ce cas, le coût de simplification et de bouchage pourra être bien plus élevé que les simples coûts d'impression
- Pour produire une expérience immersive en réalité virtuelle, le coût de création du modèle 3D (acquisition et reconstruction 3D) représente 10 % environ du budget total
- Pour créer une maquette BIM, le coût de création du modèle représentera moins de 30 % du budget total

Quelques fourchettes de prix pour la création d'un modèle 3D (acquisition et reconstruction) :

- Le nuage de points de l'extérieur d'une église peut coûter entre 1 000 et 3 000 €
- Les extérieurs d'un château et de son parc en lasergrammétrie et photogrammétrie peuvent coûter entre 20 000 et 50 000 €, selon la quantité de captations à faire au sol
- Les extérieurs d'une abbaye faisables au drone coûtent environ 20 000 €
- Pour la grotte de Font-de-Gaume, les propositions variaient entre 36 000 et 107 000 €, avec une médiane à 66 000 €
- Pour les extérieurs du Mont-Saint-Michel, les propositions variaient entre 25 000 et 96 000 €

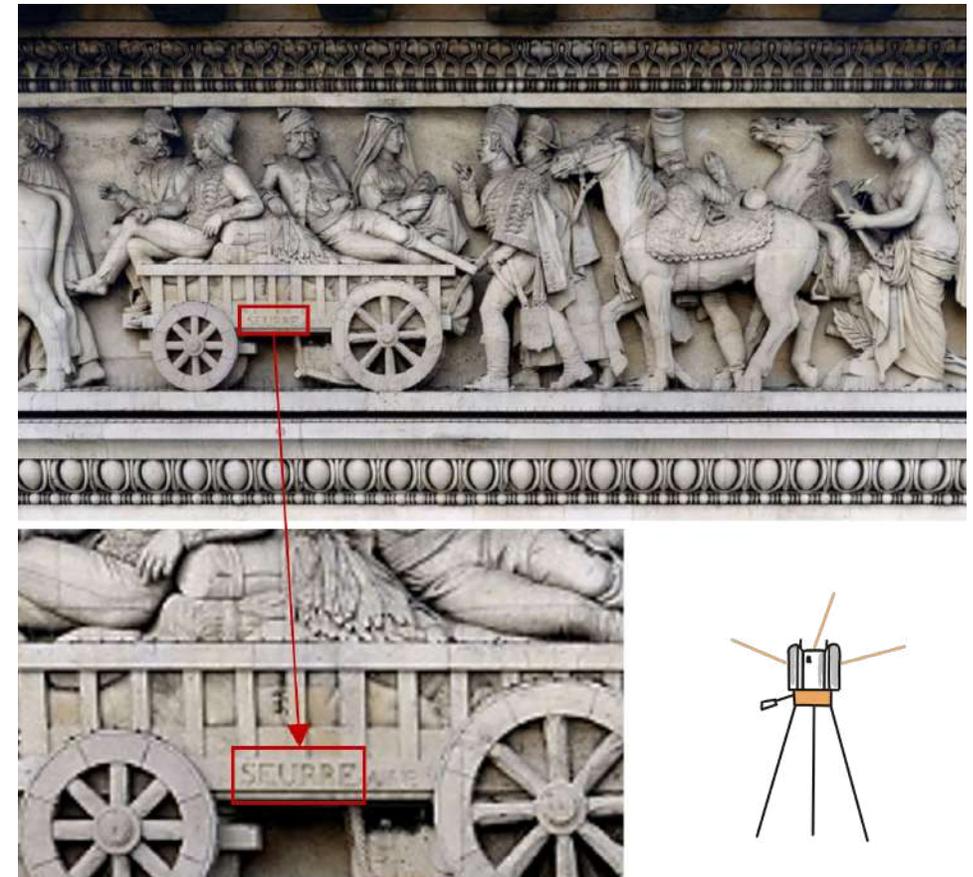
EXPRESSION DE BESOINS

Le Guide méthodologique pour la rédaction d'un cahier des charges, page 147, mis au point par le Centre des monuments nationaux et la présentation qui l'accompagne détaillent les questions à se poser lors de la consultation :

- Le ou les usages souhaités
- L'enveloppe budgétaire en fonction des réutilisations potentielles
- Les spécificités et contraintes du site à numériser : superficie, fermeture possible ou non au public, contraintes administratives, contraintes de

conservation, surfaces brillantes ou réfléchissantes, présence d'eau... Globalement, à matériel égal, c'est la compréhension fine de ces spécificités et les réponses apportées qui distingueront les prestataires

- Il est préférable de distinguer les zones ; rien ne sert par exemple de demander le même niveau de détail pour le parc et le bâtiment principal d'un château
- La précision souhaitée : comme mentionné plus haut, il est préférable de la définir en fonction du détail le plus fin à restituer. S'il mesure 1 centimètre, il faudra demander une précision de 0,5 centimètre. En cas de doute, préciser le rendu souhaité, par exemple : « faire une impression 3D en taille réelle » ou « à titre d'exemple, les lettres « SEURRE » sur la figure 3b devront être visibles sur le modèle 3D »



Exemple illustrant la marche à suivre pour indiquer la précision souhaitée dans les CCTP © CMN (cahier des charges) et Patrick Müller - CMN (photographie)

Il faudra demander notamment :

- Le **géoréférencement**, toujours préférable
- La qualité des **textures** : une résolution de 4K représente un bon compromis. En effet, les résolutions supérieures comme 8K ou 16K sont plus susceptibles de faire planter le matériel informatique. Il faut optimiser le **dépliage des UVs**, autrement dit, déplier les maillages pour bien positionner les textures et maximiser leur remplissage, ce qui peut exiger du prestataire un traitement manuel. À défaut d'objectiver la qualité des textures, il faut bien expliquer à quoi elles serviront et prévoir plusieurs itérations. Les textures devront être accompagnées des **cartes des normales, de diffusion et de profondeur**
- La **colorimétrie** : s'y intéresser est inutile si la finalité est de dresser des plans ou réaliser des impressions 3D. Par contre, si le modèle doit servir à de la conservation préventive ou à des constats d'état, il faut exiger un étalonnage et des livraisons au format raw, de façon à pouvoir apporter des corrections. À noter que les scanners sont bien plus imprécis que les **APN** (appareils photos numériques) pour retranscrire fidèlement les couleurs
- Les livrables doivent inclure **toutes les données brutes d'acquisition aux formats natifs** ainsi que toutes les informations afin de comprendre comment les modèles 3D ont été construits, éventuellement de les reconstruire plus tard et se prévenir ainsi contre l'obsolescence des logiciels. L'organisation de ces données devra respecter la découpage et le nommage du site convenus au début du projet
- Les **métadonnées** et **paradonnées** sont indispensables

Les **métadonnées** sont les informations permettant de décrire les données. Elles sont idéalement enregistrées lors de l'acquisition des données par le matériel de numérisation, mais peuvent aussi être renseignées *a posteriori*. Par exemple, un appareil photo va enregistrer pour chaque photographie des données dites exif (*Exchangeable Image File Format* pour « Format de fichier d'image échangeable ») :

- Auteur
- Date et heure de la prise de vue
- Marque et modèle de l'appareil
- Réglages de l'appareil photographique : type d'objectif, vitesse d'obturation,

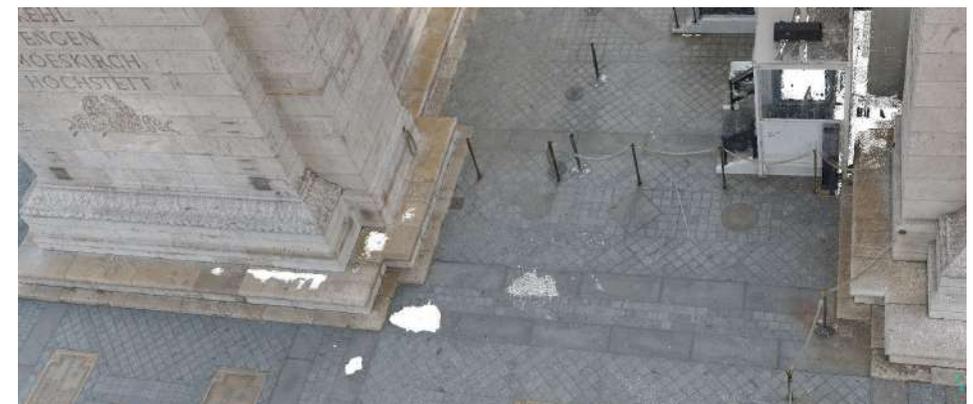
ouverture, focale, sensibilité

- Etc.



Exemple de métadonnées © Agence Galimey - CMN

Les **paradonnées** sont les données qui décrivent le processus de collecte des données. Par exemple, les paradonnées indiqueront pourquoi la photographie a été choisie comme mode opératoire, pourquoi ce type d'appareil a été préféré, combien d'essais ont été faits avant d'arriver à la bonne photo, etc. Sur le modèle 3D de l'Arc de triomphe, il y a des trous au niveau du parvis, qui s'expliquent par la présence de flaques d'eau lors de la numérisation. Il est important de recenser ce type d'informations pour mieux comprendre certains éléments qui pourraient être plus tard interprétés à tort comme des anomalies.

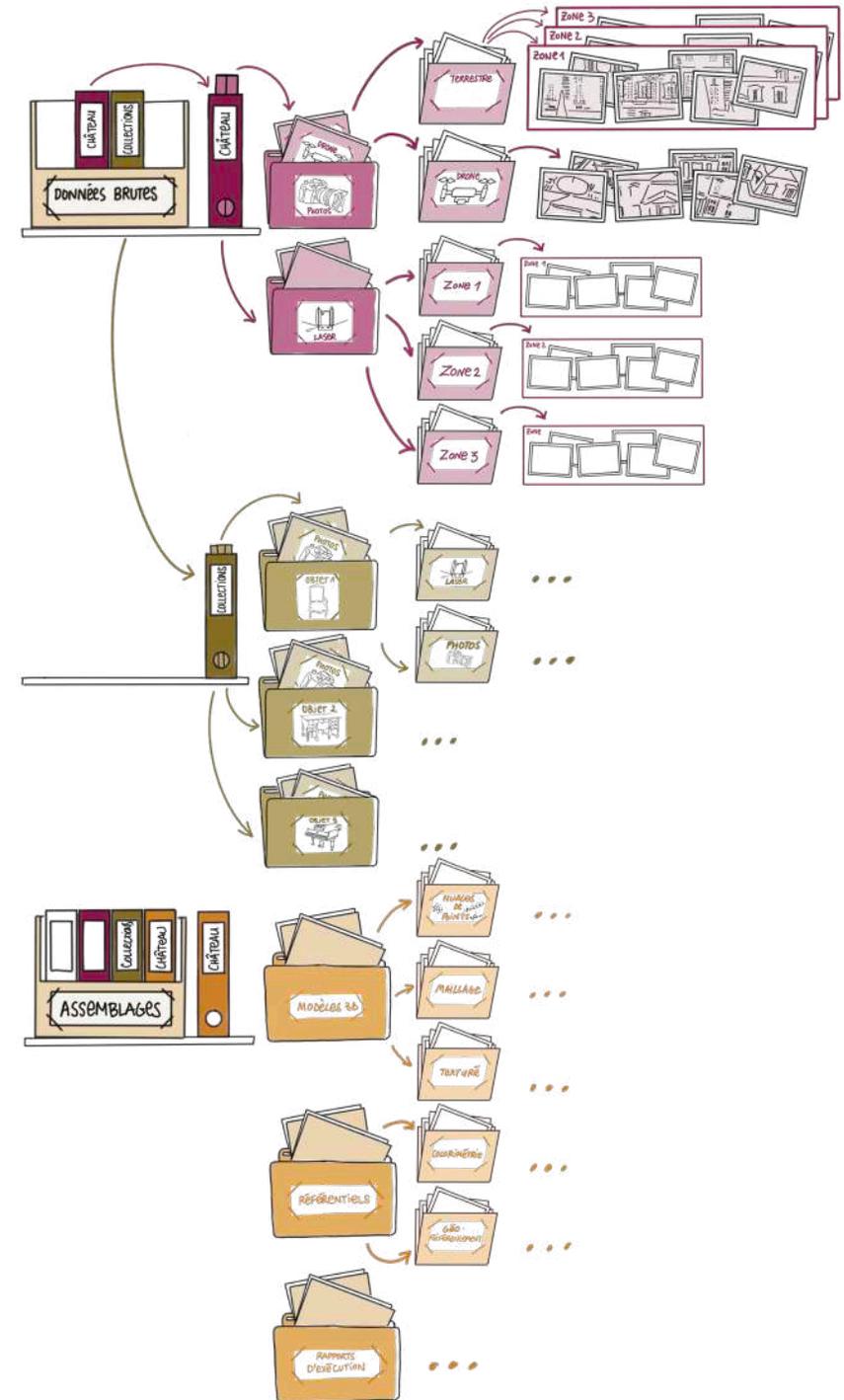
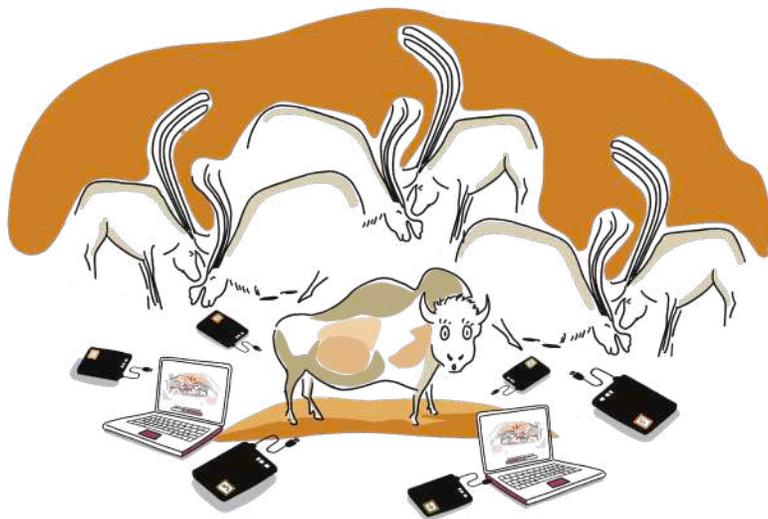


Nuage de points de l'Arc de triomphe et du parvis avec quelques trous résultant des flaques d'eau © Art Graphique et Patrimoine - CMN

Il faut demander aussi :

- Les modèles avec plusieurs niveaux de détail sous plusieurs formats : obj, fbx, ply. Ces formats sont aujourd'hui les plus utilisés et donc les plus susceptibles d'être pérennes
- Si des impressions 3D sont envisagées, une version du modèle au format stl et prête pour l'impression, c'est-à-dire hermétique avec les éventuels trous bouchés
- Un rapport écrit illustré sur l'exécution du projet : flux global, matériels et logiciels utilisés, plan d'acquisition, choix techniques, difficultés rencontrées et palliatifs...
- Une cession de droits
- Les réserves explicites du prestataire par rapport aux besoins exprimés
- La livraison sur disques SSD étiquetés en double exemplaire pour respecter le principe de redondance. Pour assurer l'archivage, il est nécessaire de réfléchir à l'organisation des données lors des exports et de la livraison, de manière à assurer une structure cohérente d'une numérisation à l'autre. Au Centre des monuments nationaux, nous menons une réflexion sur le sujet

En phase d'analyse des réponses, il sera toujours bon de questionner la méthodologie proposée par rapport aux spécificités du projet : chaque site est particulier et les usages prévus dictent beaucoup les prestations à effectuer !



ACQUISITION

Lors de l'acquisition, c'est-à-dire pendant le travail de terrain, une lumière diffuse est plébiscitée pour éviter d'avoir une façade du bâtiment blanche et l'autre rouge à cause du coucher de soleil, **l'idéal est donc de numériser lors d'un temps nuageux**. Le vent et la pluie peuvent empêcher les survols en drone, il est donc conseillé de prévoir plusieurs plages horaires pour s'assurer au maximum de la faisabilité de l'opération.

Dans certains sites, des habilitations de travail en hauteur peuvent être demandées. Les spécificités et contraintes du site patrimonial sont également à prendre en compte, à l'instar des miroirs, des surfaces brillantes et des plans d'eau qui sont difficilement numérisables et laissent des trous dans les modèles 3D, comme c'est le cas pour le miroir d'eau du château d'Azay-le-Rideau. Les arbres également peuvent aussi poser des difficultés, les feuilles n'étant pas bien captées.

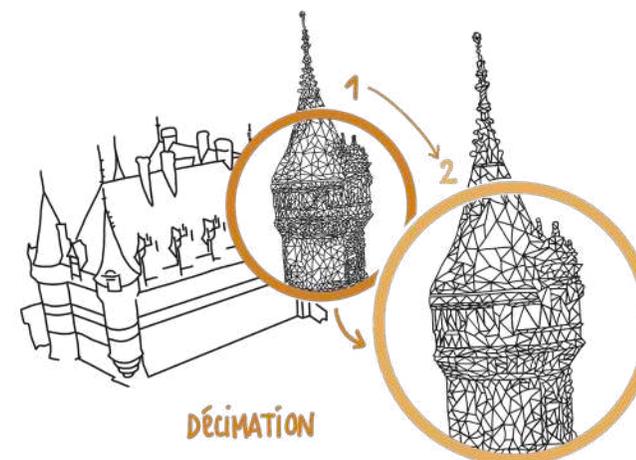
Les sites étendus comme le site archéologique de Glanum, très exigus tels que la grotte de Font-de-Gaume ou difficiles d'accès comme le château d'If, impliquent **d'adapter le matériel utilisé**. Enfin, des aspects sécuritaires sont à intégrer, notamment pour les monuments à très forte fréquentation comme l'Arc de triomphe et le Mont-Saint-Michel. Un balisage et une gestion des flux rigoureuse, parfois demi-heure par demi-heure, sont indispensables afin de gérer la co-activité avec le public. Un monument comme l'Arc de triomphe, a priori plutôt simple à numériser sur le plan technique, devient ainsi beaucoup plus complexe.

RECONSTRUCTION

La reconstruction 3D est la phase consistant à traiter et assembler les données. Plusieurs points de vigilance doivent être pris en compte.

Les équipes doivent parfois procéder à une **segmentation** méthodique et ordonnée du modèle 3D, car les données peuvent être trop volumineuses et illisibles par les ordinateurs couramment utilisés dans une institution culturelle.

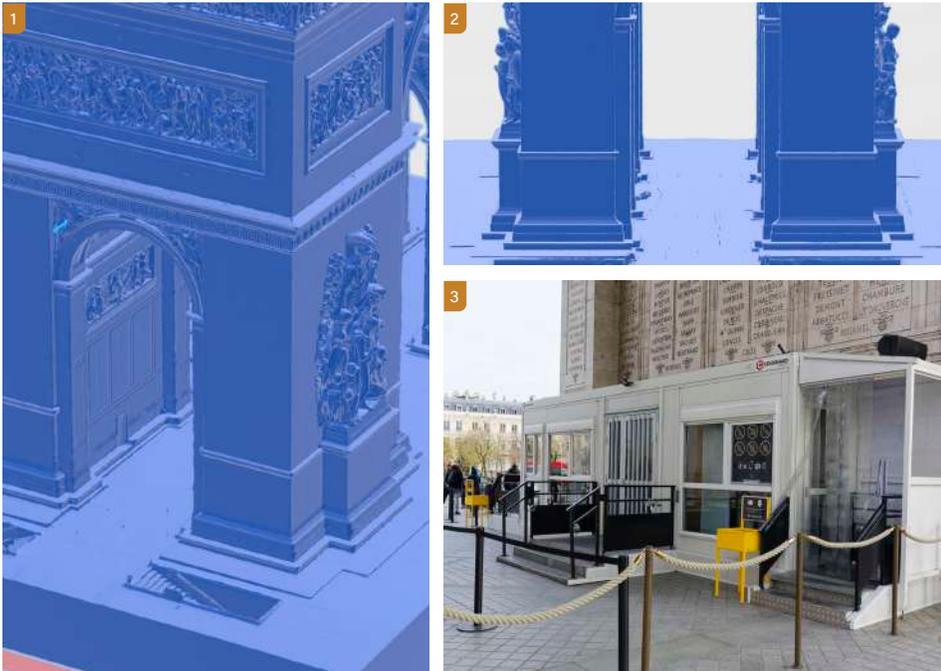
Dans cette optique, **la décimation**, c'est-à-dire la simplification du rendu, peut également être nécessaire, de même qu'une reconfiguration des textures. Comme le rendu visuel et la qualité des **textures** restent difficiles à objectiver, des itérations sont indispensables pour assurer la qualité du modèle final.



Le « **bouchage des trous** » en vue d'une impression 3D nécessite de bien se mettre d'accord sur la façon de procéder et les détails à enlever. Ce modèle sera nécessairement une interprétation, c'est pourquoi il est toujours bon de demander une version non interprétée. Par exemple, pour imprimer l'Arc de triomphe en 3D, il a fallu spécifier :

- Quels éléments enlever, comme le module préfabriqué permettant l'accueil du public
- Comment boucher les trous, tels que les sorties d'escalier ou la flamme du Soldat Inconnu





Modèle 3D ayant servi pour certaines impressions 3D (duplication de la pile A sur la pile B) et photographie du module préfabriqué de l'Arc de triomphe © Art Graphique et Patrimoine (1 et 2) et Marie-Claire Saille (3) - CMN

EXPLOITATION

Valider la livraison requiert de s'être au préalable mis d'accord sur les outils à utiliser. Il faut aussi garder en mémoire que tout ne pourra pas être validé, surtout sur un écran 2D et à distance.

Voici les étapes recommandées :

- Vérification des formats et de la cohérence de la structure d'archive
- Vérification de la complétude du relevé
- Vérification du respect des prescriptions
- Inspection des numérisations 3D
 - Cohérence métrique (l'assemblage des données)
 - Cohérence géométrique (l'homogénéité des maillages)
 - Cohérence visuelle (les aberrations chromatiques dans les images ou dans les textures)

- Vérification du caractère imprimable en 3D des modèles si tel est l'objet de la demande (création de prototypes)

Vérifier et documenter un modèle est la meilleure garantie pour sa réexploitation ultérieure éventuellement par un autre prestataire, si par exemple on souhaite extraire d'autres ortho-images ou d'autres coupes.

Il est également essentiel d'**anticiper la livraison avec la mise en place d'infrastructures de stockage robustes**, afin de pérenniser les données et de faciliter leur exploitation.

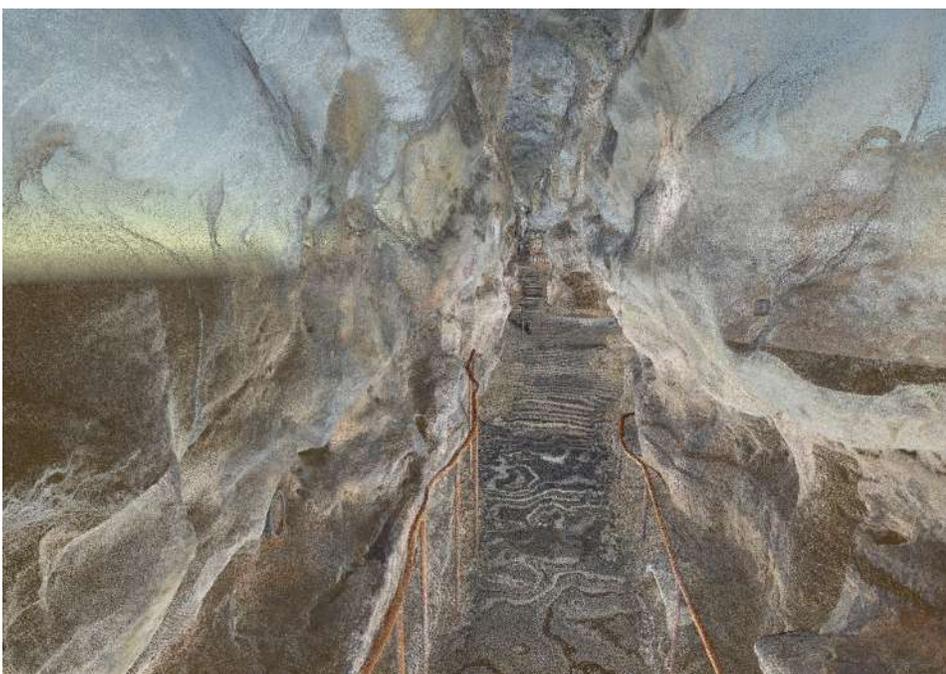
Pour lire les modèles 3D, plusieurs logiciels de visualisation existent : logiciels gratuits et open source, solutions propriétaires ou logiciels payants. Au Centre des monuments nationaux, nous utilisons principalement Blender et CloudCompare, tous deux gratuits. Dans le cadre du chantier de la tour Saint-Nicolas de La Rochelle, nous testons la solution [Aioli](#), développée par le CNRS UPR/MAP.

Nous souhaitons expérimenter également les visites virtuelles, basées sur l'assemblage de photographies à 360°, comme aide à l'archivage et à l'organisation des données. La visite virtuelle permettrait à l'utilisateur de se déplacer facilement dans la représentation numérique du monument. Des annotations faisant référence à l'articulation des données de numérisation et d'assemblage du modèle 3D apparaîtraient au fur et à mesure de la déambulation. Grâce aux annotations, l'utilisateur pourrait trouver dans les dossiers sur son ordinateur, en local, les fichiers relatifs à la numérisation. En effet, les connexions réseau sont très limitées dans certains de nos sites patrimoniaux et ne permettent pas l'utilisation de plateformes de visualisation collaboratives en ligne. Cette visite virtuelle servirait aussi en amont des numérisations pour se substituer à la visite de repérage sur site, qui n'est pas toujours possible pour des raisons de conservation. Cet outil aide déjà les candidats à répondre aux appels d'offres, en leur permettant de visualiser le site.

Enfin, nous utilisons la visualisation des données à l'échelle 1 grâce au Teleport. Cette solution conçue par Dassault Systemes permet, dans une salle spécialement équipée, de se déplacer avec un casque de réalité virtuelle dans un modèle 3D. Ce mode de visualisation permet de se repérer beaucoup plus facilement dans un site complexe et d'identifier des détails parfois difficilement visibles sur un écran 2D.



Séance de test au Teleport 1/1 de la Cité de l'architecture et du patrimoine © Dassault Systemes



Vision au casque de réalité virtuelle du nuage de points de la galerie principale de la grotte de Font-de-Gaume © Capture4CAD (modèle 3D), Dassault Systemes (Teleport 1/1) - CMN

CESSION DE DROITS

Le point fait débat et ne doit pas être oublié : les livrables qui tendent à se rapprocher au plus de l'image exacte du monument ou de l'objet de collection peuvent être considérés comme des documents administratifs mis à disposition en open source car nous pouvons considérer qu'à matériel égal, deux personnes différentes produiront le même modèle.

En revanche, pour un site patrimonial pour lequel de multiples options d'acquisition sont possibles – comme en témoignent des propositions de prix variant de 1 à 4 lors de nos appels d'offres – incluant l'application des textures, où l'interprétation et les choix humains jouent un rôle important, la question de l'originalité se pose. En effet, une création est considérée comme une œuvre originale protégeable par le droit d'auteur si elle traduit l'empreinte de la personnalité de l'auteur. Et, cette empreinte est déterminée si l'auteur a pu exprimer ses capacités créatives lors de la réalisation de l'œuvre en effectuant des choix libres et créatifs quels que soient la forme d'expression de l'œuvre, son mérite, son genre ou sa destination.

Une telle considération pourrait **entraîner des changements significatifs dans la gestion des cessions de droits actuellement en vigueur** et nous avons commencé, sur certains projets, à ne plus considérer le modèle 3D comme un tout indivisible mais à distinguer ses diverses étapes d'élaboration car un nuage de points ne représente pas la même expression qu'un modèle maillé texturé.

POUR CONCLURE

POINTS CLÉS D'UN PROJET DE NUMÉRISATION

Voici quelques questions essentielles à se poser lors de la rédaction du cahier des charges :

- Les besoins :
 - Quel usage principal ? Quel degré de détail ?
 - Quels usages ultérieurs ?
 - Quel budget pour assurer des usages ultérieurs ?
 - Quels droits ?

- Quels utilisateurs finaux ? Quelles formations ?
- La méthodologie :
 - Quelles contraintes et spécificités du site ?
 - Comment découper le site et nommer ses parties ?
 - Quelle référence visuelle initiale ?
 - Comment visualiser et contrôler les livrables ?
- Les livrables :
 - Demander les données brutes d'acquisition et les photographies
 - Demander rapports d'exécution et de traitement
 - Demander la livraison sur disque dur SSD a minima
 - Propositions technique et financière
 - Exiger l'explicitation des réserves et prévoir des itérations (échantillonnage, textures...)

RÉUTILISER ?

On pourrait facilement se laisser séduire par l'idée que « qui peut le plus peut le moins » et chercher à garantir une réutilisation maximale en produisant un modèle géoréférencé et texturé au plus haut niveau de détail possible. Il suffirait par la suite de le décimer afin d'avoir un modèle plus ou moins simplifié selon les besoins. Or, cette approche pose plusieurs problèmes.

Tout d'abord sur le plan financier. L'étude des dizaines de propositions reçues par le Centre des monuments nationaux montre que géoréférencer un modèle coûtera environ 15 % de plus. Il est donc raisonnable de toujours demander le géoréférencement d'un modèle, même s'il est initialement prévu pour la médiation culturelle. De même, demander un étalonnage colorimétrique augmentera le potentiel de réutilisation du modèle sans entraîner un véritable surcoût.

Par contre, demander des textures alors qu'elles ne sont pas nécessaires est plus discutable. Cela doublera facilement les coûts et, si la photogrammétrie est utilisée, peut multiplier par cinq la durée d'acquisition. Plus un modèle est détaillé, plus il coûtera cher.

Sur le plan technique, un modèle plus détaillé est aussi un modèle plus lourd,

plus compliqué, voire impossible, à manipuler sur le matériel informatique couramment utilisé dans les institutions culturelles. Décimer proprement peut être compliqué, par exemple pour un site préhistorique car la topologie est très irrégulière. Réduire le nombre de triangles n'est pas suffisant, il peut en effet y avoir un gros travail de reconfiguration des textures, parfois plus complexe que la production directe d'un modèle moins détaillé.

Dans tous les cas, pouvoir réutiliser suppose d'avoir archivé les données et de pouvoir retrouver tout ou partie du modèle. Il est donc indispensable d'inclure dans les livrables :

- Les données brutes d'acquisition, notamment les photographies et les fichiers des scanners
- Les informations sur toutes les données et la façon dont elles ont été collectées : métadonnées et paradonnées
- Les rapports d'exécution de traitement

Il est aussi souhaitable de livrer les modèles dans plusieurs formats, de façon à se prémunir au maximum contre leur obsolescence, et d'organiser les données pour les identifier facilement, c'est-à-dire en les nommant conformément à un découpage logique du site. Le *Guide méthodologique pour la rédaction d'un cahier des charges* revient plus en détail sur ces préconisations.

Il faut aussi avoir les droits d'exploitation pour cette nouvelle utilisation et bien sûr, il faut avoir un système d'archivage pérenne, ce qui a un coût.

Le tableau de l'annexe [Quelques cas d'usages observés ou testés, page 143](#) liste de façon non exhaustive divers cas d'usage, et donc des réutilisations potentielles d'un modèle 3D.

Toutefois, **l'expérience montre de nombreux freins à la réutilisation**. En effet, peu de prestataires sont enclins à réutiliser des données qu'ils n'auront pas produites. Ils vont souvent argumenter d'une faible qualité, ce qui rend d'autant plus importantes les bonnes documentations et organisation des données

- Même s'il y a du progrès, beaucoup de prestataires, notamment les producteurs d'expériences immersives en réalité virtuelle, peinent à objectiver leurs besoins. Ils demanderont trop souvent un « modèle le plus détaillé » avec de « bonnes textures », ce qui est très subjectif

- Le « raboutage » de modèles 3D produits à des périodes différentes reste aléatoire, même s'ils sont géoréférencés : ils ont pu être produits avec des matériels de précision trop différentes ou référencés en local, dans des référentiels différents ou avec des erreurs. Définir des repères visuels augmentera la probabilité de réussite, et dans tous les cas, il convient de documenter très précisément ce qui a été fait
- L'adaptation d'un modèle pour un nouvel usage peut dans certains cas coûter aussi cher que de le refaire, quand par exemple les textures sont floues ou les trous trop nombreux

Il est assez difficile de rentabiliser aujourd'hui l'investissement d'un modèle 3D en le monétisant. Sur les plateformes en ligne comme Sketchfab ou Turbosquid, un modèle 3D d'une fidélité plus ou moins approximative de l'Arc de triomphe se vend en moyenne 50 \$ et celui du château d'Azay-le-Rideau environ 150 \$, alors que la numérisation coûtera 200 à 400 fois plus.

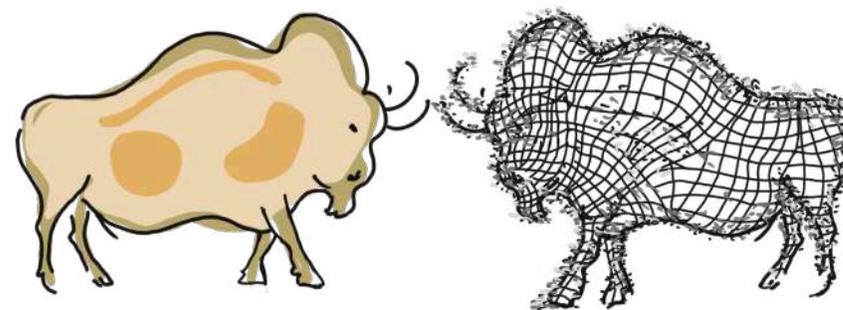
La plupart des entreprises se satisfont en fait de modèles peu détaillés leur donnant les dimensions générales du site. La production du modèle 3D représente moins de 10 % du budget total de production d'une expérience immersive, surtout que les nouveaux matériels d'acquisition et les nouvelles technologies de reconstruction continuent de réduire les coûts de numérisation. Pour l'instant, dans le marché des décors virtuels, nous n'avons pas d'exemple de réutilisation d'un modèle déjà existant.

Le modèle 3D réutilisable pour tous les usages est probablement une illusion et il sera difficile de le rentabiliser en le monétisant.

Par contre, un type de modèle 3D donné peut être réutilisé pour gagner en productivité et éviter une nouvelle acquisition, toujours contraignante. Par exemple, un nuage de points permettra d'extraire de nouvelles coupes préalablement à un nouveau chantier, ou bien, il aidera à préparer efficacement un événement. Les photographies utilisées pour produire le nuage de points pourront servir au suivi de l'évolution du monument. Un modèle maillé pourra être utilisé pour des impressions 3D à destination des personnes mal et non voyantes. Des plans pourront aussi être tirés d'un modèle texturé correctement géoréférencé.

Au-delà de la technique, il faudra avoir anticipé les cessions de droits, quitte à différencier les livrables : données brutes, nuage de points, maillage, etc.

Comprendre les usages possibles et les technologies les plus adaptées abaisse les coûts, parfois de façon spectaculaire, et améliore la qualité, donc la durée de vie et la réutilisation.



LE JUMEAU NUMÉRIQUE : FANTASME OU RÉALITÉ ?

Le modèle 3D couteau suisse aux usages universels, autrement dit le « jumeau numérique » copie parfaite d'un objet patrimonial, n'existe donc probablement pas **aujourd'hui** dans le patrimoine.

D'une part, il est très difficile à manipuler et exige des compétences techniques vite pointues, d'autre part, la latitude d'interprétations humaines et logicielles qui entrent en jeu lors d'une reconstruction 3D et la quasi-impossibilité aujourd'hui de vérifier, pierre par pierre, la fidélité d'un modèle le rendent très illusoire.

Quant à l'approche BIM dans le patrimoine culturel, elle pose des difficultés, par exemple sur le degré de modélisation qui n'est pas le même dans un site industriel et patrimonial : faut-il aller jusqu'au moellon ou la tuile ? Ou encore la visualisation et l'exploitation par les différentes équipes. Le coût de conception d'une maquette BIM est plus élevé qu'une simple reconstruction 3D. De fait, l'utilisation de modèles 3D couplés à des photos spatialisées semble plus simple, moins coûteux et suffisant aujourd'hui pour beaucoup d'usages mais n'est pas encore diffusée largement et industrialisée.

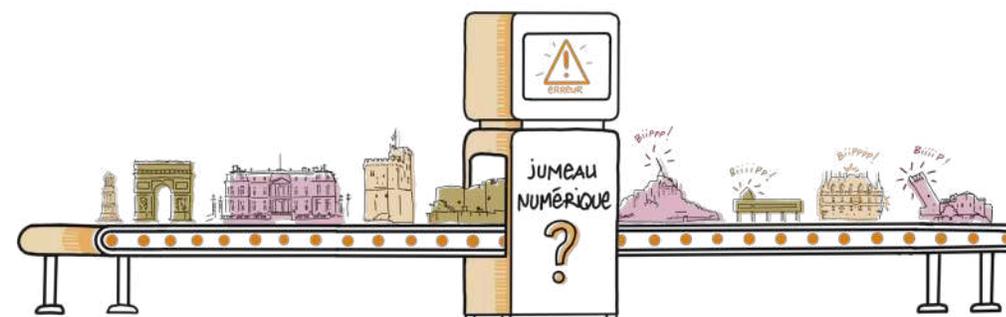
Enfin, l'évolution des technologies d'acquisition et de reconstruction fait que pour certains usages, il n'est même plus nécessaire de passer par ce type de modèle. Il semble donc plus pertinent de parler de **modèles au pluriel**, voire même, comme nous le faisons, de « représentations numériques » puisque certains n'en sont techniquement plus.

Ainsi, pour répondre à nos questionnements initiaux, réutiliser un modèle est bien possible mais sous certaines conditions qui s'appliquent dès la production du modèle. Se constituer une bibliothèque de modèles 3D peut être pertinent pour des usages internes mais pas pour la monétiser, d'autant plus qu'il est difficile d'estimer la durée de vie d'un modèle.

Du moins, aujourd'hui.

Car les cas d'usage se multiplient, les technologies avancent rapidement, la numérisation devient toujours plus accessible et nous découvrons régulièrement de nouvelles pratiques qui apportent des gains financiers ou de productivité. Nous savons que d'ici quelques mois, nous relirons d'un autre œil certaines

pages de ce livre blanc car nous n'arrêtons jamais d'apprendre. Il est donc urgent de continuer à expérimenter aussi bien avec le secteur privé qu'avec le monde de la recherche – chacun ayant des apports différents – et de partager nos expériences pour capitaliser au mieux et avancer.



BIBLIOGRAPHIE

Ben Mildenhall, Pratul P. Srinivasan, Matthew Tancik, Jonathan T. Barron, Ravi Ramamoorthi, Ren Ng, « NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis », *Computer Vision – ECCV*, 2020.

Bergeot Patrick, Brochard Maud, Estavoyer Morgane, Léonet Antoine, *Guide méthodologique pour la rédaction d'un cahier des charges*. Paris : Centre des monuments nationaux, 2024.

Bergeot Patrick, Estavoyer Morgane, « La numérisation 3D par le Centre des monuments nationaux. Approche critique et méthodologique ». *La lettre de l'OCIM*, n°210, 2024.

Bergeot Patrick, Estavoyer Morgane, Martinez Marc, « Numérisation de la grotte de Font-de-Gaume : un condensé des problématiques de la reconstruction 3D ». *Rencontres scientifique et techniques de l'Inrap*, INRAP, 2024.

Bergeot Patrick, Erneux Catherine, Estavoyer Morgane, newsletter LinkedIn du programme « CMN Numérique », Paris : Centre des monuments nationaux, 2023-2025.

Bernhard Kerbl, Georgios Kopanas, Thomas Leimkühler, and George Drettakis. 2018. « 3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering » — *ACM Trans. Graph.* 0, 2018.

Brunel Valentin, Colin Paul, Danciu Alina, Gallis Quentin, Groshens Émilie, et al, « Des métadonnées et paradonnées pour mieux exploiter des données d'enquêtes pour la recherche », *Mate la Science ouverte*, Réseau Métier MATE, 2021.

Granier Xavier, Chayani Mehdi, Abergel Violette, Bénistant Pascal, Bergerot Laurent, et al, *Les recommandations du Consortium 3D SHS*. [Rapport Technique] CNRS; SHS. 2019.

Luca (de) Livio, Delhay Jean-François, Demoulin Marie-Claude, Grandvoinnet Philippe, Pinçon Geneviève, Sagory Thomas, Sajus Bertrand, Néroulidis Ariane, *Guide pour la rédaction d'un cahier des charges de numérisation en 3D*, Paris : ministère de la Culture, 2017.

Pamart Anthony, Abergel Violette, Flammin Anne, Morineau Charlie, Paitier Hervé, et al, « Apport critique sur les matériels et logiciels 3D : Synthèse des outils et des technologies 3D », *Les recommandations du Consortium 3D SHS*, 2019.

LISTE DES ANNEXES



- [Annexe 1](#) : projets menés par le Centre des monuments nationaux
- [Annexe 2](#) : cas d'usage observés ou testés
- [Annexe 3](#) : guide méthodologique pour la rédaction d'un cahier des charges
- [Annexe 4](#) : glossaire
- [Annexe 5](#) : processus de numérisation d'un monument

Annexe 1

Projets menés par le Centre des monuments nationaux

MONT-SAINT-MICHEL

OBJECTIF

Numériser la totalité du Mont pour créer, en coproduction avec Flyview, une expérience de réalité virtuelle ultra-réaliste en LBE (*Location based entertainment*).

CADRE JURIDIQUE

Consultation au terme de laquelle la société Drones Center a été retenue pour effectuer la prestation. En effet, les modèles 3D existants n'étaient pas utilisables : qualité des textures insuffisante et freins juridiques.

PLANNING

Projet global : octobre 2021 à juillet 2022

Acquisitions 3D : avril 2022

RÉALISATIONS

- Création par Drones Center d'un modèle maillé texturé de la totalité des extérieurs du Mont-Saint-Michel par lasergrammétrie et photogrammétrie
 - 20 000 photos au drone, 60 vols sur 4 semaines avec compléments depuis le sol
 - Précision variant du millimètre (flèche et archange) à 5 centimètres (remparts)
- Modèle ensuite utilisé par le prestataire de la société Flyview pour intégration dans une expérience 3D temps réel basée sur Unreal Engine puis exploitée par Flyview

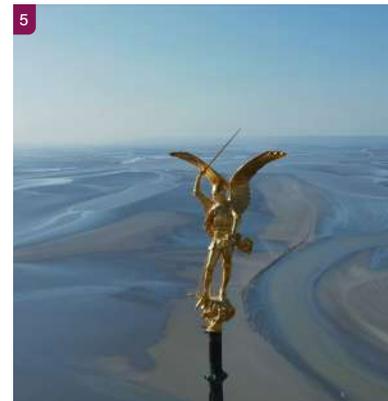
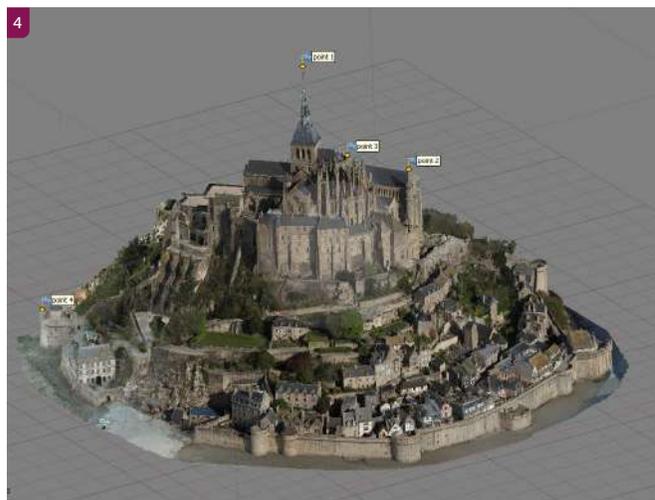
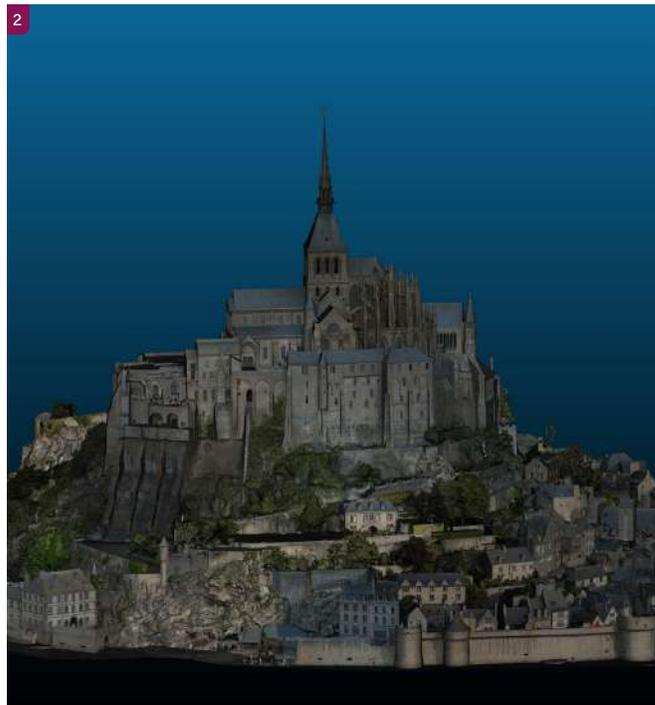
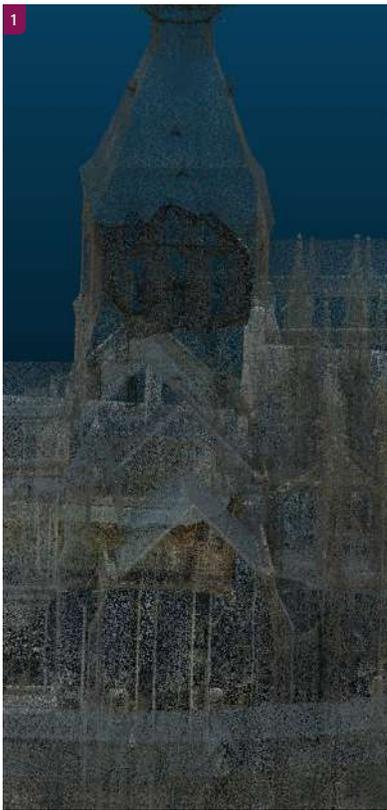
ENSEIGNEMENTS

Points positifs

- Première expérience au CMN de numérisation où la qualité des textures prime sur la précision de la géométrie
- Première expérience réussie d'intégration d'un modèle 3D dans Unreal Engine dans le cadre d'un projet impliquant le CMN
- Retour d'expérience transparent par Drones Center

Difficultés et points d'amélioration

- Cahier des charges limité à une feuille Excel avec uniquement la précision souhaitée selon les zones
 - Pas de géoréférencement car non demandé, plusieurs mètres de décalage observés finalement
 - Données brutes non fournies car non demandées
 - Modèle finalisé selon le scénario de Flyview : de nombreux trous non visibles dans l'expérience finale ont été laissés sur le modèle 3D
 - Nombreuses itérations pour fournir les textures convenant au prestataire de Flyview
 - Segmentation : 35 secteurs entre 5M et 30M de polygones, difficile de concilier cohérence topologique et contraintes de reconstruction
- Conditions d'acquisition
 - Pendant leur période de nidification, les goélands ont été perturbés par les drones et leur réaction a affecté le bon déroulement des vols
 - Autorisations de vol données par la préfecture au compte-goutte
 - Ensoleillement trop fort : 5 tentatives pour l'archange
 - Impossible d'acquérir correctement les rues du Mont : public omniprésent en journée, ombres trop prononcées le matin et le soir du fait de leur étroitesse et beaucoup trop de panneaux publicitaires à nettoyer. Il a fallu, de fait, dupliquer les façades les plus propres pour reconstruire la grande rue
 - Échafaudages sur la Merveille (effacés en postproduction)
 - Vol à moins de 3 mètres parfois



© Drones Center - CMN 1 et 3. Nuages de points de l'abbaye et du Mont-Saint-Michel 2 et 4. Modèles maillés texturés du Mont 5. Archange

© Backlight - CMN 6. Travail en cours de la reconstitution 3D dans le moteur de jeu vidéo.

© Flyview - CMN 7 et 8. Visiteurs participant à l'expérience immersive Flyview, basée sur la reconstitution 3D 9. Affiche de l'expérience immersive Flyview

SITE ARCHÉOLOGIQUE DE GLANUM

OBJECTIFS

Expérimenter le potentiel de la version 5 d'Unreal Engine, et en particulier de ses fonctionnalités Lumen (gestion de la lumière) et Nanite (gestion d'un très grand nombre de polygones) sortie en avril 2022 pour réaliser une application interactive 3D temps réel :

- Tester notamment la capacité de Unreal Engine à intégrer un modèle 3D complet du site (2,5 hectares) comprenant un très grand nombre de polygones
- Offrir au médiateur la possibilité de se déplacer dans tout le site archéologique avec des contenus enrichis (textes, reconstitutions d'élévations, vidéos...)
- Permettre une diffusion sur un ordinateur de bureautique pour proposer des visites à distance dans les écoles et EHPADs

CADRE JURIDIQUE

Mécénat de compétences de la société IMA Solutions.

PLANNING

Projet global : mai 2022 à décembre 2024

Acquisitions 3D : juin 2022

RÉALISATIONS

- Acquisition en 5 jours (Faro s70, Drone DJI Air 2s avec capteur 24Mp, APN Sony Alpha 77II avec capteur 24Mp) : 294 stations (12 milliards de points), 5 200 photos (4 200 utilisées)
- Création du modèle maillé texturé en 28 jours (segmentation en 10 zones)
- Réalisation de l'application 3D temps réel

- Test de la visite guidée à distance dans plusieurs classes via la plateforme de diffusion Discord



[Vidéo] La reconstitution en 3D temps réel

<https://youtu.be/o2JBQda8b54?feature=shared>

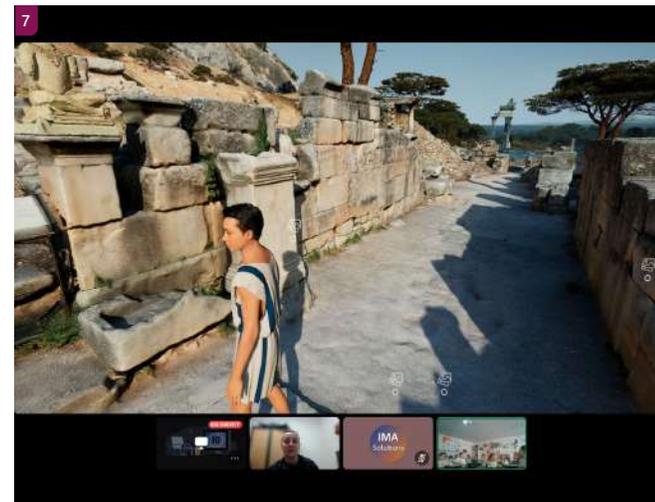
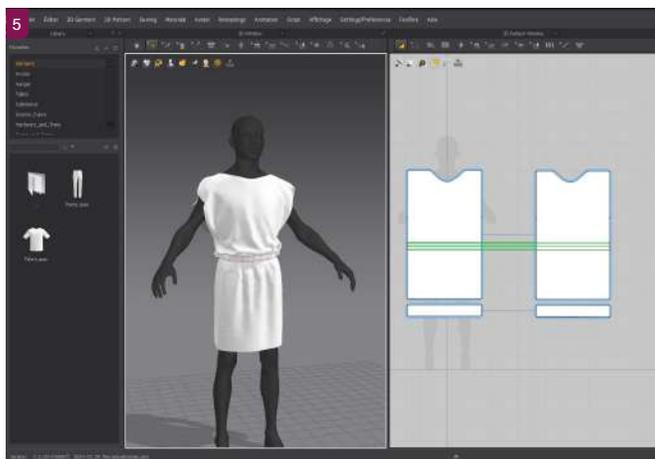
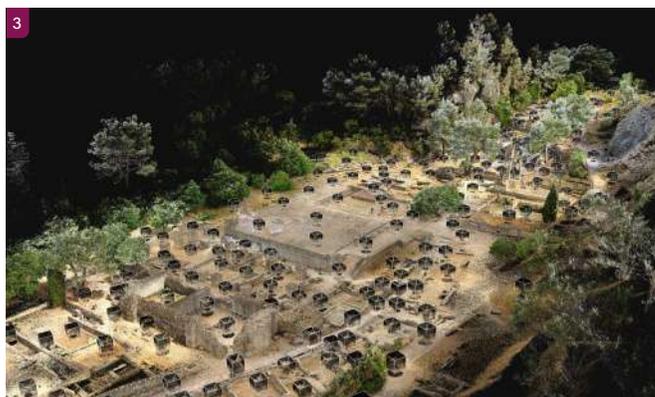
ENSEIGNEMENTS

Points positifs

- Intégration réussie dans Unreal Engine
- Valeur ajoutée du 3D temps réel pour animer un site archéologique : déplacement pas à pas, narration, restitutions de parties disparues, nouveaux points de vue grâce au survol en drone, intégration dans le parcours d'objets conservés dans d'autres sites...
- Réelle co-construction de l'expérience entre l'équipe technique et l'équipe de médiation du site archéologique de Glanum
- Effet « waouh »

Difficultés et points d'amélioration

- Conditions d'acquisition
 - Taille importante du site
 - Fort ensoleillement et couvert végétal : beaucoup d'ombres
 - Route départementale dans la zone d'acquisition
- Apparence à donner aux parties restituées
- Identification d'une plateforme de diffusion pertinente (Discord) mais parfois difficile à mettre en œuvre pour les écoles



© IMA Solutions - CMN 1 et 2. Numérisation du site par scanner 3. Résultat de la lasergrammétrie 4. Pack d'objets (assets) 3D 5. Conception de la tenue du personnage 6. Personnage finalisé dans le forum reconstitué 7. Visite guidée à distance avec une classe via Discord 8. Photogrammétrie du temple 9. Présentation du projet à l'occasion de l'exposition « Le patrimoine passé au scan ! Découvrez les monuments nationaux en 3D » 10. Visualisation du maillage 3D du temple 11. Reconstitution du site archéologique

CHÂTEAU D'AZAY-LE-RIDEAU

OBJECTIFS

Réaliser une expérience photoréaliste, multi-supports (smartphone, ordinateur et casque VR) et collaborative en 3D temps réel :

- Numériser par lasergrammétrie et photogrammétrie les extérieurs du monument, le parc et l'escalier → première mise en application du cahier des charges standard
- Utiliser ces modèles pour produire l'expérience 3D temps réel sur Unreal Engine : extérieurs (château et parc) et quatre espaces intérieurs

CADRE JURIDIQUE

- Modèle 3D : consultation au terme de laquelle la société IMA Solutions a été retenue pour effectuer la prestation
- Expérience 3D temps réel : start-up Mira, partenaire du consortium du programme « CMN Numérique » (PIA4)

PLANNING

Projet global : septembre 2022 à octobre 2025

Acquisitions 3D : janvier 2023

RÉALISATIONS

- Acquisitions en 3 jours, modèles 3D mis à disposition de Mira en mars 2023
- 391 Go de données réparties en 37 000 fichiers et 1 685 dossiers
- 153 stations scanner laser longue distance réparties sur l'ensemble du domaine et du grand escalier
- 15 000 photos drone géoréférencées via le système RTK et la station GNSS différentielle

- 7 000 photos terrestres pour le grand escalier et la liaison avec la façade extérieure du château
- 10 cibles de géoréférencement positionnées et capturées sur l'ensemble du domaine
- Tests centrés utilisateurs dès le début du projet, avant même la reconstitution du monument par Mira
 - Trois cohortes : lycéens UPE2A (élèves allophones) du lycée Jean Jaurès d'Argenteuil, ambassadrices du Pass Culture d'Île-de-France et étudiants de l'Université d'Angers
 - Accompagnement par Olivier Hû, spécialiste des interactions humains-machines dans le secteur culturel
 - 8 sessions de tests (93 passages) dans des environnements non contrôlés, l'objectif étant de vérifier que l'expérience soit bien diffusable auprès d'écoles et de particuliers
- Reconstitution et intégration dans la plateforme Mira des extérieurs du château, de quelques pièces et du parc



[Vidéo] Le modèle 3D

<https://youtu.be/Ykfngc6ySiA?feature=shared>



[Vidéo] La reconstitution en 3D temps réel

<https://youtu.be/UkZghTHhcc8?feature=shared>

ENSEIGNEMENTS

Points positifs

- Météo idéale pour l'acquisition : temps gris et couvert, permettant l'obtention de couleurs homogènes tout en évitant les ombres
- D'un point de vue technique, le caractère multi-supports de l'expérience fonctionne

- La visite virtuelle du monument, utilisée habituellement dans le cadre de médiation à distance, a été utilisée pour la reconstitution et également pour les différentes sessions de travail à distance (création du scénario)
- Les premiers tests ont montré que la qualité de la reconstitution a séduit les différents testeurs, qui avaient envie de découvrir davantage le château
- Intérêt vérifié de faire des tests dans le développement de ce type de projet, notamment dès le début de sa conception pour mieux anticiper et faire des choix pertinents
- Résultats des tests-utilisateurs :
 - Les verbatims soulignent de façon importante de grands espaces et des graphismes de qualité, ils démontrent aussi une très forte attente d'éléments dynamiques sur tous les plans :
 - » Les caractéristiques passives de l'environnement (vent, courant, bruits d'ambiance, passants, oiseaux...)
 - » Les dimensions interactives (ouvrir les portes, bouger des objets...)
 - » Les modes de déplacement et d'exploration (monter dans les arbres, courir, voler, nager...). Le vol est unanimement apprécié et le fait de nager est une demande étonnamment récurrente lors des tests
 - L'environnement virtuel est rapidement interprété selon une grille de lecture vidéoludique quelque soit le public, avec des demandes d'options de personnalisation de son avatar, ou des touches de contrôle du clavier, ainsi que des attentes d'activités plus complexes (conduire, explorer, résoudre des énigmes...)
 - Malgré un public jeune, l'utilisabilité des moyens de contrôle sur les trois dispositifs (manettes et casque VR, clavier/souris sur PC et écran tactile de smartphone) reste parfois difficile
 - L'utilisation en phase de test des prototypes a été perçue comme la découverte d'un environnement riche, beau et attrayant qui mériterait d'être plus « vivant », pas toujours facile à prendre en main et au sein duquel on aimerait se voir proposer des activités plus variées
- La communication scientifique autour de ces résultats a permis des échanges riches avec d'autres professionnel·les et chercheur·euses

Difficultés et points d'amélioration

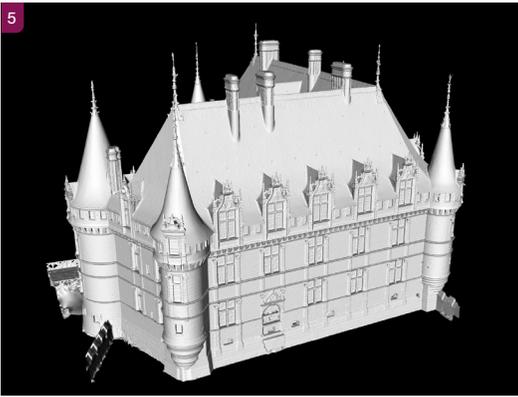
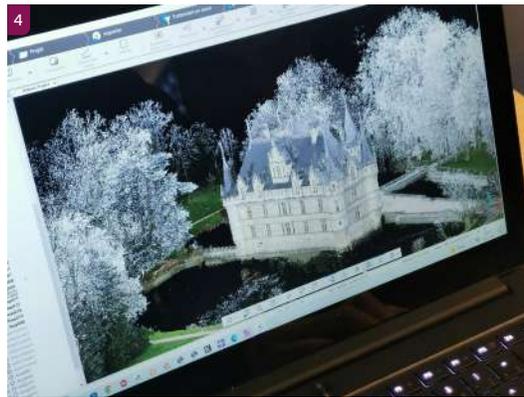
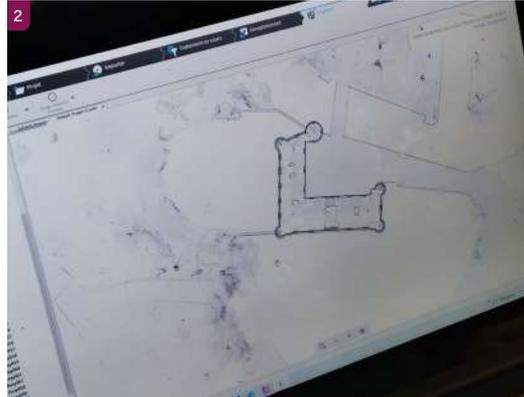
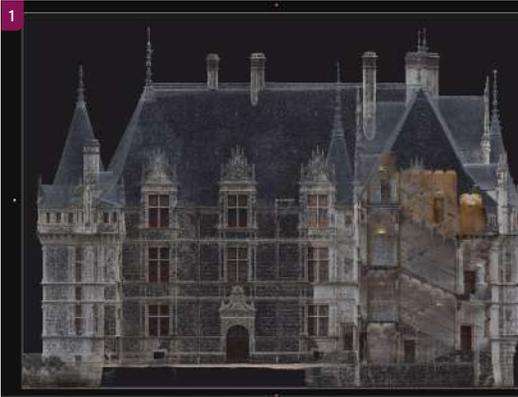
- L'organisation des données du modèle 3D ne facilite pas la visualisation d'une zone particulière (par exemple d'une tour du château) : 160 fichiers de 50 Go sans nomenclature particulière pour le nuage de points
- Non-objectivation de la qualité des textures : mise au point itérative entre IMA Solutions et Mira
- Les tests dans les environnements non contrôlés ont révélé plusieurs faiblesses dans le mode de diffusion : pare-feu et réseau notamment
- Les multiples objectifs et acteurs ont rendu difficile la priorisation des actions et ont parfois affecté de façon négative le rythme, l'avancement du projet et l'engagement des parties prenantes

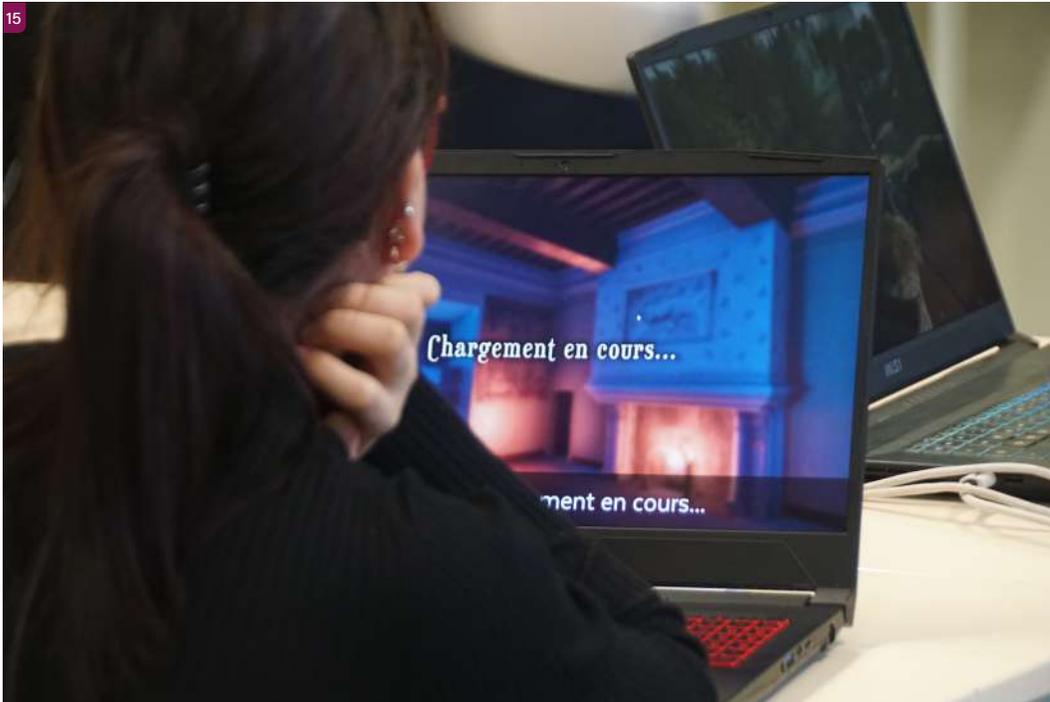
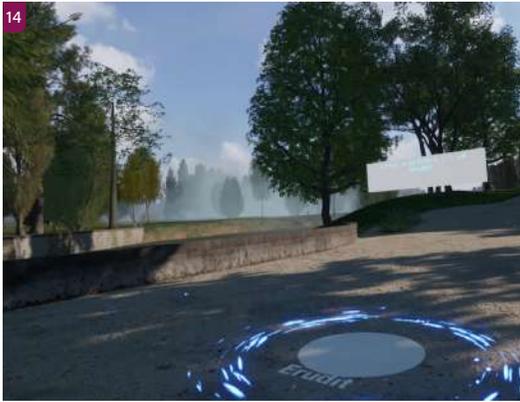


© IMA Solutions - CMN **1.** Ortho-image des façades nord (nuage de points) **2.** Carte du domaine **3.** Nuage de points **4.** Nuage de points (visualisation lors de l'acquisition) **5.** Modèle maillé non texturé **6.** Ortho-image de l'escalier d'honneur (nuage de points) **7.** Modèle maillé texturé **8.** Nuage de points du domaine

© Mira - CMN **9.** Reconstitution en 3D temps réel (travail en cours) **10 et 11.** Reconstitution en 3D temps réel du château et du parc **12.** Reconstitution en 3D temps réel des combles **14.** Prototype d'escape game

© Mira, Olivier Hû (laboratoire LERIA) - CMN **13.** Premier test du concept de l'escape game **15, 16 et 19.** Tests avec des ambassadrices du pass Culture d'Île-de-France **17 et 20.** Tests avec des élèves UPE2A du lycée Jean Jaurès d'Argenteuil **18.** Questionnaire d'évaluation **21.** Extrait des résultats des questionnaires



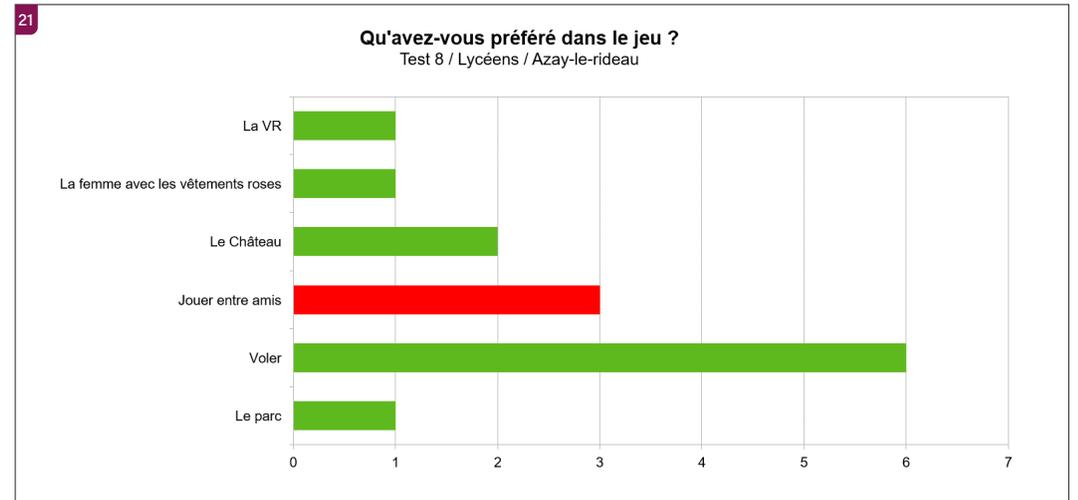


18

- 1) Prénom : LENDÀ
- 2) Age : 15
- 3) Avez-vous déjà utilisé un casque de réalité virtuelle : oui/non
- 4) Si oui, à quelle fréquence :
 - a. Au moins une fois par semaine
 - b. Au moins une fois par mois
 - c. Quelques fois dans l'année
 - d. Exceptionnellement
- 5) Jouez-vous à des jeux vidéo : oui/non
- 6) Si oui, à quelle fréquence :
 - a. Au moins une fois par semaine
 - b. Au moins une fois par mois
 - c. Quelques fois dans l'année
 - d. Exceptionnellement
- 7) Et sur quel outil jouez-vous : smartphone / PC / console de jeux
- 8) Fréquentez-vous des lieux culturels (expositions, musées, monuments historiques, etc) : oui/non
- 9) Si oui, à quelle fréquence :
 - a. Au moins une fois par semaine
 - b. Au moins une fois par mois
 - c. Quelques fois dans l'année
 - d. Exceptionnellement
- 10) En général, quel type d'activité culturelle privilégiez-vous :
 - a. Visite de monuments, châteaux, édifices religieux...
 - b. Visite de lieux d'exposition, musées, galerie...
 - c. Concerts, théâtre, cinéma...
 - d. Parcs, jardins, espace naturels...
- 11) Qu'est ce qui pourrait vous motiver à augmenter vos activités culturelles ?

visiter les parcs -
voir les lieux d'en haut.

1) le VR casque de réalité virtuelle
2/ MoJen
3/ oui, parce que j'aime voir les lieux d'en haut.
4/ oui
5/ Je préfère le parc de château.



CHÂTEAU D'IF

OBJECTIF

Tester la création d'un nuage de points par une nouvelle technologie de type SLAM : la technologie RELEVANT du CEA-List.

CADRE JURIDIQUE

Convention d'expérimentation avec la start-up Lay3rs et le laboratoire List du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA).

PLANNING

Projet global : février à octobre 2023

Acquisitions 3D : février 2023

RÉALISATIONS

- Acquisitions en 1h20
- Dispositif matériel conçu spécifiquement par le CEA-List qui inclut par exemple des caméras et une centrale inertielle
- Restitution aux équipes du CMN en octobre 2023

ENSEIGNEMENTS

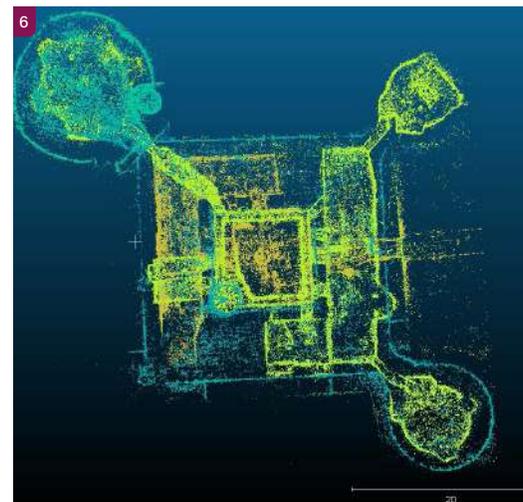
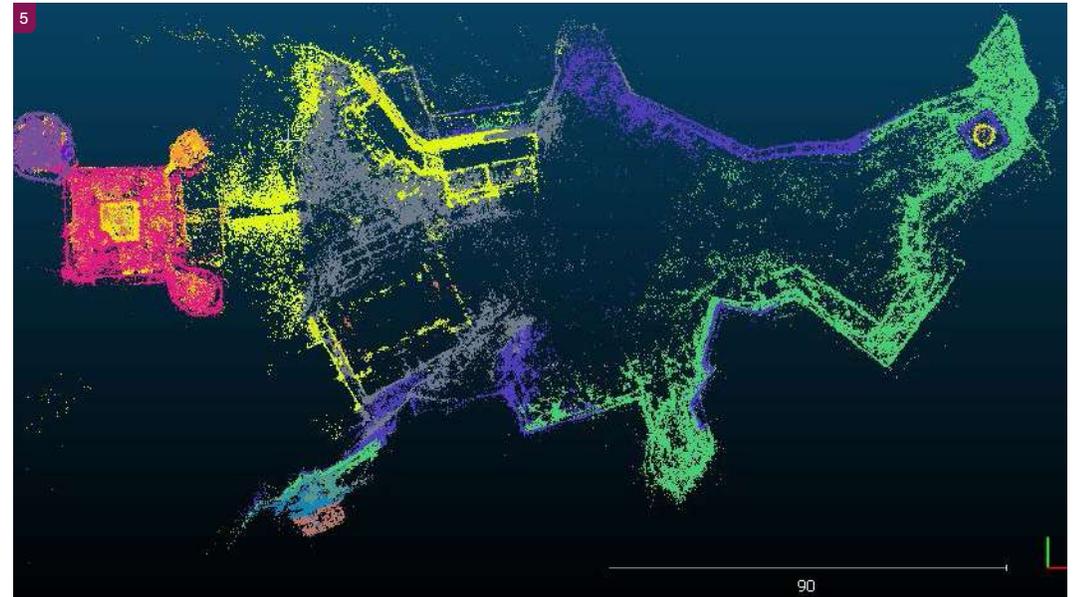
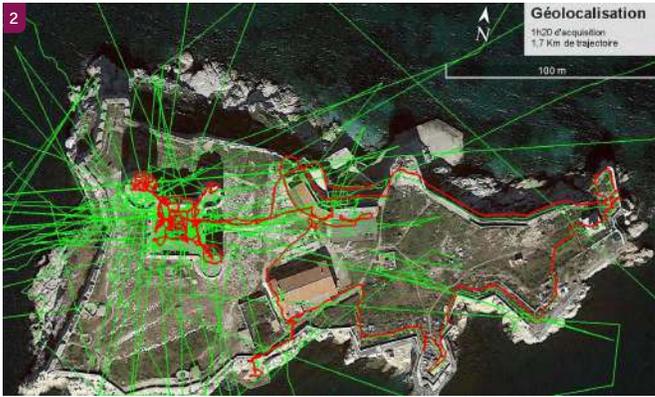
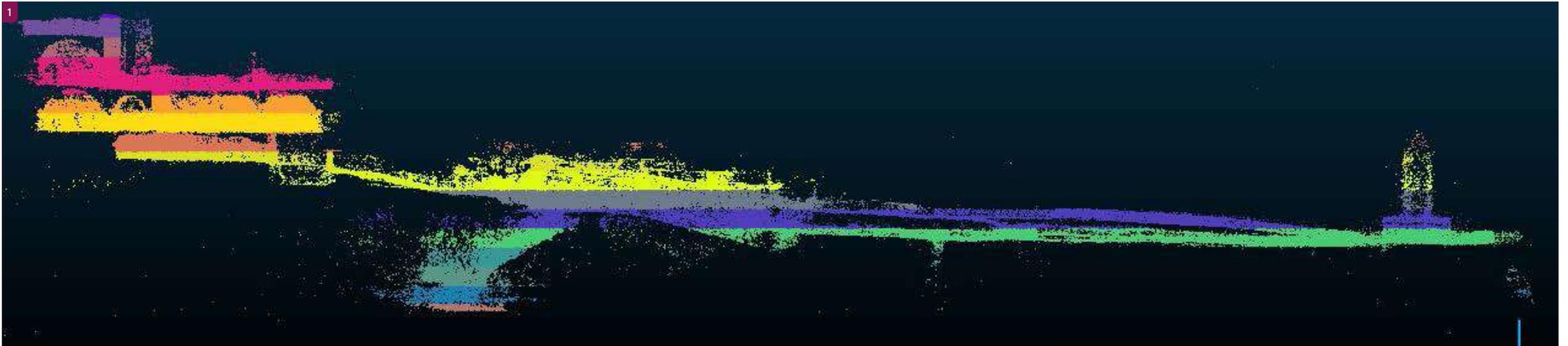
Points positifs

- Génération d'un nuage de points en 1h20
- Identification des différents étages sur le nuage de points

Difficultés et points d'amélioration

- Nuage de points en noir et blanc car le dispositif ne permet pas la couleur

- Nuage peu exploitable car il est en noir et blanc et trop épars. Il aurait fallu un deuxième passage pour améliorer la couverture et donc la densité du nuage de points résultants
- Par rapport au matériel commercial de type NavVis-VLX3 testé au château de Champs-sur-Marne, cette technologie apporte une valeur ajoutée surtout dans les milieux souterrains sans couverture GPS pour lesquels elle a été imaginée. Dans un milieu couvert par le GPS, son avantage est moindre



© CEA-List - CMN 1. Coupe transversale de la reconstruction éparsée du château d'If avec visualisation en couleur de chaque niveau 2. En rouge, trajet effectué pour procéder à l'acquisition 3D et en vert, géolocalisations successives. La carte permet d'évaluer l'exactitude du trajet en rouge 3. Vue du ciel de la reconstitution 3D éparsée de l'île 4. Dispositif développé par le CEA pour l'acquisition 3D en mouvement 5. Vue du ciel de la reconstitution éparsée de l'île avec visualisation en couleurs du niveau le plus élevé 6. Détail du château 7. Détail du dispositif d'acquisition

OBJECTIF

Comparer plusieurs méthodes d'acquisition et reconstruction 3D :

- Technologie RELEVANT du CEA-List
- Photogrammétrie et lasergrammétrie
- NeRF
- 3D Gaussian Splatting

CADRE JURIDIQUE

Convention d'expérimentation avec la start-up Lay3rs et le laboratoire List du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA).

PLANNING

Projet global : février à novembre 2023

Acquisitions 3D : février à avril 2023

RÉALISATIONS

- Acquisitions par RELEVANT en 2 heures en février
- Acquisition par photogrammétrie et lasergrammétrie des extérieurs et du cloître en 5 jours début avril – prestation réalisée par une société externe
- Reconstruction 3D du cloître par RELEVANT, des extérieurs de l'abbaye et du cloître par la méthode classique, du cloître et de certains éléments (chapiteaux, enfeu, statues, colonnes) par NeRF et 3DGS
- Tentative de recoller avec le modèle produit en 2018 par la société Akatimi
- Intégration réussie dans le logiciel Aioli du CNRS UPR/MAP en février 2024 à partir des données brutes

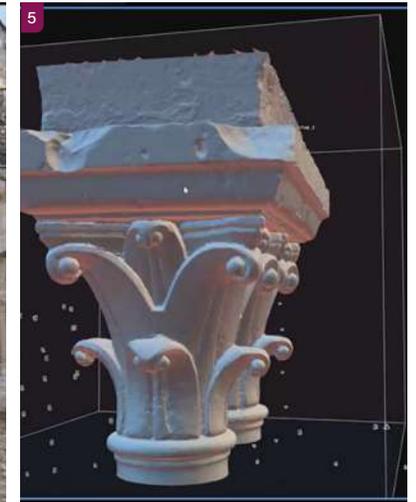
ENSEIGNEMENTS

Points positifs

- Premiers essais en NeRF et 3D Gaussian splatting. Ils ont montré l'intérêt de bien choisir les photos, donc de penser un cheminement
- Publication d'un article scientifique en novembre 2023 dans JFIG « CompoNeRF: Visualizing Scenes with Objects of Interest by Composing Neural Radiance Fields »
- Aquisition RELEVANT : création d'un modèle assez qualitatif en noir et blanc du cloître en un seul passage
- Intégration réussie dans le logiciel Aioli malgré le problème de recalage de données et un manque d'exif sur les photographies raw de Canon
- Réutilisation du modèle 3D de l'abbaye réalisé par Lay3rs pour un concours d'architecture

Difficultés et points d'amélioration

- Problème important de recalage de données entre lasergrammétrie et photogrammétrie qui n'a pas pu être diagnostiqué
- Impossible de recoller avec le modèle d'Akatimi créé en 2018 : ce dernier n'était pas géoréférencé car non demandé
- Pas de rapports d'exécution détaillés, donc pas de diagnostic précis sur les difficultés rencontrées



© Lay3rs - CMN 1 et 2. Modèle maillé texturé de l'abbaye

© Lay3rs et CNRS UPR/MAP - CMN 3. Nuage de points du cloître affiché dans le logiciel Aioli

© Lay3rs - CMN 4. Reconstruction 3D par la méthodologie NeRF du cloître 5. Reconstruction par photogrammétrie d'un chapiteau

© Lay3rs et CEA-List - CMN 6. Artefact lors de la reconstruction par photogrammétrie du cloître 7. Sculpture du cloître reconstruite par 3D Gaussian splatting 8A, 8B et 9. La même statue de Saint-Pierre reconstruite par 3D Gaussian splatting (8A), NeRF (8B) et photogrammétrie (9)

TOUR SAINT-NICOLAS DE LA ROCHELLE

OBJECTIF

Création d'une maquette en ligne à partir de plusieurs modèles pour faciliter le suivi de chantier avec le logiciel Aïoli.

CADRE JURIDIQUE

Prestation de la société BIMOTEP et partenariat avec le CNRS UPR/MAP.

PLANNING

Projet global : octobre 2023 à juin 2025

Acquisitions 3D : 2022 et juillet 2024

RÉALISATIONS

- Intégration et réconciliation dans le logiciel Aïoli de diverses données d'acquisition faites à des moments différents (photos, e57) pour constituer une maquette avec des photos spatialisées
- Acquisition d'un nouveau nuage de points à l'été 2024 et comparaison avec le nuage existant via le logiciel CloudCompare pour confirmer le diagnostic sur les mouvements de la tour

ENSEIGNEMENTS

Points positifs

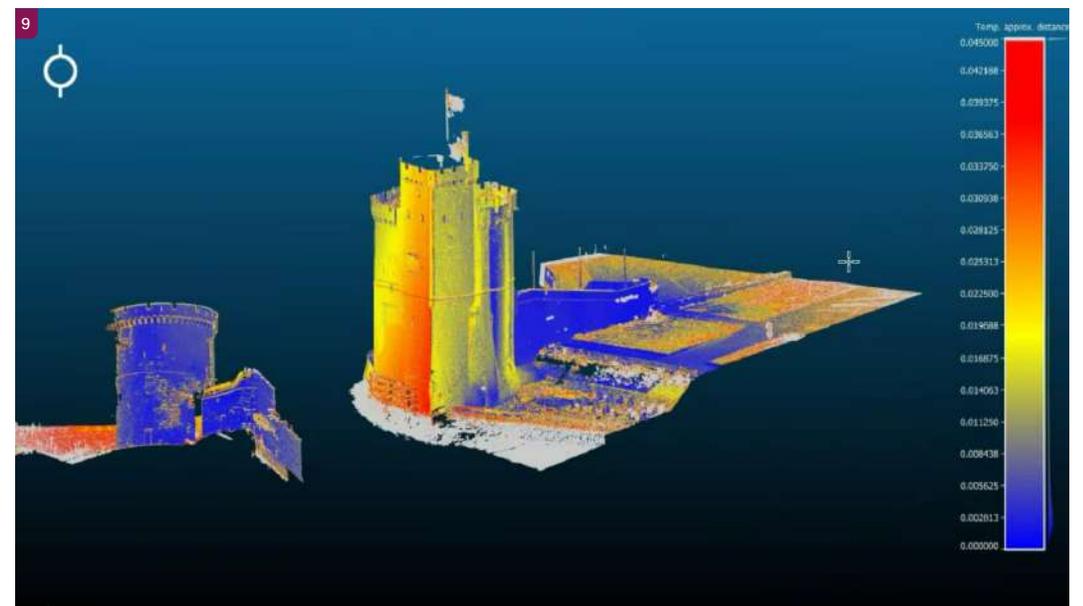
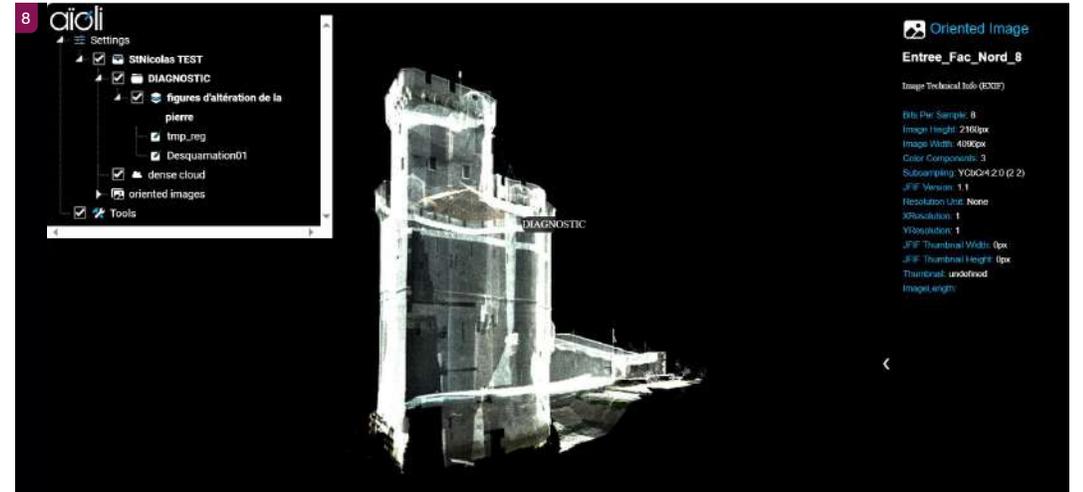
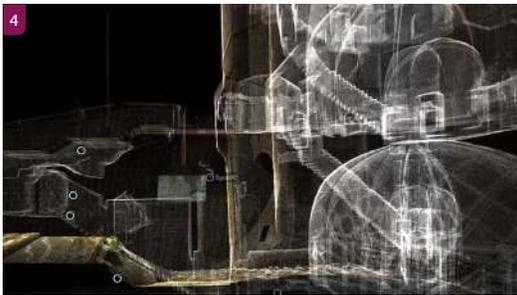
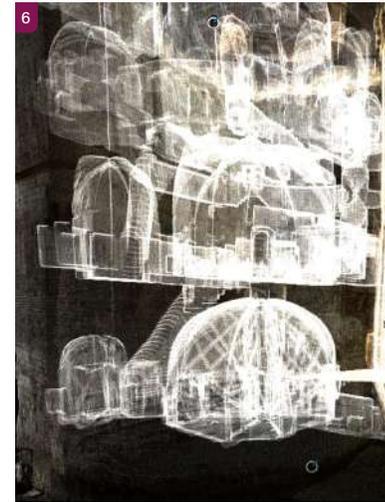
- Géoréférencement *a posteriori* des données de 2022 ayant permis la comparaison avec les données de 2024, ces dernières ayant été référencées dès l'acquisition
- Réconciliation dans le logiciel Aïoli de plusieurs jeux de données
- Test de la visualisation en ligne, souvent plus simple que la manipulation de

modèles 3D avec un logiciel installé en local

- Premier usage au CMN de nuages de points pour un diagnostic

Difficultés et points d'amélioration

- Livraison initiale très partielle : pas de géoréférencement, photos non fournies... car non demandés
- Limitations de CloudCompare pour comparer deux nuages de points : permet de mesurer un écartement mais pas un glissement
- Test d'autres outils de visualisation en ligne à mener, comme le logiciel commercial Nira



© BIMOTEP et UPR/MAP - CMN **1, 4, 6 et 8**. Nuage de points de la tour Saint-Nicolas affiché dans le logiciel Aïoli **3**. Vérification de la couverture photographique lors de l'acquisition par drone

© Université d'Amiens - CMN **5**. Vue du ciel d'un nuage de points de la tour Saint-Nicolas

© BIMOTEP - CMN **2**. Coupe de l'intérieur de la tour **7**. Exemple de diagnostic sur ortho-image **9**. Comparaison des nuages de points de 2022 et 2024 avec mise en couleurs des zones ayant bougé



GROTTE DE FONT-DE-GAUME

OBJECTIFS

Tester les possibilités de réutilisation d'un modèle 3D, à la fois pour des fins de conservation, de recherche et de médiation culturelle et scientifique :

- Disposer d'un modèle 3D plus précis et complet (comprenant notamment les galeries fermées au public) que celui réalisé en 2012
- Avoir un modèle 3D intérieur/extérieur du site
- Tester l'acquisition multimodale :
 - Lasergrammétrie pour l'extérieur et l'intérieur complet du site
 - Photogrammétrie pour les figurations, en les priorisant en fonction du temps maximum permis dans la grotte pour des raisons de conservation
- Afin de diffuser au plus grand nombre, créer des supports 360° pour réaliser des visites guidées à distance qui intègrent des spécificités propres aux grottes ornées : jeux de lumière, restitution d'élévations de sols, évocation des notions d'échelles, reconstitution d'éléments du passé (constructions médiévales sur la falaise)...

CADRE JURIDIQUE

Appel d'offres remporté par le groupement Capture4CAD et Rémi Flament EURL, avec Meandre Technologie comme sous-traitant.

Partenariat avec Dassault Systemes (Teleport).

PLANNING

Projet global : février 2023 à aujourd'hui

Acquisitions 3D : du 20 au 27 mai 2023

Acquisitions complémentaires : du 16 au 18 octobre 2024

RÉALISATIONS

- Lasergrammétrie
 - Terrestre : RTC360, BLK ARC, BLK360
 - Aérienne : BLK2FLY
 - Réutilisation des tuiles LiDAR de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) pour la vallée
 - Continuité intérieur-extérieur grâce au chien-robot SPOT de Boston Dynamics
- Éclairages de la société Meandre conçus pour le projet
- Photogrammétrie
 - Prototype d'APN Fuji pour toutes les figurations paléolithiques et, par manque de temps, pour une partie seulement des graffitis contemporains
 - Drone DJI M3E pour la falaise
- Reconstruction par photogrammétrie des figurations paléolithiques et de quelques graffitis contemporains
- Nombreux tests de reconstruction 3D multimodale
- Tests de prototypes d'éclairage aux Catacombes de Paris et à la grotte de Font-de-Gaume
- Réutilisation (partielle) réussie des données par Dassault Systemes (Teleport)



[Vidéo] Teaser de la numérisation de la grotte
https://youtu.be/6LWkR-KsO_k?feature=shared



[Vidéo] Dans les coulisses de la numérisation de la grotte
<https://youtu.be/2TEHLhSikxs?feature=shared>

ENSEIGNEMENTS

Points positifs

- Acquisitions 3D
 - Qualité exceptionnelle des photogrammétriques des figurations
 - Bon raccordement intérieur-extérieur des nuages de points
 - Bonne qualité du nuage de points dans la galerie principale
- Compréhension des limitations du matériel et de la méthodologie : ce projet se révèle être un concentré de toutes les difficultés que l'on peut rencontrer sur des projets de numérisation 3D
- Diagnostic et correction de certaines erreurs
- Transparence dans les échanges avec les prestataires, nous permettant de comprendre réellement le flux de travail et les problématiques
- De nombreuses collaborations et échanges avec des chercheur-euses, d'autres chef-fes de projet, des ingénieur-euses ayant travaillé sur des grottes ornées et l'équipe de Dassault Systemes

Difficultés et points d'amélioration

→ Méthodologie

- Absence d'inventaire exhaustif des figurations
 - Cinq figurations non acquises lors de la captation de mai 2023
 - Les graffitis contemporains les plus prioritaires n'ont pas toujours pu être acquis en photogrammétrie
 - » Inventaire complété en octobre 2023, puis affiné en 2024
- Absence de référence visuelle initiale
 - Parfois compliqué de valider un rendu : il est difficile d'avoir un souvenir exact des différentes nuances d'une portion particulière de paroi rocheuse
 - Complétude de l'acquisition impossible à vérifier au vu du volume de données (plus de 9 milliards de points)

- » Retours sur place et utilisation du Teleport de Dassault Systemes
- Visualisation
 - Outil CMN différent du prestataire → rendus différents
 - Matériel CMN inadéquat par rapport au poids des données
 - » Choix d'un même outil et commande de matériel adapté
- Absence de référence colorimétrique
 - Trois zones : extérieur, galerie principale, galeries latérales
 - Les couleurs issues des scanners et des APN sont hétérogènes
 - Quelle est la « vraie » couleur ?
 - » Non résolu à ce jour
- Outils de stockage et transfert des données pas assez performants : nombreuses livraisons corrompues
 - » Utilisation de disques durs envoyés par la Poste
 - » Depuis, le CMN est doté d'un serveur de stockage
- Segmentation du site et nommage des zones
 - Découpage pas assez fin pour optimiser le poids des modèles 3D
 - Difficile de retrouver le fichier correspondant à une zone particulière dans les centaines de fichiers de scan
 - » Non résolu à ce jour
- Lors de ses discussions avec d'autres projets similaires, l'équipe du CMN a réalisé que d'autres avaient rencontré les mêmes difficultés. Elles auraient pu être anticipées si les retours d'expériences étaient davantage diffusés

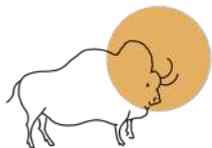
→ Technique

- Matériel d'éclairage lors de l'acquisition
 - Irisations violettes dans certaines zones (stalactites)
 - Surexposition dans les parties les plus exiguës
 - » Développement de nouveaux éclairages et nouvelles acquisitions
- Limites de l'acquisition

- Trous → pour de la médiation, bouchage à la main ou simulation des ombres via la création d'une « boîte » noire enveloppant le modèle ; pour un modèle scientifique → signaler l'incertitude et laisser les trous. En effet, pour ce dernier, il faut éviter les interprétations, qu'elles soient logicielles ou humaines
 - « Cailloux volants », marques des stations, objets fantômes → nettoyage manuel
- Limitations de Reality Capture
 - Modèles 3D générés dans des cubes
 - Chevrons noirs dans certaines zones (entre les stations)
 - Sur-interprétation de certains détails
 - Traits incongrus dus à la décimation
 - Mauvais texturage
 - » À part les cubes, problèmes non résolus, poursuite des tests
 - Cohérence entre les zones faites en photogrammétrie et en lasergrammétrie
 - Colorimétrie non homogène
 - Différence de rendu des détails à la frontière entre les zones
 - Mauvaise définition à cause d'une mauvaise gestion du dépliage des UV
 - Assemblages impossibles dans certaines zones par manque de photos autour de la figuration : de nouvelles acquisitions ont été faites

Ces difficultés posent plusieurs questions :

- Pertinence d'un modèle scientifique, sachant que la topologie d'une grotte rend les trous inévitables et que le modèle global en pleine résolution est illisible par les ordinateurs actuels
- Vérification de la complétude et de la conformité d'un rendu
- Objectivation de la qualité d'une texture



© Agence Galimey - CMN **1**. Numérisation par lasergrammétrie (scanner sur trépied) **2**. Numérisation par lasergrammétrie (SLAM) **3, 4 et 5**. Numérisation par lasergrammétrie dans les parties inaccessibles au public **6 et 7**. Numérisation par lasergrammétrie (via mât) **8 et 9**. Numérisation par photogrammétrie des figurations **10 et 11**. Numérisation par lasergrammétrie (via drone)

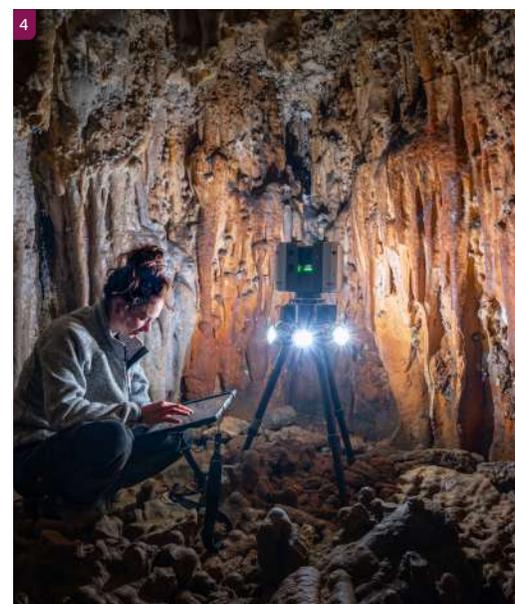
© CMN **13**. Réunion de travail pour établir un inventaire

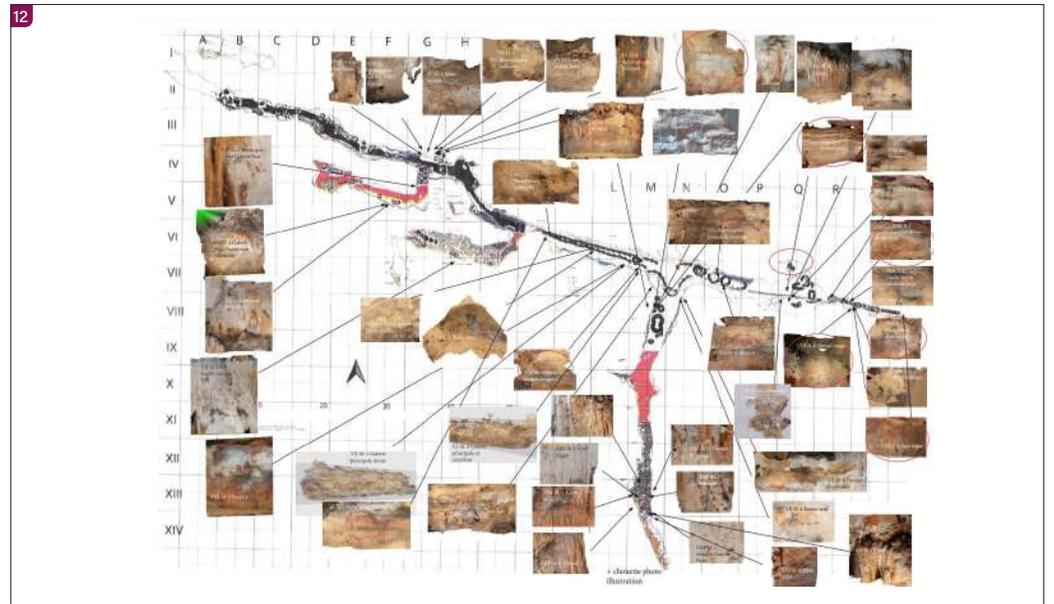
© Rémi Flament EURL - CMN **12**. Plan de la cavité avec les emplacements des figurations **14, 15, 16 et 17**. Captures d'écran des photogrammétries de quelques figurations

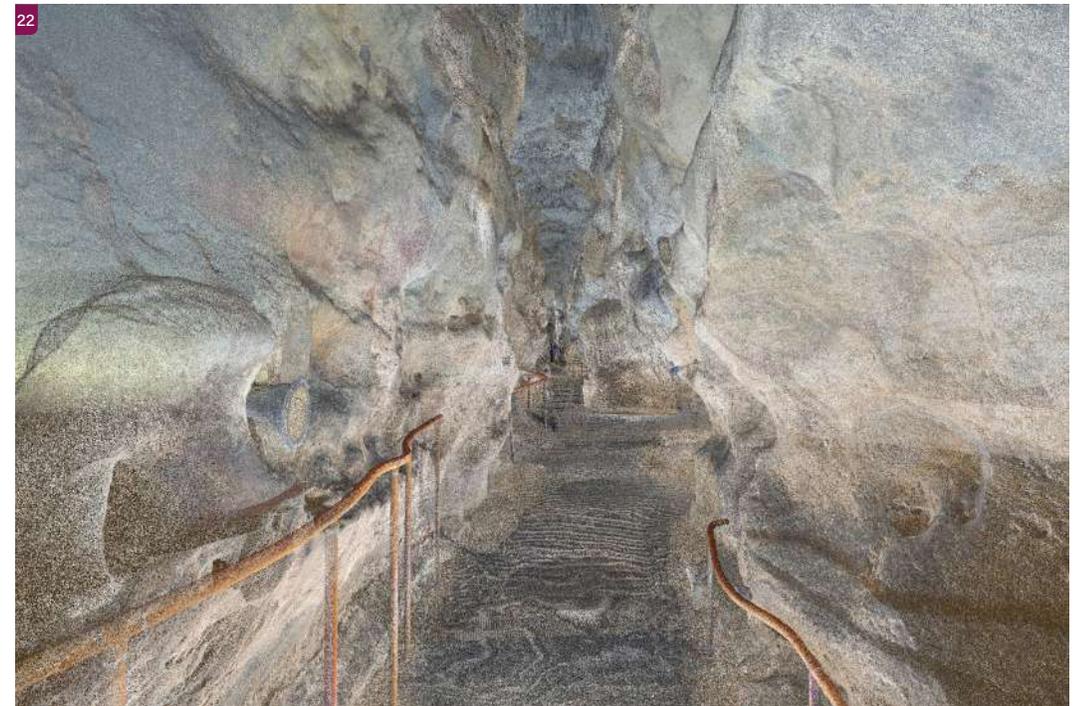
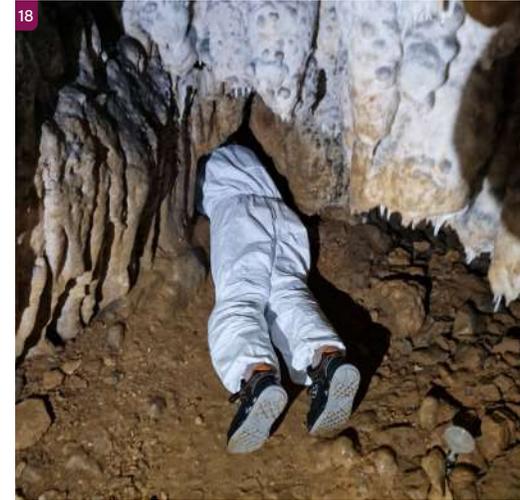
© CMN **18**. Accès difficile dans une galerie inaccessible au public **19**. Réalisation de captations 360° pour concevoir une visite virtuelle « utilitaire-catalogue » avec accès offline **20**. Réalisation de rushes pour la création d'une vidéo pédagogique **21**. Échange des consignes de sécurité des personnes et des œuvres avec France 3 pour un reportage dans le journal local **30 et 31**. Test d'un prototype d'éclairage et d'une caméra 360° (pour faire des visites « utilitaires ») dans les Catacombes de Paris

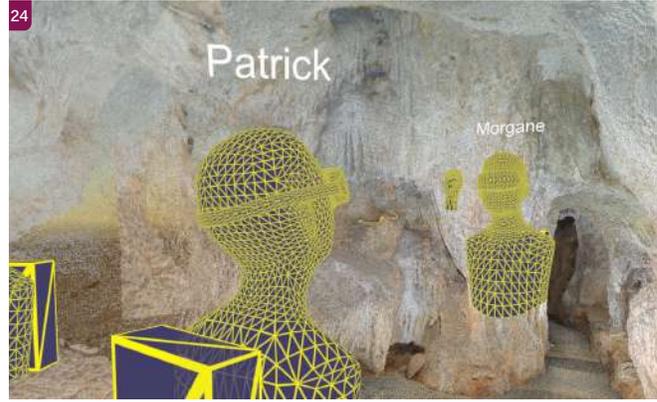
© Dassault Systemes **22**. Nuage de points visualisé à échelle 1 dans le Teleport en réalité virtuelle **23 et 24**. Session de travail dans le Teleport

© Capture4CAD - CMN **25**. Anomalie dans le modèle maillé texturé après décimation **26**. Différents rendus selon le logiciel utilisé **27**. Aspect violet sur les photographies du scanner **28**. Nouvelle numérisation pour ne plus avoir l'aspect violet avec différents tests **29**. Différence de couleurs (ocre pour la photogrammétrie, plus blanche pour les photographies issues du scanner)









CHÂTEAU DE CHAMPS-SUR-MARNE

OBJECTIF

Évaluer la pertinence des numérisations 3D pour les usages de conservation pour les objets et décors des collections :

- Numériser divers types de matériaux
- Comparer différents matériels d'acquisition
- Tester une visite virtuelle à usage professionnel : suivi de projet, maintenance, domanial

CADRE JURIDIQUE

Mécénat de compétences de la société HelloCapture.

PLANNING

Projet global : juin 2023 à décembre 2024

Acquisitions 3D : août à octobre 2023

RÉALISATIONS

- Numérisation 3D du château (extérieur/intérieur) et de quelques objets et décors avec un focus sur le plan de sauvegarde : priorité aux objets et décors complexes ou impossibles à évacuer en cas de sinistre
- Constitution d'une matériauthèque en numérisant diverses textures : stuc, tissu, cuivre, doré, porcelaine...
- Création d'une maquette BIM
- Production de plans et ortho-images
- Test de plusieurs matériels d'acquisition : SLAM (NavVis VLX3), lumière structurée (Artec Spider et Leo), etc.
- Création d'une visite virtuelle 3DVista à usage professionnel

ENSEIGNEMENTS

Points positifs

- Test de procédures et outils issus de l'industrie : visite virtuelle de référence en début de projet, logiciel StructionSite pour des annotations...
- Numérisation de l'extérieur du château et des intérieurs en 3 heures au NavVIS VLX3, matériel très innovant
- Bonne évaluation des problématiques de numérisation de décors et objets : boiseries du salon chinois, paravent en laque de Coromandel, fauteuil Jean de la Fontaine, rafraichissoir, commode Boulle...
- Échanges très transparents et réciproques entre les parties prenantes, rythme du projet volontairement échelonné (acquisition tous les mardis pendant plusieurs mois) pour favoriser le dialogue et les itérations
- Restitution le 25 juin 2023 aux équipes du monument et auprès du grand public lors de l'exposition « Le patrimoine passé au scan ! »

Difficultés et points d'amélioration

- Numérisation partielle des boiseries par manque d'anticipation de la maîtrise d'ouvrage
- Mise à disposition compliquée des données aux agents du monument : formation, visualisation, manipulation...



[Vidéo] Nuage de points du château de Champs-sur-Marne

<https://youtu.be/ELC5jP5TIRM?feature=shared>



5 mensuration des pièces HDC

nom	Surface	Volume
EDC		
C	2,54 m ²	8,58 m ³
CC	19,45 m ²	139,44 m ³
CD	2,68 m ²	8,92 m ³
C	9,14 m ²	29,36 m ³
saie a	14,78 m ²	50,63 m ³
saie b	4,89 m ²	15,47 m ³
C	16,44 m ²	53,49 m ³
saie de	10,22 m ²	33,99 m ³
saie	3,52 m ²	11,71 m ³
saie de	22,15 m ²	73,06 m ³
C	7,79 m ²	25,69 m ³
C	10,75 m ²	35,23 m ³
C	13,49 m ²	43,91 m ³
saie a	14,51 m ²	47,24 m ³
C	19,11 m ²	61,95 m ³
saie de	36,18 m ²	116,75 m ³
saie b	45,20 m ²	147,65 m ³
saie c	45,20 m ²	147,65 m ³
saie d	114,14 m ²	364,03 m ³
saie e	89,43 m ²	282,92 m ³
saie f	44,46 m ²	142,68 m ³
saie g	18,50 m ²	59,95 m ³
saie h	42,45 m ²	137,32 m ³
saie i	42,75 m ²	138,25 m ³

6A

6B

7

Rez de Chaussée



© HelloCapture - CMN 1. Résultat du traitement des photos prises du château de Champs-sur-Marne en suivant un plan de vol 2. Numérisation par lumière structurée d'un fauteuil Jean de la Fontaine 3. Modèle maillé non texturé (A) et texturé (B) 4. Numérisation par lasergrammétrie (SLAM) 5. Plan du rez-de-chaussée du monument réalisé grâce au nuage de points 6A et B. Maquette BIM 7. Ortho-image de l'escalier d'honneur (nuage de points)

HÔTEL DE LA MARINE

OBJECTIF

Évaluer des méthodes de rendu 3D (NeRF et 3D Gaussian Splatting) dans un environnement présentant plusieurs défis tels que les miroirs, dorures, bougies ou reflets.

CADRE JURIDIQUE

Convention d'expérimentation avec la société Lay3rs et le laboratoire List du CEA.

PLANNING

Projet global : novembre 2023 à juin 2024

Acquisitions 3D : nuits du 8 au 9 janvier et du 29 au 30 janvier 2024

RÉALISATIONS

- Acquisition de deux pièces (avec plusieurs types de matériel : Insta360, Canon EOS R5 sur trépied, Iphone dernière génération, Iphone plus ancien) en modes photo et vidéo
 - Le grand cabinet de travail d'une superficie de 63,1 m² et d'une hauteur sous plafond de 4,54 mètres
 - La salle à manger d'une superficie de 58,6 m² et d'une hauteur sous plafond de 4,44 mètres
- Par sécurité, dans le cas où le recalage n'aurait pas pu être réalisé, la société Imag'ing a scanné au laser avec un scanner LIDAR Z+F sur trépied et un scanner à lumière structurée Artec Leo, mais ces scans n'ont pas été utilisés
- Reconstruction par NeRF et en 3D Gaussian splatting
- Pour réaliser les vidéos de démo, 762 photographies pour le grand cabinet et 917 pour la salle à manger ont été nécessaires pour créer les rendus. Ces

photographies ont été prises avec un Canon EOS R5 sur pied

ENSEIGNEMENTS

Points positifs

- Rendus extrêmement impressionnants
- Restitution aux agents du monument avec des casques de réalité virtuelle
- Possible publication scientifique

Difficultés et points d'amélioration

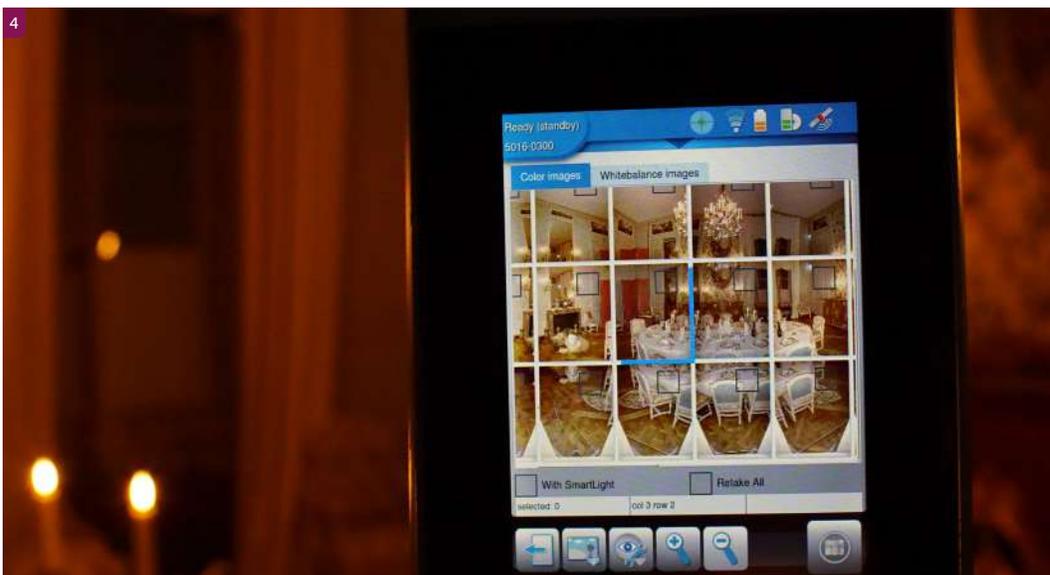
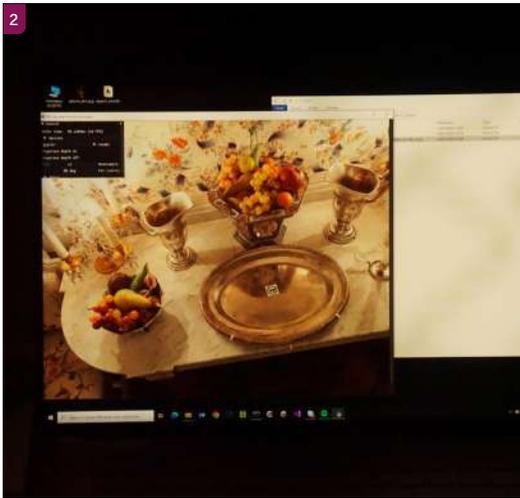
- Captations à l'Iphone non utilisées : qualité trop mauvaise à cause des conditions d'éclairage
- Manque de documentation sur ce qui a été fait



[Vidéo] NeRF réalisé à l'Hôtel de la Marine (janvier 2024)
<https://youtu.be/ZL1LoTRf6xo> © Lay3rs et CEA-List - CMN



[Vidéo] 3DGS réalisé à l'Hôtel de la Marine (janvier 2024)
<https://youtu.be/ocZaoaWGkao?feature=shared> © Lay3rs et CEA-List - CMN



© Lay3rs et CEA-List - CMN 1. Étalonnage colorimétrique des prises de vue 2 et 7. Rendu de la console en 3D Gaussian Splatting 3. Acquisition avec un appareil photo numérique (APN) 4. Écran de contrôle du scanner 5. Rendu du bureau en Gaussian splatting 6. Rendu du bureau par NeRF 8. Rendu de la console par NeRF 9 et 10. Rendu du salon en 3D Gaussian splatting 11. Restitution aux agents du monument en réalité virtuelle de la reconstruction en 3D Gaussian Splatting

ARC DE TRIOMPHE

OBJECTIFS

- Créer des impressions 3D pour une mallette pédagogique permettant de réaliser des ateliers hors les murs autour de la sculpture à destination des publics scolaire et empêché
- Tester la version « finale » du *Guide méthodologique pour la rédaction d'un cahier des charges*

CADRE JURIDIQUE

- Modèle 3D : consultation au terme de laquelle la société Art Graphique et Patrimoine a été retenue pour effectuer la prestation
- Impressions 3D : prestation de la société La Ferme 3D
- Valise technique avec découpe de la mousse au laser : prestation de la société Cirra Packaging

PLANNING

Projet global : septembre 2023 à mars 2025

Acquisitions 3D : du 21 au 23 mai, 3 juin et 13 juin 2024

RÉALISATIONS

- Prototypages d'impressions 3D sur la base des modèles en notre possession : site archéologique de Glanum, château et parc d'Azay-le-Rideau, objets 3D de l'Arc de triomphe achetés sur Sketchfab
 - Tests de textures et différents rendus
 - Conception du projet pédagogique
- Acquisition (Leica RTC360, Faro EDGE ScanArm HD, Creaform SPARK, Sony A7RIV, DJI Mavic 3, DJI Mavic 3M, antenne GNSS Spectra SP80) de l'Arc de

triomphe et d'objets

- Du 21 au 23 mai 2024 : acquisition au sol (167 positions de scan et 2 830 photos), 4 points de géoréférencement (RGF93-CC49 – NGF-IGN69)
 - Le 3 juin 2024 : drone (4 384 photos)
 - Le 13 juin 2024 : objets
- Reconstruction avec une résolution variant entre 5 millimètres et 2 centimètres/pixel
 - Génération de modèles stl pour impression 3D
 - Plusieurs itérations de reconstruction 3D (nettoyage) : première livraison le 18 juillet 2024 et livraison finale le 11 septembre 2024
 - Réutilisation de trois modèles 3D réalisés par la société IMA Solutions (conçues initialement pour une intégration dans la visite virtuelle du monument)
 - Conception de trois emporte-pièces par la société La Ferme 3D sur la base de modèle 3D issus de la numérisation
 - Réalisation des impressions 3D
 - Réception d'une valise technique pour déplacer et protéger les impressions avec découpe laser de mousse, sur la base des silhouettes des modèles 3D

ENSEIGNEMENTS

Points positifs

- Application réussie du cahier des charges standard à la fois pour optimiser la procédure d'acquisition et organiser toutes les données
- Optimisation de la procédure d'acquisition pour prendre en compte les fortes contraintes de l'Arc de triomphe : monument ouvert tout le temps au public, balisage, proximité des JO, un seul créneau de drone autorisé le matin avant 10 heures → les acquisitions ont d'abord été effectuées au sol, puis les manques ont été complétés par le drone – au lieu de tout faire en doublon dès le début
- Parallélisation des tâches lors des acquisitions sur le monument

- La livraison des données a été conforme aux spécifications : deux disques durs étiquetés, bonne articulation des données
- Après plusieurs tests de couleur, contrairement au blanc, le gris foncé semble être plus adapté pour faire ressortir les détails (et les défauts, une attention particulière doit ainsi être portée au post-traitement : polissage...). Le noir fonctionne aussi bien mais était trop clivant par rapport à la couleur du monument réel
- Bonne évaluation des caractéristiques respectives des différents matériaux utilisés pour les impressions 3D : bioplastique à base d'amidon de maïs, thermoplastique polyuréthane...
- Tests en conditions réelles des impressions 3D dans le cadre de l'exposition « Le patrimoine passé au scan ! » en septembre 2024

Difficultés et points d'amélioration

- Faute de trouver une maquette ou reconstitution d'assez bonne qualité, il a été nécessaire de numériser le monument bâti
- Difficultés sur les objets, notamment pour numériser le plan-relief du site (50 centimètres de côté) avec assez de précision pour qu'il soit imprimable à l'échelle 1/1. Une modélisation a dû être réalisée pour arriver au résultat souhaité
- Modèles stl très lourds et difficilement manipulables
- Pour la découpe mousse, seule la silhouette des objets est importante (largeur et hauteur). Cela a compliqué l'intégration de deux objets déjà imprimés car difficiles à mesurer
- Planning plus long que prévu (+ 5 mois)
 - Livraisons successives
 - Vérification des livrables



© La Ferme 3D - CMN **1 et 3**. Premier test de concept **2**. Tests de couleur sur une impression 3D **4**. Machine : imprimante 3D **6 et 18**. Impressions 3D d'éléments de sculpture **8**. Test et validation de l'utilisation de pâte auto-durcissante pour la partie « modelage » de l'atelier hors les murs **20A et 20B**. Prototypage de rosace en emporte-pièce pour la partie « modelage » (la version A avait des pétales trop courts ne permettant pas le modelage de la figuration, correction réalisée sur la version B)

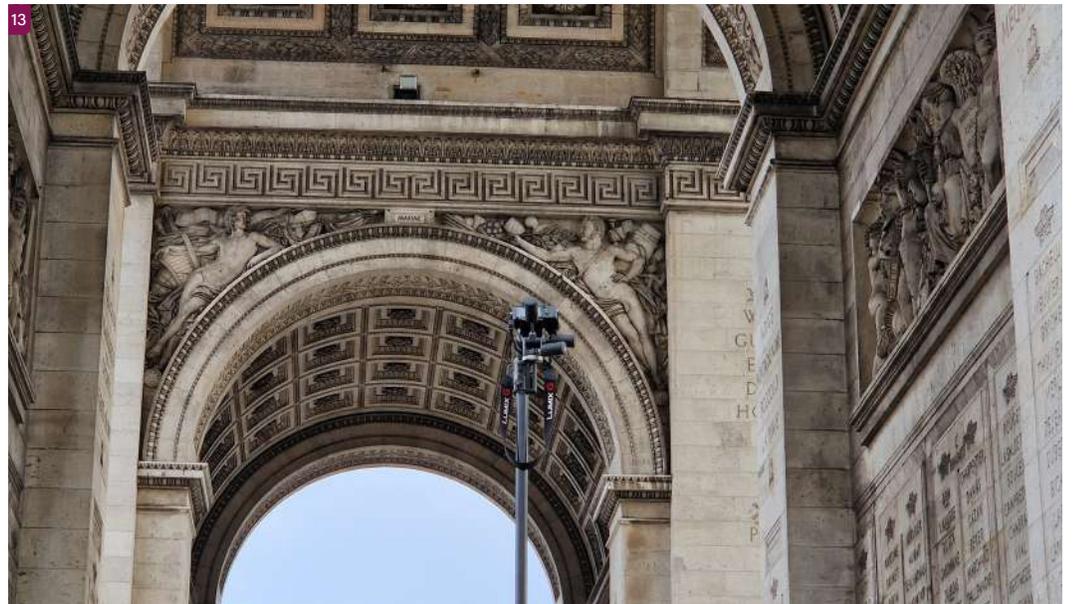
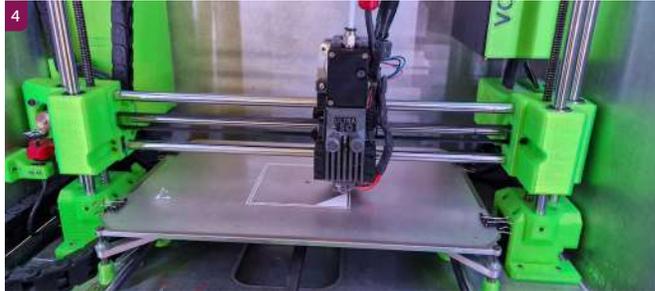
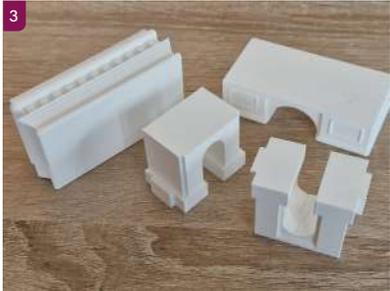
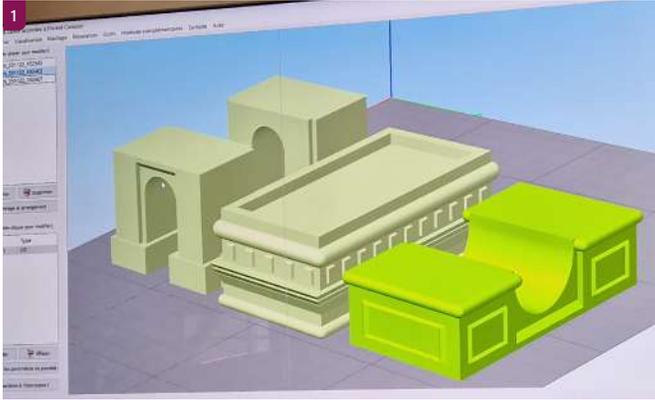
© IMA Solutions - CMN **5**. Modèle 3D d'un élément de sculpture

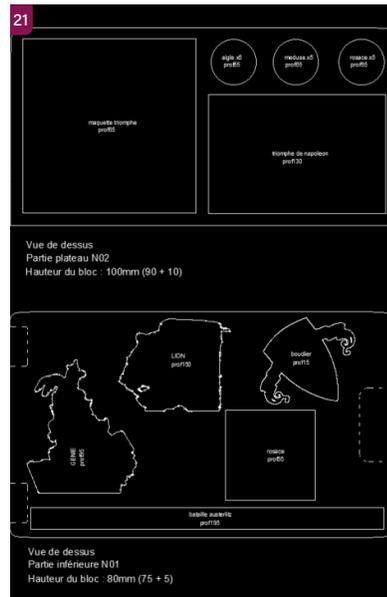
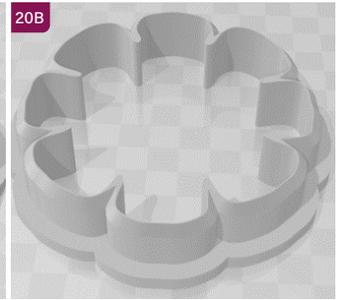
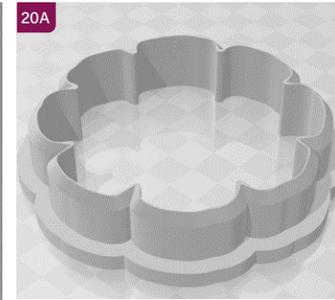
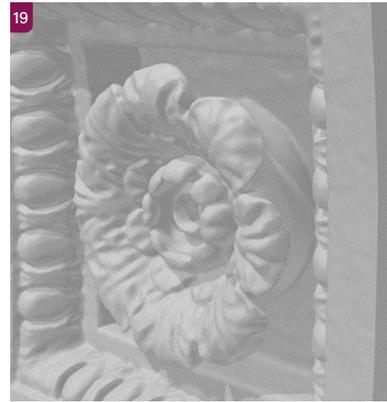
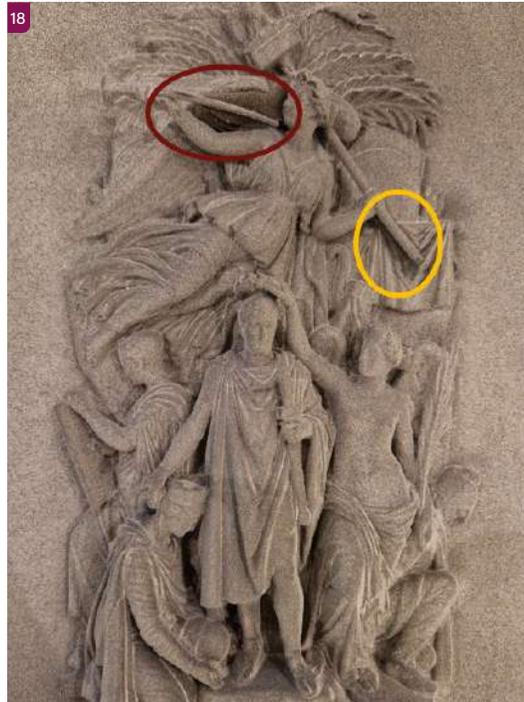
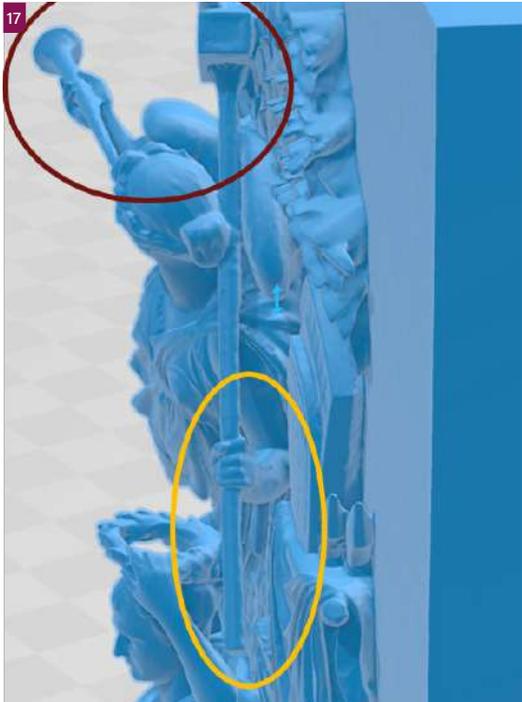
© La Ferme 3D (impressions 3D) et Agence Galimey (photographie) - CMN **7**. Prototypes

© Art Graphique et Patrimoine - CMN **9 et 10**. Numérisation par lasergrammétrie du monument **11, 12 et 13**. Numérisation par photogrammétrie aérienne et terrestre **14**. Nuage de points de l'Arc et du parvis **15**. Modèle maillé non texturé du monument **16**. Modèle maillé texturé du monument **17**. Modèle 3D d'un élément de sculpture (mise en évidence d'éléments fragiles à l'impression 3D) **19**. Modèle 3D d'un élément de sculpture

© CIRRA Packaging - CMN **21**. Dessin technique avec le positionnement futur des impressions 3D dans la mallette **22**. Refente des plaques de mousse brutes **23**. Retrait des chutes pour le montage **24**. Blocs avant assemblage **25**. Mallette sortie d'usinage

© Art Graphique et Patrimoine, IMA Solutions, La Ferme 3D et CIRRA Packaging - CMN **26**. Mallette avec les impressions 3D (plateau supérieur)





VILLA SAVOYE

OBJECTIFS

- Numériser le monument pour comparer plusieurs matériels et établir un modèle de référence du monument
- Test d'une visite virtuelle à usages professionnels : location d'espaces, repérages, entretien...

CADRE JURIDIQUE

Mécénat de compétences de la société Capture Solutions.

PLANNING

Projet global : septembre 2024 à janvier 2025

Acquisitions 3D : 9 septembre 2024

RÉALISATIONS

- Acquisitions 3D par lasergrammétrie de la villa Savoye au RTC360, BLK360 et BLK2GO
- Acquisitions 360° avec une caméra Matterport Pro 3

ENSEIGNEMENTS

Points positifs

- Parallélisation des tâches lors des acquisitions
- Possible réutilisation du nuage de points pour un cas d'usage initialement non prévu : la conception d'une exposition temporaire
- Intégration possible des photographies de la caméra Matterport dans la visite virtuelle pré-existante aux endroits où il pouvait y avoir des manques

- Restitution auprès du grand public lors de l'exposition « Le patrimoine passé au scan ! »

Difficultés et points d'amélioration

- Mise à disposition des données aux équipes du monument : visualisation, manipulation, etc

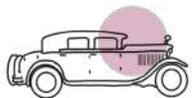


[Vidéo] Numérisation de la villa Savoye

<https://youtu.be/gKFEjSQ1dU8?feature=shared>



© Capture Solutions - CMN **1, 3 et 4**. Numérisation par lasergrammétrie (scanner sur trépied) de la villa Savoye **2**. Numérisation par lasergrammétrie (scanner dynamique) **5**. Écran de contrôle avec toutes les positions de la caméra 360° pour la visite virtuelle **6**. Vue du dessus du plan établi avec ses dimensions par la caméra 360° **7**. Panorama 360° avec ses dimensions **8**. Nuage de points de la villa **9**. Détail du nuage de points de la villa **10**. Vue de dessus du nuage de points **11**. Interview de l'administrateur du monument pour la réalisation d'une vidéo pédagogique



HÔTEL DE SULLY

OBJECTIFS

Créer un nuage de points pour le diffuser et faire des démonstrations pendant les Journées européenne du patrimoine 2024.

CADRE JURIDIQUE

Mécénat de compétences de la société HelloCapture.

PLANNING

Projet global : avril à décembre 2024

Acquisitions 3D : 23 août 2024

RÉALISATION

Acquisitions 3D au SLAM (NavVis VLX 3) des extérieurs et de quelques pièces de l'Hôtel de Sully (Salle des Gardes, appartements de la Duchesse, Orangerie) en 45 minutes.

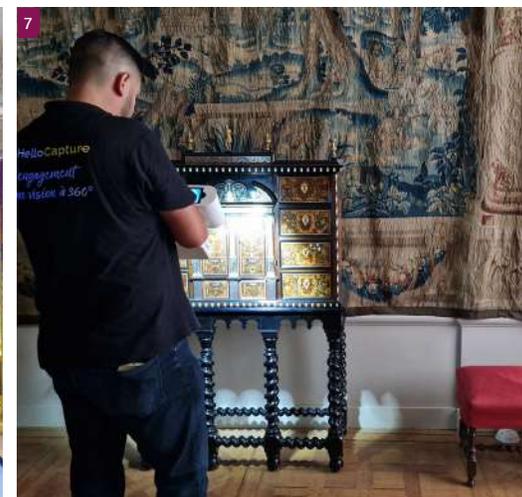
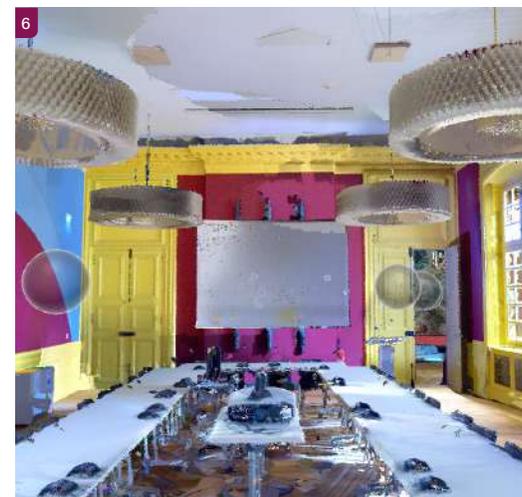
ENSEIGNEMENTS

Points positifs

- Efficacité de l'équipement pour numériser rapidement un site patrimonial
- Rapide obtention du nuage de points sur l'interface en ligne (le lendemain des acquisitions)
- Niveau de détails amplement suffisant pour le besoin exprimé
- Restitution auprès du grand public lors de l'exposition « Le patrimoine passé au scan ! »

Difficultés et points d'amélioration

- Aucune



© HelloCapture - CMN **1 et 2**. Numérisation par lasergrammétrie (SLAM) des extérieurs de l'hôtel de Sully **3**. Écran de contrôle du scanner **4**. Numérisation par lasergrammétrie (SLAM) des appartements de la Duchesse **5 et 6**. Nuage de points de la cour de l'hôtel et de la salle des Gardes **7**. Numérisation d'un objet des collections par lumière structurée **8**. Démonstration à l'occasion de l'exposition « Le patrimoine passé au scan ! Découvrez les monuments nationaux en 3D »

SITE DE CAP MODERNE

OBJECTIFS

- Numériser le site avec un focus sur le Cabanon de Le Corbusier, à des fins de médiation et de conservation
- Faire des captations 360° pour compléter le support 360° existant utilisé pour des visites guidées à distance

CADRE JURIDIQUE

Mécénat de compétences de la société Capture Solutions.

PLANNING

Projet global : octobre 2024 à février 2025

Acquisitions 3D : 18 et 19 novembre 2024

RÉALISATIONS

Acquisition par lasergrammétrie :

- Extérieurs du site au RTC360
- Intérieurs du cabanon, de l'atelier et du restaurant l'Étoile de mer au BLK360
- Intérieurs du cabanon au RTC360
- 66 stations, 6 points de géoréférencement avec une iCON ICG70T : environ 5h30 de travail
- Panoramas 360° à la caméra Matterport Pro 3

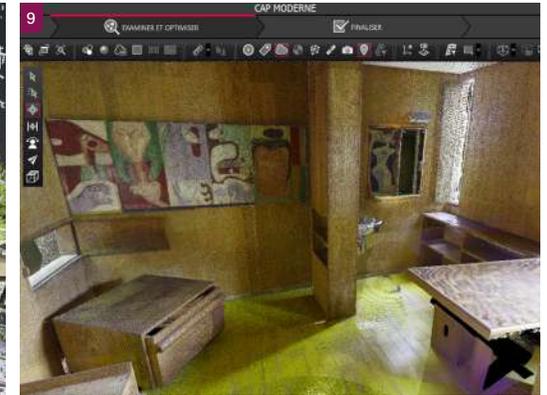
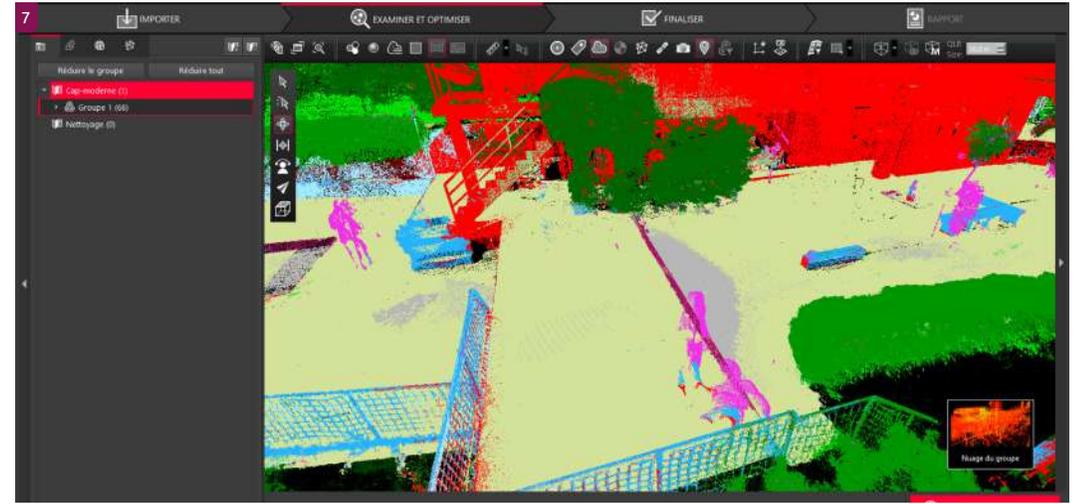
ENSEIGNEMENTS

Points positifs

- Bonne anticipation des contraintes du site
- Parallélisation des tâches

Difficultés et points d'amélioration

- Terrain très escarpé, intérieurs exigus et meublés
- Les captations 360° avaient pour but de compléter la visite, les stations à prendre étaient donc éparses. Or, la caméra Matterport impose d'avoir une continuité entre les espaces. Plusieurs « mini » visites virtuelles ont donc dû être créées
- Plusieurs positions d'acquisition dans le Cabanon pour avoir les volets dans différentes positions, afin de les rendre « dynamiques » dans la visite virtuelle



© Capture Solutions - CMN 1. Numérisation par lasergrammétrie 2. Captation 360° du site pour réaliser une visite virtuelle 3. Géoréférencement par le biais d'une canne GNSS 4. Cible pour le géoréférencement 5. Vérification du nuage de points lors de l'acquisition 6. Drone filmant des rushes pour la conception d'une vidéo pédagogique 7. Classification pour permettre le nettoyage des éléments du nuage de points dans le logiciel Register360 8, 9 et 10. Nuage de points des unités de camping, du Cabanon de Le Corbusier et de la villa E-1027

EMPREINTE ENVIRONNEMENTALE DE SERVICES IMMERSIFS

OBJECTIFS

Améliorer l'empreinte environnementale des expériences immersives utilisant des représentations numériques :

- Stocker les modèles 3D et les visites virtuelles, qui sont des données lourdes, dans un centre de données vert et comparer avec un centre de données traditionnel
- Modéliser l'empreinte environnementale de deux expériences immersives (visite à distance et expérience 3D temps réel) en réalisant une analyse de cycle de vie (ACV)
- Mesurer en temps réel les impacts de ces deux expériences et en tirer des règles d'éco-conception

CADRE JURIDIQUE

Modélisation et stockage : partenariat avec la start-up ZenT qui a créé un centre de données à hydrogène vert et s'est spécialisée dans l'éco-conception de systèmes informatiques. Le projet CEPiR (Cas d'Etude Pour un Immersif Responsable) nous a largement partagé ses travaux.

Les deux expériences immersives retenues ont été :

- Visite à distance réalisée avec la plateforme MyVisitLive de My Tour Live pour la vidéo 360° pré-enregistrée et le livestream 360°
- Expérience multi-supports d'Azay-le-Rideau avec la plateforme de Mira

My Tour Live et Mira ont largement partagé les détails des architectures logicielles de leurs plateformes.

PLANNING

Projet global : octobre 2022 à mars 2025

RÉALISATIONS

- Essais de stockage de modèles 3D et de visites virtuelles sur le centre de données de ZenT
- Étude technique des architectures logicielles des plateformes de My Tour Live et Mira
- Modélisation de l'empreinte environnementale des expériences immersives selon la méthodologie ACV
 - Choix des scénarios pour chaque expérience : lieu, nombre de participants, durée de l'expérience, équipements utilisés...
 - Choix des unités fonctionnelles, c'est-à-dire les éléments qui permettront de comparer les deux expériences
 - Création d'un fichier Excel permettant de jouer sur plusieurs paramètres
- Identification des leviers d'amélioration

ENSEIGNEMENTS

Points positifs

- Mise en œuvre complète d'une méthodologie ACV
- Identification de plusieurs erreurs dans les chiffres communément utilisés : pour les casques OLED, ils ne prenaient pas en compte l'évolution des processus technologiques
- Calcul de l'empreinte environnementale de deux expériences selon les 16 critères définis, une première dans l'écosystème culturel
- Comparaison de ces deux expériences
- Identification de leviers d'amélioration

Difficultés et points d'amélioration

- La faiblesse du réseau informatique du CMN n'a pas permis de transférer et donc de stocker des données chez ZenT
- Pour mesurer en temps réel l'empreinte des expériences, il faut pouvoir disposer de leur code source, or Mira et My Tour Live n'ont pas accès au code

source de certaines briques extrêmement pointues. Il a fallu donc renoncer à cette mesure

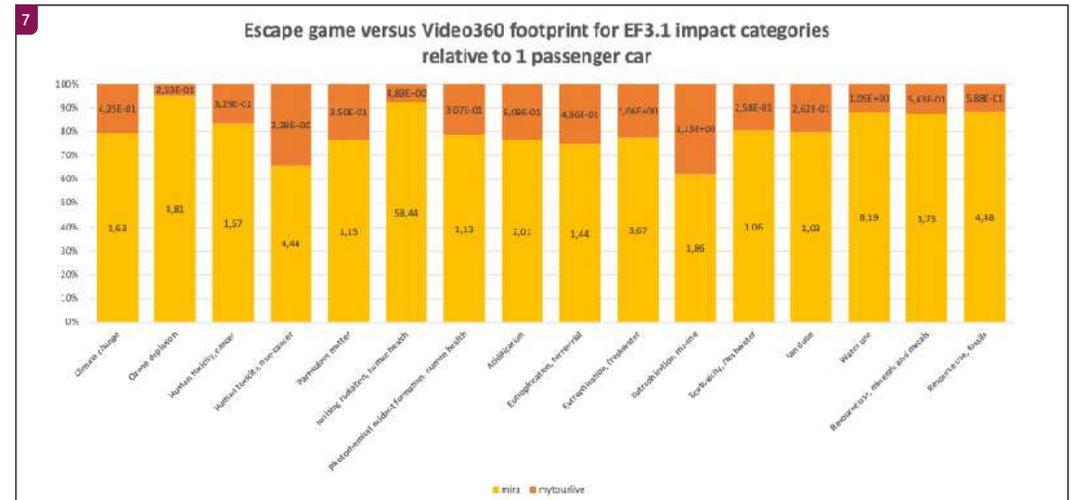
- Il est difficile d'identifier les bons canaux pour diffuser et valoriser les résultats de l'étude



Catégorie d'impact	Facteur de pondération [%]
Acidification	6.20%
Changement climatique	21.06%
Ecotoxicité, eaux douces	1.92%
Emissions particules fines	8.96%
Eutrophisation eaux douces	2.80%
Eutrophisation, eaux marines	2.96%
Eutrophisation, terrestre	3.71%
Toxicité humaine, cancérigène	2.13%
Toxicité humaine, non-cancérigène	1.84%
Radiations ionisantes	5.01%
Occupation des sols/Qualité du sol	7.94%
Ozone dépletion	6.31%
Formation d'ozone photochimique, santé humaine	4.78%
Épuisement des ressources abiotique, combustibles fossiles	8.32%
Épuisement des ressources abiotique, minéraux et métaux	7.55%
Besoin en eau	8.51%



Parameter	Value	Unit	Description
Headset_total_weight	0.504	kg	Poids du casque Oculus gen 2
Pue	1,3		Power usage effectiveness, mesure de l'efficacité des centres de données, puissance utile
P_smartphone	0,005	Kw	Puissance consommée moyenne active smartphone (capacité batterie/autonomie en heure)
P_vr_device	0,01	Kw	Puissance consommée active casque réalité virtuelle
Pbackend	10	W	Puissance des serveurs
Pcompute	45	W	
Vr_bat_wh	14	Wh	Capacité batterie Oculus
Vr_display_weight	0,14	Kg	Poids de l'écran OLED Oculus 7 pouces
Vr_life_cycle	360	Heures	Nombre de cycles utiles pendant la durée de vie du casque
Bitrate_pixelstreaming	10000	Kbit/s	Débit en kbit/s nécessaire à la transmission réseau avec la technologie pixel streaming
Nbofcores	10000		Nombre de cœurs utilisés dans une tranche de centre de données moyenne
Nbusers_phone	2		Nombre d'utilisateurs téléphone mobile pour service Mira
Nbusersfixe	2		Nombre d'utilisateurs utilisant une connexion fixe



© ZenT, Mira et My Tour Live - CMN 1. Entrée du tiers-lieu hébergeant le centre de données à hydrogène vert de ZenT 2. Panneaux solaires alimentant le centre de données 3. Liste des 16 impacts et poids de chacun dans le calcul de l'impact environnemental global 4. Exemple de pile à hydrogène 5. Arbre des impacts (revue en cours) 6. Liste des paramètres clés pour l'expérience immersive de Mira (revue en cours) 7. Comparaison des impacts des deux expériences en km véhicule équivalent (revue en cours)

Annexe 2

Quelques cas d'usages observés ou testés

Domaine	Cas d'usage	CMN	Exemples	Type de modèle (le cas échéant, selon nos déductions)
Médiation	Expériences immersives	Oui	« Tour Eiffel Effect » (Mira) « Horizon de Khéops » (Excurio), « Survol de la France » (Flyview et CMN), « Les derniers remparts, Carcassonne 1304 » (Excurio et CMN)	Modèle maillé texturé ou nuage de points
Valorisation	Impressions 3D à vendre en boutique	Non	Musée Arles Antique, grottes d'Azé	Modèle maillé non texturé
Valorisation	Aide à la décision par les élus	Non	Abri du Roc-aux-Sorciers, Cosquer Méditerranée	Modèle maillé texturé
Valorisation	Décors virtuels	Non	Château de Chantilly (« The Gray Man » de Netflix)	Modèle maillé texturé
Valorisation	Événementiel	Oui	Place de la Concorde (ouverture des JO 2024), Arc de triomphe (<i>Wrapped</i>)	Nuage de points
Médiation	Maquettes pour les mal et non voyants	Non	Musée du Prado	Modèle maillé
Médiation	Fac-similés ou maquettes	Oui	Cosquer Méditerranée, Grotte Chauvet 2 - Ardèche, Lascaux IV Centre International de l'Art Pariétal, Musée d'Archéologie Nationale, musée archéologique d'Enserune	Modèle maillé ou nuage de points
Médiation	Dispositifs numériques	Oui	Tours et remparts d'Aigues-Mortes, abbaye de Cluny	Tous les types
Médiation	Remplacement temporaire d'objets prêtés	Oui	Musée archéologique d'Enserune	Modèle maillé
Médiation	Reconstitutions sonores	Non	Palais des Papes d'Avignon	Modèle acoustique
Médiation	Scénographies et parcours de visites	Non	Cité de l'Architecture et du Patrimoine	Nuage de points ou maquette
Conservation	Réaménagement	Non	Notre-Dame de Paris	Tous les types
Conservation	Archives	Non	Cité de l'Architecture et du Patrimoine, Musée d'Archéologie Nationale, Théâtre d'Orange	Tous les types
Conservation	Plans et géométraux	Oui	Pratique la plus courante au CMN	Nuage de points
Conservation	Restauration	Non	Notre-Dame de Paris	Modèle maillé texturé
Conservation	Entretien	Non	Théâtre d'Orange	Maquette BIM ou nuage de points
Conservation	Constats d'état	Non	Métropole de Metz, département du Var, temple de Karnak	Modèle maillé texturé
Conservation	Aide au diagnostic	Oui	Tour Saint-Nicolas de la Rochelle, Notre-Dame de Paris, métropole de Metz, département du Var	Nuage de points
Recherche	Divers : test de nouvelles technologies, analyse du monument, comparaisons...	Oui	Grotte des Combarelles, de Font-de-Gaume, de Chauvet et Cosquer, abri du Roc-aux-Sorciers, château d'Azay-le-Rideau, site de Cap Moderne	Tous les types

Annexe 3

Guide méthodologique pour la rédaction d'un cahier des charges

CONTEXTE DE L'OPÉRATION

Description de l'opération et du site. Par exemple : « Dans le cadre de son programme de développement de l'accessibilité de son siège, le Centre des monuments nationaux souhaite numériser en 3D l'Hôtel de Sully afin de réaliser une maquette tactile à destination des visiteurs mal- et non-voyants ».

PÉRIMÈTRE DE L'ACQUISITION

OBJECTIF GÉNÉRAL DE L'ACQUISITION

Décrire l'objectif général de l'acquisition :

- Objectif d'archivage
- Objectif de conservation
- Objectif de recherche
- Objectif de médiation et de valorisation
- Etc

Indiquer le principal livrable attendu : nuage de points, plan, maquette ou encore modèle 3D.

PÉRIMÈTRE DE L'ACQUISITION ET RÉOLUTIONS ATTENDUES

L'acquisition d'architecture porte sur les bâtiments et les ouvrages suivants :

Indiquer le périmètre général du relevé des bâtiments, les bâtiments concernés avec leur nom, la délimitation de la parcelle, les zones de terrains, les cours ou les espaces intérieurs, les caves et sous-sols, les toitures et cheminées, les ouvrages divers et les infrastructures à relever, les plans de détails souhaités, indiquer quels ouvrages techniques sont à relever, préciser si les pathologies

visibles sont à relever, fissures, déformations, etc.

Indiquer les résolutions attendues.

Préciser quels sont les documents et acquisitions fournies par la maîtrise d'ouvrage à intégrer à la nouvelle acquisition :

→ Récupération des données des fonds marins (nuage de points, cartes marines...)

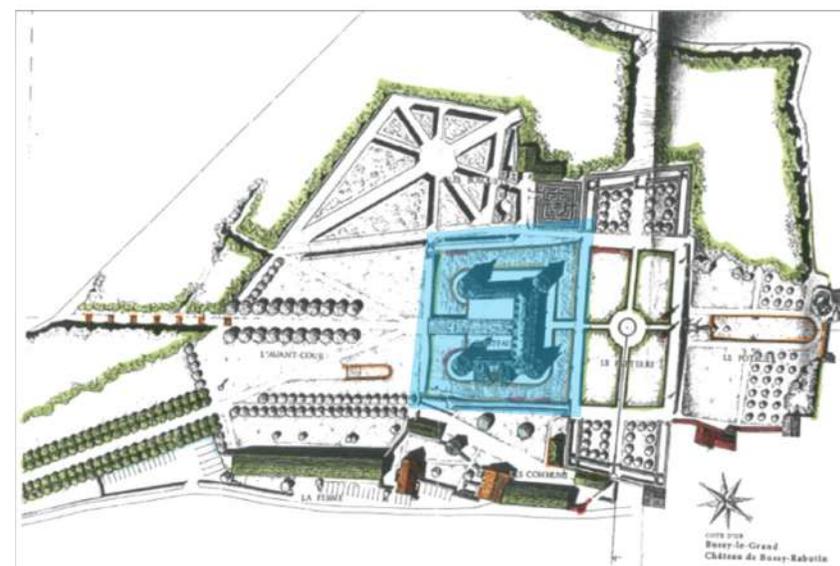
→ Récupération des diagnostics effectués par les bureaux d'études ou archéologues, composition du sol, données issues des forages...

Pour caractériser le périmètre :

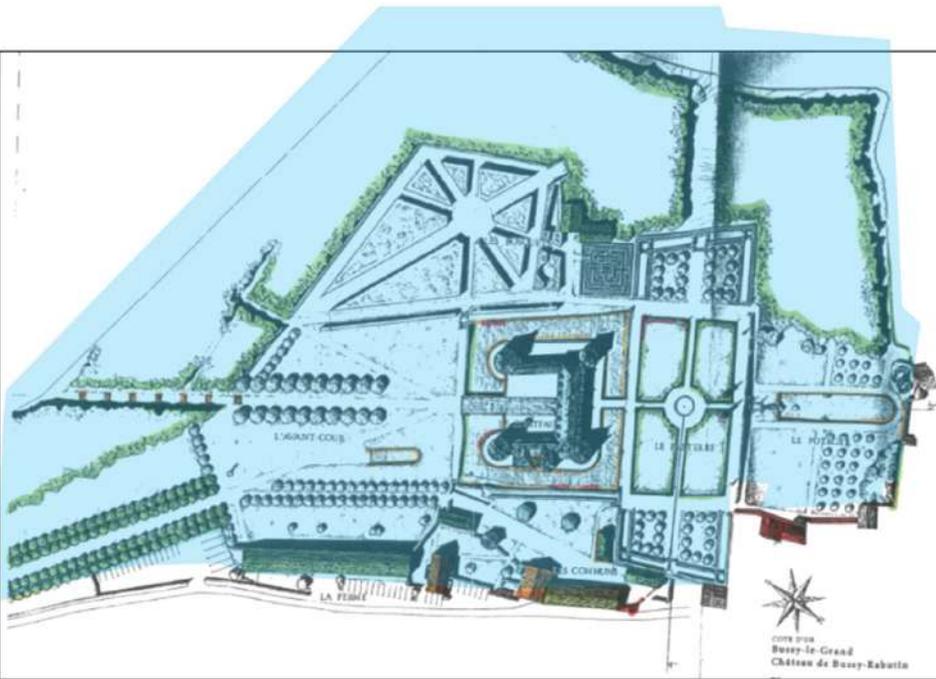
→ Insérer des plans, même sommaires, délimitant le périmètre (voir exemple ci-dessous)

→ Donner des informations de superficies

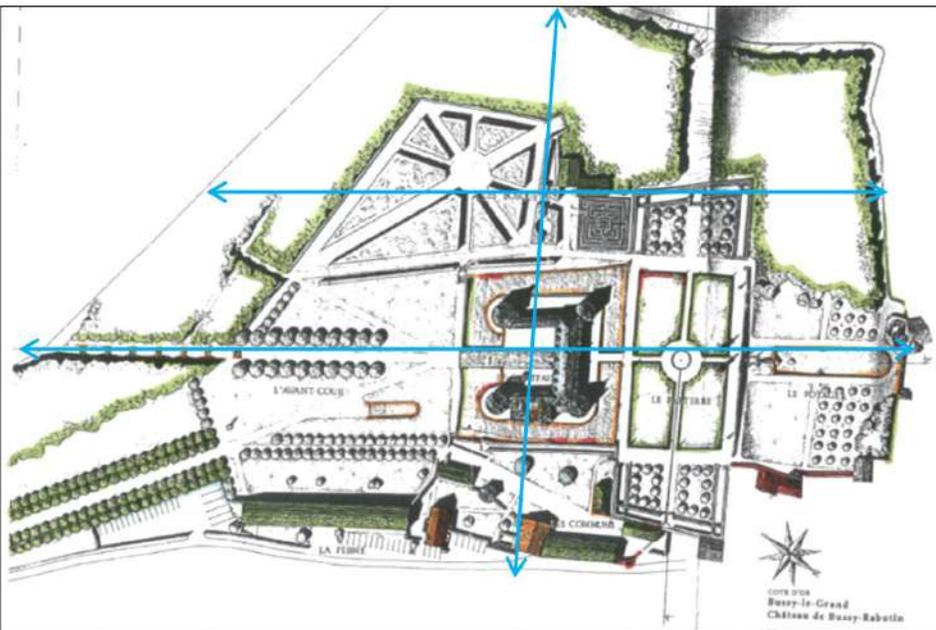
Insérer des photographies, surtout des parties plus détaillées ou nécessitant un traitement spécifique.



Exemple de périmètre pour l'acquisition d'architecture © Centre des monuments nationaux



Exemple de périmètre de l'acquisition topographique © Centre des monuments nationaux



Exemple de repérage des coupes de terrain (si demandées)

Découpage en tranches de l'acquisition :

Préciser si un découpage en tranches du relevé est nécessaire (monuments de grande taille ou nécessité opérationnelle), en indiquant clairement les différents périmètres d'acquisition, en nommant les salles, le tout pouvant être complété de pièces graphiques, plans, coupes, élévations, photographies, etc.

Préciser si une première tranche doit servir d'essai témoin pour validation par la maîtrise d'ouvrage de la méthodologie d'acquisition sur les tranches suivantes.

L'acquisition sera complétée par la réalisation d'un **reportage photographique** :

Peut rester sans objet

Indiquer le périmètre général du reportage photographique, précisez les zones, les espaces, les élévations et les bâtiments concernés : la parcelle, les cours ou les espaces intérieurs et extérieurs, les caves et sous-sols, les toitures et cheminées, les ouvrages divers, les façades, les infrastructures et les détails à photographier, indiquer approximativement le nombre de photos attendu, et le nombre de photos par espace ou par façade, etc.

Noter que le reportage pourra être réalisé avec des panoramas 360° qui offrent l'avantage de ne laisser aucun angle mort et qui maintenant proposent des résolutions équivalentes aux appareils photographiques numériques.

L'acquisition sera complétée par la réalisation d'**ortho-images** :

Peut rester sans objet

Indiquer le principe général des ortho-images à réaliser, préciser les surfaces concernées, les façades, les murs ou pignons, les peintures murales, les lambris les élévations intérieures et extérieures, les détails concernés, lister le nombre de photos attendues et le nombre de photos par espace ou par façade, etc.

Les préciser en annexes.

CONDITIONS D'EXÉCUTION

SÉCURITÉ

Conditions générales

Le Titulaire devra se conformer aux préconisations du Centre des monuments nationaux, mises en application par le personnel travaillant dans le monument.

Le personnel du Titulaire doit observer les règles de tenue et de comportement spécifiques à la nature patrimoniale du site, et à son ouverture au public. Il devra respecter les interdictions de fumer et de vapoter.

Le Titulaire se doit d'interdire l'accès à toute personne autre que celles listées dans le dossier de candidature remis.

Le Titulaire devra présenter des profils de personnel spécifiquement formé pour la gestion temporaire de la voirie lorsque l'intervention le nécessite.

L'acquisition des données aériennes sera impérativement précédée de toutes les demandes d'autorisation de survol transmises aux autorités compétentes. Les conditions météorologiques devront être examinées en amont du vol afin de garantir la sécurité du public et la qualité de l'acquisition. Le Titulaire devra mentionner les alternatives au cas où les acquisitions aériennes ne peuvent être réalisées. Les prises de vues par drone seront réalisées par un télépilote certifié (DGAC).

Les zones de survol et les zones d'intervention pour les prises de vues terrestres et via mâts télescopiques feront l'objet de mises à distance et balisages clairement signalés vis-à-vis du public. La préparation de l'acquisition, mise en place de cible, installation de mâts, géo-référencement, etc. devront éviter toute coactivité avec le public.

Le Titulaire fournira un planning détaillé, heure par heure si besoin, permettant d'évaluer les impacts de l'acquisition sur la sécurité et la coactivité avec le public ou d'autres intervenants.

Spécificités liées au monument

Indiquer le nombre de jours maximal de captation compatible avec la vie du

monument, en fonction des jours de fermeture, des événements, des saisons, etc. Pour les grottes, ajouter les conditions spécifiques applicables.

CONFIDENTIALITÉ

Le Titulaire est tenu au secret professionnel et à l'obligation de discrétion pendant toute la durée d'exécution de l'opération.

POLITIQUE RSE (RESPONSABILITÉ SOCIÉTALE DES ENTREPRISES)

Le Titulaire devra se conformer à la politique RSE qu'il aura fournie dans son dossier et en respecter les engagements tout au long de sa prestation.

Cette politique devra aborder les points environnementaux suivants :

- Efforts de diminution de l'impact carbone : transport (flotte de véhicules électriques), consommation d'énergie, politique de stockage de données du Titulaire et de ses fournisseurs impliqués dans la prestation). Le Titulaire devra a minima préciser ceux avec lesquels il collaborera dans le cadre de la prestation.
- Préservation des ressources : politique de réemploi en amont et en aval de son activité, recyclage du matériel obsolète, politique en matière de gestion de l'eau (récupérateur d'eau de pluie, mousseur, réducteur de débit)
- Biodiversité : quels moyens mis en œuvre pour adresser des problématiques de préservation des espèces vivant sur le site numérisé (exemple : périodes de nidification, nuisances sonores ou visuelles...)
- Préservation des fonctions écologiques des sols (exemple : lombricomposteur dans les locaux, panier de fruits bio pour les salariés...)
- Pollution : gestion des déchets avec le mode 5 flux ou tri 8 flux, limitation du plastique
- Autres actions ou sensibilisation des salariés : MOOC Numérique Responsable, réalisation de fresque du numérique/climat, norme ISO 26000, réalisation d'éco-challenges...
- Utilisation de référentiels (exemple : référentiel NIG), labels obtenus, intégration de clauses environnementales dans les appels d'offres du Titulaire...

Et les points sociaux suivants :

- Enjeux égalité femme-homme (label, suivi), politique de recrutement, mise en place d'un congé menstruel
- Diversité : RTT solidaire, inclusion des personnes en situation de handicap et politique d'inclusion des prestataires du Titulaire impliqués dans la prestation
- Transparence des pratiques : charte fournisseur
- Dialogue social : représentant du personnel, CSE...
- Politique de mécénat

Elle devra indiquer sa déclinaison pratique pour la prestation.

MÉTHODOLOGIE

CALAGE DES PRESTATIONS

Il est prévu au minimum une réunion de calage pour validation technique des prestations et des périmètres d'intervention avant exécution des prestations.

Cette réunion définira :

- Le planning détaillé des interventions prenant en compte les impératifs de sécurité, de conservation et de coactivité, notamment avec le public. Elle permettra de déterminer notamment les besoins en balisage ou en agents volontaires en cas d'acquisition en dehors des horaires de travail du monument. Le Titulaire fera une proposition qui sera revue par le CMN
- Le découpage (segmentation) des assemblages en fonction des spécificités du site, ainsi que le nommage des différentes parties. Le CMN fera une proposition qui sera revue avec le Titulaire pour prendre en compte ses contraintes techniques et qui sera matérialisé par un plan de segmentation
- Les outils utilisés pour suivre l'avancement et visualiser les livrables

La réunion déterminera aussi si :

- Un essai témoin est nécessaire pour valider la méthodologie d'acquisition.

Cet essai témoin pourra avoir lieu lors d'une mise au point entre la maîtrise d'ouvrage, la maîtrise d'œuvre et le Titulaire avant le démarrage de l'acquisition

- Un test colorimétrique est nécessaire pour déterminer la référence à appliquer
- La création d'une visite virtuelle de repérage est nécessaire. Selon la complexité et l'accessibilité des lieux à acquérir, une telle visite pourra être pertinente pour suivre l'avancement et vérifier la complétude des livrables. Elle devra être mise en correspondance avec le plan de segmentation
- La création d'une acquisition maîtresse est nécessaire. Il s'agit d'une acquisition de moindre résolution qui servira de référence pour les acquisitions ultérieures, c'est particulièrement utile par exemple si les acquisitions sont complexes, vont s'étaler dans le temps ou faire appel à des intervenants différents

SUIVI DE L'AVANCEMENT

Des réunions à distance ainsi qu'éventuellement une réunion en présentiel seront fixées selon les besoins et les progrès de l'avancement.

Elles se baseront sur le plan de segmentation et donneront lieu si besoin à une annotation de la visite virtuelle de repérage.

La recette des livrables donnera lieu à une réunion en présentiel, avec présentation et revue des divers éléments.

PRÉCONISATIONS

PRINCIPE D'INCRÉMENTATION - RÉUTILISATION DES NUAGES DE POINTS

Le Titulaire devra garantir la possibilité pour le CMN de compléter ou mettre à jour ultérieurement l'acquisition de la présente opération afin de pouvoir disposer de la représentation la plus complète du monument.

Dans le cas où des acquisitions antérieures sont fournies par le CMN, il s'agira de s'appuyer sur les rendus existants, d'en utiliser les mêmes critères de précision

et de résolution, afin de pouvoir intégrer les nouvelles acquisitions dans une même représentation. Le Titulaire devra ainsi veiller à la cohérence des formats choisis.

Ainsi pour faciliter le recollement avec des acquisitions existantes ou à venir, le Titulaire devra :

- S'inscrire dans le même système de coordonnées (projection Lambert93) et de nivellement topographique que les prestations existantes. Si une polygonale topographique a déjà été créée, le Titulaire devra l'utiliser et si besoin la compléter
- Structurer et segmenter les nouveaux nuages de points en respectant le même découpage et la même nomenclature pour l'ensemble des zones intérieures et extérieures concernées (toitures comprises)
- Anticiper un recouvrement partiel avec les acquisitions à venir (exemple : seuils de porte), prévoir les repères visuels (exemple : zone colorée) permettant le recollement et les documenter très précisément
- Prévoir des jalons réguliers avec des livrables 3D, de manière à vérifier au fur et à mesure les compatibilités

Si d'autres acquisitions sont déjà prévues, il est bon de prévoir en plus une acquisition maîtresse pour faciliter les recollements ultérieurs. Si le recollement avec les acquisitions existantes n'est pas faisable, le Titulaire devra en documenter les raisons.

GÉORÉFÉRENCEMENT

Afin de simplifier la réutilisation de données de numérisation au cours de la vie d'un monument, et permettre ainsi la comparaison de données de scan 3D acquises à différentes périodes, il est impératif que le Titulaire assure une livraison de données géoréférencées dans un système de coordonnées standard. Les coordonnées seront définies dans le système RGF 93 Conique Conforme (projection Lambert 93) (RGF93, code EPSG:2154). Le cas échéant, la conversion entre les systèmes existants des acquisitions fournies avec le système RGF 93 sera à réaliser pour la mise en cohérence des données.

Les altitudes doivent être décrites dans le système de nivellement en vigueur, NGF-IGN69 (ou IGN-78 pour la Corse), qui permet la conversion de hauteurs par

rapport à l'ellipsoïde de référence WGS84 en altitudes par rapport au niveau de la mer, corrigé par des surfaces de conversions décrites par l'IGN. Le cas échéant, la conversion entre les systèmes existants vers le nivellement NGF IGN 69.

La tolérance de précision souhaitée pour le géoréférencement est de 5 millimètres.

ACQUISITIONS

Spécifications générales

Concernant **la densité**, les résolutions spatiales suivantes devront être appliquées :

Préciser ici les résolutions souhaitées en cm ou mm par pixel

→ Détailler par zone : bâtiment principal, toits, faitages, mobilier intérieur, parc...

→ Distinguer les zones qui ne seront captées que par voie aérienne, dans ce cas la résolution est appelée *Ground Sampling Distance* (GSD)

→ Dans le cas de zones boisées, la résolution ne s'applique pas aux arbres

→ Veiller à ce que chaque zone soit illustrée par une photo. Ne pas hésiter à indiquer sur une photo le plus petit détail qui doit être visible : texte, joint, partie de décor, etc.

→ Respecter le découpage de zones précisé dans le chapitre Périmètre de l'acquisition et résolutions attendues, page 148

La résolution doit correspondre à la taille du plus petit détail qui devra être visible sur le modèle. Comme la durée d'acquisition est fonction de la résolution, il est recommandé de découper en zones pour isoler les parties requérant un niveau de détail plus élevé plutôt que d'aligner tout sur le plus haut niveau de détail.

Pour les zones acquises au drone, il faudra voir avec le Titulaire comment procéder selon la configuration des lieux car un drone ne peut pas changer de GSD en cours de vol : il faudra soit dupliquer la zone nécessitant plus de détails, soit tout aligner sur le niveau de détail le plus élevé.

Si une résolution ne peut être respectée (exemple : elle nécessiterait de voler trop près du monument ou des autorisations trop complexes à obtenir, ou bien la zone est trop exigüe), le Titulaire devra l'indiquer explicitement dans les réserves de son dossier de réponse et proposer des alternatives.

Une attention particulière devra être apportée à **la représentation des textures** du site, qui informent sur les conditions de surface des structures bâties ou sur l'état des décors et des mobiliers.

Afin d'assurer la qualité des textures, le Titulaire devra :

- Combiner ses données acquises par lasergrammétrie à des relevés acquis par photogrammétrie ou par simple photographie de haute qualité
- Utiliser en intérieur des éclairages complémentaires conformes aux rendus souhaités. Il prendra soin d'en documenter les caractéristiques techniques dans son dossier de réponse.

Les textures devront être carrées et avoir une résolution minimum de 4K.

Préciser la résolution souhaitée qui doit être comprise entre 4K et 16K selon l'usage souhaité. Comme le bon compromis peut être difficile à anticiper, il est judicieux d'inclure plusieurs tests.

Préciser si les textures doivent être tuilables et ne comporte qu'un seul motif (exemples : gravier, ardoises...), c'est pertinent si elles doivent servir pour une expérience 3D temps réel.

La fidélité colorimétrique est capitale pour l'exploitation des représentations créées. Afin de l'assurer, le Titulaire devra :

- Choisir pour les acquisitions photographiques en extérieur les conditions atmosphériques qui éviteront de trop grandes distorsions entre les différentes prises de vues. Par exemple, il évitera de combiner pour une même zone des vues prises le matin et le soir ou avant le soleil et en plein midi
- Respecter pour les intérieurs les recommandations spécifiques aux usages souhaités
- Respecter la même charte colorimétrique

En intérieur, plusieurs cas :

→ Respecter un éclairage d'ambiance qui devra être retranscrit le plus fidèlement, dans ce cas le préciser et si possible fournir des exemples visuels. Il faut accepter dans ce cas de perdre des détails

→ Respecter pour des raisons de conservation l'éclairage ambiant mais ensuite nécessiter de ré-éclairer, typiquement pour une application de médiation. Dans cas, préciser quel type de ré-éclairage sera souhaiter pour que le Titulaire identifie les zones problématiques et prennent des références

→ Par défaut, demander un éclairage similaire partout. Dans ce cas, demander une température de couleur comprise entre 5500 et 6000K avec un IRC > 90% pour s'approcher de la lumière du jour

Indiquer si une échelle colorimétrique sera fournie pour référence au Titulaire. Elle servira à vérifier la fidélité des livrables.

En intérieur, les éclairages complémentaires utilisés devront respecter les contraintes de conservation indiquées par le CMN (exemple : lampes qui ne chauffent pas).

Lasergrammétrie

D'une manière générale, les matériels utilisés devront permettre le respect des critères techniques suivants :

- Format : voir le chapitre Formats des livrables, métadonnées et arborescence, page 167. Exportables dans tous les types de formats universels. Les fichiers bruts au format du scanner seront également livrés, par exemple format lgs pour du matériel Leica ou fls pour du matériel Faro
- Résolution : comprise entre 11 millions et 176 millions de point par position de scan en fonction de leur emplacement et de la distance des surfaces à numériser. Possibilité de réaliser une maquette numérique avec le niveau de détail « LOD200 »
- Zone de cache : multi-positionnement des stations par pièces pour supprimer les zones de cache ou de non recouvrement. Pour cela, des stations en hauteur devront être prévues dans les volumes de grande hauteur, compris

combles et toiture. Le Titulaire ne pourra se prévaloir d'une quelconque impossibilité technique liée au travail en hauteur, il sera force de proposition sur ces points et proposera des méthodes éprouvées. Le positionnement de chaque station de scan 3D devra être réalisé afin que l'ensemble se recoupe parfaitement et ne laisse pas de trous, masques et occlusions dans le nuage final. Le nombre de stations devra être prévu pour éviter les manques et les ombres dues à l'encombrement des pièces, il en est de même pour les parties hautes (voitures, plafond...) pouvant être cachées par les saillies d'éléments architecturaux et de mobiliers présent

Les stations de scan devront être nommées et localisées sur le plan de segmentation décidé en réunion de calage.

Les nuages de points issus de l'acquisition *in situ* seront filtrés avec suppression des points parasites, triés, nettoyés, assemblés, classés et hiérarchisés par ensembles ou sous-ensembles par zones ou ensemble architecturaux cohérents.

Photogrammétrie

Ces acquisitions pourront être conduites en intérieur ou en extérieur.

Dans le cadre d'acquisitions en extérieur et pour certaines acquisitions intérieures dans des espaces de grande hauteur, elles devront pouvoir être réalisées par drone afin de permettre l'acquisition d'espaces difficilement accessibles (toiture, falaise...).

Dans le cadre d'acquisitions en intérieur ne pouvant être faites à hauteur d'homme (lustre par exemple), le Titulaire devra apporter le matériel nécessaire (gazelle, escabeau...) et s'assurer que son usage est compatible avec les contraintes de conservation (protection des pieds).

Pour rappel du chapitre Conditions d'exécution, page 154, la prestation comprendra l'ensemble des démarches (constitution de dossiers, dépôt du dossier...) nécessaires à l'obtention des autorisations concernant le vol de drone.

Les principales étapes de traitement des images doivent notamment inclure leur orientation et leur mise à l'échelle sur les points topographiques servant de repères.

RECONSTRUCTION 3D

L'ensemble des nuages de points et photographies orientées en 3D devra être assemblé dans un même système de référencement géométrique.

Les nuages de points et les jeux d'images photographiques (si acquisition photogrammétrique prévue) seront géoréférencés avec précision dans un système reconnu et aisément identifiable.

La segmentation éventuelle et la nomenclature définies lors de la réunion de calage devront être respectées.

Un soin particulier sera apporté à la qualité des assemblages géométriques et visuels (éviter les effets de double peau ou de déviation, garantir la cohérence des assemblages intérieurs/extérieurs par exemple).

L'assemblage des relevés doit être échantillonné et filtré afin de réduire les incohérences et les redondances et/ou d'améliorer la lisibilité des espaces numérisés.

Les techniques de reconstruction des volumes doivent permettre de répondre à la plus grande cohérence géométrique possible avec l'objet réel. Il appartient également au Titulaire de proposer la définition des mailles en fonction de la meilleure adéquation possible entre les images et le maillage pour répondre aux objectifs définis. Le maillage devra être adapté à la précision demandée et les méthodes de filtrage/optimisation employées devront être explicitées par le Titulaire.

Les arbres devront être conservés, même si peu lisibles, et les plans d'eau simulés afin d'éviter toute lacune dans le modèle qui le rendrait inexploitable. De façon générale, le CMN précisera lors de la visite de calage quels éléments pourront être effacés dans la restitution et quels autres éléments devront être conservés.

Le modèle sera livré en plusieurs versions correspondant à des niveaux d'échantillonnage (décimation) et à des usages différents. La détermination de ces niveaux d'échantillonnage pourra se faire de façon itérative de façon à identifier les meilleurs compromis entre :

- Visualisation des détails

- Facilité de navigation
- Poids du modèle et facilité de manipulation par rapport aux matériels disponibles au CMN (outils muséographiques de type tables tactiles, PC, tablettes...)

Pour faciliter leur visualisation et ne pas perdre inutilement en précision, les modèles seront exportés en coordonnées locales tout en préservant l'orientation de cette origine locale par rapport à la géolocalisation. Par exemple, dans le cas de l'Arc de triomphe, on préservera la géolocalisation de la flamme du Soldat Inconnu et on exprimera les coordonnées localement par rapport à cette référence.

Dans son dossier de réponse, le Titulaire devra détailler les moyens mis en œuvre pour réaliser cette phase de traitement, la méthodologie d'interpolation et d'édition des modèles maillés, la chronologie des opérations, les précisions attendues.

ORTHO-IMAGES

- Objectifs de documentation :
 - La réalisation d'ortho-images dans le périmètre indiqué doit permettre d'évaluer très précisément l'état des ouvrages à la date de prise de vue
 - Création de documents immédiatement exploitables sur le chantier (se rapprocher d'une logique de lecture classique de dessin géométral : pas de transparence, coupes clairement lisibles...)
 - Les masques doivent être limités autant que possible
 - Création des supports géométriques et visuels permettant la réalisation de restitutions graphiques par dessin vectoriel au 1/100 détaillé
- Prescriptions générales :
 - Les ortho-images doivent provenir de nuages parfaitement assemblés et géoréférencés
 - Leur définition doit être équivalente
 - Les ortho-images fournies doivent permettre une lecture de l'espace et des parements horizontaux ou verticaux. Par exemple, une coupe à l'axe des voûtes devra suivre l'axe réel des voûtains et des baies qu'elle traverse (réalisation de coupes en baïonnette autant que de besoin)

- Les plans seront fournis à plusieurs altimétries (e.g. permettant de lire les accès, les baies hautes et basses, les sols, les couvertures)
- Les coupes seront fournies à plusieurs profondeurs, permettant de lire et de comprendre l'espace qu'elles traversent

- Prescriptions sur l'élaboration des ortho-images :
 - Les documents produits seront de qualité suffisante pour permettre la lecture des appareillages de pierre, des déformations et des pathologies (en évitant les différences de teintes par exemple). Précision souhaitée pour les déformations (e.g. 0,5 à 1 cm)
 - Les plans et épaisseurs de coupe doivent être clairement repérés sur chacun des documents suivants : plan de synthèse repérant l'ensemble des coupes fournies et plan de situation sur chacune des coupes
- Prescriptions sur la mise en page des rendus :
 - Les profils de coupe doivent être systématiquement reportés sur les images afin que les parties coupées soient clairement identifiables
 - Chaque ortho-image doit être datée (date du scan et d'édition), à l'échelle (+ échelle graphique)
- Prescriptions pour l'intégration des rendus au sein de la plateforme de centralisation des données du CMN (perspective expérimentale)
 - Les coordonnées 3D des quatre extrémités de la projection orthographique calculée (ainsi que les informations sur la profondeur de champ - épaisseur du plan de projection) doivent accompagner chaque ortho-image et doivent être exprimées dans le système de coordonnées définis en phase d'assemblage

REPORTAGE PHOTOGRAPHIQUE

La réalisation d'un reportage photographique dans le périmètre indiqué doit permettre de compléter le relevé architectural et de documenter l'état des ouvrages à la date de prise de vue. Ce reportage fournit une référence visuelle utile lors des phases de travaux successives.

Le reportage photo sera réalisé sur l'ensemble des surfaces, pièces, bâtiments et espaces indiqués. Il devra permettre une vision sphérique 360° de chacune

des pièces sans angle mort. À l'intérieur, il fera apparaître pour chaque pièce l'ensemble des murs, des sols, des plafonds et des éléments architecturaux (cheminée, menuiserie, lustres...). À l'extérieur, l'ensemble des parements et des couvrements et des éléments architecturaux (lucarnes, oculi, éléments sculptés, souches de cheminées...).

Pour pouvoir zoomer sur les détails, chaque image devra avoir une définition d'au moins 16K.

Les zooms sont autorisés afin de pouvoir photographier les détails architecturaux inaccessibles. Les balances des blancs seront équilibrées et le rendu des couleurs sera harmonisé sur l'ensemble des photos du reportage : les mêmes prescriptions que pour l'acquisition s'appliquent en terme de colorimétrie.

Préciser si besoin comment doivent être nommées les photographies.

INTÉGRATION D'AUTRES TYPES DE RELEVÉS

Peut rester sans objet

L'objectif est de prévoir l'intégration dans les relevés de relevés réalisés précédemment (liste non exhaustive) :

- Relevés terrestres permettant notamment d'établir des plans topographiques
- Relevés des réseaux (aériens, souterrains...) afin de connaître la nature des réseaux et leurs positions

Ces relevés permettront aussi d'apporter des précisions techniques sur ces derniers (diamètre, fil d'eau...) :

- Relevés pré-existants de façades, d'espaces intérieurs
- Relevés manuels, minutes
- Tout autre type de relevés

L'ensemble des données issues de ces relevés est à intégrer dans une base de données. Chaque intégration de relevé pré existant est à indiquer clairement par sa source (archive, investigation *in situ*), sa date, etc. et les éventuels décalages et différences avec les acquisitions du présent marché doivent être identifiés.

LIVRABLES

Pour faciliter la validation des prestations, le Titulaire devra découper les assemblages et nommer les données conformément à la segmentation définie lors de la réunion de calage.

Il devra organiser les différents livrables en suivant l'arborescence explicitée aux paragraphes suivants.

FORMATS DES LIVRABLES, MÉTADONNÉES ET ARBORESCENCE

Types de rendus

- [R1] Sources (données brutes) des relevés par lasergrammétrie (nuages de points 3D) et photogrammétrie (photographies acquises en configuration terrestre et aérienne) sur site
- [R2] Données résultantes de l'assemblage des relevés sur site (consolidation des nuages de points réalisés par lasergrammétrie et photogrammétrie, calcul des orientations des images photographiques acquises par configuration terrestre et aérienne)
- [R3] Ortho-images - projections orthographiques des nuages de points 3D (et éventuellement des photographies orientées) extraites de l'assemblage sur la base d'une liste de plans, élévations et coupes
- [R4] Restitutions graphiques par dessin géométral élaborées à partir des ortho-images sur la base d'une liste de plans, élévations et coupes
- [R5] Reportage photographique

Livrables

Les livrables suivants sont demandés :

[R1] Sources des relevés

- Toutes les données brutes des relevés doivent être livrées au format natif, sans aucun traitement, telles que issues des capteurs
 - fls, zfs ou lgs pour les nuages de points 3D selon la marque des scanners utilisés, avec le logiciel de visualisation correspondant

(exemple : Truview ou Faroscene)

- raw pour les photographies

Les stations de scan doivent être nommées et identifiables sur le plan de segmentation.

- Chaque objet numérique doit être livré avec les métadonnées techniques du fabricant du capteur qui l'a produit. Les photographies devront avoir leurs exif

[R2] Assemblage des relevés

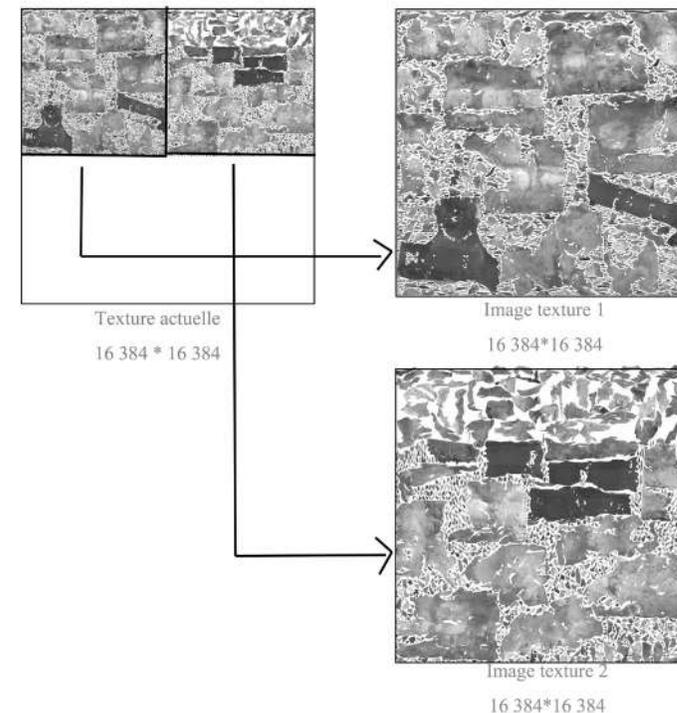
- Assemblages photogrammétrique et lasergrammétrique seront livrés dans des répertoires séparés
- Nuage de points aux formats ascii (x, y, z, i, r, g, b) et e57
- Liste des points de géoréférencement et de leurs coordonnées (format ascii) avec plan de localisation (format dwg et dxf)
- 3 versions du modèle 3D maillé texturé aux formats obj, fbx et ply :
 - Si possible, modèle de résolution maximale éventuellement segmenté selon le découpage décidé en réunion de calage
 - Modèle scientifique avec la plus haute définition nécessaire pour des usages scientifiques ou de conservation, des détails de type fissure ou gravure doivent y être visibles
 - Modèle de médiation qui ne doit pas être segmenté et doit pouvoir être ouvert par le plus grand nombre. Il doit permettre de visualiser l'ensemble du site

De façon indicative, il sera difficile sur un PC de type bureautique de visualiser plus de 100 millions de points 3D. Le modèle scientifique correspondra à un échantillonnage compris entre 75% et 50% et le modèle de médiation à un échantillonnage compris entre 25% et 10%. Selon les spécificités du site, les % exacts pourront être déterminés de façon itérative.

- Version du modèle 3D maillé texturé complètement hermétique au format stl pour les impressions 3D. Pour ne pas dégrader la qualité, le Titulaire veillera à aller à la source la plus détaillée puis calculer un maillage de la zone à

imprimer à partir des données sources

- Une capture d'écran de chaque modèle 3D livré, nommée de la même façon, afin de pouvoir vérifier rapidement si le modèle ouvert est bien le modèle livré
- Cartes des normales, de diffusion et de profondeur au format png
- Textures au format png avec une résolution minimale de 4K, un dépliage UV maximisant l'occupant de la surface et évitant les trous



Exemple montrant comment optimiser les textures © Priscilia Barbuti - CNP

- Fichier de calage photogrammétrique au format txt pour les clichés ayant nécessité un calage pour l'orientation
- Profil ICC
- 2 versions des images photographiques compressées (résolution maximale et échantillonnées à 50 %) en format jpg accompagnées des paramètres d'orientation externe et interne issus des calculs photogrammétriques - exprimés dans le système de référence [R2] - en format xml pour chaque

image ou sous forme d'un tableau csv (e.g. dimensions du capteur, point principal, centre optique, longueur de focale, paramètres de distorsion, matrice de transformation exprimée dans le repère [R2]). Les photographies devront avoir leurs exif

[R3] Ortho-images

- Les ortho-images doivent être fournies aux formats png, jpg et pdf (échelle 1/1 ou échelle claire pour les png et jpg), ainsi qu'insérées dans des fichiers dwg
- Les coordonnées 3D des extrémités de chaque ortho-image (A : haut-gauche, B : haut-droite, C : bas-droite, D : bas-gauche), ainsi que la valeur d'épaisseur du plan d'extraction pour les coupes, doivent être fournies sous forme d'un tableau csv
- Le positionnement dans l'édifice sera à indiquer dans le nom du fichier

[R4] Restitutions graphiques par dessin géométral

- Toutes les représentations doivent être fournies au format dwg et pdf (en deux résolutions)
- Les documents produits doivent être exploitables « bruts », sous forme de tirage, pour le chantier et les études
- Éventuellement, tirages à l'échelle (1/200 mini) en 2 exemplaires (cahiers A3 ou formats papier normalisés A2, A1, A0...)

[R5] Reportage photographique

- Les photographies seront livrées numérotées et datées
- Les photographies doivent être structurées dans une arborescence qui distingue photos, panoramas 360° et captations par drone
 - Les sous-dossiers doivent respecter le découpage défini lors de la réunion de calage. En cas de complexité dans le repérage des photos, chaque numéro de photo peut renvoyer à une légende reprise sur les plans d'architecture et les plans topographiques
 - En cas d'utilisation de plusieurs drones, les dossiers doivent les différencier
 - Les images équirectangulaires des panoramiques 360° doivent être

livrées sans tuilage

Si le reportage photo est livré sous forme de visite virtuelle, il doit être livré au format Virtual Tour Pro de 3DVista (à défaut, krpano) en 2 versions :

→ Exécutable embarqué et lançable sur une clé USB

→ Archive consolidée

- Les champs IPTC doivent être renseignés avec : localisation, date de prise de vues, copyright et toutes mentions légales à faire apparaître lors des exploitations, « © Nom de l'auteur de la photographie - CMN »
- Les fichiers natifs auront comme dimensions minimales 4 000 x 6 000 pixels
- Les exif doivent être présents et non modifiés
- La résolution est au minimum de 300 dpi
- Le format sera jpeg ou tiff ; 8 bits ; sans calque, sans masque, sans règle ; profil Adobe RGB

RAPPORT

Un rapport, complété d'un tableau récapitulatif, décrira :

- Le flux global et les temps de traitement
- Les opérations d'acquisitions, en incluant les noms des intervenants, les dates d'intervention, la météo quotidienne, les spécifications techniques des capteurs utilisés, ainsi que d'autres éléments susceptibles de renseigner sur les choix méthodologiques et techniques faits...
- Les rapports d'assemblage pour la photogrammétrie et la lasergrammétrie
- Les choix techniques et les processus de traitement (logiciels et méthodes utilisées) faisant référence aux sources de relevé utilisées [R1] et incluant des informations sur les résultats obtenus (incertitude de mesure, résidus quantifiés...)
- Les disparités de traitement en fonction des secteurs
- Les éventuels problèmes survenus en phase d'assemblage

- Le système de coordonnées géographiques défini
- Les actions mises en œuvre lors de la prestation pour décliner la politique RSE présentée dans l'offre

Le rapport sera illustré de schémas et de visuels permettant la bonne compréhension de ce qui est décrit. Une première livraison partielle permettra au CMN d'apprécier et de valider le niveau de détail du rapport avant complétion et remise définitive.

Il sera assorti de la visite virtuelle de repérage annotée, si elle a été faite, et du plan de segmentation annoté avec les stations de scan dûment nommées.

PROCÉDURES DE LIVRAISON

Seront livrés en deux exemplaires sur des disques durs de type SSD fournis par le Titulaire :

- Les sources des relevés [R1] ainsi que le rapport sur un premier disque avec l'arborescence indiquée
- Les autres données de façon séparée sur un autre disque

En vue du bon archivage des acquisitions et de leur exploitation, les métadonnées de chaque fichier d'acquisition produit seront renseignées impérativement par le Titulaire.

CONTRÔLE ET VALIDATION DES PRESTATIONS

Une validation des rendus sera effectuée dans un délai de 30 jours calendaires et consistera en les analyses suivantes :

- Vérification des formats et de la cohérence de la structure d'archive
- Vérification de la complétude du relevé
- Vérification du respect des prescriptions
- Inspection des numérisations 3D
 - Cohérence métrique (assemblage des données)
 - Cohérence géométrique (e.g. homogénéité des maillages...)

- Cohérence visuelle (aberrations chromatiques dans les images ou dans les textures)

- Vérification que les modèles sont bien imprimables en 3D (création de prototypes)

Le rapport sera lui aussi soumis à validation lors de la livraison.

CONSERVATION DES PRESTATIONS

Les données d'acquisition seront conservées par le Titulaire du contrat pendant une durée minimale de 5 années.

DROITS D'EXPLOITATION

Le Cahier des Clauses Administratives Générales applicable aux marchés publics de Prestations intellectuelles (C.C.A.G.-P.I.) approuvé par l'arrêté du 30 mars 2021 est applicable à cette consultation et au bon de commande afférent.

Par dérogation à l'article 35.2.1 du C.C.A.G.P.I, le Titulaire cèdera au Centre des monuments nationaux, à titre non exclusif, l'intégralité des droits de propriété intellectuelle (droit de représentation, droit de reproduction et droit d'adaptation) afférents aux résultats et productions remis au Centre des monuments nationaux dans le cadre de cette prestation conformément aux articles L.122-2 et L.122-3 du code de la propriété intellectuelle. La rémunération de la cession de droits est réputée incluse dans la prestation du Titulaire.

Les résultats et productions correspondent à l'intégralité des livrables cités au chapitre [Livrables, page 167](#).

Cette cession sera consentie, à compter de la remise par le Titulaire des résultats et productions, pour la France et le monde entier, pour toute exploitation commerciale et non commerciale, pour la durée légale de protection des droits d'auteur telle que définie par l'article L.123-1 du code de la propriété intellectuelle y compris en cas de prolongation de cette durée.

Le Centre des monuments nationaux pourra exploiter et adapter directement ou dans le cadre de rétrocessions à tout tiers de son choix les résultats et productions pour les besoins liés à l'objet du présent marché et/ou de futures

productions culturelles, touristiques et/ou pédagogiques à titre commercial ou non commercial.

Le Centre des monuments nationaux pourra ainsi exploiter et/ou autoriser l'exploitation des résultats et productions, sur les supports ci-après précisés ainsi que sur tout support connu ou inconnu à ce jour, à des fins de promotion du CMN et des monuments, dans le cadre de ses activités et/ou pour l'accomplissement de ses missions statutaires (que cette promotion soit réalisée par le CMN ou ses partenaires et mécènes), qui inclut la possibilité de rétrocéder ces droits à toute personne de son choix et notamment à tout organisme à vocation culturelle, éducative, touristique, scientifique, pédagogique, muséologique ou sociale. Le Centre des monuments nationaux peut procéder et/ou faire procéder aux exploitations commerciales et non commerciales suivantes des résultats et productions en tout ou partie :

- Exploitation sur tout support actuel et/ou à venir (papier, électronique, chimique, numérique, magnétique, audiovisuel, multimédia, dématérialisés, notamment film, vidéo, édition-électronique, CD, CD-Rom, CDI, DVD, poste d'ordinateur, appareils de projection, bornes interactives multimédia, ordinateurs, tablettes numériques, smartphones, applications, etc.), au sein du parcours de visite du Monument, dont l'accès est payant, et/ou au sein d'autres monuments gérés par le Centre des monuments nationaux ou par ses partenaires, notamment dans le cadre d'expositions temporaires
- Exploitation et diffusion de tout ou partie des résultats et productions pour la réalisation de médiations à distance (visites commentées virtuelles pour groupes ou individuels, ateliers commentés virtuels pour scolaires, etc.) produites et commercialisées par le CMN ou ses partenaires, sur tout type de support numérique (application pour tablettes numériques, Smartphones, outils multimédia, outils de réalité augmentée, etc.) ou en ligne (site Internet du CMN ou de ses partenaires, réseaux sociaux (Facebook, Instagram, Twitter, etc.), blogs, etc.). Le Centre des monuments nationaux est libre du choix et du nombre des extraits des résultats et productions qu'il souhaite exploiter
- Reproduction des résultats et productions pour la réalisation de documents d'information et/ou pédagogiques, en tout format, et toutes dimensions, sur tout support connu ou inconnu à ce jour, et notamment papier, carton, dépliant, plexi, transparent, alu, panneaux de médiation, affiches,

kakemonos, documents d'aide à la visite, dossiers pédagogiques, CD, DVD, dossier de presse, reportage d'information pour les médias, articles de presse, outils multimédias, etc.

- Diffusion en ligne sur le réseau Internet via le site du Centre des monuments nationaux ou tout site consacré au monument ou à sa promotion, ou tout site, notamment du ministère de la Culture, ainsi que sur les réseaux sociaux (Facebook, Instagram, Twitter, etc.), blogs, etc.
- Diffusion sur tout type de supports numériques et/ou multimédia, sur toute application pour tablettes numériques, Smartphones, outils multimédia, outils de réalité augmentée, etc.
- Consultation gratuite sur place (dans l'enceinte du CMN et/ou des monuments) par le public, ou encore consultation à l'extérieur sous forme de prêts gratuits à des fins exclusivement documentaires, scientifiques, pédagogiques, muséologique ou d'usage strictement privé excluant pour l'emprunteur le droit de les reproduire et/ou de les dupliquer
- Intégration dans le cadre d'œuvres audiovisuelles court et/ou long format destinées ou non à la vente
- Extraction pour des consultations ultérieures
- Édition dans le rapport d'activité du Centre des monuments nationaux et/ou de ses tutelles et/ou de ses partenaires, ou dans toute revue scientifique ou culturelle à laquelle le CMN ou l'un de ses partenaires s'associeraient
- Dans le cadre de l'archivage

Dans le cadre de ces exploitations, le CMN pourra notamment procéder à la réutilisation, à l'adaptation et/ou à la traduction des résultats et productions sur tous les supports indiqués ci-dessus, y compris sous la forme d'œuvres composites, collectives et/ou de collaboration.

Il est entendu que l'ensemble des droits seront cédés par le Titulaire au CMN à titre entièrement gracieux, y compris pour les exploitations commerciales indiquées ci-dessus. Le Titulaire ne percevra aucune rémunération proportionnelle pour toutes les exploitations prévues par la consultation présente et effectuées directement par le CMN, notamment dans le cadre de l'exploitation des différents outils de médiation.

Toute exploitation commerciale non prévue par la consultation présente fera

l'objet d'une rémunération proportionnelle fixée dans une convention ad hoc.

Les utilisations et exploitations des droits d'auteur afférents aux résultats et productions concédés par le CMN à un tiers, notamment dans le cadre de la Photothèque du CMN, donneront lieu au versement par le CMN au Titulaire d'une rémunération calculée au prorata du montant des droits perçus par le CMN, conformément aux dispositions de l'article L.131-4, 1er alinéa du C.P.I., dans les conditions ci-après précisées :

- Dans le cadre d'une rétrocession à titre onéreux, le CMN reversera au Titulaire 30 % (trente pour cent) du montant de la rémunération hors taxes qu'il perçoit lui-même de ce tiers
- En cas de co-exploitation des droits par le CMN et un tiers dans le cadre d'une exploitation à caractère commercial, comme en cas de rétrocession à titre gratuit en vue d'une telle exploitation, le contrat entre le CMN et le tiers fixera le montant des droits apportés ou cédés par le CMN. Le Titulaire percevra du CMN une rémunération égale à 15 % (quinze pour cent) de ce montant HT, à proportion de la quote-part des résultats et productions du Titulaire dans l'apport du CMN ou dans les droits dont l'exploitation a été concédée à titre gratuit par celle-ci ; le CMN s'obligera à procéder à une juste valorisation des droits apportés ou concédés, conformément aux usages ou pratiques en vigueur ; en tant que de besoin, le CMN fournit au Titulaire toutes précisions sur les modalités selon lesquelles il a été procédé à cette valorisation

Il est entendu que l'ensemble de la cession vaudra tant pour les droits d'auteurs, que les droits voisins et le droit à l'image.

Le Centre des monuments nationaux pourra rétrocéder et/ou concéder à titre non exclusif certains droits d'exploitation au bénéfice du Titulaire dans des conditions qui sont définies dans le cadre d'une convention ad hoc qui précise la durée, l'étendue et la nature des exploitations ainsi que le montant des redevances éventuelles revenant au Centre des monuments nationaux. En l'absence d'une telle convention, le Titulaire s'interdira toute exploitation des résultats et productions ainsi que de tous les éléments (notamment fichiers sources) produits en lien avec le présent marché que ce soit à titre non commercial ou commercial.

Toutes les exploitations des résultats et productions par le Centre des monuments

nationaux et/ou le Titulaire devront, dans la mesure du possible, faire apparaître la mention suivante : « © Nom du Titulaire - Centre des monuments nationaux ».

Dans le cas où la mise en place d'une plateforme d'échange collaborative ou de simple visualisation est demandée par la maîtrise d'ouvrage, le stockage devra impérativement être réalisé sur les serveurs du Titulaire ou de la maîtrise d'ouvrage, le stockage sur des serveurs externes est exclu sauf demande particulière. L'accès aux plateformes sera sécurisé par un compte dédié.

DÉLAIS

Les délais d'exécution des prestations et de remise des livrables du présent marché sont les suivants :

- Réalisation de l'acquisition [à compter de la notification du Titulaire] : x jours sous réserve de conditions météorologiques favorables.
- Traitement et reconstruction avec mise au point itérative des modèles [à compter de la date de démarrage de l'acquisition] : x semaines
- Remise des livrables [à compter de la date de démarrage de l'acquisition] : x semaines

CONTENU DE LA PROPOSITION

La proposition devra comporter :

- Une proposition technique incluant un argumentaire sur les réserves et la déclinaison de la politique RSE du Titulaire lors de la prestation
- Une proposition financière détaillée

PROPOSITION TECHNIQUE

La proposition devra préciser les éléments suivants :

- Les matériels utilisés pour les captations au sol et aérienne, ainsi que le recalage topographique, en précisant leurs focales, la taille et la résolution

des capteurs

- La justification des technologies utilisées (laser, photo, lumière structurée, combinaisons...)
- Les résolutions par pixel proposées et motivées pour les différentes zones
- Pour les captations aériennes, les distances maximales de vol prévues selon les zones
- Une estimation du nombre total d'images
- Le taux de recouvrement des images pour la photogrammétrie
- Le flux global de traitement envisagé
- La méthode de géoréférencement privilégiée avec le nombre de stations envisagé
- La méthode utilisée pour garantir une bonne texture des surfaces
- La méthode utilisée pour garantir la fidélité colorimétrique
- Tout support méthodologique spécifique à la géométrie du monument (notamment pour les zones difficiles d'accès)
- Le calendrier prévisionnel avec :
 - Les hypothèses considérées
 - Les durées prévues pour l'acquisition sur site, le traitement des données et la création itérative du modèle, en incluant la détermination itérative des bons niveaux d'échantillonnage
 - La date de livraison finale
 - La prise en compte des contraintes de sécurité, de conservation et de co-activité
- Le nombre de personnes prévues pour la captation, leurs compétences et la façon dont elles seront mises en œuvre selon les phases du projet
- Les réserves par rapport aux besoins exprimés
- La description explicite de la prise en compte des spécificités du monument
- Les références de réalisations similaires avec :
 - Un échantillon
 - Le calendrier d'exécution

- La déclinaison de la politique RSE lors de cette prestation

PROPOSITION FINANCIÈRE

La proposition financière détaillera les postes suivants :

- Préparation et autorisations administratives
- Acquisition sur site
 - Terrestre
 - Aérienne (le cas échéant)
- Captations additionnelles (reportage photo et/ou visite virtuelle)
- Assemblage et création itérative des modèles 3D
- Exports (ortho-images, plans, coupes...)
- Documentation et livraison

Annexe 4

Glossaire

Ce glossaire a été élaboré en recoupant plusieurs sources, telles que *Les recommandations du Consortium 3D SHS* et les contributions de la *Lettre de l'OCIM* n° 210. Certains termes sont issus de conventions et usages au sein du Centre des monuments nationaux. Cette annexe doit être comprise comme une sensibilisation au champ lexical de la numérisation 3D.



3D temps réel

Technique très utilisée pour les jeux vidéo qui reconstitue et anime un environnement en 3 dimensions en calculant chaque image en temps réel en fonction de la position et de la direction du regard de l'utilisateur. Ainsi, l'ensemble de l'environnement virtuel est représenté au fur et à mesure. Les logiciels utilisés pour produire de telles reconstitutions sont appelés des moteurs de jeu vidéo. Les plus utilisés sont Unity et Unreal Engine.

Acquisition

Processus de collecte des données (scans, photos, position géographique...) qui serviront ensuite à reconstruire le site en 3D.

ACV

Analyse de Cycle de Vie : méthode d'évaluation définie par les normes internationales ISO 14040 et ISO 14044 pour quantifier les impacts environnementaux d'un produit ou d'un service.

Aïoli

Logiciel développé par le CNRS UPR/MAP pour les modèles 3D. Accessible en ligne, il permet de visualiser, manipuler et annoter des modèles 3D de manière collaborative. Il est possible d'attacher des documents 2D à l'objet 3D afin de spatialiser, centraliser et archiver les informations. Aïoli a notamment été utilisé dans le cadre du chantier scientifique de la restauration de Notre-Dame de Paris.

APN

Appareil Photo Numérique.

BIM Description complète [page 27](#)

Building Information Model, terme anglais pour « Modèle des données du bâtiment », à savoir une maquette en 3D plus ou moins simplifiée. Peut signifier aussi *Building Information Modelling*, terme anglais pour « Modélisation des données du bâtiment ») et désigne dans ce cas une méthode de travail

collaborative.

Carte (des normales, de diffusion, spéculaire...)

En anglais *normal map*, *diffuse map*, *specular map*, désigne une image qui, plaquée sur un modèle maillé, permettra de simuler certaines caractéristiques de l'objet réel. La carte des normales permet ainsi de simuler les reliefs, la carte de diffusion l'éclat des couleurs, la carte spéculaire la réflexion de la lumière, etc.

Cible

Disque ou carré noir et blanc utilisé pour positionner lors de l'acquisition 3D le site par rapport à des coordonnées géographiques.

Colorimétrie

Ensemble des informations qui permettent de caractériser les couleurs, et donc de les restituer le plus fidèlement possible.

Décimation

Processus consistant à simplifier un modèle 3D en réduisant le nombre de points ou de triangles.

Dépliage des UVs

Opération qui consiste à transformer un objet en trois dimensions pour en faire un objet en deux dimensions, c'est similaire à ce qui est fait quand nous créons une carte géographique en deux dimensions à partir du globe terrestre par une projection. Le dépliage des UVs permet de créer les textures, des images en deux dimensions, qui ensuite seront appliquées sur l'objet 3D pour lui donner un aspect réaliste. Selon la façon dont ce dépliage est effectué, les textures seront de plus ou moins bonne qualité, tout comme une carte géographique a plus ou moins de déformations.

Données brutes

Données telles que collectées par les matériels d'acquisition (scanners, drones, appareils photos...) avant tout traitement.

Éco-conception

Intégration des principes de développement durable dans la conception d'un produit ou d'un service.

Géométrie

Dimensions de l'objet ou du site.

Gaussian splatting Description complète [page 37](#)

Terme anglais pour « Éclaboussures gaussiennes », nouvelle technique de reconstruction 3D s'appuyant sur des approximations mathématiques (des distributions gaussiennes) pour rendre visuellement le site.

Géométraux

Vues d'un objet ou d'un site avec ses dimensions exactes et ne tenant pas compte de la perspective, englobe notamment les coupes et élévations.

Géoréférencement Description complète [page 33](#)

Processus qui consiste à assurer aux données d'acquisition collectées, et donc aux futurs modèles 3D, des coordonnées géographiques précises.

GNSS

Global Navigation Satellite System, terme anglais pour « Système Mondial de Navigation par Satellite », ensemble des constellations de satellites permettant de se positionner et de naviguer. Le plus connu est le système américain, le GPS, mais existent aussi Galileo, le système européen, Glonass le russe et Beidou le chinois.

Impression 3D

Processus de fabrication d'objets physiques à partir de fichiers numériques, le plus souvent en superposant avec un fil fondu des couches successives.

Jumeau numérique

Modèle numérique qui supposément reconstitue à la perfection un objet ou un site. Selon les définitions, le jumeau est la réplique parfaite à un moment précis,

ou bien une réplique à même de suivre l'évolution de l'objet, voire d'en garder l'historique, ou bien, de façon encore plus générale, une réplique numérique d'un objet matériel, d'un processus ou d'un système en lien avec celui-ci, capable de stocker et de gérer en permanence les données qui s'y rapportent tout au long de son cycle de vie.

Lasergrammétrie

Technique qui consiste à balayer l'objet ou le site avec un scanner équipé d'un laser pour en déterminer les dimensions et ensuite le reconstruire en 3D.

LBE

Location Based Entertainment, terme anglais pour « Loisirs localisés dans un endroit », désigne le plus souvent des expériences de loisir multisensorielles proposées dans un lieu dédié et qui ne peuvent être vécues à domicile. Plusieurs personnes peuvent suivre dans la même pièce une expérience, de manière synchrone ou asynchrone.

LiDAR

Light Detection and Ranging, terme anglais pour « Détection et estimation de la distance par la lumière », technique de mesure à distance utilisant un faisceau de lumière.

LOD

Level Of Detail, terme anglais pour « Niveau de détail », échelle prédéfinie qui permet de définir le niveau de détail d'un modèle 3D.

Lumière structurée Schéma explicatif [page 33](#)

Technique qui détermine les dimensions d'un objet en y projetant un motif prédéfini de lumière puis en mesurant sa déformation.

Maillage (Modèle maillé)

Modèle 3D obtenu à partir d'un nuage de points en reliant les points pour former des triangles ou des polygones (quadrilatères, hexagones...) afin de créer un **maillage** qui modélise ainsi les surfaces de l'objet et reproduit plus explicitement son volume. À noter que tous les points ne sont pas forcément utilisés.

Métadonnées

Informations permettant de décrire les données. Elles sont idéalement enregistrées lors de l'acquisition des données par le matériel de numérisation, mais peuvent aussi être renseignées *a posteriori*. Par exemple, un appareil photo va enregistrer pour chaque photographie des données dites exif (*Exchangeable Image File Format* pour « Format de fichier d'image échangeable ») : auteur, date et heure de la prise de vue, marque et modèle de l'appareil, réglages de l'appareil photographique : type d'objectif, vitesse d'obturation, ouverture, focale, sensibilité, etc.

MNT

Modèle Numérique de Terrain, représentation de la surface d'un terrain sans prendre en compte les objets présents comme la végétation ou les bâtiments.

Moteur de jeu vidéo

Logiciel utilisé pour produire une reconstitution 3D temps réel.

Modèle 3D

Représentation numérique en trois dimensions d'un objet, captée avec un appareil photo et/ou un scanner et plus ou moins conforme à la réalité. Les nuages de points, les maillages, les modèles maillés texturés et les reconstitutions 3D sont des formes plus ou moins élaborées et complexes de modèles 3D.

Modèle texturé

Modèle 3D obtenu en appliquant sur un modèle maillé des textures, c'est-à-dire des couleurs et des matières pour reproduire de façon réaliste l'aspect de l'objet.

NeRF Description complète [page 36](#)

Neural Radiance Fields, terme anglais pour « Champs de rayonnement neuronal », nouvelle technique de reconstruction 3D qui utilise un réseau de neurones pour reproduire le trajet des rayons lumineux dans l'environnement et reconstruire ainsi une représentation visuelle du site en 3D.

Nuage de points

Forme la plus simple d'un modèle 3D consistant en l'ensemble des points captés

par un scanner ou des points obtenus par traitement photogrammétrique. C'est la source la plus fiable de données.

OLED

Organic Light-Emitting Diode, terme anglais pour « Diode électroluminescente organique », type de composant électronique qui permet de produire de la lumière et qui par rapport aux technologies précédentes (cristaux liquides) rend mieux les couleurs et est plus économe.

Ortho-image

Image sans déformation due à la perspective, comme si tous les points avaient été pris depuis la même distance.

Orthomosaïque

Assemblage de plusieurs ortho-images.

Paradonnées

Données qui décrivent le processus de collecte des données. Par exemple, les paradonnées indiqueront pourquoi la photographie a été choisie comme mode opératoire, pourquoi ce type d'appareil a été préféré, combien d'essais ont été faits avant d'arriver à la bonne photographie, etc.

Photogrammétrie

Technique qui consiste à prendre des centaines, voire des milliers de photos, d'un objet ou d'un site sous plusieurs angles différents puis à partir de l'analyse de ces différences de le reconstruire en 3D.

Réalité augmentée

À la différence de la réalité virtuelle qui immerge le visiteur dans un environnement complètement virtuel, la réalité augmentée va lui permettre de superposer à son environnement réel des éléments virtuels. Par exemple, il pourra sur son smartphone ou sur une tablette visualiser des objets qui n'existent pas dans son environnement réel mais qui s'y superposeront.

Réalité mixte

Technique qui permet, grâce à un casque spécifique, de fusionner le monde réel avec un environnement virtuel. Par exemple, le visiteur pourra interagir avec des personnages fictifs ou se déplacer dans une pièce complètement redécorée.

Réalité virtuelle

Technique qui permet de recréer un environnement en trois dimensions où, le plus souvent à l'aide d'un casque, l'utilisateur pourra s'immerger et se déplacer selon plusieurs dimensions.

Reconstitution 3D

Par convention au Centre des monuments nationaux : un modèle 3D produit avec un logiciel de type moteur de jeu vidéo.

Reconstruction 3D

Résultat du processus de reconstruction en 3D d'un objet à partir des techniques de photogrammétrie ou lasergrammétrie.

Redondance

Dans le cadre de cet ouvrage, désigne le fait de stocker les mêmes données dans deux sites différents, de préférence éloignés géographiquement, de sorte que si un des sites est endommagé de façon irrémédiable lors d'une catastrophe comme un incendie ou un piratage, l'autre, et donc les données, survive.

Rendu 3D

Processus informatique permettant d'afficher un objet défini en 3 dimensions sur un écran d'ordinateur en 2 dimensions, de façon à ce que l'utilisateur ait le sentiment de le voir en 3D et puisse le manipuler comme un objet 3D réel.

RTK

Real Time Kinematic, terme anglais pour « cinématique temps réel », dispositif capable de corriger en temps réel les coordonnées de positionnement. Très utile pour positionner avec précision les images prises par un drone.

Scanner

De façon générique, dispositif qui permet de numériser un objet en le balayant par exemple avec un laser.

Segmentation

Processus qui consiste à diviser l'ensemble des données d'acquisition pour pouvoir ensuite les traiter et les manipuler plus facilement.

SLAM

Simultaneous Localisation And Mapping, terme anglais pour « Localisation et Numérisation Simultanée ». Désigne en général un scanner mobile, capable de faire l'acquisition 3D de son environnement tout en se déplaçant et donc en identifiant leur position dans l'espace.

SSD

Solid-State Drive, terme anglais pour « Lecteur de stockage statique à semi-conducteurs ». Désigne un type de disque dur sans pièce mobile, contrairement aux disques durs plus anciens. Ils sont donc plus robustes mais plus chers.

Texture

Image en deux dimensions utilisée pour habiller un modèle 3D et lui donner un aspect visuel proche de la réalité.

UV mapping

Terme anglais pour « Cartographie UV ». Désigne la façon dont les textures, qui sont des images en 2 dimensions, sont appliquées sur un modèle maillé en 3 dimensions, UV étant le système de coordonnées utilisé pour cette opération.

Visite virtuelle

Série de panoramas à 360° d'un site reliés entre eux pour que l'utilisateur se déplace de l'un à l'autre et ait l'illusion de déambuler dans le site photographié.

VR

Virtual Reality, terme anglaise pour « réalité virtuelle ».



ASCII

Format permettant de stocker un nuage de points comme du texte. Il s'agit du format le plus simple et le plus pérenne, mais aussi le plus pauvre. Les fichiers sont volumineux et facilement corrompibles.

E57

Format de nuage de points défini par la norme ASTM E2807. C'est un format très flexible, assez interopérable et très largement utilisé par tous les matériels et logiciels.

FBX

Format de stockage de modèles 3D. Contrairement au format obj, il contient des données d'animation, il est donc très prisé par le jeu vidéo.

FLS

Format de nuage de points utilisé exclusivement par le fabricant de scanners Faro pour stocker les données acquises par ses appareils.

GLB, GLTF

Évolutions open source du format fbx.

JPG ou JPEG

Format d'image le plus courant. Défini par la norme ISO/CEI 10918-1 UIT-T Recommandation T.81, c'est un format compressé adapté aux usages les plus courants : visualisation sur un smartphone, sur un écran d'ordinateur, etc. La perte de données entraînée par la compression le rend moins pertinent pour certains usages professionnels comme l'imagerie médicale ou l'impression.

LAS

Format de nuage de points utilisé pour les relevés LIDAR, plutôt utilisé en cartographe et pour les systèmes d'information géographiques.

LGS

Format de nuage de points utilisé exclusivement par le fabricant de scanners Leica pour stocker les données acquises par ses appareils.

OBJ

Format le plus universel et le plus flexible pour le stockage des modèles 3D, c'est le modèle de choix quand une représentation fine des textures est nécessaire.

PLY

Format de stockage de modèles 3D, plus particulièrement de PoLYgones. Il s'agit du format privilégié par les logiciels open source de modélisation 3D.

PNG

Format d'image destiné à l'affichage sur écran qui contrairement au jpg prend en charge les arrière-plans transparents.

RAW

Terme anglais pour « Brut », désigne de façon générique, le format sous lequel un appareil photo stocke directement les images issues de son capteur avant de les traiter.

STL

Format le plus utilisé pour l'impression 3D.

TIFF

Format d'image qui à la différence du jpg et du png peut être non compressé, donc permettre une restitution plus exacte du réel. C'est le format à privilégier pour une impression de qualité.

ZFS

Format de nuage de points utilisé exclusivement par le fabricant de scanners Z+F (Zoller+Fröhlich) pour stocker les données acquises par ses appareils.

Annexe 5

Processus de numérisation d'un monument

COMMENT ET POURQUOI ON NUMÉRISE UN MONUMENT ?

