**Auteurs** :

Patrick Bergeot, directeur du programme « CMN Numérique » à la Mission de la Stratégie, de la Prospective et du Numérique, Centre des monuments nationaux. [patrick.bergeot@monuments-nationaux.fr](mailto:patrick.bergeot@monuments-nationaux.fr) - Morgane Estavoyer, cheffe de projet numérique à la Mission de la Stratégie, de la Prospective et du Numérique, Centre des monuments nationaux. [morgane.estavoyer@monuments-nationaux.fr](mailto:morgane.estavoyer@monuments-nationaux.fr)

Approche critique et méthodologique de la numérisation 3D par le Centre des monuments nationaux

# Le programme « CMN Numérique » (PIA4)

## Le 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 une visite virtuelle spécialement conçue à cet effet. Tout au long de la visite, le public peut poser des questions et interagir avec le guide.

Dans cette continuité, 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 dans le cadre de France 2030. Réunis sous la bannière du programme « CMN Numérique », plusieurs projets explorent les problématiques de valorisation des représentations numériques des monuments – les visites virtuelles, les vidéos 360° et les modèles 3D – de la conception à la diffusion.

|  |
| --- |
| *(encadré)*  **Modèle 3D**  Un modèle 3D est une représentation numérique en trois dimensions d'un objet, captée avec un appareil photo et/ou un scanner. Cette représentation est plus ou moins conforme à la réalité :   * Dans sa forme la plus simple, à savoir le nuage de points, le modèle 3D est constitué de l’ensemble de tous les points captés avec le scanner. * En reliant ces points pour former des triangles ou des quadrilatères, les surfaces de l'objet sont modélisées et un maillage est ainsi créé. Il reproduit plus explicitement le volume de l’objet. * Enfin, en s’aidant de photographies, la couleur et les matières sont appliqués sur ce maillage, de façon à reproduire de façon réaliste l’aspect de l’objet : le modèle 3D devient un modèle dit « texturé ». * Quand des éléments sont ajoutés, modifiés ou retranchés par infographie, par exemple des arbres, des fleurs, une étendue d’eau, il sera alors plutôt question de « reconstitution 3D ». |

## Les objectifs et enjeux du programme

Débuté en octobre 2022, le programme se terminera en octobre 2025. Il vise d’une part, à rationaliser et optimiser la création et l’exploitation des représentations numériques des monuments, 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 et le monde de la recherche.

Le programme s’articule autour de six objectifs :

1. Tester si la diffusion de nouvelles expériences, créées à partir de représentations numériques de monuments, permet de toucher de nouveaux publics
2. Poursuivre le développement des visites guidées à distance
3. Adresser de nouveaux marchés, notamment celui des décors virtuels
4. Créer un modèle d’empreinte environnementale de deux expériences numériques dites « immersives »
5. Standardiser la production, le stockage et la visualisation des représentations numériques des monuments
6. Tester les possibilités de réutilisation des représentations numériques

Le consortium comprend deux partenaires privés : My Tour Live et Mira. Plusieurs autres partenaires publics et privés participent activement aux projets, parmi lesquels le Centre national de Préhistoire, le laboratoire 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, 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.

## Quelques projets de numérisation

Pour atteindre les objectifs listés, nous effectuons une veille active sur l’état de l’art des technologies de numérisation et nous avons initié plusieurs projets innovants pour les éprouver. En voici quelques exemples.

Au château d’Azay-le-Rideau, notre objectif est de produire une expérience 3D temps réel se déroulant dans une version numérique hyperréaliste du monument. Pour ce faire, une photogrammétrie complète des extérieurs du monument et de son escalier d’honneur ont été intégrés dans un moteur de jeu vidéo afin de ne pas avoir à le reconstituer par infographie. Cette expérience collaborative est multi-support, il sera ainsi possible d’y jouer sur smartphone, PC et casque de réalité virtuelle.

|  |
| --- |
| *(encadré)*  **3D temps réel**  Le 3D temps réel est une technique très utilisée pour les jeux vidéo qui représente 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 calculé et apparaît au fur et à mesure des déplacements de l'utilisateur. |

À proximité d'Avignon, le site archéologique de Glanum, couvrant 2,5 hectares, a été numérisé et son modèle 3D a été intégré dans un moteur de jeu vidéo afin de créer une visite à distance où l'on peut se déplacer pas à pas de manière très réaliste à travers la reconstitution du site. Les structures disparues, telles que les temples géminés et le forum, ont été restituées de façon vivante et il est possible de modifier les conditions météorologiques pour changer l'atmosphère.

Au château de Champs-sur-Marne, nous explorons les problématiques de numérisation d’objets remarquables et/ou difficiles à déplacer en cas de sinistre tels que le lustre Boulle, le paravent chinois ou les boiseries du salon chinois. À cette occasion, des tests sont effectués sur plusieurs types de matériaux afin de composer une « matériauthèque numérique » et étudier les différents types de rendus 3D. Les performances de divers scanners sont également comparées.

Pour le chantier de la tour Saint-Nicolas de la Rochelle, l’enjeu est de combiner des modèles 3D produits par diverses équipes à différentes époques pour créer une maquette numérique du monument, la rendre accessible via une plateforme en ligne et évaluer son utilité pour faciliter la communication et accroître la productivité des divers intervenants.

À l’Arc de triomphe, les équipes ont conçu une mallette pédagogique composée d’impressions 3D. Elle est utilisée dans des ateliers pédagogiques hors les murs en combinaison avec une visite virtuelle du monument. Les participants ont la possibilité de s’initier au modelage et à la sculpture.

Pour Font-de-Gaume, dernière grotte ornée polychrome ouverte au public, le défi était de procéder à une numérisation à des fins conservatoires et scientifiques avec une précision parfois inférieure au millimètre, puis de réutiliser ce modèle 3D pour créer un support de visite guidée à distance. Ce dernier doit intégrer les exigences de médiation culturelle et scientifique propre à ce type de site patrimonial, comme des jeux de lumière, des restitutions d’élévation de sol et des aides à la compréhension des échelles.

Ces quelques projets illustrent bien tout le spectre des utilisations des représentations numériques qui peuvent se ranger en trois catégories principales.

# Valoriser et exploiter les représentations numériques du patrimoine

## 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 sont fréquemment utilisées, comme sur le site de Glanum, au domaine de Saint-Cloud ou à l’abbaye de Cluny, les reconstitutions de décors historiques et de monuments aujourd’hui disparus. 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. Des visites virtuelles permettent aussi d’accéder à des parties inaccessibles et ou à des points de vue inédits.

## 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, ou des plans détaillés et d'offrir une documentation qui sert d'archive pour les années à venir. Combinée à des photos, cette représentation numérique, qui capture le monument à un instant précis, permet aux équipes de suivre l'évolution de son état et d'anticiper les dégradations potentielles, surtout ses déformations. 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.

## 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. Par ailleurs, 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, la représentation numérique du site leur permet de travailler de manière extensive en laboratoire.

# Le processus de numérisation

## Cadre méthodologique

La numérisation comprend plusieurs étapes, principalement la préparation, l’acquisition, la reconstruction 3D et l’exploitation.

La préparation est primordiale car, dans le cadre d’un tel projet, il est nécessaire de partir de l’usage souhaité pour déterminer les besoins et les moyens à déployer. En effet, les possibilités de réutilisation sont pour l’heure limitées ou trop coûteuses par rapport à une nouvelle acquisition. Par exemple, nos tentatives de création d'impressions 3D à partir de modèles existants ont échoué car les données n’avaient pas été assemblées de façon étanche. Il est de même difficile de réutiliser dans un contexte de conservation des modèles créés initialement pour un dispositif de médiation culturelle s’ils ne sont pas étalonnés en colorimétrie ou géoréférencés, c’est-à-dire positionnés sur un plan. Nous avons ainsi dans le passé été contraints plusieurs fois à refaire des modèles. Pour y remédier, le Centre des monuments nationaux, avec l'aide d'entités comme le Centre national de Préhistoire et le CNRS UMR/MAP, a développé un cahier des charges standard incluant toutes les recommandations et tous les paramètres nécessaires pour optimiser l'utilisation, favoriser la réutilisation des modèles 3D et mutualiser les coûts.

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, comme le miroir d’eau du château d’Azay-le-Rideau, qui sont difficilement numérisables et laissent des trous dans les modèles 3D. 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 heure par heure, est indispensable afin de gérer la coactivité avec le public. Un monument comme l’Arc de triomphe, a priori simple à numériser sur le plan technique, devient ainsi beaucoup plus complexe.

Lors de la reconstruction 3D, phase consistant à traiter et assembler les données, certains 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 actuels, surtout au sein d’une institution culturelle. Dans cette optique, la décimation, c’est-à-dire la simplification du rendu, peut également être nécessaire. Cette technique consiste à supprimer certaines arêtes des triangles de la maille pour créer des zones plus grandes et donc moins détaillées. Divers autres problèmes peuvent survenir et le rendu visuel reste difficile à objectiver, ce qui rend indispensables les itérations pour assurer la qualité du modèle final.

Par ailleurs, les institutions culturelles exigent de plus en plus des prestataires ou partenaires qu'ils fournissent les données brutes d'acquisition en plus des assemblages finaux. Cette approche vise à maximiser les possibilités de réutilisation des données, permettant de compléter le modèle 3D ou de le réassembler plus tard avec des logiciels plus performants. Pour cela, 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. Pour une meilleure compréhension de la méthodologie appliquée par le prestataire ou partenaire, la livraison des métadonnées, à savoir les informations enregistrées par le matériel de numérisation, ainsi que des paradonnées, « données recueillies en parallèle d’un dispositif de collecte et qui en décrivent le processus, là où les métadonnées décrivent les données collectées » est nécessaire (Brunel, 2021). Il est également essentiel de mettre en place des infrastructures de stockage robustes, incluant au minimum une redondance, afin de pérenniser les données et de faciliter leur exploitation.

Une fois ce stockage assuré, il convient de trouver un ou plusieurs logiciels de visualisation pour lire les modèles 3D. La pléthore d’options sur le marché ne rend pas le choix aisé : logiciels gratuits et open source, solutions propriétaires ou logiciels payants. Au Centre des monuments nationaux, nous utilisons principalement Blender et Cloud Compare, tous deux gratuits. Dans le cadre du chantier de la tour Saint-Nicolas de La Rochelle, nous testons la solution Aïoli, développée par le CNRS UMR/MAP.

Nous souhaitons également expérimenter 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 et 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. À l’aide des annotations, l’utilisateur pourra 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 monuments et ne permettent pas l’utilisation de plateforme de visualisation collaboratives en ligne. Cette visite virtuelle pourrait aussi servir en amont des numérisations pour remplacer la visite de repérage sur site qui n’est pas toujours possible pour des raisons de conservation.

Enfin, nous testons la visualisation des données à l’échelle 1 grâce au Téléport. Cette solution conçue par Dassault Systèmes permet, dans une salle spécialement équipée, de se déplacer avec un casque de réalité virtuelle dans un nuage de points. L’expérience est que ce mode de visualisation permet de se repérer beaucoup plus facilement dans un site complexe et d’identifier des détails invisibles sur un écran 2D.

## Technologies d’acquisition les plus répandues

Pour numériser un monument en trois dimensions, plusieurs technologies existent, notamment la lasergrammétrie et la photogrammétrie.

De manière schématique, la lasergrammétrie consiste à balayer le monument avec un scanner. L'analyse de l'impact des impulsions 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 (en anglais : SLAM *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.

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 en produisant un nuage de points texturé 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 ou encore le gravier. Certes, l’investissement matériel est moindre puisqu’il suffit d’un appareil photo mais si le site ne peut être acquis entièrement par drone, l’acquisition sera en pratique beaucoup plus longue et beaucoup plus coûteuse. Il est donc toujours intéressant de questionner sa nécessité au regard des usages envisagés.

Une autre méthode, très précise et principalement utilisée pour les objets, est celle de la lumière structurée. Le scanner envoie sur l’objet un motif lumineux puis capture ses déformations lorsqu'il entre en contact avec la surface. L’analyse de ces déformations permet de reconstruire l’objet en 3D.

En pratique, ces technologies sont souvent combinées. La lasergrammétrie permet d’aligner correctement les photos et d’éviter que le modèle résultant n’ondule. Pour un objet, des photographies pourront être plaquées sur le modèle créée à partir de lumière structurée afin de lui fournir une belle texture.

## Technologies d’acquisition innovantes

Depuis quelques années sont apparues de nouvelles technologies qui révolutionnent la chaîne de reconstruction 3D et donc l’acquisition, car elles sont capables de reconstruire de façon hyperréaliste un monument avec beaucoup moins de données d’entrée. Par exemple, là où une photogrammétrie traditionnelle exige des milliers de photos, elles se satisferont de quelques centaines.

Ce sont les champs de rayonnement neuronaux (en anglais : *NeRF* pour Neural Radiance Fields), apparus en 2020 et les *3D Gaussian splatting* *(3DGS)* annoncées en août 2023. Nous les avons testées et comparées avec deux partenaires, Lay3rs et le Commissariat à l’énergie atomique, dans deux monuments aux caractéristiques très différentes, l’abbaye de Montmajour située près d’Arles et l’Hôtel de la Marine, place de la Concorde à Paris.

La méthode *NeRF* utilise un réseau de neurones qui, à partir de quelques images judicieusement choisies, reconstruit le faisceau des rayons lumineux à travers la scène (Mildenhall, 2020). 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 votre position dans l’espace. La représentation de la scène est très riche et permet facilement 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 peuvent être considérables.

Dans le cas du *3D Gaussian Splatting (3DGS)*, une simple approximation statistique au moyen justement de distributions gaussiennes permet à partir d'une photographie de reconstituer la répartition de ses couleurs dans l'espace (Kerbl, 2018). En recommençant, en affinant et en combinant plusieurs photographies, il devient 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, pour plusieurs raisons, convient aujourd’hui surtout à des usages de médiation culturelle et scientifique.

Les deux bénéfices principaux de ces nouvelles technologies innovantes 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.

# Jumeau numérique ou représentation numérique ?

Au cours des différentes étapes, de l’acquisition à l’exploitation, en passant par la reconstruction 3D, les interprétations sont nombreuses et sont dues à la fois aux machines et aux opérateurs. Dans le cadre du projet de numérisation de la grotte de Font-de-Gaume, plusieurs anomalies ont été repérées par les équipes, telles que des chevrons en ligne, des zébras et des zones concaves qui apparaissaient convexes. La difficulté consiste parfois à distinguer sur une même zone ce qui relève de l’erreur de reconstruction, de l’ombre portée lors de l’acquisition, ou du tracé paléolithique.

Par ailleurs, lors du projet de numérisation des collections du château de Champs-sur-Marne, il est apparu que le choix de la brillance, de l’apparence des couleurs et du comportement de la lumière au contact de l’objet 3D dépendent du choix de l’opérateur. Ce facteur est important car, par exemple, la différence de couleur d’une pierre va révéler la présence d’une fuite d’eau sous-jacente. Il faut donc restituer au mieux les couleurs d’origine.

Au vu de ces différents éléments, le Centre des monuments nationaux ainsi que plusieurs autres entités s’attachent à ne pas utiliser le terme de « jumeau numérique », qui signifierait que le modèle 3D est une réplique parfaite et conforme de l’objet physique, comme une photocopie peut l’être d’un document 2D. En effet, d’une part, vérifier la conformité d’un modèle à l’échelle d’un monument, c’est-à-dire potentiellement pierre par pierre, est difficilement envisageable avec les moyens techniques actuels ; d’autre part, le monument et les objets de collection subissent des transformations au fur et à mesure du temps que l’objet numérique ne peut décemment pas suivre. Ainsi, le terme qui nous semble plus exact est « représentation numérique ».

Enfin, plusieurs aspects juridiques relatifs à la cession de droits sont à soulever. 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 alors à disposition en open source. 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 lors de nos appels d’offre des propositions de prix variant de 1 à 4 — et pour l'application des textures, où l'interprétation et les choix humains jouent un rôle important, la question se pose du geste artistique. Une telle considération pourrait entraîner des changements significatifs dans la gestion des cessions de droits actuellement en vigueur et nous avons déjà commencé 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 en effet pas la même expression qu’un modèle maillé texturé.

Le modèle 3D tend ainsi à perdre son statut de double un peu magique capable de se substituer au monument en toutes circonstances, il est remplacé par une variété de représentations numériques optimisées pour des usages pérennes.

### Légendes des illustrations

1. Reconstitution 3D du forum du site archéologique de Glanum © IMA Solutions - Centre des monuments nationaux
2. Reconstitution 3D du reflet du château d’Azay-le-Rideau © Mira - Centre des monuments nationaux
3. Modèle 3D d’un objet des collections du château de Champs-sur-Marne © HelloCapture - Centre des monuments nationaux
4. Acquisition par drone de l’Arc de triomphe © Art Graphique et Patrimoine - Centre des monuments nationaux
5. Acquisition lasergrammétrique de la grotte de Font-de-Gaume © Agence Galimey - Centre des monuments nationaux
6. Rendu 3D de la salle à manger de l’Hôtel de la Marine en Gaussian splatting © Lay3rs et CEA List - Centre des monuments nationaux

### Bibliographie

Bergeot Patrick, Brochard Maud, Estavoyer Morgane, Léonet Antoine, *Cahier des Clauses Techniques Particulières standard pour les numérisations 3D*. Paris : Centre des monuments nationaux, 2024.

Bergeot Patrick, Erneux Catherine, Estavoyer Morgane, *newsletter LinkedIn du programme « CMN Numérique »*, Partis : Centre des monuments nationaux, 2023-2024

Bernhard Kerbl, Georgios Kopanas, Thomas Leimkühler, and George Drettakis. 2018. 3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering. *—ACM Trans. Graph. 0,* 2018, 14 pages.

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, 124 pages.

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, 25 pages.

Granier Xavier, Chayani Mehdi, Abergel Violette, Bénistant Pascal, Bergerot Laurent, et al, *Les recommandations du Consortium 3D SHS*. [Rapport Technique] CNRS; SHS. 2019, 204 pages.

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, 70 pages.

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.