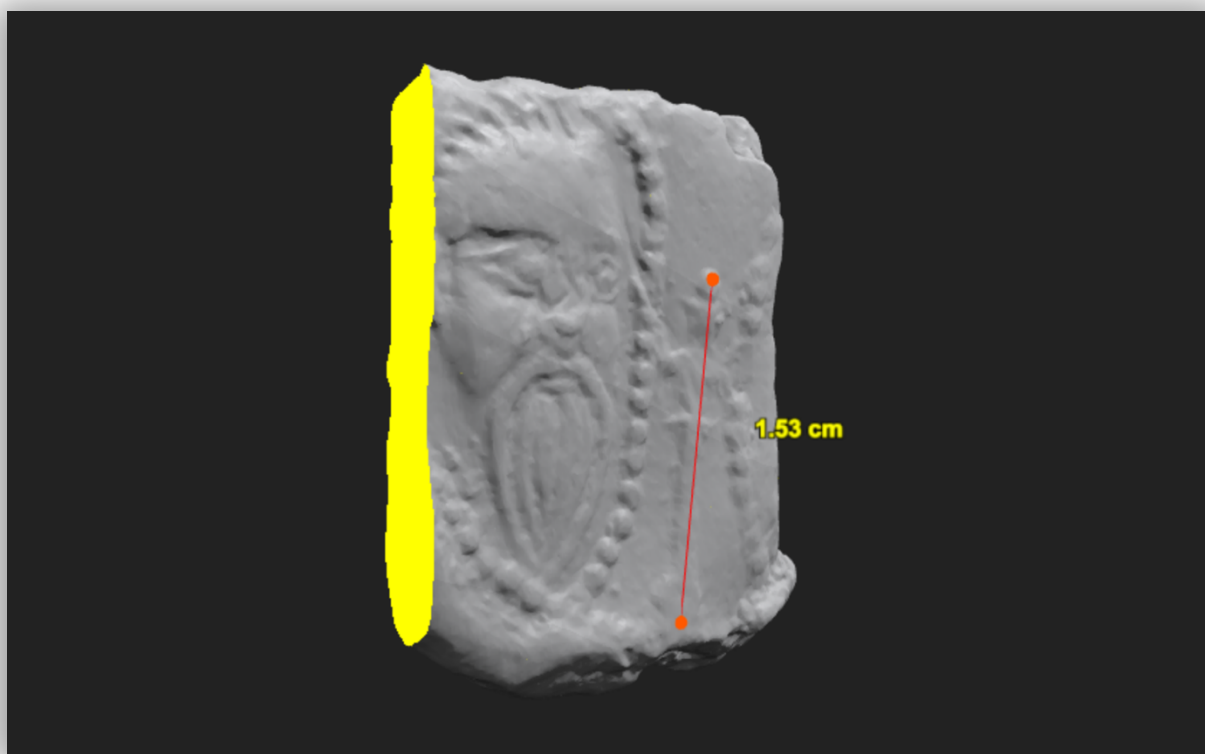


Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
UFR 03

**Numériser, modéliser, publier, conserver : Enjeux et pratiques de
la valorisation numérique du patrimoine archéologique à travers
la 3D et le web sémantique**



Master 2 Valorisation et médiation du patrimoine archéologique

Année 2024-2025

Présenté par

François Denis de Senneville

Sous la direction de Vincenzo Capozzoli

Remerciements

Je souhaite tout d'abord exprimer ma gratitude la plus sincère à mon professeur et tuteur de mémoire, Vincenzo Capozzoli. Son accompagnement, sa disponibilité et son implication ont été essentiels tout au long de cette année. Ses retours toujours constructifs m'ont motivé à donner le meilleur de moi-même et à poursuivre avec conviction dans la voie que j'ai choisie. Grâce à son soutien, j'ai pris confiance en ma capacité à trouver ma place dans le domaine de l'archéologie numérique.

Je tiens également à remercier François Giligny pour son suivi et ses conseils. Son aide ainsi que celle de Monsieur Capozzoli ont été décisives dans un moment critique de mon année universitaire, lorsque l'annulation de mon second stage a failli compromettre la réalisation de mon cursus. Grâce à cette réactivité et à leur bienveillance, une solution a pu être trouvée.

Je voudrais aussi adresser mes remerciements à mon tuteur de stage, Pierrick Tigreat, du Service Régional Archéologique d'Île-de-France. Son écoute, sa disponibilité et ses conseils attentifs m'ont permis de progresser dans ma pratique et d'élargir ma réflexion. Il a su m'accompagner avec patience et bienveillance, tout en me donnant les moyens de mettre en valeur mes compétences et d'en développer de nouvelles.

Mes remerciements les plus profonds vont également à ma mère. Son soutien indéfectible a été pour moi un pilier tout au long de cette année. Dans les moments de doute, elle a su trouver les mots justes pour me redonner confiance et avancer avec sérénité. Son regard critique sur mes travaux, ainsi que son aide précieuse, m'ont été d'un grand secours tout au long de cette année. Rien de ce que j'ai accompli n'aurait été envisageable sans son appui.

Enfin, je voudrais remercier ma compagne. Elle m'a poussé à persévérer dans ce que je désire entreprendre. Elle n'a cessé de croire en mes capacités, lorsque moi-même je doutais, son regard bienveillant a constitué une source d'énergie. Sa confiance en ma volonté de me professionnaliser dans le domaine de l'archéologie numérique a été une source constante de motivation et d'inspiration.

Toutes les images ont été produites par l'auteur de ce mémoire,
sauf indication contraire

Sommaire

REMERCIEMENTS	3
SOMMAIRE	5
INTRODUCTION.....	7
CHAPITRE 1 : CONTEXTE ET ENJEUX DES DEUX EXPÉRIENCES DE STAGE	10
1.1 VALORISATION ARCHÉOLOGIQUE AU SERVICE RÉGIONAL DE L'ARCHÉOLOGIE D'ÎLE-DE-FRANCE	10
1.2 VERS UN CONSERVATOIRE 3D À L'UNIVERSITÉ PARIS 1, GESTION ET VISUALISATION DES DONNÉES 3D	12
CHAPITRE 2 : L'ARCHÉOLOGIE À L'ÈRE DU NUMÉRIQUE : CONTEXTES, OUTILS ET ENJEUX.....	14
2.1 L'ARCHÉOLOGIE À L'ÈRE DE LA 3D : PANORAMA CRITIQUE	14
2.1.1 <i>Pourquoi numériser ? Objectifs scientifiques, patrimoniaux et de médiation.....</i>	<i>14</i>
2.1.2 <i>Numérisation 3D : défis, limites, évolutions.....</i>	<i>17</i>
2.2 DE LA VALORISATION À LA CONSERVATION	19
2.2.1 <i>Valorisation de la 3D en ligne : diffusion via sites et plateformes web, expositions virtuelles, ...</i>	<i>20</i>
2.2.2 <i>Valorisation de la 3D immersive et sensorielle.....</i>	<i>21</i>
2.2.3 <i>Conserver : archivage pérenne, open-source et FAIR, métadonnées.....</i>	<i>23</i>
2.3 ENJEUX TRANSVERSAUX.....	26
2.3.1 <i>Un Facteur humain important</i>	<i>26</i>
2.3.2 <i>Stockage de la donnée : enjeux matériels</i>	<i>28</i>
2.3.3 <i>Rationalisation des usages.....</i>	<i>30</i>
CHAPITRE 3 : NUMÉRISER POUR VALORISER - LE CAMP DES ZOUAVES (SRA ÎLE-DE-FRANCE)	32
3.1 UN PATRIMOINE DE GUERRE À REDÉCOUVRIR : CONTEXTE ET ENJEUX DU SITE	32
3.1.1 <i>Présentation du Camp des Zouaves, enjeux de médiation et de valorisation.....</i>	<i>32</i>
3.1.2 <i>Les missions du stage.....</i>	<i>35</i>
3.2 CHAÎNE DE PRODUCTION : DE LA PHOTOGRAPHIE MUSÉALE À LA PHOTOGRAMMÉTRIE	36
3.2.1 <i>Création de photographies muséales</i>	<i>36</i>
3.2.2 <i>Workflow et Méthodologie de numérisation.....</i>	<i>40</i>
3.2.3 <i>Résultats et contraintes rencontrées</i>	<i>48</i>
3.3 CRÉATION DU SITE DE VALORISATION ET MISE EN LIGNE.....	50
3.3.1 <i>Construction du site web : arborescence, design, choix techniques.....</i>	<i>51</i>
3.3.2 <i>Retour critique : qualité, accessibilité, réception</i>	<i>55</i>
3.4 ANALYSE CRITIQUE : POTENTIALITÉS, LIMITES ET ENSEIGNEMENTS	57
3.4.1 <i>Quels supports pour quel discours ? Choix de valorisation numérique et portée scientifique</i>	<i>57</i>
3.4.2 <i>Apports et limites pour ma formation</i>	<i>60</i>
CHAPITRE 4 : VERS UN CONSERVATOIRE 3D UNIVERSITAIRE (PARIS 1 – PANTHÉON SORBONNE)	62
4.1 OBJECTIFS : CONSERVATION, PÉDAGOGIE, RECHERCHE	62
4.1.1 <i>Une vitrine universitaire en complémentarité avec le CND3D</i>	<i>62</i>
4.1.2 <i>Enjeux pédagogiques et de formation pour les enseignants et les étudiants</i>	<i>63</i>
4.1.3 <i>Panorama de la valorisation patrimoniale et archéologique de la 3D sur le WEB.....</i>	<i>64</i>
4.2 STRUCTURATION DES DONNÉES 3D	70
4.2.1 <i>Ontologie de métadonnées</i>	<i>70</i>
4.2.2 <i>Cartographie des formats selon usages (maillage, nuage de points)</i>	<i>72</i>

4.2.3	<i>Gouvernance des fichiers, droits et licences des données 3D</i>	74
4.3	BENCHMARK, TESTS ET DÉVELOPPEMENTS DES VISIONNEUSES	76
4.3.1	<i>Présentation des différentes visionneuses sélectionnées</i>	76
4.3.2	<i>Résultats des tests : Potree, Smithsonian Voyager, 3DHOP</i>	79
4.3.3	<i>Prototype hybride et viewer personnalisé en Three.js</i>	81
4.3.4	<i>Apports et limites pour ma formation</i>	84
CHAPITRE 5 : REFLEXION DE SYNTHÈSE : ARTICULER VALORISATION ET CONSERVATION DANS LES PRATIQUES NUMÉRIQUES EN ARCHÉOLOGIE		86
5.1	COMPRENDRE LA CHAÎNE COMPLÈTE DE LA DONNÉE 3D PATRIMONIALE : DE LA NUMÉRISATION À LA DIFFUSION PUBLIQUE ET À L'ARCHIVAGE PÉRENNE.	86
5.1.1	<i>Enseignements croisés des deux cas d'étude</i>	86
5.1.2	<i>Positionner le curseur entre médiation et rigueur scientifique</i>	89
5.2	L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE COMME OUTIL D'ACCÉLÉRATION ET D'ÉLARGISSEMENT DES COMPÉTENCES	91
5.2.1	<i>L'IA élargit le champ d'action et compétences de l'archéologue dans les projets numériques</i>	91
5.2.2	<i>Limite : Outil d'accompagnement, non substitut aux choix scientifiques</i>	93
CONCLUSION.....		96
ANNEXES		100
BIBLIOGRAPHIE.....		120
WEBOGRAPHIE		124
TABLE DES FIGURES		125
TABLE DES ANNEXES.....		127

Introduction

Comme toute Science, l'archéologie évolue de façon cyclique, ainsi que l'a conceptualisé Thomas S. Kuhn dans son ouvrage majeur, *La Structure des révolutions scientifiques* (1962). Il propose une vision non-linéaire du progrès scientifique, basée sur des phases de bouleversements et de stabilité, ce sont donc des cycles de crises et de révolutions venant répondre à un paradigme émergent. L'archéologie n'en fait pas exception, sans évoquer une révolution au sens de Kuhn, la discipline archéologique connaît une transformation profonde sous l'effet du numérique qui s'est ancré dans nos pratiques, nos outils et nos méthodes. Le numérique évolue souvent plus vite qu'on ne le maîtrise. L'adaptation est parfois complexe, la compréhension également, mais surtout la rationalisation de nos pratiques numériques l'est encore plus. En effet chaque nouvelle technologie offre la possibilité de découvrir des méthodes d'acquisition, de traitement de la donnée, plus rapides, plus efficaces, et apportent une évolution dans le domaine de l'archéologie.

Grâce à sa tendance pluridisciplinaire, et depuis les fondations d'une discipline scientifique, l'archéologie n'a cessé de suivre des innovations et des techniques. L'adoption des technologies numériques n'est pas un phénomène récent, puisque les années 1950 voient l'utilisation de premiers ordinateurs dédiés au traitement de données archéologiques, pour des calculs automatisés ou des statistiques (Tufféry 2023). Le développement numérique s'opère dans les années 1980, car l'usage de l'informatique se répand avec l'arrivée des micro-ordinateurs et des ordinateurs personnels, décuplé par l'avènement de l'archéologie préventive (Tufféry 2022a, p. 29). Depuis les années 2010, l'acquisition de données 3D in situ s'est banalisée, par la démocratisation des techniques photogrammétriques, lasergrammétriques, scannerisations, RTI (Reflectance Transformation Imaging), tomographiques, Lidar, etc... (Carpentier 2019). Cet avènement s'explique en partie par l'arrivée de matériel de plus en plus léger, avec par exemple l'utilisation quasi systématique des drones permettant la capture spatiale et graphique. Les algorithmes ne cessent d'évoluer en parallèle du développement accru de l'hardware. La prise de données in situ a alors été bouleversée, ainsi qu'en témoigne le nombre croissant de formations au sein des universités mais également des institutions ou organismes archéologiques. La 3D fait désormais partie du socle méthodologique des nouveaux archéologues.

La 3D offre des opportunités inédites en termes de valorisation du patrimoine archéologique, notamment par la capture de formes, de volumes et d'apparences de tous types d'objets ou de sites, produisant une réplique numérique fidèle sous forme de nuages de points ou de maillages. Ces modèles numériques servent à visualiser des hypothèses, à synthétiser des résultats scientifiques, ainsi qu'à quantifier des données, tout en permettant une représentation des projets patrimoniaux depuis la phase de fouille jusqu'à la diffusion au public. Par conséquent, la 3D dessert à la fois des objectifs scientifiques, patrimoniaux et de valorisation, ce qui concourt à un renouvellement des pratiques de médiation culturelle. Le patrimoine est alors accessible sous de nouvelles formes, telles que des expériences immersives, expositions et collections en ligne. En outre, cela ouvre des perspectives de conservation des données sur le long terme. Toutefois, cette technologie pose des enjeux et des défis, notamment au sujet de son intégration, sans supplanter les méthodes classiques, ainsi que la question de garantir une qualité de production de numérisation scientifique, enfin comprendre comment gérer les masses de données produites de façon éthique et pérenne. En somme, il s'agit de mettre en place un usage critique et raisonné de ces outils et méthodes numériques afin que chaque nouvelle technologie soit mise au service d'une science ouverte, plutôt que se laisser guider par une mode technologique. En parallèle, il est nécessaire d'assurer une souveraineté numérique en matière de gestion des données patrimoniales.

C'est dans ce contexte en pleine mutation que s'inscrit mon parcours de formation en archéologie, marqué par une appétence pour les technologies numériques alliée à un désir de production de données archéologiques. En effet, mon intérêt pour l'archéologie ne s'est jamais limité à une époque ou un type de mobilier précis, réellement animé par la production de résultats concrets sur les terrains ainsi que par une passion pour l'informatique. Le numérique appliqué à l'archéologie m'a permis d'assouvir mon désir de production et de valorisation de données archéologiques. Au fil de mes expériences de terrain, j'ai pu appréhender plus profondément le panel de méthodes et d'outils disponibles, convaincu que ces techniques peuvent servir une science ouverte et rigoureuse, tout en soulevant des problématiques inhérentes à sa propre pratique. J'ai donc tout d'abord orienté mon cursus vers la valorisation numérique de l'archéologie avec une formation en master "valorisation et médiation du patrimoine archéologique" qui m'a permis d'acquérir des bases théoriques et pratiques pour allier rigueur scientifique, innovation technologique. L'objectif de cette année a été pour moi l'occasion d'aborder une phase essentielle du cycle de vie des données, dans le cas présent la 3D. Pour ces raisons, je souhaite compléter cette étude par un second master en recherche dédiée à la phase qui précède

Dans le cadre de ce mémoire de fin d'étude, j'ai pu réaliser des expériences de stages complémentaires qui constituent le cœur de cette analyse. Le premier stage s'est déroulé auprès du Service Régional d'Archéologie (SRA) au sein de la Direction Régionale des Affaires Culturelles (DRAC), avec pour mission la numérisation 3D et la valorisation en ligne des vestiges du site archéologique du Camp des Zouaves à Milly-la-Forêt en Essonne. Le second a

été effectué à l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne et portait sur la conception d'un conservatoire universitaire 3D dédié aux collections 3D de l'université. Ma tâche consistait à réfléchir à la conception d'une plateforme web sémantique pour la gestion et diffusion de mobiliers archéologiques 3D existants.

Ces deux projets menés dans des contextes institutionnels différents avec des objectifs de production en lien m'ont incité à soulever une question de fond. En quoi la numérisation 3D et les plateformes web sémantiques transforment-elles les pratiques de valorisation patrimoniale, en conciliant science ouverte, contraintes techniques et souveraineté numérique ? Cela propose de questionner les nouveaux outils et environnements numériques dédiés à la mise en valeur du patrimoine archéologique, ainsi qu'aux enjeux d'accessibilité aux connaissances, la pérennisation et la maîtrise des données par les organismes et institutions patrimoniales. Pour répondre à ces questionnements multiples, ce mémoire s'articule en cinq chapitres. Le premier permet de dresser un contexte ainsi que les enjeux des deux expériences de stage et leurs objectifs généraux. Le second chapitre propose un état de l'art sur l'archéologie à l'ère du numérique en particulier au sujet des productions tridimensionnelles. Il explore les cadres théoriques et les outils de la 3D, y compris les pratiques actuelles et analyse les enjeux techniques et scientifiques qui en découlent. Il présente ensuite les motivations à l'origine de ces productions, leurs usages en termes de valorisation et de recherche, et conclut sur les défis liés à la conservation et la rationalisation des productions de ces données. Les chapitres « trois et quatre » évoquent les études de cas. Le troisième chapitre est consacré à la valorisation numérique du Camp des Zouaves, et aborde le contexte historique dans lequel cette valorisation se place, puis décrit et analyse la mise en œuvre de la chaîne de production de numérisation et du développement d'une plateforme web de médiation pour la diffusion de son contenu. Les résultats seront analysés par le biais de retours d'utilisateurs et d'une réflexion critique. Le quatrième chapitre, dédié au conservatoire 3D universitaire de Paris 1, examine les objectifs du projet de vitrine de collections 3D au travers des besoins de conservation pérenne des données, de visualisation, d'intérêt pédagogique et de recherche. Il évoque également la structuration des données 3D avec la normalisation des métadonnées, des formats et des droits, ainsi que les choix techniques mis en œuvre pour poser les bases d'une plateforme sémantique de diffusion et d'archivage 3D. Enfin le dernier chapitre se veut être une analyse transversale des leçons tirées de l'ensemble des travaux produits, afin de confronter les résultats des deux cas d'études et identifier une articulation cohérente des perspectives de valorisation et de conservation du patrimoine archéologique à l'ère du numérique et de l'équilibre à trouver entre les enjeux de sciences ouvertes et de souveraineté de ces infrastructures. Ce chapitre a vocation à synthétiser afin d'élargir la réflexion aux évolutions émergentes, comme le rôle potentiel de l'intelligence artificielle au sujet des pratiques numériques en archéologie.

Chapitre 1 : Contexte et enjeux des deux expériences de stage

Ce chapitre introductif présente le contexte et les enjeux des deux terrains de stage sur lesquels repose ce mémoire. Il est essentiel de comprendre le rôle, la nature du projet et les missions suivies dans chaque structure d'accueil, sans détailler précisément chaque production. Cette première perspective situe les deux études de cas dans leur contexte, cadres institutionnels et scientifiques respectifs.

1.1 Valorisation archéologique au service régional de l'archéologie d'Île-de-France

Le Service régional de l'archéologie d'Île-de-France est un service placé sous l'autorité administrative de la Direction Régionale des Affaires Culturelles, et est donc un service déconcentré du ministère de la Culture. Les missions du SRA sont exercées conformément à la législation sur le patrimoine archéologique. Il a pour mission la protection, l'inventaire scientifique ainsi que la diffusion du patrimoine archéologique régional. A ce titre, ce service est chargé d'assurer l'application et la réglementation relative à l'archéologie préventive et programmée. Il permet de contrôler et d'encadrer scientifiquement les opérations de ces fouilles de façon systématique. Le SRA joue donc un rôle fondamental dans la mise à disposition des connaissances archéologiques produites, accessibles auprès de la communauté scientifique ainsi que du grand public, avec notamment la gestion de la carte archéologique à l'échelle régionale et des publications relatives aux opérations réalisées au cours de l'année. Cela favorise l'accès et la diffusion des résultats de recherche. On y retrouve l'élaboration de dispositifs variés tels que des publications scientifiques, des expositions, des journées d'études.

données par photogrammétrie au traitement des modèles tout en assurant la qualité des résultats sans référenciel au sein du SRA, puis aménager la plateforme de diffusion web avec une présentation attrayante et pédagogique afin de l'adapter à différents publics. Ce cas d'étude interroge sur la place du numérique au sein d'un service archéologique régional, mais aussi sur l'intégration de nouveaux outils de médiation sans moyens dédiés en interne, et donc influant sur l'assurance de la pérennité d'une initiative née dans le cadre d'un stage. Le bilan de cette expérience mesure le potentiel offert par la 3D et la mise en valeur de collections sur le web pour un seul site archéologique, ainsi que les limites pratiques dans ce contexte institutionnel où des ressources et profils techniques peuvent être restreints. Ce retour d'expérience contribue à questionner le rôle du numérique dans un processus de valorisation archéologique tout en identifiant des conditions de succès et d'échec dans ce type de projet au sein d'un organisme public archéologique tel que le SRA.

1.2 Vers un conservatoire 3D à l'université Paris 1, gestion et visualisation des données 3D

La seconde expérience s'est déroulée dans un contexte universitaire au sein de l'UFR 03 d'histoire de l'art et d'archéologie de l'université Paris 1 Panthéon-Sorbonne sous la direction de Vincenzo Capozzoli. Ce stage s'inscrit dans une stratégie de valorisation numérique des collections de l'université. L'objectif central était de concevoir et de poser les bases d'un conservatoire 3D universitaire, c'est-à-dire une plateforme institutionnelle permettant de visualiser et conserver durablement des modèles 3D d'objets patrimoniaux appartenant à l'université. Il s'agit ici de créer une infrastructure pérenne capable de rassembler des modèles issus de multiples provenances et de divers contextes, tout en offrant un accès ouvert ergonomique à ces données. Ce stage a donc une double démarche à travers une réflexion méthodologique et une expérimentation technique.

Le travail effectué autour de la réflexion méthodologique associe une expérimentation technique concrète dans une optique d'application de principe FAIR et donc de science ouverte. Cela passe par une réflexion au sujet d'une ontologie de métadonnées adaptées au modèle 3D afin de les décrire de façon normalisée, ainsi que par une prise en compte des paradonnées techniques, c'est-à-dire des informations sur la création du modèle lui-même à travers les détails techniques. La plateforme universitaire doit servir non seulement de vitrine, mais également d'un espace d'archives structuré, dédié à la recherche, et permettant de pérenniser des données dans le temps. En parallèle, le projet a une ambition pédagogique, pour les enseignants et les étudiants de l'université, il donnera la possibilité de visualiser en ligne les

artefacts en 3D et d'expérimenter une nouvelle forme d'études et d'enseignements de ce mobilier archéologique. Le but est de sensibiliser les étudiants au potentiel qu'offre la 3D, ainsi que de les former aux bonnes pratiques de documentation des données numériques, aspects essentiels des enjeux du conservatoire.

D'un point de vue technique, cette expérience a permis d'explorer des solutions existantes afin de bâtir cette plateforme web sémantique. Le choix s'est porté sur le CMS Omeka S qui était déjà implanté sur les serveurs de l'université afin de profiter d'une base stable dédiée à l'univers patrimonial. Omeka S offre un cadre modulable afin de gérer des collections patrimoniales dans un système sémantique. La réflexion s'est portée sur l'architecture du site, et l'intégration d'un conservatoire 3D, au travers du dialogue entre les collections et les objets, le choix des schémas de métadonnées, et enfin, le développement et l'inclusion des solutions spécifiques pour la visualisation des modèles 3D. Cela a occasionné un travail de comparaison entre différentes visionneuses 3D disponibles tels que 3DHOP, Smithsonian Voyager et Potree ou encore les fonctionnalités IIIF. L'intérêt est d'identifier la ou les visionneuses les plus adaptées aux besoins spécifiques de Paris 1 en matière de recherche et d'enseignement, par les capacités d'interaction offertes pour l'utilisateur, l'ergonomie de l'interface et la facilité d'intégration au sein d'Omeka S. La gouvernance des données 3D a été examinée au travers des droits d'auteur, des licences open source et de la gestion des mises à jour des modèles dans le temps, sujet qui rejoint l'ensemble des questionnements à propos de la conservation des modèles 3D dans un cadre pérenne. La création d'un conservatoire 3D universitaire représente un enjeu stratégique tant pour la valorisation que pour la conservation du patrimoine. Il démontre qu'une université peut être un acteur de diffusion numérique de données archéologiques, en s'alignant avec des standards nationaux et internationaux en matière de gestion de données culturelles.

Ce projet s'inscrit dans une réflexion à large échelle sur l'infrastructure nécessaire pour gérer des ressources 3D multiples dans un cadre durable et ouvert à tous. Il s'agit d'un terrain complémentaire afin d'analyser comment la numérisation 3D et les plateformes web sémantiques dédiées transforment les pratiques de valorisation patrimoniale, à travers la création de contenus numériques, leur diffusion et leur archivage à long terme.

Chapitre 2 : L'archéologie à l'ère du numérique : contextes, outils et enjeux

En préambule, il semble nécessaire d'appréhender le terme "numérique" et son utilisation en archéologie.

Le numérique peut être défini de plusieurs façons. Au sens technique, l'adjectif se réfère au codage, à la transmission d'informations sous formes de chiffres, et de fait, il est opposé à l'analogique. En informatique, il s'agit d'un langage binaire qui est la base de toute opération de calcul et logique au sein du système (Verriez 2023, p. 16). Recouvrir l'ensemble des définitions de numérique semble illusoire, car cette technique est en évolution constante. Le numérique en archéologie fait donc référence à la manière dont une information est acquise et par quel moyen, elle est traitée et exploitée.

En ce qui concerne cette étude, il s'agit de détailler un des aspects du numérique, celui des acquisitions en trois dimensions, dans le cadre d'une mise en valeur des données archéologiques. Le recours à l'éventail d'outils dédiés à la conception et au traitement de ces données passe par un questionnement sur le cycle de vie de cette donnée 3D.

2.1 L'archéologie à l'ère de la 3D : panorama critique

2.1.1 *Pourquoi numériser ? Objectifs scientifiques, patrimoniaux et de médiation*

L'acquisition 3D en archéologie consiste à scanner un objet ou une réalité spatiale, afin d'en capturer sa forme, son volume et ses couleurs en trois dimensions, et ainsi créer une réplique numérique sous forme de maillage, ou de nuage de points (Delamare 2024, p. 49). Contrairement à d'autres méthodes et techniques appliquées en archéologie, il est complexe de définir un bilan exhaustif des utilisations et applications de la 3D, car ces outils évoluent, en particulier à l'heure actuelle, de façon constante (Delamare 2024, p. 394).

La numérisation est une méthode desservie par des outils, motivée par une multitude d'objectifs qui recoupent les sphères scientifiques, patrimoniales et de médiation. Comme

décrit dans le livre blanc du Consortium 3D " *La production de modèles numériques 3D ne peut être une fin en soi. Les modèles 3D servent à visualiser des hypothèses, à synthétiser des résultats. Ils permettent de quantifier des données réelles ou bien restituées. Dans le champ du patrimoine, les données numériques 3D accompagnent les projets depuis les phases d'acquisition jusqu'à la valorisation* " (Abergel et al. 2017, p. 7). Il est vrai que la production 3D n'a de sens que si elle est reliée à une interprétation scientifique, aux métriques, et aux dispositifs de diffusion qui l'exposent. Il s'agit d'un cycle complet qui guide chaque étape et nourrit une finalité scientifique et patrimoniale et non seulement la technique qui guide le projet.

La 3D offre de nombreux avantages à plusieurs égards : Une analyse et une manipulation non destructives, pour des objets fragiles, pour des sites difficiles d'accès ou d'étude (Nicolas et al. 2016). La réalisation de jumeaux numériques offre un moyen rapide d'enregistrement et d'analyse des données, et si les méthodes d'acquisition sont décrites avec précision, elle favorise la transparence et la reproductibilité de la donnée. C'est également un moyen de conservation et d'archivage. Elle favorise le travail collaboratif entre spécialistes, permettant également des analyses à distance, lorsque les moyens sont mis en oeuvre. Enfin aujourd'hui, la 3D est une tendance en termes de support de médiation scientifique, de valorisation des travaux et des biens archéologiques. C'est la raison pour laquelle la réalité augmentée comme la réalité virtuelle sont de plus en plus utilisées sur les projets destinés au grand public afin de renouveler l'offre patrimoniale.

Concernant les objectifs scientifiques, la numérisation permet d'acquérir et de produire de la donnée, d'analyser et d'interpréter, produire une documentation détaillée, et enfin mettre à disposition des données objectives et fiables. L'acquisition et la production de données en trois dimensions sont devenues omniprésentes. La numérisation ouvre la possibilité de construire des méthodes d'enregistrement et d'analyse se rajoutant aux méthodes traditionnelles dès la phase de fouille. Cette option répond fréquemment à des objectifs de gain de temps et de meilleure précision. Elle facilite les méthodes d'archivage de manière plus ou moins centralisée, et par conséquent simplifie l'étude à posteriori, avec par exemple, l'utilisation de coupes et de mesures permettant de conserver une rigueur scientifique. Le partage de ces données contribue à alimenter le processus de comparaison et par conséquent à améliorer les interprétations (Verriez 2023, p. 12). L'analyse et l'interprétation couplées à des outils adéquats, offrent des dispositifs de visualisation, de manipulation et de traitement de données car des outils adaptés permettent le calcul de géométrie (volume, surface, mesure, coupe), de phasage et d'assemblage virtuel (Granier et al. 2019, p. 136). Cependant il est essentiel de garder à l'esprit qu'il ne s'agit pas de baser toute l'analyse sur le modèle 3D, mais de tester et de représenter des hypothèses dans un cadre de processus de réflexion scientifique et donc de produire une documentation détaillée. Sorti du contexte de fouille, l'objet 3D offre une objectivité et une fiabilité d'analyse, en limitant certains biais d'interprétation inhérents aux

études à posteriori. Cependant une donnée en trois dimensions n'est fiable que si la chaîne d'opération suit et respecte des règles scientifiques de reproductibilité.

L'archéologie est par définition une science destructive. La numérisation se place comme une solution de préservation et de pérennisation du patrimoine archéologique. L'avènement de méthodes et outils numériques appliqués à l'archéologie mène également à la recherche d'un archivage à long terme, afin de rendre les données ouvertes et exploitables dans le temps. Un autre intérêt est par ailleurs la conservation d'un jumeau numérique de haute qualité, car en cas de destruction ou d'altération d'un objet d'étude archéologique, le modèle 3D acquiert une valeur patrimoniale importante (Laurent 2024, p. 44).

Enfin, la médiation et la valorisation sont des préoccupations finales de la numérisation. Aujourd'hui, l'ensemble de la population est sensibilisé aux moyens numériques disponibles offrant un accès à la valorisation du patrimoine archéologique. En effet ces technologies proposent des méthodes innovantes de partage des connaissances, au sein des infrastructures culturelles traditionnelles comme les musées, ou les sites archéologiques, mais aussi et surtout via internet. Cette diffusion des connaissances, et par conséquent des informations, atteint divers publics, universitaires, professionnels de l'archéologie ou grand public. L'intérêt est d'adapter ce partage en fonction du public cible. Comme expliqué précédemment, la " trois dimensions " dessert les objectifs scientifiques par un facteur interactif fort, et cela s'applique également à la médiation, car les formats 3D permettent d'illustrer de nombreux résultats scientifiques. Le potentiel archéologique offre des dispositifs variés comme la réalité virtuelle ou augmentée, des animations, des impressions 3D, ouvrant la médiation à un nouvel outil d'expérience sensorielle. Dans certains cas, cela autorise l'accès virtuellement alors que les sites originaux sont interdits au public, les grottes Chauvet ou Cosquer en sont de bons exemples (Tufféry 2022a, p. 309). L'essor et l'accessibilité à internet permettent donc un partage adapté au grand public comme au public scientifique.

Bien que le numérique appliqué à l'archéologie offre de formidables outils et possibilités, il est nécessaire de souligner que ces méthodes soulèvent des enjeux et des défis majeurs car l'ensemble des données archéologiques est concerné. Les professionnels de l'archéologie se doivent d'exercer un regard critique sur leurs pratiques numériques, pour une utilisation répondant clairement à des problématiques définies et nécessaires (Tufféry 2019). Le numérique est un outil, c'est une méthode appliquée à l'archéologie, ce n'est pas une discipline en soi. La sensibilisation à ces technologies est nécessaire, afin de s'approprier intelligemment et de façon rationnelle l'ensemble de ces outils.

2.1.2 Numérisation 3D : défis, limites, évolutions

La tendance à la numérisation soulève de nombreuses questions tant par le besoin de rationalisation de cette pratique, que par les moyens techniques d'acquisition et de matériel, de diffusion et de conservation. En effet l'utilisation de la 3D n'est pas toujours justifiée, parfois la valeur ajoutée n'est pas suffisamment importante et suit une tendance plus que la réponse à un besoin scientifique. Parfois, la qualité de reconstitution et de traitement des données ne correspond pas aux critiques scientifiques nécessaires (Tufféry 2022a, p. 97). Aujourd'hui, la 3D est une pratique durablement ancrée dans la recherche archéologique, mais s'accompagne de défis et de limites significatifs.

En termes de défis techniques, la production de données 3D est très chronophage et demande un matériel souvent particulièrement conséquent. De plus, cela génère une quantité considérable de données, provenant des différentes méthodes telles que les nombreuses photographies dédiées à la photogrammétrie, la scannerisation, la lasergrammétrie, le Lidar, la Tomographie, etc... Toutes ces acquisitions produisent des données hétérogènes qu'il faut ensuite rassembler (Thivet et al. 2019, p. 4). À la suite de ces méthodes d'acquisition se pose la question de la data. En effet, la plupart du temps, les fichiers produits sont très lourds. Par conséquent, la lecture de ces fichiers, le partage ainsi que leur exploitation sont complexes. En outre, dans un contexte scientifique, il est normal d'utiliser les données dans leur format brut. Cela implique des capacités de stockage et une machine informatique adéquate pour traiter ces données. Les acquisitions représentent plusieurs dizaines de gigaoctets, parfois plusieurs centaines, des projets entiers peuvent atteindre le terraoctet. Ces données brutes sont compliquées à archiver, par leur taille mais aussi par la logistique inhérente à de tels fichiers. Une sauvegarde pérenne est alors incertaine, et peu de solutions nationales sont à la disposition de tous. Le Conservatoire National des Données 3D (CND3D) mis en place par Huma-Num ne répond qu'en partie à cette problématique, puisque le dépôt n'est pas libre pour chaque institution. Pour cette raison dans de nombreux services archéologiques ces données, 3D ou autres, sont stockées sur des disques durs, SSD et autres méthodes de sauvegarde non pérennes. L'exploitation et l'analyse de ces données devient alors complexe, le système de partage quasi inexistant est inadapté, il ne permet ni rigueur scientifique durable, ni accessibilité de la donnée dans un souci de science ouverte. Ces masses de données ont également posé la question de l'interopérabilité sémantique. En effet, il s'agit de données scientifiques qu'il faut organiser afin de repertorier de la façon la plus efficace et générale possible à l'échelle régionale ou nationale. L'adoption d'ontologies vise à relier des métadonnées et paradonnées communes (CIDOC CRM).

Il est intéressant de revenir sur le terme d'objectivité et de fiabilité du modèle 3D évoqué dans la partie précédente. La qualité de production d'un modèle 3D est, par définition, le fruit de choix méthodologiques et matériels afin d'arriver à un traitement d'informations. C'est pourquoi un modèle 3D est subjectif en termes techniques, car son degré de précision dépend

du matériel et du protocole d'acquisition. Par ces choix, la qualité finale du modèle est sujette à des changements, le biais humain est fortement présent. À cela s'ajoutent de nombreuses contraintes d'ordre pratique et éthique. Entre le coût et l'accessibilité du matériel adéquat, les problématiques liées aux big data, qu'il s'agisse des logiciels et des services de traitement, de mise en ligne ou de stockage, apparaissent comme une conséquence logique de cette pratique. Numériser n'a de sens que si l'on peut diffuser et conserver les modèles de la manière la plus pérenne possible. Les communautés patrimoniales dont l'archéologie fait partie ont étudié les principes FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) et les moyens Libre et Open-Source afin de répondre durablement à ces problématiques.

L'adoption de ces outils soulève la question des compétences et de l'identité professionnelle. Ces nouvelles méthodes exigent de nouvelles compétences de la part des archéologues. Si pour certains, cela peut représenter une opportunité, pour d'autres c'est une contrainte menaçant leur identité professionnelle (Tufféry 2022a, p. 19). L'ensemble des professionnels est informé de ces pratiques, mais le manque de compétences et de personnel qualifié est indéniable, malgré l'intensification des actions de formation dès le niveau universitaire et au sein des organismes. Cela relève probablement d'une carence dans l'éducation et la sensibilisation au numérique de manière générale. D'autre part, une certaine méfiance a pu freiner la maîtrise des outils de numérisation et de modélisation 3D, qui pourrait parfois primer sur l'intérêt scientifique à la base d'une numérisation, puisque les modèles 3D sont souvent utilisés dans des cas de médiation et de valorisation et donc sans vocation heuristique (Delamare 2024, p. 16).

Comme cité auparavant, l'acquisition 3D répertorie plusieurs méthodes. Cependant, elles ne sont pas toutes démocratisées de manière homogène. La photogrammétrie, est la méthode la plus connue, et d'ailleurs la plus systématique lors de phases d'opération, et comme option de création de modèles 3D pour du mobilier ou autre. Cela s'explique en grande partie par le moindre coût financier, puisque la photogrammétrie ne demande qu'un matériel de prise de vues ainsi qu'un ordinateur permettant de faire le post-traitement. Les autres méthodes d'acquisition, telles que l'acquisition lidar, nécessitent souvent l'utilisation d'un drone, le laser ou le scan à lumière structurée et le laser demandent un matériel spécifique coûtant souvent plusieurs milliers d'euros.

En parallèle à ces enjeux et limites de nouveaux développements et outils se profilent, entraînant de nouvelles problématiques. Ségolène Delamare, au travers de sa thèse visant à analyser l'intérêt croissant des méthodes de numérisation et de modélisation 3D auprès des archéologues, pose la question du devenir de la 3D. Comme elle le souligne ces outils évoluent rapidement et de façon constante (Delamare 2024). L'évolution et l'intégration des technologies 3D ne doivent pas donc pas être perçues comme une révolution mais comme une continuité car les outils et applications ont tendance à évoluer en même temps que les outils technologiques dont nous pouvons disposer. L'exemple le plus explicite à ce jour est la combinaison de

méthodes archéologiques numériques avec l'intelligence artificielle, notamment au sujet d'une production de maillage 3D de qualité supérieure à la photogrammétrie, ou bien l'intégration même au sein des algorithmes et pipelines des processus photogrammétriques. Parallèlement, certaines méthodes tendent à s'intégrer plus durablement en archéologie, comme la tomographie visant un enregistrement le moins intrusif possible. Au final, les techniques 3D s'avèrent de plus en plus comme complémentaires aux autres méthodes d'enregistrement et d'analyse archéologique, plutôt que concurrentes (Verriez 2023, p. 150). L'évolution de la 3D en archéologie tend à s'intégrer dans un système d'information archéologique (SIA) et à vocation patrimoniale comme le démontrent les projets interdisciplinaires de plus en plus présents et cherchant à intégrer la donnée 3D dans un système d'information plus large (Delamare 2024, p. 444). En termes d'impact sur la valorisation et la médiation, le numérique et plus particulièrement la 3D, apportent un développement de plus en plus accru des expériences immersives ou de reconstitutions avec l'utilisation ou non de la réalité virtuelle et augmentée. La 3D est une solution pour intégrer des publics spécifiques, tels que les personnes à mobilité réduite ayant ainsi accès à une valorisation immersive et inclusive.

2.2 De la valorisation à la conservation

L'intégration des techniques 3D en archéologie couvre l'ensemble de la chaîne opératoire, la valorisation des connaissances et des informations, notamment sur le long terme. L'intérêt premier de la valorisation en archéologie est de rendre des collections et des informations provenant de la recherche archéologique accessibles à un public large. Cela regroupe donc des actions de diffusion, de communication et participe de façon intrinsèque au développement et au partage de ces connaissances.

Depuis quelques années, la 3D s'est installée dans nos modes de consommation et de visualisation, elle est devenue un outil largement intégré pour la communication et la transmission de connaissances. Elle est un médium permettant une compréhension visuelle et scientifique, particulièrement explicite (Verriez 2023, p. 15). Ce phénomène concerne les organismes muséaux, mais aussi les archéologues dans leur métier car la 3D offre une perspective de travail scientifique, mais également de valorisation dès la production de ces données en trois dimensions.

Ces nouveaux médiums demandent des moyens techniques de diffusion et de visualisation différents des méthodes traditionnelles, notamment par une diffusion via le web pour des collections, mais également la mise en place d'expositions virtuelles visionnables en ligne ou sur place via des moyens techniques tels que les casques de réalité virtuelle ou des dispositifs adaptés à la réalité augmentée. L'accès et la visualisation de ces informations et

données sont donc reliés aux moyens de mise en ligne à travers des plateformes dédiées et par conséquent impactés par des problématiques de stockage et de conservation. La limite entre mise en ligne, visualisation et la conservation/stockage est très fine. Pour saisir les liens de corrélation entre ces divers outils, méthodes et supports de visualisation, et comprendre comment ils s'articulent avec les stratégies de stockage et de conservation, il est indispensable d'analyser, étape par étape, les enjeux qui les unissent.

2.2.1 Valorisation de la 3D en ligne : diffusion via sites et plateformes web, expositions virtuelles, ...

La diffusion via le web et l'utilisation de méthodes de visualisation virtuelle est un aspect central de ce type de médiation et valorisation. Premièrement, la visualisation a pour objectif de rendre accessible et compréhensible une information, un patrimoine à divers publics. Elle peut donc servir à la valorisation comme au besoin de recherche scientifique. Dans la plupart des cas, les modèles 3D sont intégrés directement en ligne, permettant une interaction plus riche qu'en 2D, sans délai de téléchargement de fichiers 3D conséquents.

La limite est assez fine entre ce qu'on peut définir en tant qu'outil de visualisation et plateforme dédiée à la visualisation 3D. En effet, plusieurs solutions sont disponibles. La plus connue et la plus répandue est la plateforme Sketchfab. Elle est très couramment utilisée par bon nombre d'organisations patrimoniales en tant qu'outil et plateforme de partage et comme support de visualisation de données 3D en ligne. Par exemple, aujourd'hui, le musée d'archéologie nationale de Saint-Germain-en-Laye utilise cette plateforme intégrée au sein de son site internet et permettant la visualisation de mobilier archéologique au sein de leurs collections en ligne (Annexe 1 : Capture d'écran de la page d'accueil des collections 3D du Musée d'archéologie National de Saint-Germain-en-Laye.). La popularité de Sketchfab soulève des interrogations sur la pérennité et la souveraineté des données. La plateforme n'est pas open source et ne présente pas de principe FAIR. De surcroît, elle a été rachetée en 2021 par l'entreprise Epic Games, ce qui met en danger la propriété de l'ensemble des données 3D déposées sur cette plateforme. Le rachat de Sketchfab a été motivé principalement par deux raisons. La commercialisation de l'ensemble des données 3D publiées sur la plateforme, ainsi que l'utilisation de ces données au sein d'une autre plateforme, également propriété d'Epic Games : Unreal Engine qui est un moteur 3D de création d'environnements dédiés aux jeux vidéo. Elle pourrait donc utiliser ces modèles 3D à des fins de confection de jeux vidéo ludiques. D'autres plateformes moins connues existent, comme Clara.io, Thingiverse, MyMiniFactory, P3D.in et bien d'autres que nous détaillerons plus tard dans notre étude de cas sur le consortium 3D de Paris 1.

Face à ce risque de dépendance, on retrouve les outils dédiés à la visualisation de modèles 3D ou de nuages de points. Ils sont généralement open source, et ont pour vocation à

être intégrés nativement au sein d'un site web. Les outils les plus connus et les plus répandus en Europe sont 3D Hop, Potree ,et Smithsonian Voyager arrivé plus récemment sur le marché. L'intérêt de ces visionneuses est de mettre à disposition des outils d'analyse, de calcul, bien plus élaborés que ceux des plateformes citées précédemment. Elles donnent également la possibilité de visionner et de sauvegarder les métadonnées de chaque modèle. Ces outils constituent l'interface entre valorisation et conservation de ces données, et répondent simultanément à cette double demande.

Toutefois, ces solutions techniques ne résolvent pas le problème de la diffusion des modèles 3D dans des supports de publications scientifiques. En effet la valorisation scientifique en archéologie s'effectue majoritairement via la publication d'articles, de revues ou de monographies. Cependant, comme le souligne Ségolène Delamare, l'intégration de fichiers 3D au sein de publications archéologiques, est extrêmement limitée, car réalisable uniquement sous format numérique, grâce au format PDF 3D. Malheureusement ce format est illisible pour bon nombre de visionneuses pdf, il augmente considérablement la taille du PDF et réduit drastiquement la qualité de la donnée 3D ainsi que l'interaction avec ce dernier. On retrouve également des outils dédiés uniquement à la visualisation de nuages de points. L'une des solutions à cet inconvénient lors de la consultation d'articles scientifiques en ligne est donc l'intégration via hyperlien ou via module de visualisation au sein de la publication (et non sous format pdf). Ces réflexions mènent alors vers une question qui ne vise plus seulement où stocker et comment afficher ces données, mais également comment les rendre citables et exploitables au sein d'une chaîne éditoriale scientifique. Des solutions commencent tout juste à être mises en place, avec par exemple un IIIF 3D ou encore un DOI, appliquées au modèle 3D.

2.2.2 Valorisation de la 3D immersive et sensorielle

La diffusion et la valorisation de ces données 3D par l'intermédiaire de sites web dédiés ou par des plateformes 3D externes, sont des outils accessibles uniquement en ligne et ne permettent pas, à proprement dit, des interactions physiques. Une valorisation immersive et sensorielle est destinée au grand public et par conséquent aux institutions et aux organismes à vocation patrimoniale et non scientifique. Les trois technologies représentatives de cette méthode de valorisation sont : la réalité virtuelle, la réalité augmentée et enfin l'impression 3D. L'intérêt de ces technologies pour les utilisateurs est de créer un environnement interactif total ou qui superpose des éléments virtuels à ceux de la réalité.

La première technologie, la plus populaire, mais également la plus sujette à débat, est la réalité virtuelle. Cette technologie replace l'utilisateur dans un environnement totalement immersif, en particulier par l'utilisation de la vue et de l'ouïe. Elle permet de visionner des espaces ou bien des objets modélisés en 3D. Pourtant, cette technologie suscite, à la fois,

attirance et réticence. En effet, parfois l'intérêt réel d'une mise en place de dispositifs est limité, car dépendant de la qualité de l'environnement virtuel créé. À contrario, ces environnements peuvent être particulièrement bien pertinents et attractifs, comme celui de l'écosystème numérique Notre-Dame, qui a créé une expédition en réalité virtuelle avec une intégration de storytelling. La VR n'a pas uniquement vocation à être destinée au grand public. En effet, elle peut être utilisée à des fins scientifiques permettant de contextualiser un espace pour les chercheurs. Parfois considérée comme un peu trop clinquante, elle peut générer une certaine méfiance chez les archéologues, mais également pour son caractère potentiellement trop réaliste qui pourrait induire en erreur, en présentant des hypothèses comme une vérité (Delamare 2024, p. 66). L'utilisation d'un matériel spécifique dédié à la VR peut également poser question, notamment au sujet de la maintenance et du coût du matériel pour les institutions, mais elle demande aussi des compétences adéquates pour la mise en place de ces expériences.

La réalité augmentée se place possiblement comme une réponse aux problèmes matériels et logistiques posés par la réalité virtuelle. L'AR repose sur le principe de superposer en temps réel une image virtuelle sur le réel, au travers un dispositif mobile tel qu'un smartphone ou une tablette. Cela n'omet pas l'interaction avec l'environnement et les diverses informations, puisque le smartphone, ou la tablette, servent de dispositif d'interaction pour cliquer ou se déplacer. En archéologie, elle est donc utilisable en particulier à des fins pédagogiques, de façon à recontextualiser un espace, mais également à permettre la visualisation d'objets n'étant pas accessibles. Elle s'intègre bien plus facilement dans la documentation de collections 3D, puisqu'on la retrouve souvent au sein même des outils de visualisation. Par ailleurs, il est plus intéressant d'utiliser l'AR dans ce cadre-là que la réalité virtuelle pour des questions de matériel.

Enfin, le dernier dispositif, le plus concret d'entre eux, est l'impression 3D. Ici, il s'agit d'une réplique physique créée à partir de modèles numériques. Contrairement aux deux autres méthodes de valorisation virtuelle, l'impression 3D offre une dimension sensorielle par le toucher pour le public. Elle offre également l'accès au mobilier archéologique dont l'original est inabordable, comme avec la création de facs similés, par exemple celui de la grotte Chauvet (Delamare 2024, p. 98). Il s'agit également d'un outil d'étude, offrant la possibilité d'examiner et de visualiser un mobilier fragile sans contact direct. On notera également que la modélisation 3D couplée à l'impression 3D permet de reconstituer des parties manquantes comme dans le cas de céramiques remontées ou objet lithique.

2.2.3 Conserver : archivage pérenne, open-source et FAIR, métadonnées

Comme évoqué plus tôt, la conservation et l'archivage sont des enjeux majeurs en archéologie puisqu'il s'agit d'une discipline destructrice par nature. La 3D offre une méthode d'enregistrement complémentaire aux techniques de relevé 2D. Ces données en trois dimensions permettent de compenser la destruction par la création d'une réplique numérique. Ces données peuvent être patrimonialisées au même sens que les vestiges le sont. De cette façon, la 3D confère une valeur historique et patrimoniale (Dutailly et al. 2019, p. 29). Il faut aussi considérer que les modèles 3D ne sont que le fruit d'un processus de traitement de données. Dans un souci de reproductibilité scientifique, il est essentiel de conserver les documents associés à cette production. En d'autres termes, il s'agit d'archiver l'acquisition de données « brutes ». En plus de leur valeur heuristique, ce sont aussi des données ayant une valeur technique sur les méthodes qui ont pu être utilisées auparavant (Granier et al. 2019, p. 29). Outre la sauvegarde des données ayant mené au modèle 3D, il est également essentiel de documenter le processus, donc le protocole, les méthodes et les ressources utilisées. Cet ensemble assure donc une valeur scientifique forte, une réutilisation et une comparaison possible dans le futur (Granier et al. 2019, p. 29).

Cependant, contrairement aux méthodes de stockage et d'archivage classiques des données 2D, celles de la 3D apportent de nouveaux enjeux et défis : manque de solutions pérennes et de politique nationale claire et définie, volumes de données importants, initiatives individuelles, stockage à court terme, et enfin difficultés inhérentes aux évolutions techniques et technologiques. Les modèles 3D et les données qui en découlent sont donc au cœur des stratégies de conservation, des méthodes de communication et de valorisation de la connaissance.

Les méthodes de conservation sont les garantes de la pérennité des données et des connaissances, étroitement liées aux techniques de visualisation qui constituent les outils de prédilection pour comprendre et communiquer. Toutefois, il demeure indispensable d'examiner la dimension de sauvegarde pour ce quelle est.

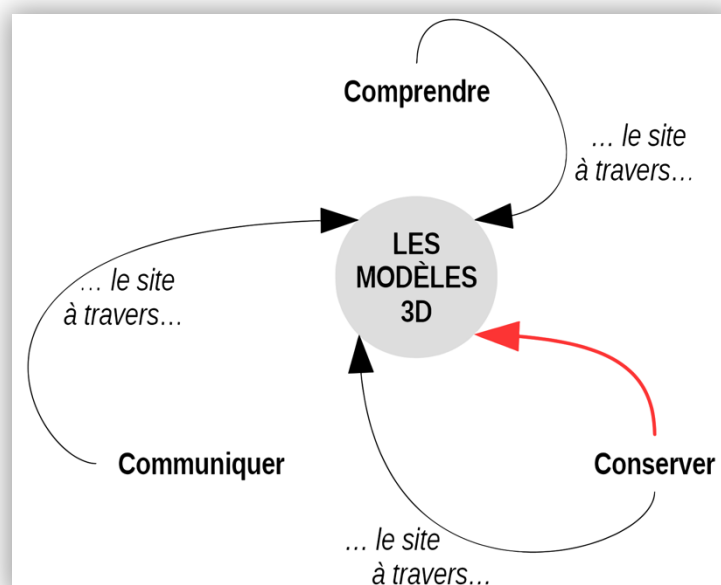


Figure 2: Les modèles 3D sont au cœur de trois enjeux et la conservation tient un rôle particulier; (Dutailly et al. 2019, p. 29).

La conservation et l'archivage demandent des protocoles précis et clairs, ainsi que des méthodologies établies, mais également transparentes, accessibles à tous, qui permettront une meilleure gestion des données, et ainsi une conservation à l'échelle nationale plus pérenne. En plus de la normalisation, la transparence est un point clé au sein des protocoles d'archivage. En s'appuyant sur les principes FAIR, d'open source et de science ouverte, ceci permet de rendre les données facilement accessibles, mais également interopérables et réutilisables par quiconque (Verriez 2023, p. 42). L'ensemble du stockage de ces données a également besoin d'être organisé dans un système de gestion clair. La solution est de renseigner des métadonnées complètes et structurées, afin d'assurer une traçabilité pour chaque donnée, mais également de garantir une conservation et de limiter la réappropriation de données par autrui. Il s'agit de principes à la base de projets tels que le Conservatoire National des Données 3D (CND3D) ainsi que le Consortium MASA (Mémoire des archéologues et des sites archéologiques).

Initié par l'infrastructure de recherche Huma-Num le CND3D a pour objectif de sensibiliser les acteurs aux usages et aux enjeux des modèles 3D, mais également de mettre à disposition des ressources et des outils ouverts à tous. À ce titre un guide de recommandation des bonnes pratiques liées aux données 3D a été publié. Le conservatoire propose l'entreposage et la visualisation de modèles 3D. On y retrouve également les métadonnées nécessaires pour la gestion dans le cadre d'une démarche de science ouverte. Aucun format de dépôt ni de contrôle de qualité des données n'est imposé, cela reste de la responsabilité du déposant (Verriez 2023, p. 287). Malgré l'objectif initial de partage et d'accessibilité promulgué par le consortium 3DSHS, le CND3D ne respecte pas entièrement l'accessibilité aux données puisqu'en effet elles sont souvent répertoriées mais non directement accessibles à tous et pour

la plupart elles ne sont pas visionnables ou uniquement en format photographique. Par ailleurs, le conservatoire semble avantager certains organismes et institutions au détriment d'autres. Notamment, les organismes de recherche et universités sont largement privilégiés, contrairement à d'autres services et organismes archéologiques présents sur le territoire (Delamare 2024, p. 458).

Parallèlement, le consortium MASA créé en 2012 dans le but de répondre aux enjeux de pérennisation des données archéologiques numérisées au sens général, est le moteur d'une mise en évidence d'étapes clés dans le cycle de vie des données numériques : planification, création, traitement, analyse, conservation, partage et réutilisation.

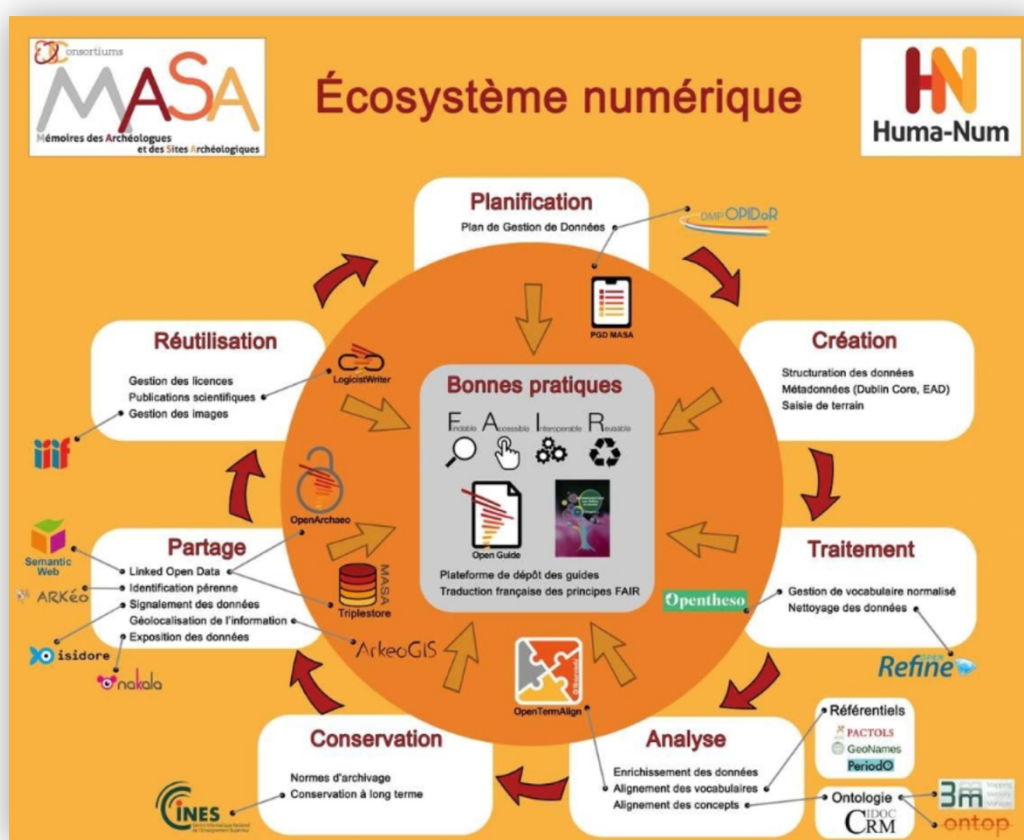


Figure 3 : Facteurs de décisions d'application de la 3D, schéma S. Delamare

La planification associée à des méthodologies adaptées est alors nécessaire. Aujourd'hui le consortium recommande de suivre un Plan de Gestion de Données (PGD) avant le début d'une opération ou de projet patrimonial. Ce schéma récapitule parfaitement l'ensemble d'un processus idéal construit autour du principe FAIR. Cependant si cette planification prônée par la MASA est idéale sur le papier, sa mise en application se révèle complexe ainsi que le démontre ce schéma en partie à cause d'un manque cruel d'information lors des étapes de

création et de conservation même si ce dernier est comblé par les plateformes de partage. Nous observerons ce phénomène à travers nos études de cas.

D'autres outils, tels que des CMS patrimoniaux et plateformes de diffusion et de partage, offrent une complémentarité aux solutions évoquées précédemment. Ils sont très présents en termes de partage de la donnée, on notera Nakala mis en place par Huma-Num et offrant un système de partage et de stockage de données, ArkeoGis pour partager et interroger des données spatialisées, enfin Openarchoe recense et documente les outils numériques open source utilisés en archéologie.

Au travers de cette analyse il apparaît que l'utilisation de données 3D doit s'inscrire, lors du déploiement, dans une démarche rigoureuse, planifiée, transparente et pour le mieux collaborative. Elle doit donc être guidée par des principes de science ouverte. Il est évident que ce sont des sujets qui appellent à relever des défis techniques, méthodologiques mais également humains. La pleine intégration de ces méthodes dans les pratiques archéologiques est encore en cours de réalisation.

2.3 Enjeux transversaux

Tout enregistrement archéologique est conditionné par la perception de son auteur et sa maîtrise des objets techniques (Belarbi et al. 2012, p. 90). Les transformations profondes que le numérique apporte à l'archéologie n'est pas sans défi humain. Par sa nature évolutive, il est nécessaire de s'adapter constamment aux nouvelles pratiques. Cela soulève plusieurs questions concernant l'influence des facteurs humains et ses implications sur la production, l'analyse et la diffusion des connaissances.

Ces enjeux transversaux rappellent que les données numériques et 3D n'acquièrent réellement de valeur dès lors qu'ils s'inscrivent dans un écosystème maîtrisé, où les compétences humaines, les infrastructures de stockage, de partage, ainsi que les objectifs scientifiques et de valorisation sont organisés de façon conjointe.

2.3.1 *Un Facteur humain important*

Quelle que soit la méthode d'acquisition ou d'enregistrement en archéologie, numérique ou non, elle est influencée par un intermédiaire qui est son utilisateur. Par conséquent, même si l'on estime qu'un résultat est scientifiquement correct, il aura par définition une dimension subjective.

L'intérêt premier des numérisations 3D est d'apporter un nouvel outil d'enregistrement, mais également d'apporter une objectivité dans certaines analyses. Une acquisition se fait en conséquence de choix méthodologiques et de paramétrages induisant une part de subjectivité dès la phase d'enregistrement. Un des exemples les plus explicites à ce sujet est la photogrammétrie, qui s'appuie sur la prise d'un nombre conséquent de photographies. Ces photographies sont considérées comme un témoignage qui transmet une perception de l'auteur. Un modèle 3D au même titre qu'une photographie constitue une archive de fouilles qui intègre une partie du discours scientifique de l'archéologue (Verriez 2023, p. 141).

En termes d'accessibilité sur le plan matériel et technique, on constate un fossé entre les capacités et la volonté des professionnels d'adopter les outils 3D malgré leur démocratisation, ainsi qu'un manque d'expérience et surtout de matériel ou de logiciel adéquat (Delamare 2024). L'accompagnement des institutions et organismes auprès des usagers n'est pas à négliger. C'est un facteur important dans la sensibilisation et l'accompagnement pour comprendre les principes fondamentaux de ces outils, l'utilisation de ces technologies. En ce sens, les utilisateurs ne doivent pas être simplement passifs (Verriez 2023, p. 249). Il ne faut pas oublier que le concept de science ouverte n'est pas encore compris et intégré par tous les professionnels, à cela il faut rajouter un manque de formation initiale aux outils numériques, car nombre d'entre eux révèlent être autodidactes en la matière (Delamare 2024, p. 132). Ces deux facteurs cumulés sont donc un frein majeur, mais révèlent aussi l'importance de la contribution humaine qui reste complexe à résoudre. En effet, si la base de la production de données ne répond pas aux exigences scientifiques, la valeur des données produites est questionnable. L'accès à la 3D et son apprentissage nécessitent un effort particulier et on constate que de nombreux utilisateurs ne maîtrisent pas suffisamment les techniques, méthodes et outils. En outre, si certains utilisateurs pensent les maîtriser, il s'agit bien souvent d'un leurre provoqué par la facilité d'utilisation au prime abord des logiciels 3D et qui laisse croire qu'il est aisé de produire des résultats satisfaisants. Ce phénomène souligne l'importance de la maîtrise de l'entièreté des paramètres des logiciels, et du matériel d'acquisition, dans un souci de fiabilité pour les résultats scientifiques (Tufféry 2022a, p. 167).

Depuis l'introduction des pratiques numériques, la transformation des pratiques et des compétences est perceptible. L'arrivée de ces méthodes met en exergue une fracture, puisque ces outils requièrent des compétences spécifiques, créant une inégalité et un sentiment de perte de savoir-faire chez certains (Tufféry 2022b, p. 62-65). Pourtant, lors d'une phase de terrain ou de post-fouilles, on observe une répartition des tâches en fonction des compétences requises. Par sa nature pluridisciplinaire l'archéologie révèle une hybridation des pratiques, et le numérique n'en fait pas exception (Tufféry 2019). Aucune méthode ne peut à elle seule restituer toutes les caractéristiques d'un objet archéologique. Le modèle 3D est donc une représentation à un instant précis, conditionnée par les choix et les objectifs de recherche (Laurent 2024, p. 113).

Enfin, malgré ses atouts et ses qualités de rendu fidèle à la réalité, la visualisation 3D peut conduire à estimer qu'il n'est pas nécessaire de compléter le modèle par des annotations interprétatives. Le détachement de l'objet réel vers son jumeau numérique souligne qu'il ne faut pas se cantonner à la simple représentation de l'objet numérisé. Les méthodes technologiques ne doivent pas remplacer les discours scientifiques. L'aspect réaliste des reconstitutions 3D, peut être trompeur, et ne doit pas être perçu comme une vérité absolue. Il est donc essentiel de limiter ce biais par une sensibilisation, distinguer des données factuelles de leur interprétation et de leur valorisation (Tufféry 2022a, p. 119). Un modèle numérique doit être perçu comme une proposition interprétative et non définitive (Delamare 2024, p. 64). Il est important de se demander de qui la restitution 3D constitue le point de vue, du contemporain, des artefacts ou du chercheur (Lescop et al. 2020) ?

2.3.2 Stockage de la donnée : enjeux matériels

L'augmentation constante des données numériques et 3D en archéologie pose des défis en matière de stockage sur le plan matériel. Le stockage de ces données demande des moyens financiers et des ressources techniques importantes. Pourtant, cette prolifération de données constitue un paradoxe, puisqu'elles restent souvent sous-exploitées en raison des difficultés de stockage, de diffusion, mais également de manipulation (Thivet et al. 2019). La plupart des archéologues, s'ils n'ont pas été sensibilisés au cycle de vie de la donnée, n'ont pas de compétences spécialisées dans ce domaine (Tufféry 2022a, p. 119).

Malgré les solutions apportées par Huma-Num, la sauvegarde des données numériques archéologiques n'est à ce jour pas pleinement garantie. Il est évident qu'avec des pratiques générales de plus en plus portées vers le numérique, le volume de données est croissant. Les données numériques risquent d'être inexploitable dans plusieurs décennies (Tufféry 2022a, p. 212). En effet, la production de données numériques est produite par une nébuleuse de services et organismes archéologiques dotés de manière inégale en termes de disponibilité matérielle et technique. Par exemple, lors d'opérations programmées, la plupart des archéologues, provenant de services régionaux, ne disposent pas de tous les équipements pour sauvegarder leurs fichiers 3D ou autres données. Très fréquemment ces données sont stockées sur des supports locaux ou personnels (Granier et al. 2019, p. 29). L'archive n'est donc pas stockée de manière pérenne.

Il est donc essentiel d'aborder la thématique de l'obsolescence, puisqu'en effet, ce terme concerne tous les outils et techniques utilisés dans le numérique appliqué en archéologie. Notamment dans le domaine de la 3D, où des outils de visualisation, mais également de stockage, ou bien les formats de fichiers choisis pour stocker la donnée peuvent, dans le temps, devenir obsolètes. En effet, ici, on rejoint l'évolution rapide des technologies numériques. Ce qui mène à la réflexion sur une veille constante et à de futures migrations afin de prévenir des

données inutilisables (Dutailly et al. 2019, p. 60). A cet égard, le choix du matériel destiné à stocker les données est une préoccupation majeure car une conservation pérenne nécessite des moyens techniques adéquats. Les méthodes de stockage se scindent en deux groupes. Le stockage dit « froid » et le stockage dit « chaud ». Ces deux méthodes ne s'opposent pas mais elles sont complémentaires. En effet, une donnée chaude a pour vocation à être utilisée de manière récurrente et doit donc être consultable et partageable. En revanche une donnée chaude a pour vocation à être stockée sur un temps long et nécessite une méthode de conservation durable pour être exploitable idéalement même après plusieurs décennies. Actuellement, la méthode chaude est la plus répandue au travers de l'utilisation de disques durs SSD ou de cloud.

Type de stockage	CLOUD	HDD / SSD
Durée de vie	Dépendant de l'entreprise qui la dirige (incertain)	5 à 7 ans
Capacité de stockage	Illimité en fonction des capacités financières du payeur	Plusieurs To
Points forts	Flexible et accessibilité en ligne (partage)	Confidentialité de la donnée
Points faibles	Confidentialité de la donnée et souveraineté	Sensible à la surchauffe et risque de donnée illisible

Figure 4 : Tableau comparatif des deux types de stockage principaux.

Ces pratiques interrogent sur l'obsolescence matérielle. En effet, les méthodes de stockage en dur ne perdurent pas plus d'une dizaine d'années. Quant aux solutions cloud, les questions de confidentialité, d'éthique et de souveraineté, liées au stockage des données par une entité tiers posent actuellement problème. Les technologies de stockage citées auparavant, peuvent se retrouver désuètes. Le Cloud peut être fermé pénalisant l'accès, ou bien en cas d'accident sur les datas serveurs, les données peuvent être perdues à jamais. Les stockages sur disques sont plus sûrs, mais avec une durée de vie limitée. Malheureusement, dans ce cas, l'archéologie est tributaire de l'avancement de ces technologies.

Ces formes hétérogènes de stockage, alliées à une systématisation des méthodes de numérisation 3D, occasionnent une surcharge de données qui finissent par être sous-exploitées par un manque de rigueur dans l'archivage. En somme, la gestion de stockage des données numériques en archéologie, y compris les données 3D, est un enjeu complexe qui va au-delà de la simple capacité matérielle, impliquant également des défis techniques, méthodologiques, financiers et humains.

2.3.3 Rationalisation des usages

Cet axe de réflexion a été fortement inspiré des travaux de Quentin Verriez qui dans son travail doctoral, démontre les limites d'une utilisation non rationnelle de la 3D. Pourquoi une rationalisation des pratiques est-elle nécessaire ? Plusieurs facteurs en soulignent la nécessité :

- L'augmentation exponentielle des outils numériques mis à disposition des archéologues procure un volume massif de données.
- Ces pratiques se systématisent, on remarque alors l'absence de standards communs au sein des protocoles de production.
- Une illusion de solution miracle. Il existe une tendance à considérer que les technologies numériques peuvent proposer une solution universelle à un ensemble de problématiques. Cela conduit à une négligence à propos de leurs limites.
- Il ne faut pas négliger le coût environnemental et économique. Les technologies numériques ont un impact significatif par une consommation de ressources, mais également des enjeux économiques et d'allocation de ressources, liés à l'investissement et à la formation de professionnels comme au coût matériel.
- Une production massive de données, souvent sous exploitées, ne garantit ni leur qualité ni leur conservation à long terme et par conséquent une réutilisation quasi impossible.
- La valeur esthétique des productions 3D ne doit pas primer sur la valeur heuristique.

À l'heure actuelle les spécialistes sont conscients que les techniques 3D ne sont pas des solutions universelles, l'obtention de modèle 3D n'est pas l'aboutissement d'un travail mais une étape planifiée au sein d'un projet (Cannoni 2022, p. 2). Ces pratiques doivent interroger sur la manière dont les technologies influent et modifient la perception des données. De surcroît, l'intégration de la 3D dans une planification d'opération nécessite une définition claire des objectifs et des méthodes spécifiques appliquées à chaque outil d'acquisition. Cette forme d'approche offre des outils d'analyse et d'interprétation de la phase d'acquisition à la phase de la valorisation.

La rationalisation de nos pratiques relatives à l'enregistrement de données numériques est essentielle. La production de modèle 3D n'a pas toujours vocation à la lecture en trois dimensions, dans la majorité des cas il s'agit d'un processus voué à la création d'une vue orthographique. D'autre part, il s'avère que les documents issus des productions 3D peuvent manquer d'interprétation, ou perdre leur intérêt de lecture en trois dimensions lors d'exportation 2D (Delamare 2024, p. 420). Il s'agit d'une production primaire dénuée d'information. Par conséquent, on peut s'interroger sur l'utilité de produire ces données. C'est pourquoi l'observation en direct et physique d'un sujet d'étude, un contact avec la matière, sont de grande importance. A défaut, il existe un risque de détachement de l'objet réel au profit de sa copie virtuelle (Cannoni 2022, p. 8). Un modèle 3D, une image même de haute qualité, ne peuvent,

dans un processus scientifique, remplacer une observation et une interprétation directe de la part d'un spécialiste (Eusèbe 2019, p. 10-14). La démocratisation de ces nouveaux modes de représentation favorise l'abandon progressif d'enregistrements traditionnels et de règles sémiologiques graphiques en archéologie (Verriez 2023, p. 36). En ce sens, la 3D et ses méthodes d'enregistrement ne doivent pas remplacer les méthodes traditionnelles avérées dans le processus scientifique archéologique, mais être intégrées en complémentarité, dans la planification d'une opération ou d'un projet. Une utilisation non critique doit être prévenue afin de ne pas délaissier un raisonnement scientifique.

En conclusion, il est fondamental de développer un esprit critique et un usage raisonné, car il faut dépasser les aspects purement techniques en intégrant une approche sociale, économique et environnementale. La rationalisation met l'accent sur une utilisation consciente, éthique, open-source, FAIR, afin d'atteindre des objectifs scientifiques et assurer une pérennité des données, et donc un aspect évolutif du numérique et de la recherche en archéologie.

Chapitre 3 : Numériser pour valoriser - Le Camp des Zouaves (SRA Île-de-France)

3.1 Un patrimoine de guerre à redécouvrir : contexte et enjeux du site

3.1.1 Présentation du Camp des Zouaves, enjeux de médiation et de valorisation

Le camp des Zouaves est installé au niveau de la lisière sud-ouest de la commune de Milly-la-Forêt, dans le département de l'Essonne. Il se situe sur la bordure occidentale du massif forestier du Gâtinais, sur une clairière sableuse et surmontée d'une mince couverture limono-argileuse, offrant un drainage rapide. Cette situation explique en partie le choix de l'implantation des plateformes de baraquement, de façon à limiter l'accumulation d'eau dans le camp. La dernière opération archéologique documentée date d'avril 2024, au cours de laquelle a été réalisé un diagnostic. Il faut également indiquer que les dernières fouilles réalisées mais non documentées ont eu lieu en mai 2025.

Le camp militaire de Milly-la-Forêt n'est que rarement représenté dans les sources d'époque. Seules quelques correspondances militaires et rares clichés du cantonnement permettent de le documenter. De plus, aucune fouille programmée n'y a été conduite avant 2024, malgré des premières alertes formulées dès 2012 par l'association « Les amis de Milly-en Gâtinais ». Cela signifie qu'aucune expertise scientifique n'a eu lieu avant 2024. L'objectif des premières études a été de cartographier l'extension réelle du champ et par conséquent du camp militaire, de caractériser les architectures standardisées qui se sont révélées être des baraquements « adrian », ainsi que les infrastructures sanitaires. Les dernières études ont eu pour but de documenter les pratiques quotidiennes par l'étude des déchets, des espaces de circulation et d'entraînement afin d'enrichir les données archéologiques de la première guerre mondiale et en particulier celles de l'arrière-front.

Le camp des Zouaves est au cœur du contexte historique de la Première Guerre mondiale puisqu'il est actif de 1915 à 1919. Dès juillet 1915, un premier transfert des 1er et 4eme régiments de Zouaves est effectué depuis Rosny-sous-Bois avec un effectif d'environ 3000 hommes. Par la suite, de 1916 à 1917, la documentation démontre une saturation du camp et une dispersion des compagnies coloniales vers Metz et Vert en Seine-et-Marne. Enfin, de novembre 1918 à 1919, on constate un retrait progressif et un abandon des installations d'après les archives iconographiques qui confirment l'intense activité entre 1916 et 1917.



Figure 5 : Milly-la-Forêt, Le Ruisseau, cantonnement de Zouaves.

L'opération de 2024 s'est déroulée en plusieurs phases. La première phase a été une prospection non invasive, faite à partir d'un lever lidar, (12 points par mètre carré), et a mis en évidence plus de 40 plateformes rectangulaires d'environ 8 mètres sur 22 mètres. L'importante présence de métaux a permis de déterminer la densité d'artefacts métalliques présents et la réalisation d'une carte de chaleur.

C'est donc en avril 2024 que quatre fenêtres d'environ 3 mètres carrés ont été réalisées. Ces sondages sont répartis au sein de trois zones. La première est un plancher calciné d'un baraquement, la seconde un accès empierré à la cantine, et la troisième et dernière zone est constituée de latrines bétonnées et comblées de sédiments organiques.



Figure 6 : Latrines de la Zone 3, Nicolas Girault

À la suite de cela, des analyses en laboratoire ont été réalisées, notamment sur la dendrochronologie pour les fragments de plancher, de résidus de poudre noire ainsi que des tests palynologiques qui ont démontré un déboisement suivi d'une repousse rapide. Le mobilier mis au jour recense un certain nombre de matériels militaires, dont 212 douilles Lebel, datées de 1916 à 1917, 37 cartouches intactes, 31 boutons d'uniformes et quelques fragments de ceinturons, du mobilier de vie quotidienne est également recensé : 163 bouteilles d'eau de vie ou de vin, de la vaisselle en faïence fine, des boîtes de conserve. Et enfin, des dalles en ciment prompt, des bondes de douche et des tuyauteries en plomb-zinc constituent le matériel sanitaire.

Ces éléments confirment que le camp militaire de Milly-la-Forêt était un pôle majeur de formation des troupes nord-africaines, que l'on appelait les zouaves, passage obligé avant de les envoyer sur le front. Ce site archéologique offre des perspectives de valorisation. Le potentiel de médiation du camp est une opportunité pour illustrer l'archéologie des conflits contemporains, période peu documentée dans le domaine. De plus, le mobilier mis au jour appartient aux propriétaires du terrain, ce qui implique une possible inaccessibilité du mobilier dans le temps. Il semble donc intéressant de documenter, recenser, conserver et diffuser le mobilier archéologique du site. Un objet de valorisation dédié à l'archéologie de la Grande Guerre, et plus précisément du camp des Zouaves, est un axe de développement judicieux.

3.1.2 Les missions du stage

L'archéologie tire profit de la 3D pour améliorer ses méthodes de recherche, ainsi que la diffusion et la présentation des données archéologiques au grand public. Grâce à cet outil de médiation et de valorisation, un public de non-spécialistes, peut être initié à la discipline, à ses enjeux et ses méthodes. Le stage était donc dédié au service de la démocratisation culturelle des informations archéologiques.

Les objectifs de ce stage se centrent essentiellement sur la mise en valeur des collections archéologiques du camp des Zouaves. D'une durée limitée à deux mois, il n'a pas été possible d'y intégrer des objectifs supplémentaires. Cette mission s'intègre dans un mouvement de campagne de numérisation 3D. En effet, les établissements ouverts au public et conservant des collections d'intérêt archéologique s'orientent vers une conservation et une valorisation produites à partir de méthode numérique. A l'échelle nationale, ce mouvement est initié dans le cadre du projet France Collection 3D mené par l'agence photographique de la RMN Grand-Palais. Le musée d'archéologie nationale a été l'un des premiers musées nationaux à s'impliquer dans ce projet. L'intérêt consiste à mettre des modèles en ligne à disposition et répartis sur une plateforme de visualisation du musée ou du projet France Collection 3D. Cette plateforme se trouve être Sketchfab qui soulève de nombreuses questions comme nous l'avons évoqué auparavant, notamment au sujet de la confidentialité et de la souveraineté de ces données 3D.

Ce stage s'inscrit dans cette démarche de numérisation 3D ainsi que dans le projet de recherche en archéologie programmée mené sur le site du camp des Zouaves, et du mobilier de la campagne 2024. Les missions de ce stage s'axent sur la médiation en archéologie couplée aux technologies qui se révèlent être un moyen puissant pour rendre l'archéologie accessible et engageante auprès du public. La valorisation du mobilier archéologique se présente sous différents objectifs :

- La production d'un catalogue photographique non technique de type catalogue de musée.
- La mise en place d'un protocole de numérisation et l'élaboration de modèles 3D basés sur un échantillon d'objets relatifs à l'habillement, à l'hygiène et à l'armement.
- Création d'un site de diffusion et de visualisation à vocation de médiation avec l'intégration des collections.

3.2 Chaîne de production : de la photographie muséale à la photogrammétrie

Une fois le cahier des charges établi, définissant clairement les attentes de rendu et de production, un calendrier recensant des différentes phases d'organisation a été établi.

La première étape du projet consiste à organiser l'ensemble des opérations nécessaires à la numérisation du mobilier. La DRAC ne dispose pas d'espace de stockage et de salle de numérisation adéquate, ce fut un premier obstacle. J'ai donc pris contact avec François Giligny afin d'accéder à une salle de numérisation et de stockage en coordination avec l'université Paris 1, en collaboration avec Cyril Gallinand, responsable informatique de l'UFR 03 d'histoire de l'art et d'archéologie.

La seconde étape a été de définir l'ordre de production des différentes acquisitions. J'ai retenu l'option de commencer par les prises de vue de type muséal, permettant de créer dans un premier temps un catalogue photographique représentatif du mobilier. Après validation du contenu et des productions, je suis passé à l'étape de numérisation et de création des productions 3D. Au préalable à la mise en place des acquisitions, il a été nécessaire d'établir les outils et la méthodologie spécifiques à utiliser pour garantir la restitution fidèle des objets. L'ensemble des avancées a été validé à travers plusieurs échanges avec mon tuteur de stage Pierrick Tigreat.

3.2.1 Création de photographies muséales

La photographie n'est pas la méthode la plus utilisée pour la numérisation du mobilier en archéologie. Dans une collection, il est nécessaire d'appliquer ce type de production, afin d'avoir une représentation générale de l'objet la plus fidèle possible. D'autant qu'une photographie est parfois suffisante pour retranscrire un objet, ainsi que nous l'avons expliqué lors de notre argumentaire sur la rationalisation des pratiques numériques et en particulier celui de la 3D.

Par ailleurs, prendre un cliché de type muséal ne signifie pas écarter l'aspect scientifique d'acquisition. Il s'agit ici de faire une composition entre représentation esthétique et représentation fidèle du mobilier avec intégration de caractéristiques scientifiques. Dans un premier temps il a fallu définir les caractéristiques esthétiques et scientifiques nécessaires au sein des acquisitions photographiques.

Une qualité d'image suffisante, afin de retranscrire correctement les détails et la colorimétrie de l'objet est le critère primordial. Intéressé par ce sujet, j'ai la chance d'être équipé avec un matériel photographique adapté : un appareil photo Sony A6000, disposant d'un capteur APS-C et de 24 mégapixels. Cependant, un boîtier doit être couplé à un objectif photo de qualité, faute de quoi le rendu colorimétrique et la netteté trouveraient leurs limites, et l'ensemble permet d'obtenir une esthétique personnalisable. Pour ces raisons, j'ai choisi mon capteur Sigma 30 mm avec une focale 1.4 permettant une capture de la lumière suffisante, et présentant la possibilité de création d'un flou d'arrière-plan adapté. Le choix de la taille du capteur 30 mm est questionnable car dans la plupart des cas, on préfère utiliser un capteur 50 mm. Toutefois, le rendu 30 mm couplé à un capteur APS-C se rapproche de celui du 50 mm, et n'est donc pas le même qu'avec un objectif 30 mm couplé à un capteur full frame.



Figure 7 : Les différentes tailles de capteur en photo, nightskypix.com.

Le second critère défini a été le décor environnant l'objet, c'est-à-dire le fond photographique à utiliser. Après plusieurs échanges avec Pierrick Tigreat, nous nous sommes accordés sur le fait d'intégrer un fond neutre sur lequel les objets ressortiraient suffisamment. Le choix s'est porté sur un fond de couleur gris.

Enfin, la troisième et dernière caractéristique est d'intégrer une échelle, afin de respecter l'aspect scientifique. Cependant, comme l'échelle physique compromettrait l'esthétique, j'ai décidé de photographier les objets avec une échelle réelle puis de l'effacer en post-traitement et d'y intégrer une échelle numérique. D'autre part, afin de restituer au mieux le mobilier archéologique, il est crucial de prendre un objet sous différents points de vue. Dans cette optique, il a été choisi de photographier les objets de face ainsi que leur revers pour les objets plats tels que les boutons ou les sceaux. Pour les munitions, il a été retenu de photographier l'objet de face ainsi que l'amorce des cartouches. Ces options s'expliquent par le

fait qu'un objet est photographié en fonction de son sens d'utilisation. C'est pour cette raison que les cartouches ont été positionnées verticalement pour les photographies de face.

Une fois que l'ensemble des objectifs de qualité de rendu a été défini, un protocole photographique a pu être mis en place. Pour le choix du matériel, j'ai conservé l'appareil photo sony alpha 6000 couplé avec l'objectif sigma 30 mm f1.4, un panneau LED a été ajouté sur l'appareil photo apportant un éclairage continu et directionnel et assurant une bonne exposition et balance des blancs sur l'objet photographié. Cet ensemble reposait sur un trépied. Le fond photo a été créé à partir de cartons de mousse pour maquette d'architecture pour la structure, ainsi que des feuilles cartonnées grises pour la couleur.

Un total de 22 objets a été photographié. L'étape suivante a été le tri des photos ainsi qu'un traitement de chacune d'entre elles sur le logiciel Lightroom afin de corriger la balance des blancs et obtenir un rendu homogène sur chacune des photographies, puis améliorer la netteté, parfois les contrastes ainsi que la suppression de la mire physique pour y placer une échelle numérique.

C'est un total de 46 photos qui ont été produites avec un rendu homogène, c'est-à-dire avec un cadrage similaire dans un format carré avec une échelle de même proportion, l'intégration du numéro d'objet et des couleurs homogénéisées.



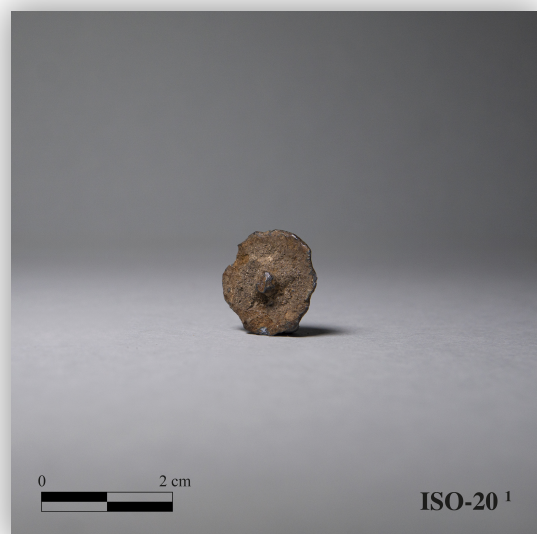
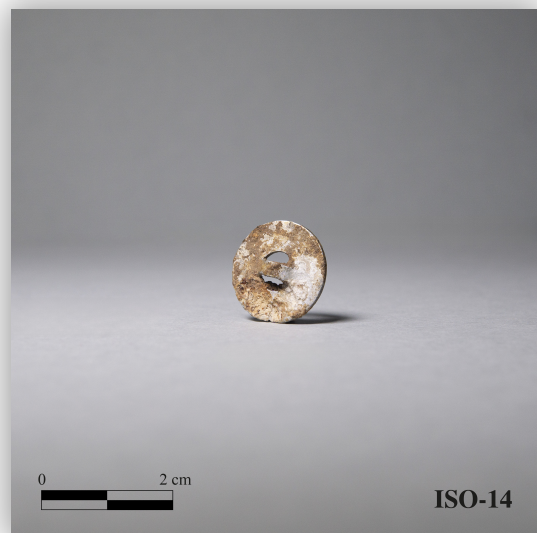
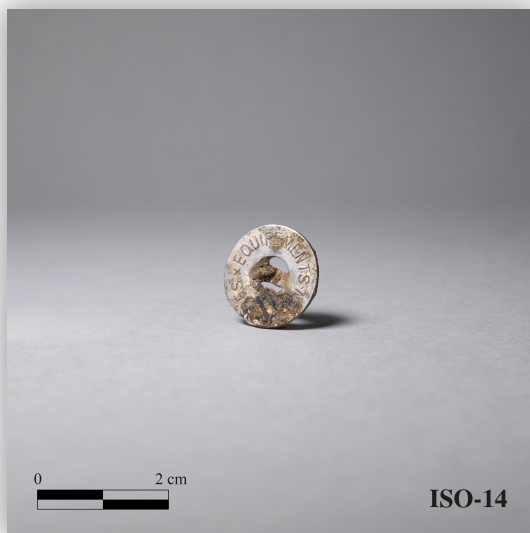


Figure 8 : Exemple du rendu final de chaque type de mobilier photographié.

Ces photographies alimentent une documentation et une illustration des collections de Milly La Forêt. A ce stade il est judicieux de se demander si une représentation en deux dimensions suffirait à représenter ce type de mobilier ? Les modèles 3D sont-ils plus adaptés ou bien complémentaires dans le cadre de cette production ? A l'évidence, de bons clichés sont conçus comme des documents visuels qui répondent à un cadre normatif pour être compris par un public de spécialistes et de non-initiés. Pourtant, d'un point de vue archéologique, une photographie de documentation n'est pas scientifiquement juste, car elle présente des déformations. Par ailleurs, ces représentations ont été influencées par mes choix d'acquisition de lumière ainsi que de composition. Toutefois cela interfère-t-il sur l'interprétation d'autrui ? Cependant, il en est de même pour une visualisation d'un objet en 3D puisque nous le voyons sous une perspective interprétée par la visionneuse. En revanche, ces photographies de type muséal sont légères à mettre en œuvre, moins coûteuses en temps et en matériel.

3.2.2 Workflow et Méthodologie de numérisation

Après avoir assuré la production d'un corpus de photographies muséales, il convenait d'organiser la seconde phase, celle dédiée à l'acquisition et le traitement du mobilier en modèle tridimensionnel exploitable. Cette étape est centrale au sein de notre chaîne de valorisation et repose sur un workflow et une méthodologie de numérisation justifiés par des choix logiciels, informatiques et photographiques. Le but est de garantir la faisabilité technique, à travers un protocole détaillé.

Avant toute acquisition, un projet de numérisation 3D impose une phase de préparation destinée à établir un dispositif technique de référence. Cette étape permet d'avoir une vue globale, d'une part sur l'équipement photographique, d'autre part au niveau de la configuration informatique requise et enfin sur l'ensemble des logiciels mobilisés lors de l'acquisition et du traitement. Enfin, cette phase assure que les conditions d'acquisition soient optimales et standardisées, car elles impactent directement la qualité des modèles 3D. Cette rigueur répond aux objectifs du projet dans le cadre d'une valorisation numérique du patrimoine ainsi que d'une qualité métrologique de façon à obtenir des mesures et des dimensions fiables sur les objets numérisés, sans oublier l'accessibilité technique afin de mettre en œuvre une méthode reproductible avec des outils disponibles pour une large communauté. L'un des atouts de la photogrammétrie est de pouvoir se reposer sur du matériel relativement standard et abordable. Néanmoins, il convient de sélectionner ce matériel judicieusement et de garantir la réussite du workflow afin de limiter les erreurs lors de la capture de données et faciliter les étapes suivantes du traitement.

Étape 1 : Préparation

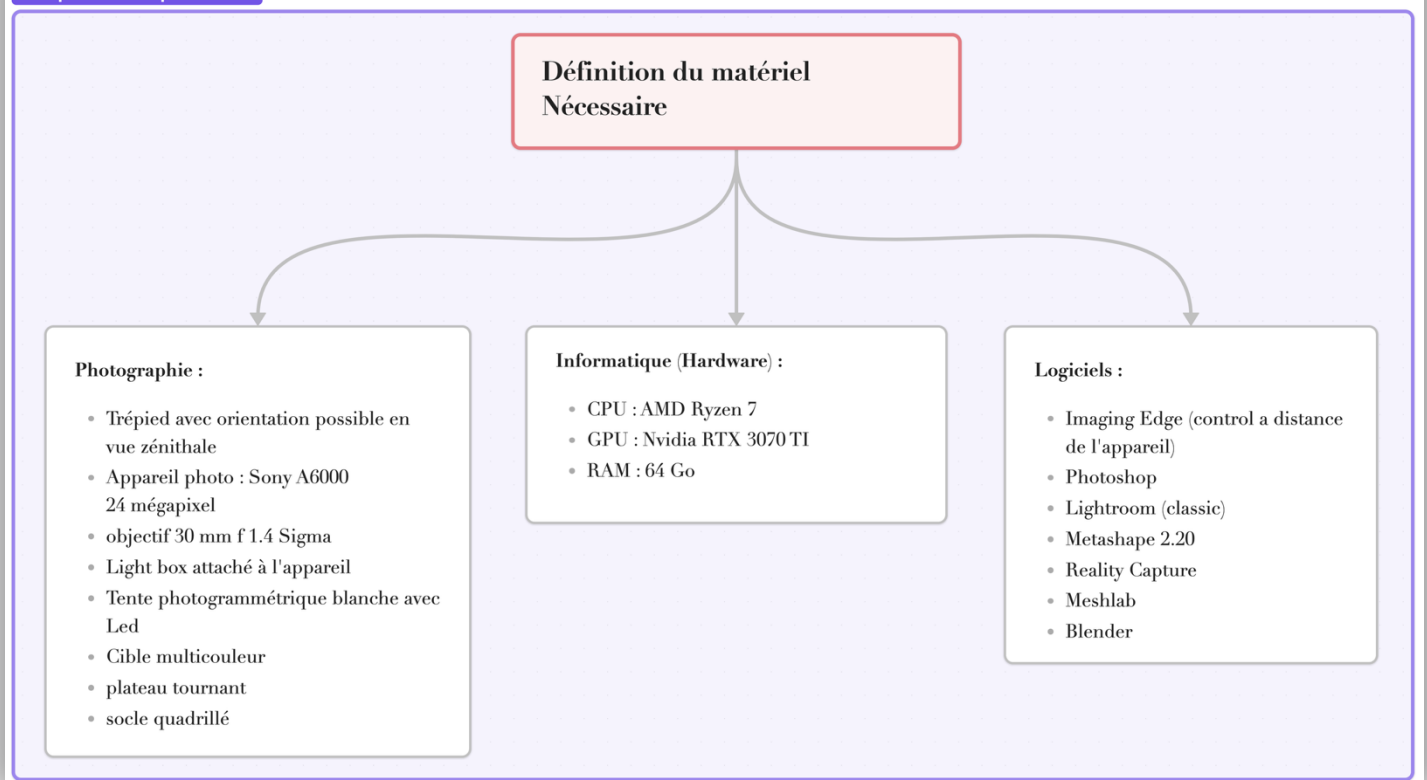


Figure 9 : Première étape de protocole de numérisation 3D.

Cette première étape s'attarde sur la préparation du matériel photographique informatique et logiciel. La qualité des photographies initiales détermine en grande partie la qualité du modèle 3D final. L'équipement photographique doit permettre de maintenir des conditions de prise de vues constantes pour l'ensemble du jeu de photos.

Dans notre cas, pour rappel, il s'agit d'un appareil photo Sony Alpha 6000, doté d'un capteur APS-C. Il ne s'agit pas du capteur le plus large disponible, le capteur plein format, mais il offre une qualité de prise de vues largement suffisante. En effet, on retrouve beaucoup de drones et de boîtiers compacts qui utilisent ce genre de capteur et qui sont un choix récurrent pour les acquisitions photogrammétriques. D'autant plus que dans notre cas, la résolution est de 24 mégapixels, alors qu'il est recommandé d'utiliser une résolution d'au moins 16 mégapixels afin d'avoir un niveau de détail suffisant (Verriez et al. 2023). Couplé au même objectif utilisé lors des photographies muséales, cet objectif permet par sa focale de 1.4 de capturer une quantité de lumière importante, et ainsi d'éviter de monter les ISO et de pouvoir rester à une vitesse d'obturation rapide, assurant la qualité et la netteté des prises de vues. Enfin, il s'agit d'une focale fixe, mieux optimisée que les zooms. Ces objectifs offrent une meilleure netteté, moins de distorsions et une ouverture plus large (Verriez et al. 2023). De plus, la longueur

focale, selon les conseils du consortium 3D SHS, devrait se situer entre 20 mm et 85 mm (Granier et al. 2019, p. 64) alors que le nôtre est un 30 mm.

L'éclairage de la scène est un point essentiel et joue un rôle majeur dans la réussite de l'acquisition photogrammétrique. Une prise de vues insuffisamment éclairée ou au contraire trop exposée risque de poser des problèmes lors du traitement. L'éclairage, ou un contraste trop intense, peut induire des erreurs lors du calcul algorithmique. Dans ce cas, une lumière diffuse homogène et suffisamment forte permet d'éliminer les ombres marquées sur l'objet. Dans notre situation, le choix s'est porté sur une tente photo qui éclaire l'objet sur les côtés, sur le haut par l'arrière, complétée par un panneau led fixé sur l'appareil photo permettant d'éclairer l'objet de face. De plus, une tente photo crée un arrière-plan homogène qui ne peut pas être interprété par les logiciels de traitement.

Les accessoires de prise de vues permettent de compléter le kit photographique et d'optimiser les conditions de capture. Le trépied, couplé avec un déclencheur à distance, permet de stabiliser chaque prise de vues, ainsi que d'adapter l'angle séparément. Il permet de ne pas toucher au boîtier lors d'une capture et d'éliminer tout tremblement. Le plateau tournant est manuel permettant de faire tourner l'objet sur lui-même et de ne pas déplacer la caméra. Il offre un meilleur contrôle sur l'éclairage qui reste toujours le même, ce qui explique également le choix du fond neutre. Sur ce plateau, nous avons installé un socle quadrillé avec des cibles, ce dispositif permettra d'établir une échelle lors du post-traitement et les cibles permettent d'accroître l'alignement des photos. Des cibles multicolores ont été privilégiées car après plusieurs tests, il s'est avéré que des cibles monochromes peuvent être confondues entre elles, même s'il s'agit de cibles codées.

La photogrammétrie est un processus exigeant en ressources de calcul, en termes de configuration informatique et de choix logiciels. Il est important de disposer d'une configuration informatique suffisamment puissante pour exécuter ces tâches dans des temps raisonnables et sans erreur mémoire ainsi que de choisir des logiciels adaptés. Les trois composants critiques du poste de travail sont le processeur (CPU), la carte graphique (GPU) et la mémoire vive (RAM). Dans notre cas, il s'agit d'une configuration informatique provenant de mon ordinateur personnel. Ces composants garantissent un gain de temps considérable dans le traitement photo et 3D. De plus, documenter précisément la configuration informatique contribue à la reproductibilité de ce projet puisqu'un autre chercheur sera en mesure de savoir quelle puissance est requise pour reproduire des résultats similaires. Cette transparence fait partie d'un protocole scientifique rigoureux. Enfin, le choix logiciel se doit d'être cohérent avec les objectifs méthodologiques. Par exemple, pour le traitement d'images, le choix s'est porté vers Adobe Lightroom, car il s'agit d'un logiciel que je maîtrise et qui permet de traiter des photos volumineuses, en grand nombre et de façon précise. Pour ce qui est du logiciel photogrammétrique, une comparaison entre Agisoft, Metashape et Reality Capture a été opérée. Le choix final s'est porté sur Metashape en raison de la possibilité de traiter directement le

nuage de points, ce qui n'est pas disponible sur Reality Capture, mais facilite le workflow. Si Reality Capture est plus rapide dans nombre de comparaisons, ici il ne s'agit pas d'acquisition massive avec un traitement de plusieurs milliers de photographies en simultané. C'est pourquoi Agisoft Metashape ne prend pas plus de temps de calcul dans un contexte de numérisation mobilier. Dans notre cas de production de l'alignement à la création du maillage 3D, Reality Capture permet un traitement en 20 minutes et Metashape en 25-30 minutes. Enfin pour ce qui est du post-traitement (nettoyage et optimisation) Meshlab et Blender ont été retenus car il s'agit de logiciels open-source et très puissants en modélisation 3D.

Cette première étape pose les bases matérielles et logicielles et explique le cadre méthodologique dans lequel s'inscrivent les résultats et analyses à venir. Cela confère une crédibilité à ce travail de numérisation 3D.

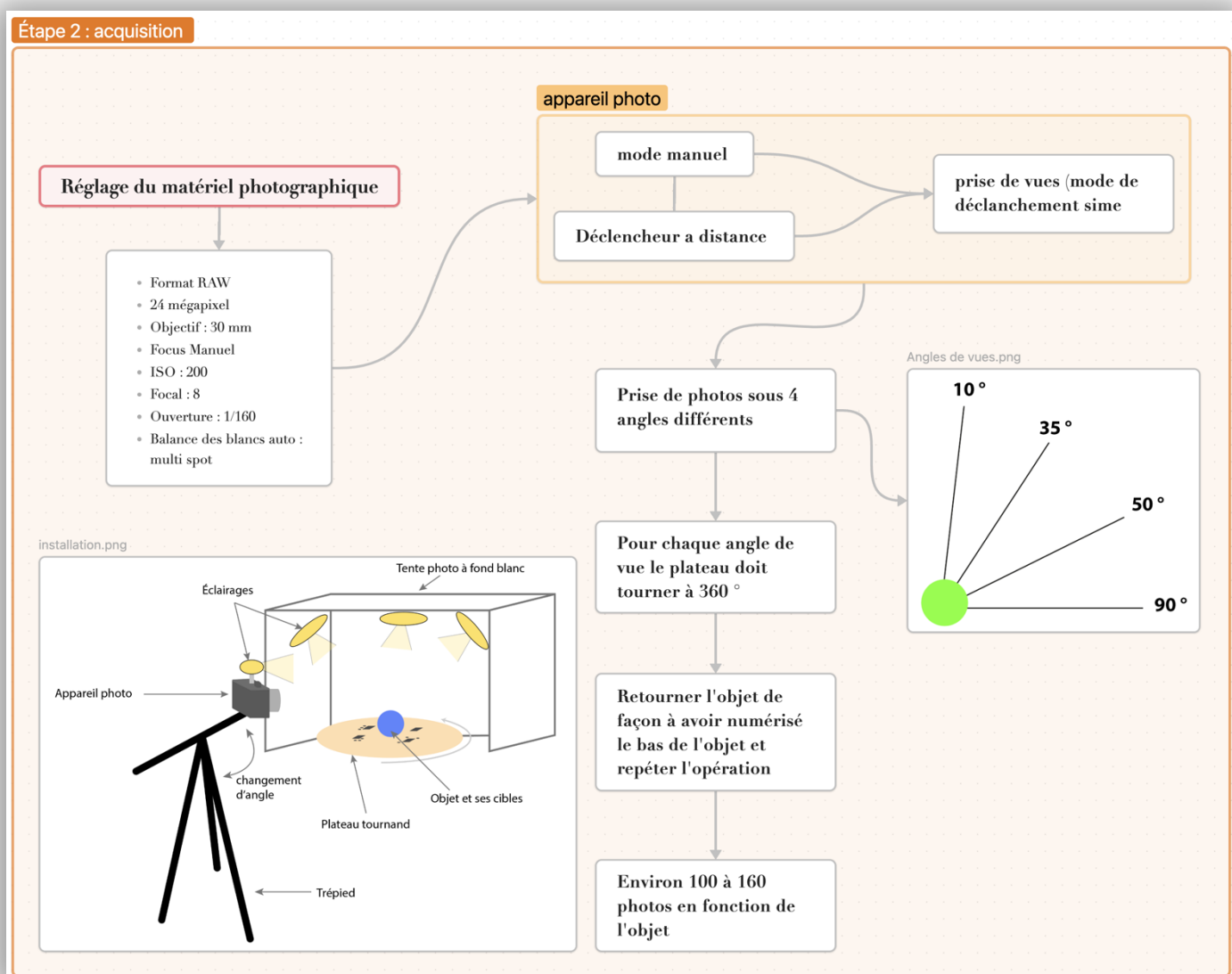


Figure 10 : Deuxième étape du protocole du numérisation 3D.

Après avoir énoncé le dispositif matériel, la seconde étape consiste en l'acquisition de séries de photographies, base du processus photogrammétrique. L'objectif est de produire un jeu d'images homogènes et de qualité.

Le premier point essentiel est le réglage de l'appareil photo. Tout d'abord, le format RAW est à choisir en priorité puisqu'il permet de conserver toute l'information radiométrique de la lumière et facilite une correction homogène au sein des logiciels de traitement. Les modes automatiques ou personnalisés sont à bannir, et nous retiendrons le mode manuel couplé avec une mise au point manuelle d'exposition ou de focus entre chaque cliché. Nous ne reviendrons pas sur les caractéristiques de l'objectif 30 mm que nous avons déjà détaillées auparavant. Pour ce qui est des ISO, une valeur à 200 ISO fixe permet d'éviter la formation de bruit numérique, et favorise une luminosité et netteté naturelle. On privilégie une petite ouverture à F/8 permettant une grande profondeur de champ, car une ouverture trop grande créera un flou d'arrière-plan important. Enfin, une obturation 1/160 secondes permet de capturer un taux de lumière suffisant et d'assurer grâce à la stabilité du trépied une netteté importante de l'objet. L'organisation de la scène d'acquisition a déjà été détaillée précédemment et est figurée et détaillée au sein de la (Figure 10).

Chaque série de photos est opérée avec une stratégie d'angles de prises de vues. Dans notre cas, elle a été divisée en quatre séries : avec un angle à 90° degrés de face, une à 50°, 35° puis 10°, cette dernière offre une vue quasi-zénithale (Figure 10). Cette procédure associée à la rotation du plateau permet un recouvrement d'environ 70% entre chaque cliché successif (Verriez et al. 2023). Il s'agit de l'une des conditions requises pour un bon alignement des photos en post-production et nécessaire à la création du nuage de points. Une fois l'entièreté des angles de vue capturée, l'objet est retourné afin de photographier son dessous. L'opération est répétée sur l'ensemble des angles énoncés, ce qui permet de combler les potentielles zones de vide ainsi que d'acquérir la zone de l'objet reposant sur le plateau.

Le résultat attendu se trouve entre 100 et 160 photos en fonction de la complexité et de la taille de l'objet. Il ne s'agit pas d'un nombre trop important mais largement suffisant pour le mobilier de Milly-la-Forêt, qui est composé d'objets centimétriques, de maximum 7 cm de haut.

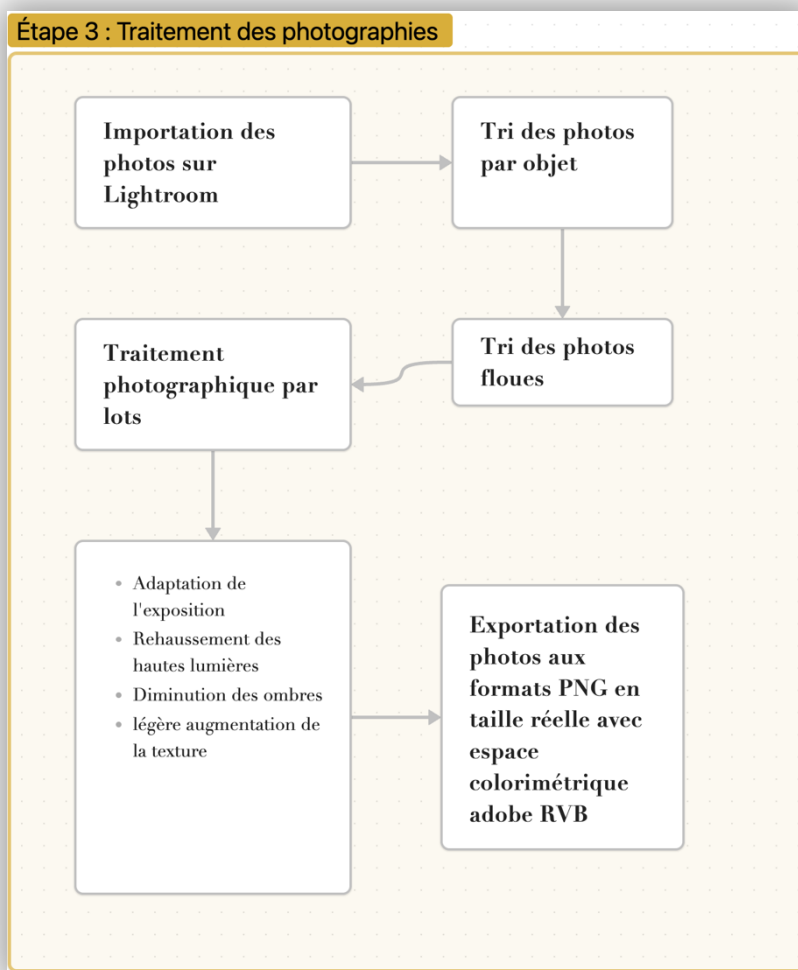


Figure 11 : Troisième étape du protocole de numérisation 3D.

La troisième étape du protocole de numérisation 3D est essentielle afin d'optimiser et de faciliter le traitement des images, et aboutir à un modèle 3D qualitatif.

Dans un premier temps, l'ensemble des photos a été trié par objet et les photos floues ou non conformes à nos attentes ont été écartées. Le logiciel Adobe Lightroom retenu comme outil de traitement photographique permet un traitement non destructif des fichiers RAW avec des ajustements réversibles, une gestion par lot, car il est possible d'appliquer un réglage identique à plusieurs fichiers contribuant à une uniformité.

Les réglages ont été adaptés en fonction de chaque objet avec une mise à niveau de la balance des blancs, une adaptation de l'exposition, un rehaussement des hautes lumières et une diminution des ombres permettant de quasiment supprimer les zones sombres tout en révélant de nouveaux détails de l'objet sur la photo. Une légère augmentation de la texture met les détails en lumière. Enfin, une exportation en PNG taille réelle 32 bits a été choisie avec un profil colorimétrique Adobe RGB sans compression destructive. Ce choix se justifie par une taille de

fichier finale relativement réduite, contrairement à une exportation au format TIFF. Le format DNG alternative au RAW a été une solution envisagée car lisible par le logiciel Metashape. Cependant il n'y a pas de réelle différence dans les résultats de production entre PNG et DNG.

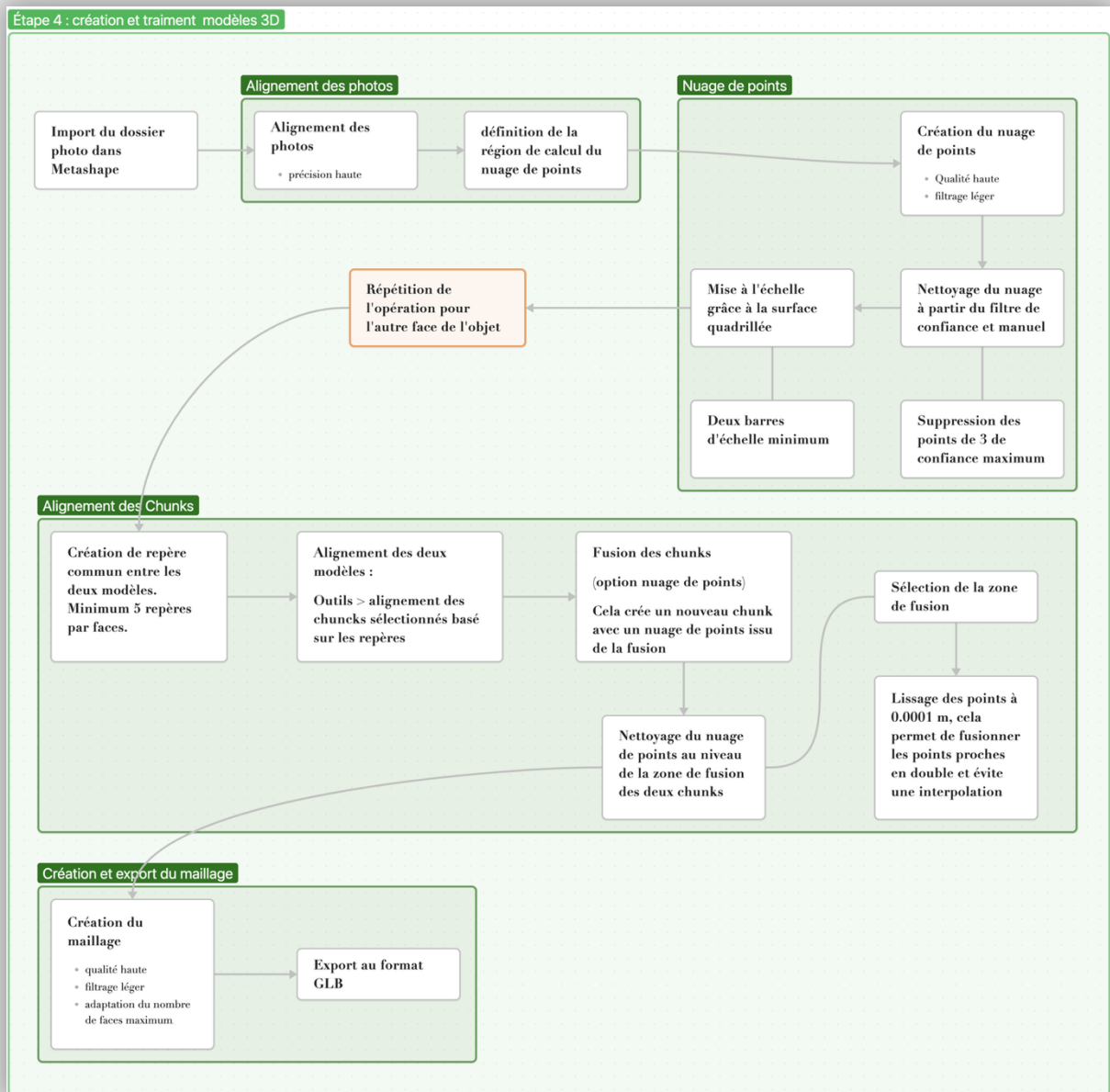


Figure 12: Quatrième étape du protocole de numérisation 3D.

L'étape de création et de traitement des modèles 3D est le cœur de ce protocole. Le logiciel Agisoft Metashape permet de convertir un jeu d'image pré-traitées, en un maillage texturé propre, avec une mise à l'échelle et une exportation prête pour la diffusion au format GLB.

La construction d'un modèle 3D dans Metashape commence par un alignement de précision des photos. Dans le cas présent, nous avons choisi le mode haute qualité et non le

mode ultra haute qualité car ce dernier mode extrapole et surinterprète l'alignement des photos. Dans cette configuration, cela permet de détecter environ 40 000 points par cliché. Un calcul procède à l'estimation de la position de chaque caméra et garantit une géométrie fiable. Puis, il faut définir une région de calcul autour de l'objet afin de ne calculer qu'une certaine zone lors de la création du nuage de points, étape la plus consommatrice en ressources informatiques. Le nuage de points est ensuite créé dans la résolution la plus haute possible avec un filtrage léger des points. Le nettoyage de ce dernier se fait par une suppression automatique de points de confiance calculés par le logiciel sur une base de 0 à 10. Les points inférieurs à 3 de confiance sont supprimés. En fonction de la qualité du modèle, cela supprime plus ou moins deux points. La procédure est répétée pour la face inférieure du modèle qui fournit ce qu'on appelle un second chunk apparenté à un deuxième calque qui produira par notre procédé un nuage de points. Ces deux nuages seront fusionnés par l'intégration de repères similaires entre les deux nuages de points. Un nettoyage est ensuite réalisé et enfin un export au format .glb avec une texture en 8K sous profil Adobe RGB.

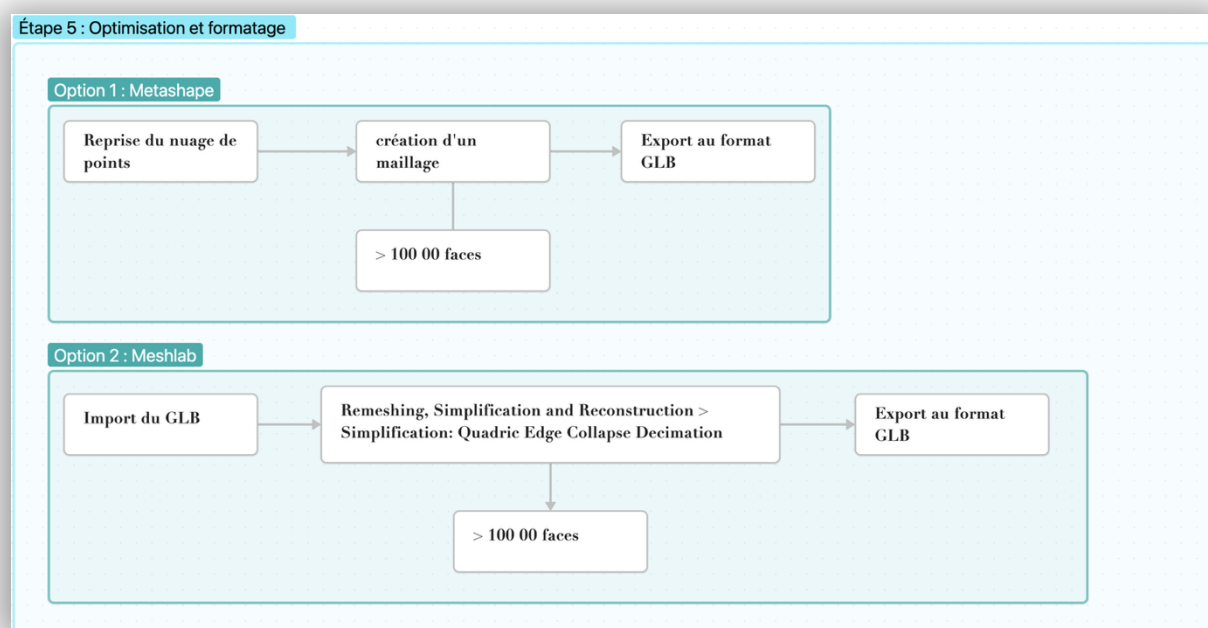


Figure 13 : Cinquième et dernière étape du protocole de numérisation 3D.

Enfin, la cinquième et dernière étape est l'optimisation des modèles afin de diminuer la taille du fichier final sans perte de qualité. Cela se traduit par une baisse du nombre de faces dans l'objet 3D. Deux solutions sont possibles dans Metashape soit avec une création d'un maillage avec un nombre limité de faces inférieur à 100 000 ou bien dans le logiciel MeshLab, avec une option de décimation du maillage, c'est-à-dire une optimisation du nombre de faces, dans notre cas, également inférieur à 100 000. Ce nombre de faces résulte de plusieurs tests, les fichiers d'origine étaient compris entre 20 et 80 mégaoctets, tandis qu'après optimisation, ils ne font plus que 3 à 10 mégaoctets. Cependant, dans le cadre d'une conservation optimale, il est nécessaire de conserver les deux fichiers produits.

3.2.3 Résultats et contraintes rencontrées

Au total, 23 objets ont été numérisés en 3D, comprenant des boutons, des douilles ainsi que des sceaux d'époque moderne et d'époque médiévale. Pour 23 objets nous avons donc procédé à 46 acquisitions, compte tenu de la contrainte de numérisation supplémentaire de la partie reposant sur le socle pour chaque objet.

Pour chaque acquisition, le temps de traitement a été relativement homogène. L'alignement des photos a demandé environ une minute de travail. Le calcul du nuage de points a pris environ 15 minutes. A noter que le temps consacré aux objets tels que les douilles a été supérieur d'environ 3 minutes par rapport à celui des petits objets tels que les boutons. Enfin, la création du mesh et de la texture a requis une minute pour chaque objet, il s'agit de l'étape la plus rapide. Cela signifie que pour chaque objet, le temps de calcul représente une durée d'environ 20 minutes sur une fourchette haute, sans compter le nettoyage manuel pour chaque acquisition. Le temps total de calcul aura donc été de 15 heures et 20 minutes pour les 46 acquisitions.

En termes de qualité, les photos produites ont permis sur l'ensemble des acquisitions d'atteindre un score d'alignement des photos supérieur à 9, ce qui est le score le plus élevé fourni par Metashape. La zone de couverture d'environ 1.5 cm² par caméra, soulignant une qualité photographique largement satisfaisante.

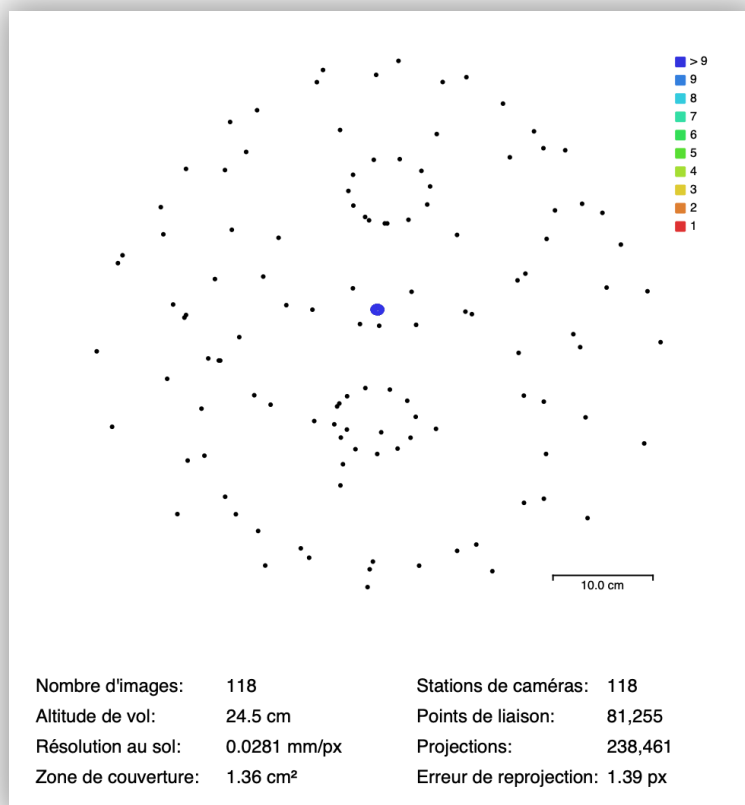


Figure 14 : exemple de résultats de rapport metashape (ISO US-26).

Toutefois malgré cette réussite de qualité de production, l'ensemble du processus n'a pas été sans contraintes, notamment en termes de photographie. En effet, lors de la phase de test entre le logiciel Metashape et RealityCapture, les formats d'images acceptés sont différents. RealityCapture accepte le format RAW, tandis que Metashape accepte le format DNG, les deux logiciels acceptent le PNG et le JPEG. Cependant, dans une logique technique et qualitative, il semblait pertinent de traiter les photos et de les exporter au format TIF. Néanmoins, ce format est relativement lourd lors de l'export depuis Lightroom, car une conversion de bonne qualité n'est pas destructive. Après exportation, chaque fichier pèse environ 40 à 50 mégaoctets. Une fois l'ensemble des images importées dans les logiciels de traitement, le calcul d'alignement ainsi que de nuages de points est plus lourd et plus lent qu'au format PNG. Pour un seul calcul de nuages de points, le traitement pouvait présenter une différence de plus de 40 minutes entre les deux logiciels retenus. Tout naturellement, le PNG a été la solution choisie, puisqu'une conversion de qualité du format RAW au format PNG n'est pas si destructif, mais un peu moins qualitatif que le format TIF. Par ailleurs, les résultats en format TIF n'étaient pas concluants, avec notamment beaucoup d'interpolations au niveau des points et d'aberrations blanches et noires créées autour de l'objet.

Enfin, dans un souci de comparaison de méthodes, il semble pertinent de confronter la photogrammétrie avec une autre méthode et ainsi confirmer le choix de méthodes retenu au départ. Nous allons donc étudier la numérisation par scanner 3D, en particulier celui de la marque Artec, le modèle Spider. Il s'agit d'un scanner 3D portable à lumière structurée, conçu pour capturer des petits objets ou des surfaces avec une haute précision autorisant des détails fins. Ce scanner est très utilisé dans le milieu de l'archéologie et du patrimoine. Un de ces avantages est de proposer une précision de 50 microns assurant une restitution géométrique de qualité, une capture rapide, ainsi qu'une mise à l'échelle automatique des outils d'édition intégrés. Dans ce contexte de comparaison, je suis allé tester ce scanner auprès de Cyril Galinand, responsable informatique de l'UFR-03 de Paris 1, sur l'un des objets des collections de Milly-la-Forêt.

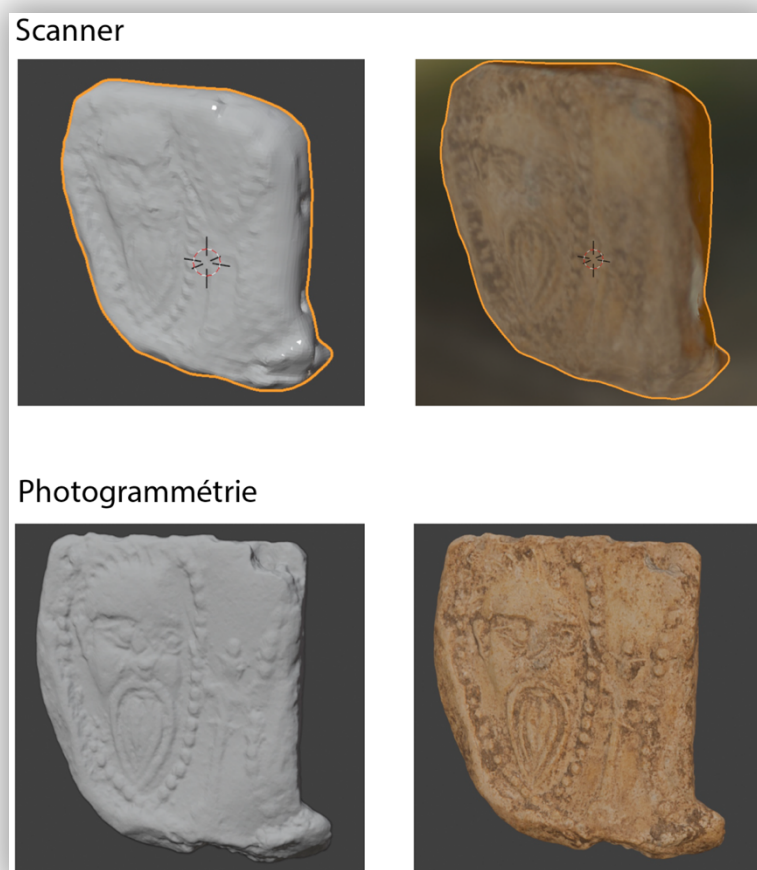


Figure 15 : Comparaison des résultats entre le scanner Artec spider et la photogrammétrie

Les photos de la figure 15 sont suffisamment évocatrices, le résultat est sans appel. La photogrammétrie donne un résultat de bien meilleure qualité avec un maillage détaillé et une texture de plus haute définition. Malgré les 1600 frames, c'est-à-dire images capturées par le scanner, les 120 photos acquises dans le cadre du protocole photogrammétrique offrent une qualité supérieure.

3.3 Création du site de valorisation et mise en ligne

Après la numérisation de l'ensemble des objets, la dernière étape du projet consiste à créer un site web dédié à la valorisation du site archéologique du camp des Zouaves. L'objectif est de rendre les données du camp des Zouaves, accessibles et compréhensibles pour un large public, en exploitant les potentialités du numérique pour la médiation du patrimoine. L'enjeu est donc de présenter les modèles 3D numérisés, les photographies, ainsi que l'information contextuelle de ces objets de manière attractive et scientifique.

Il est donc nécessaire de décrire la construction de ce site web, par son arborescence, les choix de design et techniques. Nous avons inclus un retour critique sur le résultat de la première version de ce site web, évaluant la qualité du site, son accessibilité et sa réception de la part de différents utilisateurs.

3.3.1 Construction du site web : arborescence, design, choix techniques

La mise en place de ce site web a suivi une démarche méthodique. La première tâche a été la définition de l'arborescence du site, c'est-à-dire l'organisation des pages, la navigation et les liens entre elles, puis la conception d'un design clair et ergonomique. Les choix techniques ont été guidés par les ressources disponibles, notamment l'utilisation du CMS Omeka S, ainsi que par les contraintes rencontrées au cours de ce projet.

Avant de mettre en place un site web, il est nécessaire d'établir une sitemap, c'est-à-dire un plan qui démontre les liens entre chaque page présente sur le site web. Ainsi on distingue clairement les différentes sections de contenu. Dans notre cas, il s'agit d'une part de sections contextuelles, et d'autre part, d'une section de consultations adaptées aux collections de mobiliers numérisées. L'arborescence de ce site web s'axe autour d'une page d'accueil qui offre une mise en contexte historique, ainsi qu'une navigation par déroulement permettant d'explorer les sections principales présentes sur le site, c'est-à-dire les collections, l'exposition virtuelle ainsi que les articles en lien avec le site de fouilles. De plus, ce sont des éléments que l'on retrouve dans la barre de navigation qui permet, au dehors de la page d'accueil, de pouvoir continuer à naviguer entre les différentes pages.

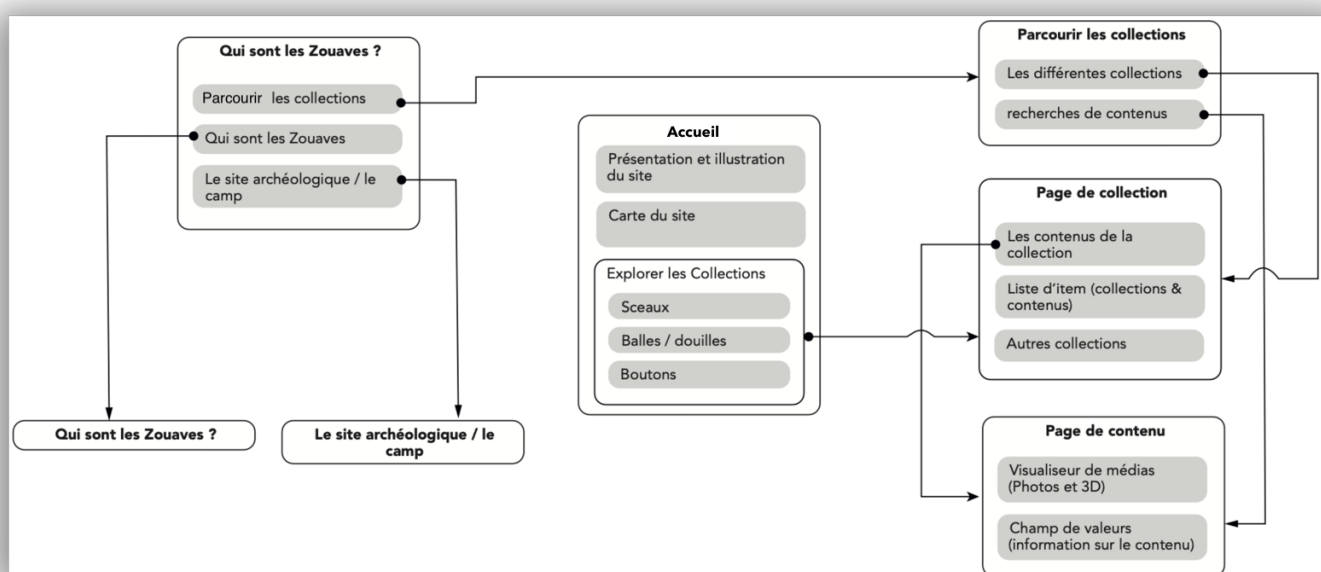


Figure 16 : Site map du site du Camp des Zouaves.

Cette arborescence a été conçue pour faciliter la navigation. Le visiteur passe aisément des informations générales, c'est-à-dire du contexte historique du camp, à des informations spécifiques telles que celles relatives aux objets numérisés. Cependant, il ne s'agit encore que de la première version, ce qui signifie qu'à long terme, il serait nécessaire d'intégrer des hyperliens vers des objets ou collections illustrant certains propos au sein des articles. Réciproquement, des notices d'objets pourraient renvoyer l'utilisateur vers un contexte de documentation écrite.

Toutefois, un site web disposant d'une organisation claire n'est pas forcément intuitif, cela doit passer par le design et l'ergonomie. Le design du site web a donc été pensé pour être à la fois sobre, afin de laisser la primauté au contenu, tout en étant attrayant. De plus, il a fallu porter attention à l'organisation de chaque contenu afin de ne pas perdre le regard de l'utilisateur. C'est pourquoi une lecture verticale est privilégiée avec les informations entièrement centrées au sein de la page web. Cette mise en forme permet également de faciliter le développement d'une interface dédiée à la navigation sur smartphone.

Le développement du site s'est appuyé sur le CMS OmekaS, ce qui signifie système de gestion de contenu. C'est une plateforme qui permet de créer, gérer et publier facilement du contenu sur un site web sans nécessiter un codage total de dispositif. Un CMS s'élabore avec un back-end, l'espace réservé aux développeurs pour organiser l'entièreté du système, et un front-end, les pages web accessibles aux utilisateurs. OmekaS est un CMS expert dans le domaine patrimonial. Il est spécialisé pour les bibliothèques, musées, archives et organismes de recherche. Il permet de publier des collections numériques en ligne, gérer une base de données intégrant images, vidéos, modèles 3D et autres types de documents, ainsi que d'utiliser un vocabulaire normalisé pour décrire chaque objet. Il permet également de gérer plusieurs sites à partir d'une même installation, ce qui facilite l'interaction de différents intervenants. Ce dispositif était déjà présent au sein de l'université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, le choix s'est donc porté tout naturellement vers Omeka S

Pour construire une toute première version de la page d'accueil, il a été nécessaire d'utiliser un langage de code, c'est-à-dire le HTML (hypertext markup language), destiné à créer des mises en pages, des designs et des interfaces dédiées aux pages web. Les premiers essais ont eu pour vocation d'organiser la lecture, c'est-à-dire, d'avoir un espace de mise en contexte et d'introduction du site web pour que l'utilisateur se repère aisément. Ensuite, vint la phase de création des espaces d'informations dédiées aux collections numérisées avec l'exposition virtuelle et les différentes catégories d'objets numérisés. Et enfin, la dernière section a été consacrée aux articles, donc aux contenus écrits à vocation scientifique ou de valorisation (Annexe 2 : Première version de la page d'accueil du site web du Camp des Zouaves.).

Le design sélectionné s'adapte au thème graphique choisi sur le site web qui est un gabarit proposé par Omeka S. Nous avons opté pour une présentation épurée avec des fonds clairs, une typographie sans serif, l'intégration d'un code couleur, le bleu, couleur majoritaire qui permet de repérer les points d'interaction sur le site web. Pour proposer une navigation épurée et agréable, des animations ont été intégrées à l'aide de CSS (Cascading Style Sheets), qui est une composante de stylisation du langage HTML.

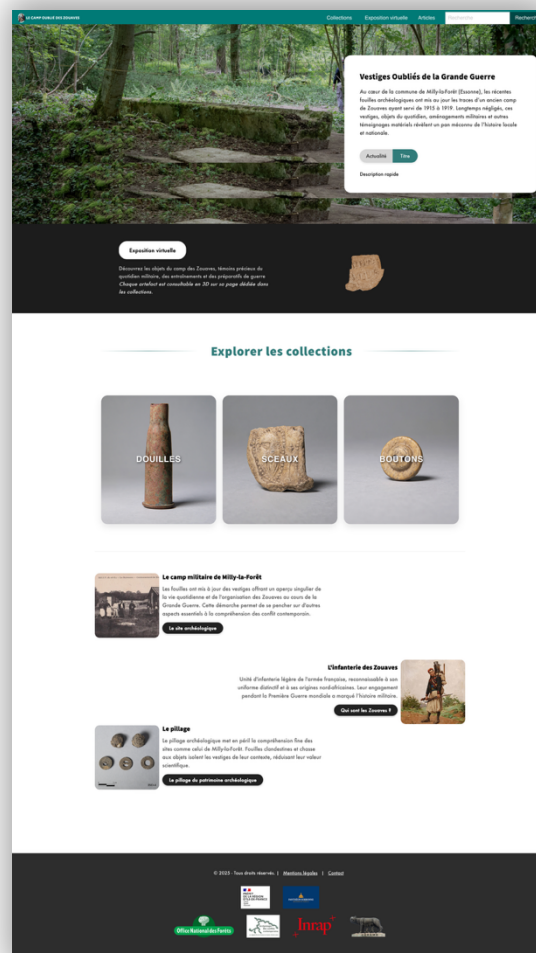


Figure 17 : Version actuelle de page d'accueil du site web du Camp des Zouaves.

Le reste des pages a été configuré avec un entête clair, c'est-à-dire un titre pour la section, un pied de page incluant les mentions institutionnelles, c'est-à-dire logos de l'université, du préfet d'Île de France et des partenaires, ainsi que les crédits.

L'espace dédié aux collections s'organise par thématique : dans notre exemple, « boutons, douilles et sceaux ». Pour chaque collection, une interface claire et lisible a également été nécessaire. Les contenus sont construits sous forme de grille. Chaque objet, c'est-

à-dire chaque contenu, dispose d'un titre et d'une description ainsi que d'une image. Dans un souci d'ergonomie, une barre de recherche a été intégrée.

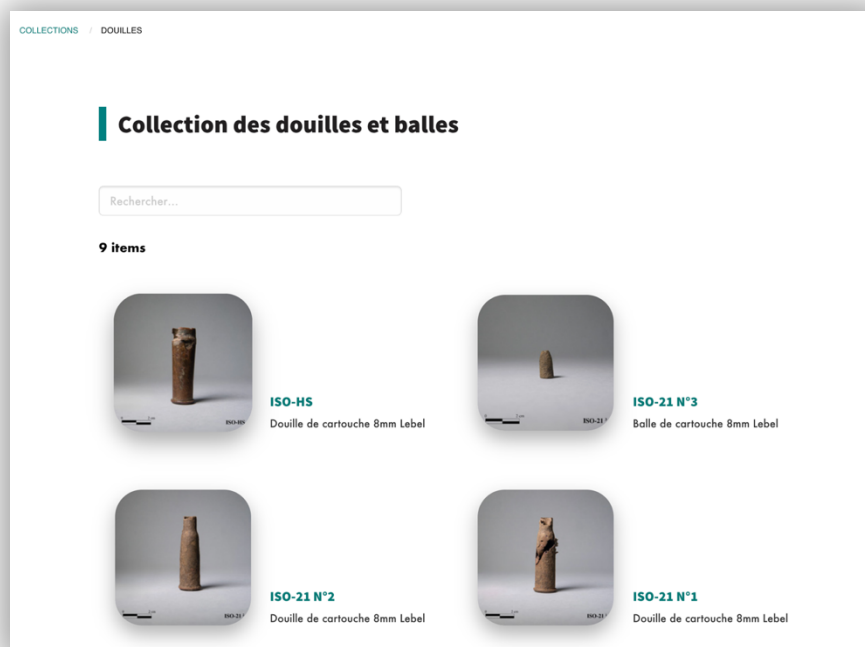


Figure 18 : Exemple de l'interface de la collection de douilles et de balles.

Les pages de fiches objets sont constituées à partir d'un module intégré à Omeka S appelé Universal Viewer et permettant de lire des fichiers images et 3D. Il est juxtaposé avec une description de l'objet et ses métadonnées, basées sur le référentiel Pactols qui est un réservoir de métadonnées spécialisées open-source et FAIR (Annexe 3 : fiche objet avec métadonnées.).

En résumé, la création de ce site web, a été guidée par une recherche d'équilibre entre expérience utilisateur et rigueur de valorisation archéologique. La plateforme OmekaS offre un cadre robuste pour construire un site à vocation patrimoniale, disposant de ressources organisées sous forme de collections et de contenus. Cependant dans notre contexte de production, OmekaS n'a pas pu être exploitée à son plein potentiel, car la plateforme est hébergée sur le serveur de l'université Paris 1, et cela engendre un certain nombre de restrictions. En effet, le statut d'utilisateur n'offre ni la possibilité de modifier les caractéristiques du thème proposé par OmekaS, ni d'ajouter une visionneuse spécifique. Un code mixte entre HTML et Javascript a permis de pallier à certaines limites rencontrées exceptée la visualisation de modèle 3D car la visionneuse "Universal Viewer" ne peut lire deux types de fichiers simultanément (images et modèles 3D combinés). Il a donc été nécessaire d'utiliser une deuxième visionneuse déjà intégrée uniquement pour les images pour que Universal Viewer puisse lire uniquement le modèle 3D. Le site web du Camp des Zouaves a

pour vocation à évoluer dans le temps : Les visualisations 3D peuvent être basculées sur une nouvelle visionneuse offrant un aspect scientifique plus pertinent avec des outils d'analyse et des points d'interaction cliquables ou encore l'intégration d'articles plus approfondis, ou d'actualités en lien avec les fouilles et publications à paraître.

3.3.2 Retour critique : qualité, accessibilité, réception

Après mise en ligne du site, il est indispensable d'évaluer de manière critique l'impact et la qualité de production auprès de divers utilisateurs. Le questionnaire a été conçu à partir de choix d'interrogations visant à tester l'adéquation du projet. Il tente d'aborder plusieurs axes précis répartis en 5 thématiques: la technique, l'ergonomie, le contenu, l'innovation 3D ainsi que la stratégie envers les publics. Le premier situe le profil de l'interlocuteur et permet de contextualiser et de situer les réponses en fonction de son expertise. Le second s'assure de la robustesse technique et de l'accessibilité du site afin de vérifier que la 3D n'est pas trop consommatrice en ressources. Le troisième teste l'ergonomie générale par une évaluation du design et de la navigation, qui doit être intuitive et fluide. Cela permet de valider nos hypothèses de hiérarchie visuelle. Nous avons prolongé avec un axe dédié à la qualité des images et des modèles 3D car les photos et les modèles représentent le premier contact de l'utilisateur avec l'objet. Il est donc nécessaire de vérifier la bonne lisibilité et la qualité des productions. Enfin, la dernière rubrique analyse et vérifie l'équilibre entre science et médiation ainsi que la pertinence entre les photos, le modèle 3D et les informations textuelles. Ainsi on peut mesurer l'innovation technique ainsi que le bien-fondé de l'ajout des modèles 3D, et la perception du discours auprès du public.

Au total, 11 personnes ont répondu aux 25 questions. Ce nombre réduit ne permet pas de tirer des conclusions statistiques solides sur la réception du site. Toutefois, il est possible de dégager des tendances qualitatives à partir de ces retours limités et d'observations informelles.

Pour entreprendre une analyse critique, il faut déterminer plusieurs facteurs essentiels à la contextualisation des données recueillies. Le panel est équilibré, quatre professionnels issus d'institutions archéologiques, cinq étudiants, un archéologue agent au sein de l'organisme forestier ONF, ainsi qu'une personne non spécialiste. La majorité des consultations a eu lieu sur ordinateur (9), une sur tablette et une sur smartphone. Des questions ont été posées sur le navigateur utilisé lors de problèmes techniques, mais aucune corrélation n'a été mise en évidence.

Sur le plan technique, sept personnes jugent le chargement des pages assez rapide, tandis que quatre personnes ont rencontré des lenteurs épisodiques en particulier en lien avec l'exposition virtuelle. Cela provient probablement de l'utilisation de model viewer qui ne paraît pas assez optimisé ou de la taille du modèle 3D. En ce qui concerne l'ergonomie visuelle, le design graphique, (Annexe 4 : Graphique des réponses en lien avec le design graphique.) la

fluidité et l'intuitivité de navigation ont été très bien notées. Aucune note n'est descendue en dessous de 4 sur 5, cinq notes sur onze sont à 5 sur 5 (Annexe 5 : Graphique des résultats du retour de fluidité et d'intuitivité.). La page d'accueil est jugée claire. Seuls deux répondants suggèrent d'ajouter d'emblée une carte de localisation pour contextualiser le site. Ceci démontre que la stratégie d'organisation de la page d'accueil et du site web en lui-même est pertinente.

En termes de contenu et de médiation, tous les répondants, sauf un, disent avoir trouvé bonne à très bonne la qualité des photographies (Annexe 6 : Graphique des réponses en lien avec la qualité des photographies muséales.). Sept sur onze des répondants estiment que les photos, 3D et textes sont très complémentaires. Deux réponses restent mitigées et jugent la 3D inutile pour ces objets mais reconnaissent la valeur pédagogique de l'exercice, ainsi que des remarques au sujet de l'absence d'outils de mesure (Annexe 9 : Graphique des réponses en lien avec la pertinence entre photographie, modèle 3D et documentation.). Trois répondants suggèrent des vues en contexte du mobilier, photographique ou en 3D. Cependant les interactions avec les modèles 3D semblent appréciées pour le côté innovant mais non pas pour leur utilité, car aucun moyen d'analyse ni de contextualisation n'a été mis en place, ce qui confère aux modèles un aspect gadget malgré la qualité des numérisations qui restent pertinentes au sein du projet (Annexe 8 : Graphique des réponses en lien avec la compréhension au travers des modèles 3D.). Comme le relève un des répondant " Il pourrait être envisagé de proposer des modèles 3D uniquement pour certains objets, en raison de leurs similarités. En revanche, dans une démarche scientifique, il est pertinent de disposer de l'intégralité des modèles afin d'analyser chaque objet avec précision."

En ce qui concerne les valeurs scientifiques et de médiation en rapport avec les publics, dix réponses sur onze jugent un équilibre satisfaisant, avec des notes de 3 à 5 sur 5. Cependant, on relève que le public curieux d'histoire, et les chercheurs sont les plus satisfaits (Annexe 7 : Graphique des publics les mieux desservis par le site web.). Deux personnes suggèrent de rendre les textes plus accessibles et de prévoir une diffusion plus large pour atteindre d'autres publics.

En termes d'améliorations prioritaires, il semble qu'une optimisation des modèles 3D pour un affichage mobile soit nécessaire, en particulier pour l'exposition virtuelle, modèle 3D le plus important du site, ainsi que d'enrichir cette exposition avec l'ajout de points d'interaction. Malgré quelques lenteurs ponctuelles et des ajustements ergonomiques nécessaires, le site du Camp des Zouaves est globalement perçu comme agréable, intuitif et efficace pour comprendre les objets présentés. Par ailleurs, ce site web apparaît cohérent avec les autres plateformes de valorisation de collections archéologiques et historiques (Annexe 10 : Graphique de la cohérence du site web avec d'autres plateformes de valorisation de collections patrimoniales). Les retours soulignent toutefois qu'une 3D pertinente doit rester associée à ces présentations d'objets, avec soit une mise en contexte ou une possibilité d'analyse et d'étude des objets en question. Cela met en lumière sa capacité à toucher aussi bien des spécialistes que le grand

public. La réception de ce projet reste à approfondir, même si les premiers échos confirment l'intérêt du projet, mais le véritable impact sur le public ne pourra être mesuré qu'après une diffusion élargie et un recul temporel plus important. Ce retour d'expériences alimente une réflexion sur les potentialités et limites de la valorisation numérique en archéologie.

La base du site web semble bonne, par son esthétisme, sa navigation et l'iconographie de qualité. Pour ce qui est des modèles 3D, ils sont un atout d'innovation, mais la question d'une réelle valeur ajoutée reste posée. Pour améliorer l'intérêt de la 3D, il faut optimiser son chargement, enrichir le visionnage par des outils d'analyse et de mesure, ainsi qu'une fonction d'annotation et de mise en contexte interne.

3.4 Analyse critique : potentialités, limites et enseignements

Après la démonstration factuelle du déroulement du projet et la présentation des résultats, il convient de prendre du recul afin d'analyser de manière critique l'ensemble de la démarche. Une réflexion approfondie articulée en deux volets semble judicieuse. D'une part, nous examinerons les supports numériques choisis et la pertinence de leur usage par rapport aux discours scientifiques et pédagogiques visés. Quelles sont les potentialités et limites intrinsèques de ces choix technologiques ? D'autre part, nous dégagerons les enseignements personnels, les compétences acquises et la prise de recul critique sur les usages du numérique en archéologie. Ce projet de valorisation du camp des Zouaves se place dans un contexte plus large de valorisation numérique du patrimoine.

3.4.1 Quels supports pour quel discours ? Choix de valorisation numérique et portée scientifique

La question « Quels supports pour quel discours ? » invite à interroger les moyens numériques utilisés et le message que l'on souhaite transmettre au sein d'un projet de valorisation. Dans le cadre de la valorisation du Camp des Zouaves, nous avons mobilisé principalement quatre types de supports : les modèles 3D, les photographies, ainsi que du texte et des métadonnées. Il s'agit de supports présentant des forces et des faiblesses permettant de véhiculer une information spécifique. Il est crucial d'analyser dans quelle mesure les choix effectués ont servi un propos scientifique et pédagogique, ou, au contraire, l'ont parfois limité. Cette réflexion rejoint les problématiques de fond de la médiation du patrimoine qui reviennent à rationaliser nos pratiques numériques pour qu'elles apportent une réelle plus-value sans céder à un effet de mode technologique. Il est pertinent de s'interroger sur la portée scientifique réelle

d'un dispositif 3D, disponible en ligne. Ils sont souvent mis en avant pour un aspect spectaculaire, sans exploitation scientifique réelle.

Le support numérique web, exploité au sein de ce projet, démontre un potentiel de convergence des médias puisqu'il a été possible d'intégrer des éléments variés en un tout cohérent. Ce projet de valorisation poursuit à la fois un objectif scientifique et un objectif de médiation. Il a donc fallu décider quel média utiliser pour quel contenu. La contextualisation historique et archéologique se réalise davantage avec un texte illustré d'images. Cela introduit un texte explicatif et transmet un discours structuré et nuancé. Parallèlement, les présentations des objets, au sein des collections, reposent sur un support visuel, primordial. La photographie à haute résolution joue un rôle central, elle restitue fidèlement l'apparence de chaque pièce, complétée alors par la 3D qui apporte une valeur ajoutée. La photo ne permet pas à l'utilisateur d'interagir avec elle par sa nature en deux dimensions. En théorie, un modèle 3D offre une expérience plus riche qu'une image 2D, car il permet l'interaction et révèle la forme de l'objet sous tous ses angles. Il s'agit donc d'un atout de compréhension pour certains artefacts. Par exemple, des objets représentant des détails sur une face cachée ne pourront pleinement être appréhendés qu'en 3D. Une visualisation en trois dimensions permet d'engager davantage l'utilisateur, ce qui le rend en quelque sorte acteur de sa découverte. Il tourne, il zoome, il explore à son gré, contrairement à une image fixe qui impose un point de vue unique.

Cependant, une mise en œuvre pratique de la 3D a été, comme nous l'avons vu, parfois problématique. En effet, le support technique, la visionneuse intégrée à Omeka S, n'était pas à la hauteur de nos attentes initiales. La 3D a été perçue comme parfois inutile ou n'ayant aucune plus-value au sein du discours de valorisation. Cela pose question à propos du support de visionnage du modèle 3D. En l'état, la portée scientifique reste limitée, il n'y a aucune possibilité d'interaction avec le modèle 3D. Aucun outil d'analyse ni de mesure ni de point d'interaction ne permet d'ajouter des informations et du contenu au modèle. Cela confère à notre site une portée pédagogique visuelle, il montre la forme générale de l'objet, sans une portée heuristique, ce qui est souvent le cas dans une démarche de médiation plus que de recherche. (Delamare 2024, p. 16). Ce projet confirme en partie cette tendance puisque la 3D sert d'abord de médium destiné à attirer le public en offrant une représentation visuelle ludique et explicite et non directement comme un outil scientifique.

Pour autant, conclure par le simple fait que la 3D ne permet pas une étude scientifique est réducteur. La portée de cette technologie dépend de la façon dont elle est intégrée et exploitée. Dans notre cas, un outil approprié pour en exploiter le potentiel nous a manqué. Idéalement, un outil de visualisation 3D adapté avec des fonctionnalités d'étude, aurait pu maximiser la portée scientifique et pédagogique. Une visionneuse 3D, enrichie d'annotations et d'outils, permet à un public non initié à l'archéologie, d'explorer et d'entrer en interaction avec l'objet. De plus, l'intégration d'un support narratif permet de toucher l'ensemble des publics et créer une véritable plus-value pédagogique et scientifique.

Un autre aspect du choix de support concerne l'expérience utilisateur et le type de discours véhiculé. Chaque médium façonne la perception du contenu. Un texte permet une analyse détaillée et un discours structuré, mais il peut rebuter une partie du public s'il est trop technique. C'est pourquoi, dans un premier temps, le site n'expose que des textes concis permettant une mise en contexte simple du site de fouilles. Cependant, il n'est pas exclu qu'ultérieurement des articles à vocation scientifique soient intégrés. Il s'agit là d'une stratégie afin de rendre le discours plus accessible et engageant.

La valorisation numérique offre une complémentarité des supports, puisqu'un visiteur peut lire une documentation historique afin de comprendre le contexte. C'est une forme de discours informatif. Si la navigation se fait de manière instinctive, il est amené à manipuler un objet en 3D afin de l'appréhender. Cela offre une compréhension globale du sujet d'étude et souligne le fait que chaque production, même qualitative, ne peut offrir un discours pleinement complémentaire que par une navigation et une ergonomie adaptée entre l'ensemble de ces discours.

Ces points interrogent sur la pertinence narrative de nos choix. En effet, lorsque l'on propose un modèle 3D, des photographies, ainsi que des informations contextuelles, il est intéressant de comprendre dans quel récit cela est intégré. Une scénarisation entre l'ensemble des documents proposés aurait été judicieuse. L'utilisateur pourrait être guidé à travers une sélection d'objets et d'informations dans un but de compréhension générale accrue, sans le priver de la liberté de naviguer à sa guise.

En définitive, la complémentarité des supports semble essentielle, les informations textuelles, les photographies et la 3D jouent un rôle précis au sein de ce projet. Aucun de ces médiums, utilisé seul n'aurait pu transmettre l'ensemble de ces informations. Il faut donc privilégier une adéquation entre outils et messages, c'est ce qui doit guider la réflexion autour du discours. Cependant, il faudra veiller à ne pas sacrifier l'expérience utilisateur pour une innovation technique non maîtrisée. Une présentation 2D de qualité prévaut sur un mauvais modèle 3D. Ce point renvoie à la notion de rationalisation évoquée dans le premier chapitre.

Dans le contexte de ce projet de valorisation, la 3D offre des potentiels immenses pour le patrimoine archéologique : création d'expériences immersives, accessibilité des artefacts, et captation d'un nouveau public via un support innovant. Le projet du camp des Zouaves a permis de mettre en lumière le fait que le numérique, et en particulier la 3D, offre à l'archéologie un support pertinent de diffusion des connaissances, à condition de rester critique sur son usage, de l'aligner sur des principes de sciences ouvertes et des objectifs scientifiques et pédagogiques.

3.4.2 Apports et limites pour ma formation

Ce dernier axe est consacré à une réflexion introspective sur les apports de ce projet à ma formation de jeune professionnel en valorisation du patrimoine. Réaliser la numérisation 3d d'objets ainsi que créer un site web de médiation, constitue un exercice pratique très complet, mobilisant à la fois des savoir-faire techniques, des connaissances scientifiques, ainsi que des aptitudes de gestion de projet. Cette expérience m'a permis de révéler des compétences acquises au cours de mon année de master, de les renforcer ainsi que de pointer celles qui restent à développer.

Il est également essentiel de rappeler que ce type de valorisation n'est pas usuelle au sein du SRA Île-de-France. Il s'agissait d'une première initiative du genre. Cette institution ne dispose pas de services ayant pour mission une valorisation numérique via le web. D'autre part, l'organisation d'un tel projet fait appel à des compétences qui, à l'heure actuelle, ne sont pas intégrées dans les plans de recrutement au sein d'un service archéologique. La valorisation se fait essentiellement via des communications et des événements de médiation. Par conséquent, un tel projet provient d'une initiative extérieure impliquant, à aujourd'hui, une forme d'embauche contractuelle puisqu'une production de ce type ne pourrait pas se réaliser en interne, dans l'état actuel des services régionaux d'archéologie non pourvus de profils diversifiés et qualifiés pour des productions différentes.

La conduite de ce programme a été extrêmement formatrice car elle a concerné de nombreux domaines. J'ai pu acquérir ou renforcer des compétences techniques en termes de photographie, d'acquisition 3d, de gestion de contenu et d'ontologie de métadonnées, ainsi que de développement web à travers le CMS Omeka S. J'ai eu l'occasion de développer une autonomie en termes de gestion de projet alliée à l'apprentissage des techniques de médiation et de valorisation numérique. Ceci m'a permis de combiner les dimensions scientifiques, techniques et pédagogiques de la valorisation du patrimoine, et de mettre l'accent sur l'importance d'un profil polyvalent, ainsi que la nécessité d'une compréhension concrète des enjeux du numérique en archéologie.

Malgré ces apports, des limites ont été rencontrées, ce sont autant des défis que des axes d'amélioration. L'un des premiers obstacles était relatif à mes compétences techniques spécifiques, n'étant pas développeur web de formation. Je me suis parfois senti bridé et j'ai dû prendre un temps d'apprentissage avant de pouvoir de nouveau produire. Cela souligne également un point important : la valorisation numérique en archéologie est par nature pluridisciplinaire. Il n'est donc pas possible d'exceller, seul, dans tous les domaines nécessaires à la bonne réalisation d'un projet de cette envergure. Un travail d'équipe, avec une convergence de compétences, semble crucial pour une bonne réalisation de projets numériques patrimoniaux. Par ailleurs, un travail collaboratif permet de mettre en exergue une réflexion et une rationalisation des pratiques plus développées.

Je dois également souligner le manque de temps pour cette mission, une préparation plus importante pour la phase de médiation et de test utilisateur aurait été idéale. Par exemple, dans le cas de l'expérience utilisateur, une collecte d'avis sur le long terme aurait été plus pertinente, permettant d'ajuster l'ergonomie du site au fur et à mesure. Il en est de même pour la stratégie de communication autour du site qui n'a pas été développée. En effet, intégrer une composante de communication et valorisation du projet en lui-même, et non seulement du contenu, aurait été plus efficace pour atteindre le public. Enfin, cela m'a permis de mettre en lumière mes limites en matière d'évaluation critique vis-à-vis de mes propres productions. Étant le concepteur et le réalisateur, il est parfois difficile de juger objectivement ce qui peut être amélioré au sein de son propre travail. La durée de stage limitée à deux mois a restreint ma capacité d'auto-évaluation et de remise en question suffisamment importante tout au long du processus, car j'étais soucieux de remplir ma mission dans le temps imparti.

Par conséquent, ce projet a été hautement bénéfique pour ma formation, avec une palette de compétences élargie, ainsi qu'une montée en puissance dans la confiance en ma capacité de mener un projet de A à Z. Pour autant, j'ai pu considérer mes limites actuelles, comme un tremplin vers des axes d'amélioration. En outre, j'ai pu développer ma perception de la complexité du travail de valorisation du patrimoine archéologique à l'ère du numérique, en termes de maîtrise des contenus scientifiques, tout en jonglant avec des outils innovants, au sein de processus planifiés et rigoureux. Enfin, j'ai appréhendé la complexité d'apprendre en continu, de collaborer avec divers spécialistes, et de devoir adapter des supports et des discours aux divers publics scientifiques ou non.

Chapitre 4 : Vers un conservatoire 3D universitaire (Paris 1 – Panthéon Sorbonne)

4.1 Objectifs : conservation, pédagogie, recherche

4.1.1 *Une vitrine universitaire en complémentarité avec le CND3D*

Lorsque l'on évoque une vitrine 3D, l'image immédiate est celle d'une galerie numérique, où des modèles 3D seraient exposés. Pourtant, un conservatoire 3D se doit de faire de la 3D un prolongement de la pratique archéologique et non une simple vitrine des moyens techniques mis en place pour valoriser des objets. La volonté de départ est de s'inscrire dans la mentalité de sciences ouvertes et d'une planification FAIR pour les données archéologiques. L'initiative de Paris 1 Panthéon-Sorbonne vise à créer un conservatoire numérique de modèles 3D spécifique à l'université. Son but n'est pas de concurrencer l'actuel conservatoire national des données 3D. En effet, cette structure assure un hébergement et un stockage sécurisé, une visualisation en ligne, notamment via l'outil 3D-HOP, accessible sous certaines conditions, ainsi que l'attribution d'un DOI pour chaque modèle, la citabilité et la traçabilité de chaque fichier. Toutefois, le conservatoire 3D de Paris 1 n'a pas vocation à copier ces services, mais à les compléter dans un cadre institutionnel précis. Ce projet se positionne comme une vitrine basée sur l'expérience utilisateur, l'innovation pédagogique, et par conséquent une valorisation interne des collections appartenant à l'université. Le CND3D n'a vocation que de sauvegarde à long terme et une diffusion à l'échelle nationale. Il s'agira donc d'une forme de fonctionnement collaboratif permettant de pallier les manques d'une plateforme par un service proposé en interne, spécifique aux besoins de l'université. Ce conservatoire ne délaisse pas les impératifs en matière de science ouverte et de données FAIR. Enfin, il répond à des préoccupations éthiques récentes, notamment dues à la dépendance de solutions prioritaires externes telles que Sketchfab pour l'hébergement des modèles 3D de recherche, organismes universitaires et d'archéologie.

Ce projet se présentera sous forme d'une plateforme web sémantique mise en place grâce au CMS Omeka S, choix expliqué pour sa vocation patrimoniale que nous avons déjà

détaillée auparavant. L'ensemble du contenu présenté au sein de ce conservatoire sera organisé dans des collections dans lesquelles chaque objet disposera de sa fiche de présentation contenant une ontologie de métadonnées précises, le contexte historique, les caractéristiques de l'objet ainsi que les détails du modèles 3D et de sa production. Les modèles seront accompagnés d'images de l'objet physique ainsi que des contenus pédagogiques supplémentaires comme par exemple des vidéos ou des documents spécifiques sous forme de PDF consultables.

Ce conservatoire se distingue par une ambition résolument pédagogique et scientifique dans un cadre d'initiation des étudiants à la visualisation d'objets 3D et à l'utilisation des outils d'analyse intégrés disponibles pour les enseignants et les étudiants. La valorisation des collections sera produite par des moyens de narration interactifs. La mise en place de ce projet sur Omeka S permet de replacer chaque modèle dans un contexte historique avec une intégration de métadonnées précises, ainsi que la mise en place d'un numéro d'inventaire unique pour chaque contenu tel que le DOI présent au CND3D, de la sorte à documenter la provenance numérique de chaque objet avec des standards réglementés garantissant une pérennité et une souveraineté des données.

4.1.2 Enjeux pédagogiques et de formation pour les enseignants et les étudiants

Au-delà d'un principe de conservation et de visualisation, le conservateur 3D universitaire de Paris 1 poursuit un objectif de transmission pédagogique et de formation par un outil dédié. De cette manière cette plateforme offrirait aux étudiants un accès direct à des collections numérisées d'objets archéologiques qu'ils pourront étudier de manière interactive. L'initiation des étudiants aux outils en trois dimensions est inhérente aux ambitions déclarées au sein de ce projet afin de les former à l'ensemble de la chaîne de production numérique, et à la mise en ligne, ce qui les sensibilisera à des objectifs concrets de production. Pour les enseignants, la plateforme constitue un support innovant pour les cours, avec une possibilité d'illustrer certains propos, avec un modèle 3D manipulable en temps réel, ainsi que la création de parcours annotés au sein des modèles, avec l'intégration de textes explicatifs, d'images, de vidéos, qui guideront les étudiants dans un cadre d'apprentissage ou encore de proposer des exercices pratiques par une analyse des mesures et coupes d'objets.

L'enjeu est de sensibiliser les étudiants ainsi que le corps enseignant au passage de la phase de production à la phase de consommation, puisque l'acquisition 3D est fortement démocratisée et documentée, contrairement à la phase de valorisation. Il semble intéressant d'apporter une didactique de la visualisation 3D, avec par exemple une phase démonstrative où un enseignant initie, à la visualisation et aux possibilités d'analyse d'un modèle, des étudiants qui reçoivent un jeu de données leur permettant de s'exercer par des mesures, des

coupes, des annotations et ainsi réaliser une étude et une valorisation d'un objet archéologique. Enfin, une phase productive sera intégrée : l'étudiant est sensibilisé à une production d'un modèle 3D, à la mise en ligne ainsi qu'aux renseignements ontologiques du modèle qui suivront sa publication. L'ensemble du processus, nécessaire au cycle de vie d'un jeu de données 3D dans le cadre de science ouverte, sera défini.

L'offre pédagogique ne doit pas se limiter à une simple visualisation passive, car seuls les modèles mis en ligne par des personnes accréditées sont accessibles. Dans ces conditions, aucun moyen d'analyse ou d'étude ne peut être envisagé indépendamment par rapport à la base de collections existantes. Pour cette raison, il est important de prévoir une solution, pour les étudiants, qui ne les oblige pas à mettre en ligne leur propre modèle. Ainsi, un outil de visualisation sera mis à la disposition de tous, tant aux étudiants qu'aux enseignants notamment lors de séances d'initiation à ces outils.

Il s'agit là de démocratiser l'usage de la 3D dans la formation des sciences humaines, et en particulier en archéologie, par l'utilisation d'un outil de pédagogie active. Les étudiants et les enseignants disposeront d'un environnement maîtrisé d'études et de pédagogie accessible et adapté y compris aux non-spécialistes en maintenant un objectif de haut niveau d'exigence scientifique.

4.1.3 Panorama de la valorisation patrimoniale et archéologique de la 3D sur le WEB

Le développement d'un conservatoire 3D à Paris 1 s'inscrit plus largement dans un paysage de diffusion du patrimoine culturel en 3D sur le web présent depuis environ une dizaine d'années. En lien avec le développement des technologies 3D, de nombreuses institutions patrimoniales et projets de recherche ont voulu mettre en ligne des modèles en trois dimensions d'objets, de sites et de monuments, à vocation de médiation auprès du grand public et de valorisation scientifique. Cependant, les organismes patrimoniaux n'ont pas été les seuls à s'atteler à ce type de projet. En effet, des plateformes généralistes d'hébergement de modèles 3D ont émergé, proposant des sites dédiés aux dépôts et à la visualisation, et qui sont devenus des outils majoritairement utilisés dans le domaine patrimonial, y compris l'archéologie car ils offrent un moyen de stockage et de diffusion très accessible, avec l'intégration de moyens de visualisation simples et rapides, ne demandant aucune compétence technique.

Parmi les plateformes en ligne les plus populaires, Sketchfab est la plus utilisée de toutes. Elle bénéficie d'un quasi-monopole dans ce domaine. L'un de ses points forts est sa visionneuse intégrée, car performante, qui offre des fonctions avancées telles que des annotations, un mode de réalité augmentée et de réalité virtuelle, ainsi que la possibilité de l'incorporer au sein d'un site web tiers. Nombre d'institutions muséales, notamment, ont été séduites par cette facilité d'utilisation, d'intégration et de stockage. Néanmoins, il s'agit d'un service propriétaire, gratuit à la condition de ne pas mettre en ligne un fichier de plus de 100

mégaoctets. Les difficultés inhérentes à cette plateforme concernent notamment la pérennité et le contrôle des données car les utilisateurs sont dépendants d'une entreprise privée qui impose des conditions ne respectant pas les fondamentaux de science ouverte.

Il serait regrettable de négliger l'existence d'autres plateformes autorisant l'hébergement et le visionnage. Ainsi, il est intéressant de détailler un paysage général des plateformes disponibles dans l'hébergement de modèles 3D. Nous avons délibérément décidé de ne pas nous limiter à la sélection de plateformes patrimoniales afin d'analyser les modèles économiques, l'accessibilité et les principes d'ouverture. Quatre critères ont été retenus. Un hébergement des fichiers sur l'infrastructure de service, c'est-à-dire la mise en place d'une vitrine 3D, l'intégration d'une visionneuse, la présence de métadonnées, plus ou moins spécifiques et scientifiques, ainsi que les modalités de diffusion telles que des gestions de droit, de partage, d'e-commerce ou d'open data. Au total huit plateformes ont été sélectionnées.

Plateforme	Positionnement et spécificités	Outils de visualisation	Mise en ligne et formats	FAIR / Open source	Modèle économique	Aspects éthiques / big data
Sketchfab	Leader grand public et musées (racheté par Epic Games). > 800 000 modèles CC libres + store payant	Viewer WebGL, AR/VR (USDZ, WebXR), annotations, API JS/REST.	Upload web ou API. Formats : OBJ, FBX, STL, glTF (export auto), USDZ	Pas open-source, mais API ouverte. Efforts FAIR évoqués dans la communauté RetD	Freemium : gratuit limité (100 Mo/modèle) ; Pro, Premium et Enterprise	CGU strictes (interdits armes, haine, contenus illicites)
Clara.io	Service canadien : édition 3D cloud + dépôt partagé	Éditeur temps-réel, rendu V-Ray, embed Three.js.	Drag-drop / REST ; FBX, OBJ, STL, BLEND, etc.	Code fermé, API script/REST libre. FAIR partiel.	Gratuit + offres Pro (rendu cloud).	Pas de modération forte ; stockage extensible, datasets volumineux acceptés.
Thingiverse	Communauté maker (MakerBot). Axé impression 3D.	Viewer .stl + Customizer (OpenSCAD en ligne).	STL/OBJ via web.	Plateforme propriétaire ; fichiers sous licences CC ou GPL au choix de l'auteur	100 % gratuit (monétisation via pubs et écosystème Makerbot).	Politique DMCA ; privilège open hardware ; big data : > 5 M de fichiers.
MyMiniFactory	Marketplace pour figurines et jeux (print-on-demand).	Viewer 3D + apps mobiles AR.	STL/OBJ. Workflow « Store » pour créateurs.	Données librement licenciées ou vendues. Pas open-source.	Freemium ; vente directe	Vérification manuelle des modèles ; règles anti-plagiat.
CGTrader	Marché B2B (CG/VR/AR) + hub freelance.	Visionneuse PBR temps réel.	Formats pro (FBX, OBJ, MAX, STL...)	Plateforme fermée, métadonnées Dublin Core.	Vente à la commission ; abonnement Business.	Filtre contenu illicite ; gros volumes (> 1,5 M fichiers) via CDN.
P3D.in	Hébergeur léger + white-label.	Viewer WebGL paramétrable, API embed	Upload web/API ; OBJ, STL, glTF.	Code fermé, API payante.	Gratuit (1 Go)	Respect RGPD, pas d'IA générative sans consentement.
NIH 3D Print Exchange	Portail public biomédical (NIH).	Viewer, outils de réparation maillage, scripts de conversion.	Web upload ; STL, VRML, PLY	Ouvert, DOI, descriptions normalisées ; pleinement FAIR.	Gratuit	Revue scientifique communautaire ; disclaimers médicaux.
MorphoSource (Duke Univ.)	Repository recherche (scans CT, patrimoine).	Viewer multi-résolution, mesures, découpes.	Upload + API cURL ; CT stacks, OBJ, PLY, STL.	Attribution DOI, métadonnées Darwin Core ; FAIR ; code partiellement libre.	Gratuit (quota) ; institutions partenaires → stockage illimité.	Politique d'accès négociable (embargo, CC-BY, etc.) ; capacité « big data » (volumes > 10 Go).

Figure 19 : Panel représentatif des différentes plateformes d'hébergement et de visualisation 3D en ligne.

Sur l'ensemble de ces plateformes, des formats de diffusion dominant le marché. Pour l'impression, le STL et le PLY sont les plus répandus. En revanche, pour une visualisation web en temps réel, l'OBJ et le GLB se partagent l'activité avec une nette progression du GLB expliquée par l'intégration de la texture et du maillage au sein d'un seul fichier alors que l'OBJ sépare ces données.

En termes de respect des principes FAIR, seules Morphosources et NIH 3D Print répondent nativement à ces contraintes, avec par exemple la mise en place de DOI, licence explicite. Les autres restent "fundable and accessible" mais ne sont pas interoperables et non réutilisables dans le cadre d'un protocole de science ouverte. Cette différence débouche sur les modèles économiques choisis par chaque plateforme. Le premier et le plus populaire est le freemium limité, avec comme figure de proue Sketchfab, qui représente parfaitement ce modèle économique. On trouve également P3D.in ainsi que MyMiniFactory et Clara.io. Le second modèle, utilisé uniquement par CGTrader, est une monétisation directe par commission. On trouve ensuite le modèle le plus ouvert, c'est-à-dire une gratuité académique, avec NEH 3D Print Exchange et MorphoSource qui sont les plateformes se rapprochant le plus du modèle visé par le consortium 3D de Paris 1. Enfin, les plateformes avec un marketplace intégré seront bientôt rejointes par Sketchfab, c'est-à-dire avec l'intégration d'une vente directe des modèles 3D. Cette diversité de modèles économiques influe sur la pérennité des données hébergées, puisque des modèles gratuits archivés sous un modèle académique garantissent un accès durable, mais présentent parfois des fonctionnalités limitées. Alors que les plateformes commerciales garantissent la plupart du temps des performances et des mises à jour accrues, mais la pérennité des modèles n'est pas garantie en cas de rachat ou de changement de stratégie économique.

La plus forte particularité est qu'aucune de ces infrastructures n'est open source, car il s'agit toujours d'une plateforme propriétaire. En effet, le contexte de données FAIR est présent par des métadonnées normalisées et accessibles avec l'intégration d'un numéro d'inventaire tel que le DOI.

En parallèle, les portails institutionnels ou scientifiques ont pu voir le jour afin de répondre aux besoins du patrimoine et de la recherche. Le fait de ne pas citer le CND 3D est intentionnel puisque nous en parlons depuis le début de notre travail compte tenu de sa place prédominante dans le paysage français de l'archivage des données 3D à vocation patrimoniale. C'est pourquoi un panorama des plateformes et collections universitaires accessibles est pertinent afin de contextualiser au mieux le positionnement du projet de conservatoire 3D de Paris 1.

Université (pays)	Nom de la collection / portail	Technologie vitrine	Vitrine propriétaire (université)	Type d'objets mis en ligne	FAIR et formats principaux
University of Oxford (R-U.)	Digital Bodleian — ARCHIOx	IIIF-3D + scanner photométrique Selene	OUI	Manuscrits, sceaux, tirages cuivre 18 ^e s.	Objectifs DOI et intégration IIIF ; formats haute-résolution OBJ/normal maps ; métadonnées IIIF compatibles
Maastricht University (NL)	PURE3D (infrastructure nationale)	Front-end React + Fedora backend (open-source)	OUI	Projets scolaires, Monuments, sites archéo, éditions savantes 3D	Conçu « FAIR-by-design » : dépôt pérenne + paradata ; support glTF/OBJ, archives zip
University of Cambridge (R-U)	Fitzwilliam Museum 3D	Sketchfab	NON	Sculptures, antiquités, objets d'art	Licence gérée par Sketchfab, donc propriété en danger, le dépôt n'est donc pas pérenne; support glTF/OBJ
UCL – Petrie Museum (R-U)	Petrie Museum 3D	Sketchfab	NON	Artefacts égyptiens (11+ modèles)	Licence gérée par Sketchfab, donc propriété en danger, le dépôt n'est donc pas pérenne; support glTF/OBJ
University of Edinburgh (R-U)	Open.Ed 3D models	Sketchfab	NON	OER : géologie, instruments, œuvres patrimoniales	Licence gérée par Sketchfab, donc propriété en danger, le dépôt n'est donc pas pérenne; support glTF/OBJ
University of Reading (R-U)	SAGES	Sketchfab	NON	Modèles photogrammétriques de terrain (Silchester, Wadi Faynan...)	Licence gérée par Sketchfab, donc propriété en danger, le dépôt n'est donc pas pérenne; support glTF/OBJ
Université de Strasbourg (FR)	Institut d'Égyptologie	Sketchfab	NON	Statuettes, céramiques, relevés de sites TT 33	Licence gérée par Sketchfab, donc propriété en danger, le dépôt n'est donc pas pérenne; support glTF/OBJ
Leiden University (NL)	Digital Humanities student collections	Sketchfab	NON	Objets patrimoniaux scannés par étudiants	Licence gérée par Sketchfab, donc propriété en danger, le dépôt n'est donc pas pérenne; support glTF/OBJ
University of Oslo (NO)	Museum of Cultural History (KHM)	Sketchfab	NON	Archéologie, ethnographie, numismatique	Licence gérée par Sketchfab, donc propriété en danger, le dépôt n'est donc pas pérenne; support glTF/OBJ

Figure 20 : Panel non exhaustif des vitrines 3D universitaires à l'international.

Cette représentation non exhaustive d'universités disposant d'une vitrine de collections 3D à vocation patrimoniale démontre que le phénomène Sketchfab n'est pas inhérent à la France. On retrouve d'un côté un modèle de vitrine propriétaire avec l'université d'Oxford, et la plateforme nationale pure 3D développée par l'université de Maastricht, qui a une vocation d'hébergement de projets 3D scolaires et universitaires et d'un autre côté, des vitrines externalisées hébergées sur Sketchfab. Cela signifie que très peu d'infrastructures universitaires mettent à disposition des formats ouverts. Ces approches demandent plus de moyens techniques et financiers à mettre en œuvre, mais garantissent une souveraineté et une traçabilité pérenne. Ce critère devrait être essentiel pour des organismes de recherche. La plateforme Sketchfab soulève des enjeux éthiques à plusieurs niveaux, tels que la durabilité et la souveraineté numérique, ainsi qu'une dépendance vis-à-vis du nouveau propriétaire de Sketchfab "Epic Games", et une perspective de migration vers un store "Fab" qui menace l'intégrité des modèles avec un nouveau modèle économique. Cette bascule vers une logique marchande met à mal les licences et les droits de réutilisation, créant une tension entre l'esprit open access et les mécanismes de monétisation privée. Les différents organismes et institutions se retrouvent exposés à une perte de contrôle moral sur leur production. De plus, la complexité juridique internationale rend quasiment impossible toute harmonisation législative autour d'une protection commune vis-à-vis des modèles et des déposants. Il paraît donc indispensable de promouvoir des solutions alternatives afin de renforcer les dépôts institutionnels mais également coopératifs dans le but d'adopter des licences claires, des standards ouverts ce qui se traduit par des dépôts pérennes dans des principes FAIR. Seule une telle approche permettra une préservation des droits d'auteur et une sauvegarde des collections patrimoniales.

Ce panorama des plateformes privées et universitaires démontre un dilemme classique entre tentation d'une solution clé en main offrant une visibilité immédiate et une exigence académique durable et avec une souveraineté interne. D'un côté, il s'agit d'une solution à court terme, avec des plateformes propriétaires telles que Sketchfab, qui restent attractives, d'un autre côté, une solution sur le long terme, plus robuste mais plus complexe à mettre en place, permettant une articulation entre vitrines, archives, métadonnées et pédagogie pour les étudiants et les enseignants. C'est dans cet écosystème que le conservatoire 3D de Paris 1 vient prendre place, avec une ambition de combiner une infrastructure académique pérenne alignée avec des standards de recherche, des métadonnées riches, DOI et un archivage certifié, mais également avec une expérience utilisateur moderne, en alignement avec les meilleures vitrines web actuelles pour assurer à la fois une diffusion grand public et l'exploitation des modèles par les étudiants et les enseignants de l'université.

4.2 Structuration des données 3D

4.2.1 *Ontologie de métadonnées*

Un archivage des données 3D se doit d'être accompagné d'une structuration des données descriptives associées, il s'agit d'un enjeu central lors de la phase de mise en ligne et de conservation. Cela assure une intelligibilité et une interopérabilité des modèles 3D dans notre cas. La mise en place d'une ontologie de métadonnées précise doit s'appuyer sur des standards reconnus et standardisés, conciliant vocabulaire générique et spécifique aux différents types de patrimoine.

Avec l'utilisation d'Omeka S, le renseignement de métadonnées fondamentales est facilité par la création de modèles de ressources personnalisables. C'est-à-dire qu'il est possible de mêler plusieurs ontologies entre elles, telles que le CIDOC CRM, le Dublin Core, le CARARE 2.0, les ontologies développées par le ministère de la Culture ou encore la plateforme open source Pactol, etc... Pourquoi recourir à une ontologie ? L'un des écueils majeurs de la 3D patrimoniale est l'hétérogénéité, c'est-à-dire des fichiers volumineux n'ayant pas forcément le même format, des méthodes d'acquisition variées et des chaînes de traitement opaques. Une ontologie permet de mettre en place un vocabulaire contrôlé et une interopérabilité entre l'ensemble des fichiers.

Le CIDOC-CRM est une ontologie de référence pour le patrimoine culturel, il permet de décrire de manière formelle des informations liées à l'objet étudié, comme sa provenance, son contexte, sa datation, etc... De surcroît cela offre un cadre sémantique essentiel à la bonne pratique de la mise en ligne des données 3D assurant une parfaite interopérabilité. Le Dublin Core est un jeu de métadonnées génériques et relativement polyvalentes, avec par exemple, le titre, le créateur, la date et les descriptions. Cependant placer toutes les informations dans l'espace de descriptions présente un risque de briser l'interopérabilité des métadonnées et donc de ne pas référencer l'objet correctement. Le Dublin Core reste toutefois une solution pour des cas particuliers.

Le Conservatoire National des Données 3D s'appuie aujourd'hui sur une structuration précise de ces métadonnées à travers un schéma généré via l'outil Altag3D. Ce schéma dénommé mdacst3d permet de couvrir plusieurs catégories essentielles : identification, contexte scientifique, méthode d'acquisition, technique, c'est-à-dire paramétrage 3D, contexte spatial, droit et licence. Cette organisation permet de fournir un lot de données cohérent qui est validable automatiquement par l'infrastructure du CND3D et permet de se conformer aux standards internationaux du CIDOC-CRM. De ce fait, ces métadonnées sont interopérables.

Un autre standard européen de métadonnées particulièrement intéressant est à citer : CARARE 2.0 qui vise à faciliter l'interopérabilité des données patrimoniales et archéologiques

entre infrastructures européennes. Tout comme les métadonnées du CND3D, CARARE 2.0 se décline en plusieurs grands ensembles (Identification générale : titre et identifiant ; Provenance et contexte de production ; Documentation numérique : nature de la ressource, format et licence ; Événements ou activités associées : type d'opération et date précise de l'activité ; Relation et contexte). Ce schéma de métadonnées autorise une compatibilité étroite avec le CIDOC-CRM et donc garantit une interopérabilité à l'échelle internationale importante, en particulier en Europe. Il permet une description efficace du contexte historique, spatial et temporel.

Afin d'assurer des métadonnées fonctionnelles et interopérables, il est nécessaire de guider le rédacteur des informations, avec un vocabulaire pré rempli et à choix pour certaines catégories, cela permet d'éviter des fautes de saisie et autres erreurs bloquant la mise en relation de ces vocabulaires. C'est pourquoi la mise en place de listes de valeurs contrôlées offrira le meilleur référencement possible.

Ce modèle de ressources sert à décrire un objet et sa numérisation 3D de façon claire et réutilisable. Les métadonnées nécessaires sont décrites et organisées de manière systématique, cela permet d'articuler les champs descriptifs et techniques selon des standards reconnus. La description s'organise avec un titre qui opère comme un identifiant lisible et indexable, il est adossé à un type qui offre une catégorisation contrôlée et interopérable grâce au thesaurus Art & Architecture (AAT), une datation inscrit l'objet dans une chronologie, les champs de matériaux et de techniques renseignent la constitution et le procédé de création, données indispensables à la typologie et la conservation. Les dimensions doivent être normalisées avec une unité explicite, la provenance, c'est-à-dire le site de découverte ainsi que sa localisation actuelle de conservation sont assurés par des identifiants et des lieux géoréférencés grâce à la base de données GeoNames. Cela garantit une traçabilité spatiale. Du côté numérique, il est nécessaire de préciser le format du fichier 3D (GLB, PLY, OBJ, ...), le processus de numérisation (photogrammétrie, scannerisation, ...), le jeu de données utilisé, c'est-à-dire des photos, des scans, ainsi que le nombre de fichiers, le logiciel choisi afin de garantir la reproductibilité et la taille du fichier final. Enfin, il est essentiel de préciser l'auteur, les droits et licences qui accompagnent la production, ainsi qu'un identifiant pérenne (ARK ou DOI) qui permet de consolider l'archivage. (Annexe 11 : Modèle de ressources mis en place pour le conservatoire 3D de Paris 1.)

Ces articulations offriraient un cadre robuste et interopérable au conservatoire numérique 3D de Paris 1 par une combinaison équilibrée entre plusieurs schémas, ce qui optimise la valorisation ainsi que l'exploitation pédagogique et scientifique des ressources 3D produites par Paris 1.

Afin de produire des données descriptives complètes, il faut accorder une attention particulière aux paradata, qui sont les informations du processus de création du modèle 3D dans notre cas. Ces paradata garantissent la rigueur scientifique et la reproductibilité des

résultats, par exemple, la méthode d'acquisition, les jeux de données sources, nombre de photos, scan ou autre, les paramètres de post-traitement, logiciels utilisés, ainsi que des choix de modification par modélisation. Ces informations apportent un contexte indispensable afin d'évaluer la qualité et la fiabilité d'un modèle. A défaut, les données 3D perdent une grande partie de leur valeur scientifique. Il est donc important de mettre en place une distinction entre les informations sur l'objet physique en général et les métadonnées liées au modèle 3D. Il faut veiller à ce que le conservatoire 3D de Paris 1 présente la référence du contexte historique et matériel de l'objet sans omettre le contexte de production.

4.2.2 Cartographie des formats selon usages (maillage, nuage de points)

Les modèles 3D utilisés dans le patrimoine et en archéologie relèvent de formats variés et d'usages spécifiquement liés à ces derniers. Il est utile de cartographier ces formats en fonction de leurs usages, de façon à adopter une stratégie rationnelle, de diffusion et de stockage. On distingue deux types de contenus 3D, les maillages et les nuages de points.

Un maillage est une structure composée de sommets, d'arêtes et de faces qui représentent une surface en trois dimensions. Il présente des caractéristiques explicites comme une topologie car on sait quelle face partage une arête et quel sommet compose une face. Ce format permet, par sa composition de faces, d'appliquer des rendus de textures à sa surface. Il est utilisé dans le cadre de modélisation et de numérisation d'objets provenant du réel, dans le jeu vidéo, au cinéma et dans la réalité virtuelle. Il permet également une analyse des surfaces par un calcul des volumes, d'air ou de simulation d'animation. Il sert également à des fins d'impression 3D.

Le nuage de points est un ensemble non structuré de points dans un espace 3D défini. Chacun de ces points comporte des coordonnées précises en X, Y, Z, obtenus par des acquisitions LIDAR, photogrammétriques ou de scannerisation. La différence avec un maillage est qu'il n'y a pas de connectivité entre les points donc aucune présence d'arrête ni de face. Il peut contenir plusieurs millions de points. Il précède la création du maillage. Ses usages sont divers : en topographie pour les relevés architecturaux ou bien pour une analyse dimensionnelle ou pour les détections de formes, notamment lors des prospections archéologiques. Le nuage de points est très peu visionné pour des objets mais pour des espaces tels que des sites archéologiques ou des monuments.

On peut donc relever trois usages particuliers couramment utilisés entre le maillage ici divisé en deux sections et un seul pour le nuage de points.

Famille	Contenu principal	Exemple d'usage (consortium)	Usages typiques
Maillage léger (≤ 1 M faces)	Objets/sculptures petites ou moyennes, texturés ou couleur vertex	Recherche iconographique et typologie, collection 3D (vitrine)	Visualisation rapide, impression 3D
Maillage haute résolution	Maillages 1 – 100 M faces décimés LOD pour diffusion web	Médiation pour le grand public et recherche scientifique	Streaming adaptatif sur le web, expo virtuelle, annotation, analyse métrique, métadonnées scientifiques
Nuage de points	Relevés LiDAR/scan 3D	Restitution architecturale, analyse morphométrique	Annotation, analyse métrique, métadonnées scientifiques

Figure 21 : Tableau des usages des différents formats de fichiers 3D.

Chaque famille de données 3D demande des formats spécifiques. Par exemple, pour un maillage léger, on choisira le format PLY qui est un format simple incluant la forme et non les couleurs ou bien le format GLB qui permet de compresser la taille du fichier final tout en incluant couleurs et formes. Le format OBJ est également utilisable mais reste plus lourd en taille que le format GLB, de plus, il est moins pratique car la lisibilité de la texture se fait via un fichier séparé du maillage. Le GLB apparaît alors comme le plus adapté. Par ailleurs, il permet de gérer le level of definition (LOD), et d'adapter la qualité du modèle lors d'une visualisation en direct sur le web. En ce qui concerne le nuage de points, quelques formats sont disponibles comme le LAZ ou le E57. Le premier est à privilégier car il est plus répandu. Cependant, un nuage de points est par nature plus lourd qu'un maillage. Il est donc nécessaire d'avoir une conversion en LOD afin de faciliter la visualisation sans ralentissement. Cette action est possible grâce à l'outil PotreeConverter qui appartient à la visionneuse nommée Potree et qui permet de lire des nuages de points. Nous reviendrons plus en détail sur cette spécificité qui permet d'adapter la qualité d'un nuage de points en temps réel.

Chaque usage et par conséquent chaque format doit être adapté au public visé et donc aux objectifs prioritaires le concernant. Une réflexion sur les formats devient pertinente car ils ne sont pas tous adaptés aux mêmes pratiques de visualisation. Un public non spécialiste aura besoin d'une compréhension rapide ainsi que d'une expérience visuelle attractive. L'usage ne doit pas être complexe et doit rester accessible. En revanche, un public spécialisé attendra des outils d'analyse, de données brutes exploitables ainsi qu'une documentation scientifique transparente.

Public visé	Objectifs prioritaires	Contraintes principales
Chercheurs	Analyse fine des micro-détails, mesures, comparaison avec d'autres objets, coupes, dessins DAO	Fidélité métrique et échelle, métadonnées, possibilité d'export, outils de mesure et de coupe, coordonnées XYZ pointable.
Conservateurs	Suivi de l'état de conservation, documentation et métadonnées et inventaire	Historique de versions, compatibilité avec bases patrimoniales, métadonnées.
Grand public	Compréhension rapide, expérience visuelle séduisante, narration	Simplicité d'usage, poids réduit, accessibilité web
Étudiants	Réutilisation pédagogique, initiation, outils accessibles pour une étude et une analyse complète	Formats faciles à convertir (STL/OBJ/GLB), outils de recherches accessibles, licence ouverte à tous

Figure 22 : tableau des différents besoins de diffusion de modèles 3D selon différents publics.

La diffusion de modèles 3D doit jouer entre un équilibre de précision scientifique, de robustesse patrimoniale, et une accessibilité pédagogique et médiatique. Ces exigences rappellent qu'un objet numérique en lui-même ne suffit pas. Des outils et des services doivent être adaptés selon l'utilisateur cible. La conception d'un support 3D doit être considérée comme modulaire, elle ne doit donc pas chercher une solution unique. C'est toute la complexité d'adaptation en fonction du profil du public. Une réflexion sur l'interface devient primordiale afin d'avoir un résultat hybride étudié pour l'ensemble des utilisateurs.

4.2.3 Gouvernance des fichiers, droits et licences des données 3D.

Le dernier point à aborder dans un processus de structuration des données 3D est la gouvernance des fichiers numériques incluant les questions juridiques liées à la mise en ligne notamment à travers les droits d'auteur et de licence assurant une exploitation responsable de ces données.

Dans un premier temps, il convient de clarifier les droits de propriété et d'usage concernant les modèles 3D provenant d'artefacts archéologiques. La propriété matérielle de l'objet original revient le plus souvent à l'État, notamment dans les cas de découvertes issues de fouilles préventives, ou bien à un propriétaire selon le régime légal applicable ¹. Mais qu'en est-il du fichier 3D qui résulte de la numérisation d'un objet appartenant soit à un propriétaire privé ou à l'Etat ? Un modèle 3D peut être protégé par le droit d'auteur exclusivement s'il

¹ Selon l'article L.541-4 du Code du patrimoine, après le 8 juillet 2016, les biens archéologiques mobiliers mis au jour sont présumés appartenir au propriétaire du terrain s'il l'a acquis avant le 9 juillet 2016, et à l'État s'il l'a acquis après cette date.

présente une originalité, c'est-à-dire une empreinte de personnalité ou de créativité de la part de son auteur. Un scan fidèle d'un objet du domaine public ne permet donc pas la mise en place de nouveaux droits d'auteur, car il s'agit d'une simple reproduction qui doit rester libre de droits, d'après le principe établi par l'article 14 de la directive européenne 2019/790 (Directive - 2019/790 - FR - directive droit d'auteur - EUR-Lex 2019). La législation change quand l'auteur introduit des choix créatifs ou intellectuels au sein de la modélisation 3D, par exemple une restitution hypothétique des parties montantes manquantes d'une céramique, ou un maillage dérivé de l'objet originel à vocation de reconstitution. La création est alors considérée comme une œuvre dérivée et peut alors bénéficier d'une protection juridique.

Dans le cas du conservatoire, 3D de Paris 1, la plupart des modèles sont des numérisations d'objets archéologiques appartenant à l'université ou au domaine public. Certaines de ces numérisations proviennent de modelages, ou des répliques d'objets originels. Ces modèles n'intégreront pas de droit d'auteur, d'autant plus qu'ils ne seront pas commercialisés. Pour autant, il est judicieux d'intégrer l'auteur de l'acquisition, car toute personne ayant contribué à la numérisation bénéficie d'un droit à la paternité. Dans le cadre du respect de la science ouverte, cela garantit qu'aucune modification non signalée à travers ces métadonnées et paradonnées n'est effectuée anonymement.

Un autre point important doit être signalé : le droit sui generis des bases de données. Si l'université consacre des moyens substantiels pour constituer la collection, cet investissement lui confère une protection contre l'extraction et la réutilisation massive de son contenu. Il s'agit d'un droit propre à l'Union européenne qui assure une protection juridique globale du conservatoire, même si chaque modèle pris isolément est libre de droit. Cela prévient des pillages de données par des tiers non autorisés, puisque la plateforme sera accessible à tous.

En termes de gouvernance, il sera nécessaire de définir dans le temps les rôles et procédures à suivre, comme les personnes autorisées à déposer de nouveaux modèles, tels que certains enseignants-chercheurs et étudiants sous validation, avec un processus de validation qualitative avant mise en ligne, permettant de vérifier la qualité et l'exactitude des métadonnées. Le conservatoire n'est pas simplement une vitrine technique, mais repose sur des bases, des règles garantissant une conformité légale, une qualité scientifique, ainsi qu'une durabilité de l'ensemble des données qui y seront hébergées.

4.3 Benchmark, tests et développements des visionneuses

4.3.1 *Présentation des différentes visionneuses sélectionnées*

Un aspect clé du projet de conservatoire 3D de Paris 1 est le choix de la visionneuse 3D idéale pour visualiser des modèles. Une étude comparée de plusieurs solutions existantes privilégie des outils open source adaptés à la diffusion et à l'analyse du patrimoine culturel en trois dimensions. Trois visionneuses ont été présélectionnées pour des tests approfondis. Chacune d'elles présente des caractéristiques spécifiques qui justifient leur utilisation. Deux visionneuses sont adaptées à la lecture de maillage, 3DHOP et Smithsonian Voyager, tandis que Potree, est adaptée pour la lecture de nuages de points.

La première visionneuse retenue est 3D Hop, qui signifie 3D Heritage Online Presenter. Elle a été développée par l'ISTI-CNR en Italie, et est une visionneuse dédiée au patrimoine, permettant une visualisation de maillage de haute résolution, et une gestion du niveau de détail (LOD). Elle supporte deux formats, nativement le PLY qui ne gère que les polygones et non la texture, ainsi qu'un format propriétaire appelé Nexus (NXS) concourant à gérer le niveau de LOD ainsi que les textures.

Type modèle	Format(s) natifs	Format(s) d'entrée (conversion)	Conteneur de métadonnées internes	Usages typiques
Maillage sans texture	.ply	.ply natif .obj, .stl, .fbx → MeshLab → .ply	nombre faces, vertices, etc...	Visualisation rapide
Maillage avec texture	.nxs, .nxz	.ply ou .obj → Nexus	nombre faces, vertices, etc...	Streaming adaptatif sur le web, expo virtuelle (VR), analyse et étude mobilier

Figure 23 : tableau des formats lus par 3DHOP.

Cet outil inclut des fonctionnalités scientifiques telles que l'ajout d'annotations interactives en 3D, un outil de mesure de distance et d'angle, la possibilité de créer des coupes dans le modèle ainsi qu'un mode d'éclairage ajustable afin de mettre les reliefs en valeur. La qualité de cette visionneuse se trouve dans son intégration au sein du CMS Omeka S choisi pour le conservatoire, grâce à un plugin ².

La seconde visionneuse Smithsonian Voyager est également dédiée à la lecture de maillage 3D. Développée par la Smithsonian Institution pour exposer leurs propres collections

² Il s'agit d'un composant logiciel externe que l'on peut ajouter tel un module d'extension sur une application, ce qui permet d'étendre les fonctionnalités du programme sans toucher à ses fondations.

d'objets 3D en ligne, elle ne se base que sur le format GLB, le plus compact en termes de taille de fichier et comprenant le maillage et la texture. Voyager est doté des mêmes outils que Smithsonian, tels que les outils de mesure, de coupe, d'éclairage et de changement de texture. Il se distingue par un mode de narration très développé, avec des annotations comme celles de 3DHOP, mais avec l'intégration de texte explicatif, que l'on peut étendre grâce à la création d'articles composés d'un texte descriptif long et de médias comme des images et fichiers audio et vidéo. L'ajout de ces fonctions s'effectue avec un fichier externe appelé « une scene » (fichier JSON) qui décrit les caractéristiques entrées sur la version d'édition de la visionneuse.

Type modèle	Format(s) natifs	Format(s) d'entrée (conversion)	Conteneur de métadonnées internes	Usages typiques
Maillage	.glb, .gltf	.obj, .fbx, .dae, .ply → Blender/Babylon → .glb	rien	Visualisation classique avec outils de modification de lumière, de texture et outils de découpe du modèle.
Scene en lien avec le modèle 3D	.svx.json (Voyager Scene)	Généré par <i>Voyager Story</i> (version d'édition)	asset, scene, texture, articles sémantiques dynamique avec le modèle 3D, annotations, tours audio	Story-telling, exposition, parcours interactif, narrations multimédia

Figure 24 : Tableau des formats nécessaires à Smithsonian Voyager.

Cette visionneuse possède une interface utilisateur intuitive et adaptée aux mobiles. Elle met l'accent sur la sémantique et présente un développement conçu davantage pour un usage de médiation que scientifique. Contrairement à 3DHOP, Voyager ne dispose pas de plugin dédié à son intégration dans Omeka S.

Enfin le dernier choix s'est porté vers l'outil open source Potree, développée par Markus Schütz, il s'agit d'une visionneuse spécialisée dans l'affiche de nuages de points y compris les plus massifs. L'atout majeur de Potree est la possibilité de lire des nuages de points comportant plusieurs millions de points, car elle sait réduire le nombre de points affichés sans interférer avec la lecture du modèle. Cela est possible par un pré-calcul des points en données octree qui convertit non seulement le fichier LAZ du nuage de points mais aussi un fichier JSON permettant le LOD.

Type modèle	Format(s) natifs	Format(s) d'entrée (conversion)	Conteneur de métadonnées internes	Usages typiques
Nuage de points	Dossier Potree octree (cloud.js)	.las → PotreeConverter .e57 → CloudCompare → .las → PotreeConverter	cloud.js : spacing, bounds, attribs ; LAS headers conservés	Analyse géomatique, coupe, profil, mesure sur gros volumes
Maillage léger (≤ 1 M faces)(optionnel)	.potree mesh (three.js)	.obj → three.js loader	Manual JSON (material, lighting)	Mix nuage + maillage, AR/VR

Figure 25 : Tableau des formats intégrés à Potree

Il s'agit de la visionneuse qui se prête le mieux au modèle d'acquisition de paysages ou d'architecture. Potree intègre des outils de mesure avancés : mesure de distances multiples, calcul d'angle, calcul de surface, calcul de volume et bien d'autres. L'outil de coupe ne se limite pas simplement aux axes X,Y,Z mais permet d'orienter la coupe dans l'angle que l'on désire. La capacité à ajuster la densité et la taille de points affichés permet à cette visionneuse de fonctionner sur l'ensemble des navigateurs et des ordinateurs sans latence importante.

Visionneuse	Formats supportés	Fonctionnalités principales	Plugin Omeka S	Méthode d'intégration recommandée	Cas d'usage idéal
3DHOP	PLY, NXS (via Nexus.js)	- Navigation LOD - Hotspots interactifs - Mesures - Éclairage et annotations HTML	Oui	- Plugin intégré - Intégration via <iframe> - Bloc HTML personnalisé dans Omeka	Objets archéologiques, scans haute précision, site de fouilles / espaces numérisés
Potree	LAS, LAZ, PLY, E57	- Visualisation de nuages de points massifs - Mesures, coupes, profils - LOD performant	Non	- Intégration via <iframe> - Nécessite Potree Converter - Bloc HTML personnalisé	Nuage de points, Levés Lidar, architecture, environnements archéologiques
Smithsonian Voyager (modelviewer)	GLB, glTF	- Hotspots interactifs et article de documentation - Animations - Espace DEV - UI moderne et responsive	Non	- Intégration via <iframe> (web component) - Fichier GLB hébergé en ligne ou sur Omeka - Bloc HTML personnalisé	Objets muséaux, médiation culturelle, collections accessibles au public

Figure 26 : Tableau récapitulatif des trois visionneuses sélectionnées.

Ces trois visionneuses offrent un panel d'options disponibles particulièrement intéressantes dans des cadres différents. 3DHOP a une vocation scientifique tout comme Potree son équivalent pour les nuages de points. En revanche Smithsonian Voyager peut être le plus interactif et ouvre également à des perspectives de web sémantique. Cette analyse comparative nous permet de voir quels sont les outils et services les plus intéressants à combiner.

4.3.2 Résultats des tests : Potree, Smithsonian Voyager, 3DHOP

Nous avons conduit une série de tests de ces visionneuses avec une installation en local sur un ordinateur personnel, destinés à évaluer concrètement chaque visionneuse en conditions réelles avec des modèles 3D type tels que du mobilier ou des nuages de points. Nous en avons dégagé des enseignements importants.

La prise en main de 3D Hop confirme qu'il s'agit d'un outil adapté à la visualisation et à l'analyse de mobilier archéologique. Cependant, elle demande une certaine préparation des données car pour tirer parti des capacités du LOD de 3D Hop, il est nécessaire de convertir le modèle 3D en format Nexus (NXS), via des logiciels dédiés tels que MeshLab. Lors de nos tests, la conversion et l'export des textures n'ont pas fonctionné systématiquement. Il s'agit donc d'une étape additionnelle qui vient alourdir le processus de mise en ligne et de visualisation. D'autre part, il faut automatiser les importations dans Omeka S car dans le cadre d'un conservatoire 3D, il n'est pas envisageable de devoir tout paramétrer manuellement à chaque ajout. Par ailleurs, 3DHOP est certes un logiciel complet, mais n'a pas été mis à jour depuis plusieurs années. La dernière version date de 2015. Ceci pose la question des maintenances logicielles sur le long terme et donc d'une possible obsolescence dans les années qui suivent. L'expérience utilisateur de la visionneuse est toutefois très satisfaisante sur le plan scientifique. Les tests démontrent qu'un modèle est visionnable à haute résolution. Les outils de mesure de distance et d'angle fonctionnent parfaitement. Les coupes transversales sont très utiles et permettent également d'ajouter plusieurs coupes. En termes d'ergonomie, 3D Hop est sobre et fonctionnel, mais pourrait gagner en modernité. Il pourrait être intéressant d'y intégrer des améliorations, comme une modification de l'arrière-plan adapté à l'identité visuelle de l'institution, qui se met à jour selon le zoom, ou encore revoir le design des boutons et panneaux pour une version plus actuelle. Toutefois, cet outil présente un point faible important, les annotations interactives ne sont ni adaptées ni ergonomiques. Ce sont des points issus de sphère 3D, ajoutés manuellement avec un code nécessitant de connaître l'emplacement exact en coordonnées de l'annotation. Les hotspots (annotations) ne sont d'ailleurs pas très lisibles (Annexe 13 : Exemple d'annotation au sein de la visionneuse 3DHOP.). A l'opposé de Smithsonian Voyager, il n'y a pas d'interface d'édition de la présentation du modèle.

Parallèlement, les tests de Voyager ont mis en lumière une philosophie très différente de 3D Hop, axée sur une simplicité d'usage et une vocation à la valorisation et à la médiation.

L'édition des contenus est très développée. L'un des premiers avantages notables chez Smithsonian Voyager est la charge directement et la lecture des modèles GLB sans conversion au préalable. Un modèle exporté directement depuis Metashape Blender ou un autre logiciel de création 3D peut être immédiatement lu. Le mode éditeur de la visionneuse est très complet. Il permet d'intégrer des articles avec images, vidéos et sons synchronisés avec des animations dans le modèle. Il zoome automatiquement sur un détail évoqué dans le texte. Le storytelling est particulièrement intéressant dans un contexte de médiation. Dans le cadre d'un usage muséal et pédagogique, cela offre à l'utilisateur une expérience d'exposition commentée qui peut être développée par un mode de réalité augmentée via le scan d'un QR code. L'interface est très épurée et moderne et nos tests ont révélé une excellente fluidité d'utilisation. Les points positifs, du point de vue analytique, sont un mode de mesure relativement sommaire, des annotations interactives très détaillées, un outil de coupe limité à un seul axe, mais qui intègre une section colorée de l'objet facilitant la lecture et une utilisation pour la DAO. En ce qui concerne les limites Voyager n'intègre pas d'échelle adaptative. D'autre part, il semble parfois que la visionneuse peine à s'adapter aux objets de petite taille (Annexe 12 : Exemple d'annotations sur un petit objet dans la visionneuse Smithsonian Voyager.). Le choix de cette visionneuse serait motivé par un objectif de médiation, et non par une exploitation scientifique. Dans le cas du conservatoire 3D de Paris 1, il s'agit d'une utilisation hybride entre médiation, valorisation et étude du mobilier. Enfin, concernant l'intégration dans Omeka S, l'absence de plugins ne facilite pas l'automatisation d'importation et de visualisation de nouveaux modèles dans les collections prévues sur la plateforme.

En ce qui concerne Potree, il s'agit là d'un outil redoutable pour afficher de gros nuages de points de manière fluide. D'une qualité adaptative, il fournit une bonne impression de densité visuelle sans surcharger l'ordinateur. Les outils de mesure sont sans aucun doute les plus perfectionnés des trois visionneuses : distance polysegmentée, calcul d'angle, de surface, de volume. Par ailleurs, un nuage de points peut être géoréférencé. Potree offre la possibilité d'intégrer un fond cartographique que l'on peut visionner en simultané avec le nuage de points (Annexe 14 : Exemple de géolocalisation disponible dans les fonctionnalités de la visionneuse Potree.). Il est également possible d'ajouter des annotations qui se retrouveront sur un fichier SCENE lisible conjointement au modèle 3D. Ces fonctionnalités sont très utiles pour les archéologues professionnels comme pour les étudiants. Par exemple, il est possible de calculer le volume d'une cavité, la surface au sol d'un secteur ou d'une zone particulière. En d'autres termes, cela offre des outils d'étude sophistiqués et complets à l'échelle d'un site entier. Cependant, cette visionneuse n'est pas sans défaut, puisque l'interface est assez brute, orientée vers une utilisation fortement scientifique, et souffre d'un manque d'ergonomie. Le manque de lisibilité des menus, et d'informations sur l'utilisation de certains outils, est notable. De plus, tout comme 3D hop, Potree présente un inconvénient : la nécessité de convertir le fichier originel d'un format LAS à un fichier Octree complété par un fichier javascript du nuage de points permettant la lecture de qualité adaptative. Ces limitations peuvent décourager

l'initiation d'un étudiant aux outils d'analyse et de visualisation 3D ainsi qu'un utilisateur non initié à l'archéologie n'ayant pas l'utilité de l'ensemble de ces fonctionnalités dans le cadre d'une médiation.

A l'issue de ces tests, aucune visionneuse ne s'impose comme étant la parfaite solution à une utilisation hybride entre valorisation et études scientifiques. Chacune présente des forces et des faiblesses. Le mobilier présenté sera majoritairement des maillages d'objets, parfois quelques nuages de points, mais cela ne sera pas la majorité des cas. Les Smithsonian Voyager apparaissent comme les solutions les plus adaptées. 3DHOP répond à quelques besoins scientifiques, mais il n'est pas doté de l'ensemble des outils d'analyse de Potree. Cependant, il est intégré dans Omeka S par un plugin, ce qui en fait un avantage très important.. Tandis que Voyageur offre une expérience utilisateur incomparable et un workflow simplifié sans intégration native dans Omeka S. Quant à Potree, elle peut être conservée comme une solution complémentaire pour les cas de nuages de points.

En ce sens, le conservatoire 3D de Paris 1 privilégie deux points : une intégration parfaite dans Omeka S, et un outil adapté à une visualisation simple, mais qui offre des outils d'étude et d'analyse performants. Cela justifie d'envisager un prototype d'amélioration de chacune des visionneuses. Cependant, cela induit un processus de rétro-engineering afin de comprendre comment chacune des visionneuses a été produite, ce qui est particulièrement long et fastidieux. La mise en place d'une visionneuse hybride est également une solution, mais demande des ressources et des compétences en termes de code et de rétro-engineering importantes.

4.3.3 Prototype hybride et viewer personnalisé en Three.js

Face au constat qu'aucune visionneuse actuelle ne remplit l'ensemble des exigences scientifiques, pédagogiques et ergonomiques en simultané, une réflexion s'est engagée au sujet de la conception d'un viewer hybride combinant le meilleur de chaque solution. L'idée n'est pas de réinventer des fonctionnalités au sein d'une nouvelle visionneuse mais d'assembler des outils fonctionnels et performants. Concrètement, le besoin se dessine avec une utilisation de Voyager pour une visualisation des maillages standards, force de sa simplicité et de son esthétisme, d'outils d'analyse, avec un recours à Potree qui permettrait également de lire des nuages de points. Cela revient à une intégration qui consisterait à fondre Potree et Voyager en une seule visionneuse. Toutefois, cela représente un défi technique majeur, puisque les deux architectures logicielles sont complexes et différentes. L'objectif est d'être pragmatique, avec une interface unifiée et un système d'onglets ou de boutons permettant un basculement d'une visionneuse à l'autre, selon le type de fichier, un maillage ou un nuage de points. Les deux vues partageraient autant que possible les mêmes métadonnées et annotations, et idéalement sur un fichier de scène en commun. Cependant, cela ajoute des processus complexes avant la mise en ligne et

donc une formation adaptée pour les personnes autorisées à la publication de modèles. Pourtant, d'un point de vue technique, Voyager et Potree utilisent tous deux Three.js en arrière-plan, le script qui permet de visualiser les modèles 3D. Les deux visionneuses gèrent des métadonnées et les paramètres de scène via un fichier JSON. C'est donc une piste pour rendre ces descriptions interopérables entre les deux. Cette compatibilité reste à prouver, car nous avons, au cours des tests, rencontré un obstacle, puisque le format de scène de Voyager ne prend pas en charge les derniers GLB 2.0, c'est-à-dire le format de fichiers des modèles 3D. Par conséquent, la visionneuse Voyager n'arrive pas à lire de façon simultanée le modèle avec la scène. L'interface sous forme d'onglets permettrait de présenter à l'utilisateur une expérience fluide en cachant la complexité technique d'avoir une seule visionneuse capable de changer de mode d'affichage.

Cette approche de prototype hybride soulève les questions de l'interopérabilité et de la facilité de l'intégrer dans un protocole de mise en ligne et de conservation des données. C'est pourquoi nous avons exploré en parallèle la possibilité d'intégrer nos modèles dans un cadre standardisé, reconnu, qui est le manifeste IIIF (International Image Interoperability Framework). Le manifeste IIIF est une solution à considérer car il répond aux enjeux de fragmentation et d'enfermement technologique des modèles 3D comme le souligne Thomas Flynn : « un modèle 3D isolé dans un viewer propriétaire reste un cul-de-sac numérique » car le manifeste IIIF permet au modèle de devenir portable c'est à dire de pouvoir l'exporter d'un viewer à un autre. Il repose sur des API (Application Programming Interface) qui fournissent un cadre unifié pour l'accès, la navigation et la recherche dans des collections de fichiers numériques pourvus de métadonnées et d'informations d'annotations. Un viewer basé sur un manifeste IIIF révèle plusieurs avantages comme une interopérabilité accrue car il permet d'interpréter les modèles par le manifeste sans besoin d'un nouveau développement pour chaque visionneuse. Son intégration dans un CMS est fortement répandue, notamment dans Omeka S, qui intègre déjà les modules compatibles IIIF. Par ailleurs cela réduit la charge technique de maintenance. Cette norme garantit un respect des principes FAIR. Ce manifeste est une référence dans le cadre d'une conservation pérenne incluant la provenance des modèles ainsi que l'indication de l'ordre identifiant en DOI ou ARK. Cela permet de s'attarder sur l'amélioration des données et des métadonnées associées sans perte de temps sur l'effort technique de la maintenance d'un code dédié à une visionneuse. Adopter le manifeste IIIF permettra au conservatoire 3D de Paris 1 de s'inscrire dans un écosystème international de la 3D dans le domaine du patrimoine.

Après cette évaluation, le choix d'une interface hybride a révélé des défis techniques trop importants pour un stage d'une durée limitée à 1 mois. Des modifications en profondeur des deux visionneuses, s'avèrent délicat à réaliser puisqu'il faut plonger dans le code source et comprendre toute la logique, ce qui dépasse le cadre du temps alloué à cette expérience. Dans le cadre d'une initiative personnelle, j'ai adopté une approche différente, mais formatrice : développer de A à Z, une visionneuse 3D, tout en m'appuyant sur la même architecture

développée par Smithsonian Voyageur et Potree, Three.js dans le but de lire le format le plus simple en termes de taille, de compression du maillage et de texture, le GLB. Ce choix a permis de maîtriser des aspects essentiels à une visionneuse et de l'adapter sur mesure aux besoins identifiés au cours de cette étude. Le résultat est un prototype destiné à être modulable et intègre, à ce jour, certaines fonctionnalités avancées, absentes de 3DHOP et de Voyageur. Les outils d'analyse intégrés ont été inspirés directement de Smithsonian Voyageurs et Potree afin de combler les lacunes de l'un et de l'autre.

- Un outil de coupe, activable sur plusieurs plans en simultanément, pour isoler un volume spécifique. Chaque coupe est orientable dans n'importe quel sens.
- Les sections de coupe sont de couleur unie afin de bien les distinguer et de les intégrer dans d'éventuels travaux de DAO.
- Un outil de mesure multipoints avec des mesures segmentaires.
- Un outil de calcul de volume intérieur du maillage.
- Une barre d'échelle en fonction du zoom sur l'objet 3d
- Une fonction capture d'écran intégrant la barre d'échelle.
- Un outil de changement de texture : texture, sans texture, normals, X-Ray.

En termes d'évolution, dans les prochaines versions, la visionneuse intégrera une fiche de métadonnées automatiquement renseignées par rapport aux paramètres du modèle et à des métadonnées rajoutées au sein d'une scène éditée. Je prévois également l'ajout d'une vue orthographique, un mode de capture d'écran en vectoriel et non uniquement en images raster. Dans une vocation de valorisation, ce viewer intégrera des articles et annotations similaires à ceux de Smithsonian Voyager. Enfin, pour régler le souci de compatibilité entre une lecture de maillage et de nuage de points, un bouton permettra de basculer entre les deux formats. Dans un souci d'intégration de métadonnées, d'annotations et d'articles interopérables, il sera alors nécessaire de créer une version d'édition de la visionneuse, de la propre métadonnée que l'on pourra exporter au format JSON et qui sera lisible ultérieurement par la visionneuse.

En parallèle au développement d'une visionneuse entièrement personnalisée, une réflexion s'est engagée au sujet d'un espace de formation et d'expérimentation distinct des vitrines de collection, accessibles aux étudiants et aux enseignants. Ce module situé dans un espace dédié proposerait une visionneuse n'étant pas reliée aux modèles 3D conservés par Paris 1 mais proposant un système de « glisser-déposer » plus communément connu sous le nom de "drag and drop" où l'utilisateur pourrait déposer son propre fichier 3D et le visualiser immédiatement dans la visionneuse sans avoir à le mettre en ligne. Deux objectifs sont ciblés : fournir une possibilité d'étude, d'analyse, et de pédagogie dédiée, où les utilisateurs peuvent tester un outil avec leurs données sans risque de les abandonner lors de l'importation, car aucun fichier ne serait conservé sur les serveurs, le chargement étant temporaire et en local, mais aussi faciliter les démonstrations, l'apprentissage en autonomie ainsi que la possibilité d'analyse sans dépendre du système et du protocole de mise en ligne du conservatoire.

En définitive, cette visionneuse entièrement développée de A à Z est une preuve concrète de la possibilité de concevoir une visionneuse idéale pour ce conservatoire, proposant un outil unifié, polyvalent, évolutif, alliant les capacités techniques de Potree et 3D hop à l'ergonomie et la dimension narrative de Smithsonian Voyager.

4.3.4 Apports et limites pour ma formation

La conduite de ce projet de conservatoire 3D universitaire a été bénéfique sur de nombreux plans. D'un point de vue technique, partir d'une réflexion des besoins concrets et nécessaires au sein d'un conservatoire 3D, au développement d'une application et ainsi à une mise en place web complète a permis de solidifier mes compétences en programmation. Cette expérience m'a sensibilisé aux caractéristiques et aux besoins de la 3D en temps réel. Elle a développé une compréhension accrue des formats 3D et des pipelines de traitement nécessaires à la mise en place d'une conservation et d'une valorisation de données 3D pérennes. D'autre part, cela a enrichi une vision globale des solutions open source disponibles dans le domaine, ainsi que l'importance d'une intégration open source et interopérable des données 3D.

D'un point de vue méthodologique, cette expérience m'a placé à l'intersection de plusieurs disciplines. J'ai notamment pu adopter une approche rigoureuse au sujet des normes de sciences ouvertes, notamment au sujet de la qualité des métadonnées, d'une documentation précise des paradosées et une interopérabilité de ces données produites. Se conformer au principe FAIR n'est pas chose aisée car il faut concevoir un projet exploitable dans les années à venir. Il s'agit là d'une sensibilisation aux enjeux de pérennisation, rarement abordés au sein d'une formation classique en archéologie, mais qui, à l'heure actuelle dans une ère de plus en plus numérique, devient cruciale.

Par ailleurs, cela a développé mon esprit critique vis-à-vis des outils et solutions numériques disponibles au sein de cette démarche. Ce cheminement m'a permis de ne pas voir la technologie comme quelque chose d'intangible, mais comme un domaine que l'on doit questionner et améliorer au fil de notre pratique. Dans le cas de ce conservatoire, une visionneuse 3D n'est pas un gadget. Il s'agit d'un médium qui oriente l'étude et la perception d'un objet virtuel, elles-mêmes dépendantes des fonctionnalités offertes par cet outil. Il s'agit là pour ma part d'un regard réflexif sur l'outil numérique et son impact épistémologique qui doit faire partie des acquis essentiels à l'heure actuelle en archéologie.

Au cours de ce projet, j'ai rencontré divers obstacles. Le premier fut incontestablement le manque de temps, notamment en termes de réflexion ainsi que pour les tests sur les diverses possibilités en matière de visualisation des modèles 3D, en particulier pour le manifeste IIIF qui apparaît comme une solution intéressante. La conception de la visionneuse produite de A à Z, fut également l'objet d'une course contre la montre, car il s'agit encore d'un prototype. Il est construit comme un modèle robuste et entièrement intégré à Omeka S. Par ailleurs, développer

seul un outil m'a beaucoup appris, par exemple à mieux appréhender les impératifs à intégrer dans ce type de projet. Un projet numérique de cette envergure doit s'inscrire dans une logique collective afin de survivre et d'évoluer. J'ai pris conscience de la montée en puissance de mes propres compétences.

Il n'en reste que par mes réflexions, j'ai développé certaines critiques au sujet de ce conservatoire, notamment relatives aux moyens techniques mis au profit du stockage de l'ensemble de ces modèles. Dans un objectif de science ouverte et de pérennisation des données scientifiques, il est essentiel de sauvegarder des versions brutes de ces scans, des versions nettoyées, des données sources qui ont permis le traitement et le résultat final. Il en est de même pour les nouvelles versions de certains modèles qui vont « écraser » les anciennes. Comment ces moutures seront-elles conservées et inventoriées ? Elles constituent un témoignage des méthodes appliquées à un moment donné en archéologie, ce sont des archives. Chacune de ces étapes doit être conservée afin de documenter le processus scientifique d'acquisition d'un sujet. Il semble donc intéressant de mettre en place une nomenclature ainsi qu'une arborescence claire entre l'ensemble de ces fichiers. Rationaliser le stockage permettra d'économiser de l'espace tout en conservant une rigueur scientifique requise pour une reproductibilité de l'ensemble de ces acquisitions.

En dépit de ces critiques, ce chapitre d'expériences m'a confirmé mon intérêt pour l'archéologie, et pour le numérique appliqué à l'archéologie. Cet exercice m'a offert une vue d'ensemble claire des enjeux et des compromis à concilier afin de répondre aux problématiques actuelles et futures. Cette formation par la pratique a été riche, elle me permet d'aborder mon parcours avec un bagage technique et critique renforcé. En conclusion, le projet du conservatoire 3D universitaire de Paris 1 a constitué un terrain d'apprentissage spécifique, à la fois technique, scientifique et parfois même social. Le bilan apparaît très positif.

Chapitre 5 : Reflexion de synthèse : articuler valorisation et conservation dans les pratiques numériques en archéologie

5.1 Comprendre la chaîne complète de la donnée 3D patrimoniale : de la numérisation à la diffusion publique et à l'archivage pérenne.

Les données 3D archéologiques et patrimoniales sont au cœur des nouvelles pratiques numériques en archéologie. Les deux études de cas réalisées au cours de cette année ont mis en évidence une partie de la chaîne de traitement de la donnée, tout en apportant des réflexions sur la mise en valeur et la pérennisation de ces données. Le cycle de vie d'un modèle en trois dimensions doit être élaboré dans son intégralité, depuis l'acquisition jusqu'à sa visualisation par les publics et son archivage. C'est avec une vision globale que les défis techniques, méthodologiques et éthiques peuvent être anticipés, pour que la numérisation ne soit pas une fin en soi.

5.1.1 Enseignements croisés des deux cas d'étude

Un regard croisé sur ces deux expériences de stage révèle plusieurs enseignements. D'une part, le constat que la production d'un modèle 3D fiable et fidèle requiert un processus rigoureux lors de l'ensemble des phases de production et de mise en valeur. D'autre part, le fait qu'un modèle peut aborder plusieurs finalités, que ce soit une valorisation auprès du grand public ou dans un but de conservation et de consultations scientifiques. Par conséquent la destination aura une influence sur les méthodes appliquées, pourtant il semble indispensable de construire les projets tant d'un point de vue de valorisation que de conservation quelle que soit la finalité scientifique.

Le projet de valorisation du site archéologique du Camp des zouaves de Milly-la-Fôret s'est inscrit dans la médiation numérique à une échelle locale. Il a démontré la faisabilité d'un projet de valorisation d'un site de fouilles unique avec une mise en valeur de ses seules collections. Toutefois, cette initiative qui reste isolée soulève la question de la pérennité. En effet, une fois le site réalisé et le stage terminé, la maintenance de ces données et du site web

en lui même n'est plus réellement assurée. Dans une institution comme le SRA rattaché à la DRAC, aucun service n'est dédié à la maintenance des données numériques archéologiques en interne. Un projet de ce genre peut donc rester sans lendemain, s'il n'est pas relié à une infrastructure disposant des moyens suffisants pour les mises à jour. Parallèlement, on perçoit la contradiction entre la nécessité de protocole et de construction rigoureux issus de réflexions sur le long terme et les carences en technologies numériques qui occasionnent des interventions extérieures ponctuelles et donc à court terme.

La seconde expérience est axée sur le conservatoire 3D universitaire de Paris 1 qui a l'objectif d'être une plateforme pérenne capable de rassembler des modèles 3D issus de multiples projets et de provenances diverses. Cette approche offre un constat général au sujet de la pertinence des plateformes archéologiques dédiées à la visualisation et à la valorisation de modèles 3D. Cela répond à une volonté de créer un espace qui regroupe plusieurs artefacts de contextes variés : provenance, typologie et période, plutôt que des collections monothématiques offrant peu de comparaison. La création d'une vitrine limitée à un seul site archéologique peut être justifiée pour un site majeur disposant d'une abondante documentation, malgré la pratique actuelle du partage des informations par scans sur des plateformes plus classiques et non dédiées. Dans ces conditions, il semble plus efficace de s'appuyer sur des plateformes mutualisées à une échelle spécifique, plutôt que multiplier les micro-sites web qui dispersent l'information et par conséquent amoindrisent la valorisation archéologique.

En France, le CND3D témoigne de cette démarche et de la volonté de centralisation en archéologie française. Le Conservatoire national offre une structuration normalisée des modèles. Cependant, dans sa forme actuelle, il ne couvre qu'en partie les besoins nécessaires à l'échelle nationale. Le dépôt n'est pas librement ouvert à chaque institution ou projet archéologique, créant une inégalité. C'est pourquoi beaucoup d'organismes stockent leurs données 3D localement, c'est-à-dire sur des plateformes externes, disques durs et des serveurs internes, avec des risques que nous avons pu explorer lors du premier chapitre. On peut craindre la perte de données, une interopérabilité limitée ainsi qu'une visualisation quasi nulle. Pour remédier à ces manques des initiatives parallèles émergent. Certains services régionaux, musées ou universités cherchent à développer leur propre plateforme afin d'exposer, mais aussi de conserver leurs données 3D. Il s'agit donc de démarches fragmentées qui posent la question de la coordination de l'ensemble des services et donc des données 3D accessibles. Ne vaudrait-il pas mieux encourager des solutions coopératives, comme à l'échelle d'une région ou d'un réseau de recherche, et éviter des dispersions d'efforts et de données, afin d'assurer une meilleure harmonisation ?

Ces deux expériences permettent d'illustrer un dilemme. D'un côté, le camp des Zouaves, qui est un projet pionnier du SRA, porté par une personne aux compétences polyvalentes, mais sans ancrage pérenne dans l'institution initiatrice du projet. Ce qui démontre une faille dans la durabilité du projet. Le conservatoire 3D de Paris 1, s'inscrit en

complémentarité du CND 3D, en créant une infrastructure académique durable, et en respectant des standards de recherche actuels. Il offre un compromis entre une solution clé en main, permettant une visibilité quasiment immédiate, et une exigence scientifique durable, avec une souveraineté claire, et FAIR. Cependant, la démarche de développement d'une plateforme ou d'un conservatoire dédié à la visualisation de modèles 3D doit être justifiée en amont par de réels besoins et répondre à une demande concrète.

Cette analyse croisée met en lumière le caractère chaîné et continu du traitement des données 3D. L'erreur la plus courante est de cloisonner chacune des phases de production, comme le fait de numériser sans se soucier de l'archivage futur. Afin de maximiser la valeur patrimoniale d'une acquisition 3D, il est nécessaire de planifier l'enchaînement cohérent de chaque étape et de ses exigences. On distingue trois phases indissociables :

La première, la production de la donnée, inclut l'acquisition sur terrain ou dans le cadre d'une post-fouilles, le post-traitement de l'acquisition, ainsi que le choix de format de fichier adapté. Les décisions devront être prises en rapport avec la résolution du modèle, un format ouvert au propriétaire, la pertinence d'un degré de simplification dépendant des facilités de diffusion et de conservation adoptées par la suite. Par exemple, le fait de générer un maillage trop lourd sans version allégée compliquera la mise en ligne, tandis qu'un format propriétaire pourrait compromettre une conservation sur la longue durée, ainsi qu'une future lecture du fichier obsolète.

La seconde phase consiste à rendre accessible la donnée. Une fois que les modèles sont produits, la démarche scientifique de science ouverte impose une diffusion par divers moyens. Dans notre cas, par une plateforme web sémantique organisée sous forme de collections et visionnable par le biais de visionneuses 3D dédiées. C'est l'étape de valorisation pendant laquelle il faudra veiller à l'accessibilité avec les critères d'ergonomie et de médiation pour assurer à l'utilisateur une navigation intuitive, et une compréhension des contextes de modèles 3D, et ainsi interagir de manière ludique et pédagogique.

Enfin, la dernière phase concerne la dimension de conservation de la chaîne opératoire. Elle recouvre un archivage sur le long terme de l'ensemble des fichiers et données 3D produites du début du protocole à la fin. Cela doit s'appuyer sur le respect des principes FAIR, de l'utilisation de formats et outils ouverts, ainsi que d'une sauvegarde de données sur des supports pérennes qui restent accessibles. Le cas du conservatoire de Paris 1 démontre que cette réflexion est au cœur du projet, avec une ontologie de métadonnées conforme aux standards dans le domaine, de façon à garantir une interopérabilité des descriptions et à faciliter le dialogue avec des infrastructures telles que le CND3D. Le site du camp des Zouaves, se base lui aussi sur Omeka S, mais peut gagner à exporter ou à aligner ses données vers un dépôt pérenne afin de ne pas rester isolé et gagner en visibilité, par exemple, avec la mise en place d'une plateforme de conservation et de visualisation à l'échelle de l'île de France. La

pérennisation demande donc une réflexion sur la gouvernance. En effet, il est nécessaire de déterminer qui gère et maintient la plateforme dans le temps, ainsi que de se positionner sur les droits d'usage des modèles à travers les licences ouvertes qui permettent une réutilisation scientifique tout en protégeant, si besoin, les droits des découvreurs et des créateurs des données.

Numériser n'a de sens que si l'on peut diffuser et conserver les données 3D, et ce, de la manière la plus pérenne possible. Ces deux études ont permis d'illustrer une portion de la chaîne opératoire. Le premier stage a été centré sur la diffusion innovante d'un contenu 3D à une échelle spécifique, alors que le second était orienté sur la structuration et la conservation des données 3D à l'échelle institutionnelle. Ces enseignements croisés permettent de dégager une vision unifiée. L'archéologie numérique doit s'attacher à articuler chaque maillon du processus qui organise le cycle de vie des données 3D. C'est la condition pour que les efforts investis en amont aboutissent à des résultats tangibles, en termes de transmission des savoirs à l'échelle scientifique ou de médiatisation, ainsi que dans le cadre d'une sauvegarde du patrimoine. Cet ensemble doit reposer sur des pratiques collaboratives, car la réussite de projets comprenant l'acquisition et la mise en valeur de données en trois dimensions exige des compétences pluridisciplinaires et une coordination entre plusieurs acteurs, tels que des techniciens, des médiateurs, des archivistes et des conservateurs. Un individu isolé, même s'il excelle dans l'ensemble des domaines nécessaires, ne peut assurer seul la durabilité d'un tel projet. Un travail basé sur la collaboration et la mutualisation des compétences permettra de répartir la charge technique, mais également d'enrichir les réflexions critiques et garantira une rationalisation des pratiques tout au long du processus.

5.1.2 Positionner le curseur entre médiation et rigueur scientifique

Les outils numériques offrent une double approche en archéologie. Ce sont des leviers de médiation et de valorisation, mais aussi des moyens de conservation et de traçabilité qui n'existaient pas auparavant. Toutefois, il est nécessaire de trouver un bon équilibre entre les pratiques et la conception de projets numériques patrimoniaux.

Le numérique et en particulier la 3D offre des possibilités de valorisation innovantes par la mise en place d'un récit visuel et interactif. Il permet de rendre des artefacts et sites archéologiques fragiles ou lointains, accessibles à divers publics. Ce support offre une médiation numérique renforçant l'émotion et l'engagement du public, notamment avec des interactions autour d'un objet trois 3D permettant d'explorer les détails, de s'immerger dans une reconstitution au sein d'un contexte archéologique précis. Pour autant, l'archéologie doit rester une discipline scientifique attachée à une rigueur méthodologique et à une validation des données. Le risque inhérent au dispositif de médiation vis-à-vis du grand public repose sur une simplification excessive et par conséquent une distorsion du discours scientifique. Il existe le

danger de présenter des hypothèses de restitution comme des vérités établies ou encore de privilégier un rendu spectaculaire au détriment d'un contexte parfois moins esthétique mais nécessaire à la compréhension du travail scientifique effectué en amont. Cependant, il ne faut pas oublier que la photogrammétrie et la modélisation 3D sont des produits de représentation, elles-mêmes subjectives, car dépendant de choix techniques, méthodologiques et interprétatifs opérés lors de la création. C'est pourquoi un modèle numérique doit toujours être considéré comme une reconstruction parmi d'autres possibles et non pas comme un objet réel, comme le souligne Ségolène Delamare "un modèle numérique doit être perçu comme une proposition interprétative et non définitive" (Delamare 2024, p. 64).

Plusieurs principes clés permettent d'articuler médiation et rigueur scientifique sans les opposer, notamment la transparence et la documentation. Il est capital qu'un discours accompagne un contenu 3D et explique le contexte de production et son statut. Chaque modèle doit être sourcé par son origine, la méthode d'acquisition et les différents cas d'interprétation et de reconstruction hypothétique. Chaque objet 3D doit être fourni avec une notice détaillée, c'est-à-dire avec des métadonnées scientifiques accessibles en parallèle d'une visualisation. Il s'agit là d'assurer que les données brutes derrière la vitrine soient exploitables par les chercheurs avec une description normative et interopérable. Ce double mode de visualisation est prometteur afin de satisfaire la curiosité du public et les besoins de principes scientifiques.

Un autre point est l'articulation entre valorisation et science par un niveau de discours adapté afin de traduire des informations en fonction des publics sans dériver de l'essence du savoir initial. La médiation numérique offre une possibilité de lecture multiple avec une exposition virtuelle qui peut présenter un résumé vulgarisé pour un visiteur lambda tout en mettant à disposition un onglet orientant vers un rapport scientifique complet dédié à un public spécialisé. Ainsi, il est possible de mettre en place une formule où chaque public trouve la réponse à son attente, tandis qu'un chercheur peut vérifier et analyser les données présentées.

Les choix techniques annexes sont également cruciaux en termes de valorisation. L'utilisation de standards ouverts et d'outils open source garantit une traçabilité des données affichées. C'est une réponse aux reproches faits aux solutions propriétaires telles que Sketchfab qui enferment les modèles 3D dans un écosystème fermé et commercial, et qui, en dépit de l'offre d'une belle vitrine, compromettent la conservation à long terme et une maîtrise des données par des spécialistes. A l'inverse, un CMS tel que Omeka S permet de paramétrer des métadonnées normalisées et d'allier une vitrine web et une base de données académiques par des principes sémantiques. Le développement d'un conservatoire 3D couplé à une visionneuse 3D et Omeka S s'inscrit dans la logique d'intégration d'une visualisation ludique au sein d'une infrastructure documentaire solide. Une architecture bilingue (grand public et scientifique) représente sans doute l'avenir des plateformes patrimoniales.

Enfin, afin d'articuler convenablement ces principes, il est nécessaire d'établir des évaluations critiques et retours d'usage. Cela implique donc d'évaluer l'efficacité de la médiation proposée et d'accepter une remise en question. Par exemple, dans le projet du Camp des Zouaves, un recueil de retours utilisateurs a été mis en place. Ce type d'évaluation permet d'améliorer la médiation en fonction des manques pointés, et d'éviter un discours erroné en fonction du public cible. Inclure, dès que possible, un regard extérieur, collègues, experts ou test public, aide à ajuster le curseur de valorisation.

En définitive, contrairement à ce qui est souvent véhiculé, valorisation et médiation ne s'opposent pas à rigueur scientifique. Les outils et méthodes numériques permettent de les concilier plus intelligemment, à condition de les articuler en suivant des méthodologies construites et rigoureuses. Une valorisation maîtrisée peut diffuser plus largement des connaissances et susciter de nouveaux points de recherche par exemple en mettant l'accent sur des artefacts négligés. De plus, intégrer une dimension de conservation dès la conception d'un projet de médiation garantit à celui-ci une crédibilité et une utilisation sur le long terme. Le numérique permet de mettre fin au faux dilemme entre diffusion et science, il est possible de médiatiser sans vulgariser à outrance, tout en partageant les données. L'enjeu réside dans la clarification des niveaux de lecture et la fourniture d'une infrastructure adéquate.

5.2 L'intelligence artificielle comme outil d'accélération et d'élargissement des compétences

Après avoir examiné les enjeux de traitement et de médiation des modèles 3D, il convient également de se projeter vers les perspectives technologiques qui pourraient redéfinir dans le temps ces pratiques. L'IA fait partie de ces outils qui promettent d'accélérer certains processus ainsi que d'élargir le champ d'action des archéologues dans les projets numériques ainsi que d'un point de vue général.

5.2.1 L'IA élargit le champ d'action et compétences de l'archéologue dans les projets numériques

L'IA, au sens large du terme, trouve de plus en plus d'applications concrètes en archéologie, dès la phase de fouilles et jusqu'à la phase de valorisation. Cependant, cela soulève des enjeux importants car son intégration doit se réaliser avec la conscience qu'il s'agit d'un outil d'accompagnement et non d'une baguette magique capable de remplacer toute expertise humaine, compétences ou choix scientifiques fondamentaux au sein d'une science telle que l'archéologie.

À l'heure actuelle, les méthodes offertes par l'intelligence artificielle permettent aux archéologues d'aller plus loin, plus vite dans de nombreux domaines, tout en automatisant des tâches complexes et parfois répétitives. De cette manière, cela élargit le champ des compétences, mobilisables par un professionnel de l'archéologie. Certaines compétences réservées à des spécialistes et qui jusqu'alors demandaient des formations et un apprentissage très chronophage peuvent être acquises plus rapidement, ce qui permet également de traiter de nouvelles questions et des volumes de données beaucoup plus importants qu'auparavant.

L'intelligence artificielle peut intervenir efficacement sur différentes étapes de travail. Comme pour la prospection d'analyse spatiale où l'IA, appliquée à des algorithmes d'apprentissage automatique, mis en place pour les détections d'acquisitions LIDAR et d'images aériennes, permet d'identifier plus rapidement des potentiels sites archéologiques. Il est également clair que dans un futur proche, l'IA optimisera les processus de modélisation et d'acquisition 3D, notamment à travers la photogrammétrie assistée par un apprentissage profond. Le matériel d'acquisition 3D évoluera avec des applications mobiles ou des caméras intelligentes qui pourront faciliter l'acquisition sur le terrain. En termes d'études de mobilier et de classification, cela ouvre à une simplification d'analyse et d'inventaire du mobilier. L'IA permettra d'assister à l'identification précise de mobilier spécifique, de faciliter les analyses statistiques, ouvrant de nouvelles pistes de recherche.

Dans notre cas de production, il s'agit d'une pratique hybride de l'IA, notamment en termes de développement et de code. Dans la réalisation du prototype de visionneuse 3D développé sous JavaScript, ainsi que le paramétrage de site internet, j'ai pu utiliser une approche de dialogue avec l'intelligence artificielle. En effet, dans le cadre d'une pratique autodidacte, l'archéologue va s'attacher à compiler de la documentation, des forums, des blogs et des tutoriels. L'apprentissage d'un langage informatique est long et fastidieux. Une pratique hybride entre documentation et aide de l'intelligence artificielle a permis de limiter la durée. Des questions ciblées permettent de maximiser les informations et d'orienter rapidement des résultats vers un objectif précis. Par exemple, l'intégration de nouvelles fonctionnalités au sein de la visionneuse a été facilitée avec une interrogation précise auprès d'un modèle d'IA aiguillant directement vers des fonctionnalités déjà présentes sur internet et fonctionnelles, évitant des recherches longues et parfois hasardeuses. Un autre avantage consiste en la réduction des erreurs car le modèle peut analyser le contexte et proposer des corrections du code. Cependant, il ne s'agit pas de donner tout le pouvoir entre les mains de l'IA, mais d'avoir une utilisation hybride. Dans le cas présent, j'ai pu comprendre le langage utilisé, offrant sur le long terme une perspective d'engager une évolution du code, car j'ai compris sa construction et son organisation. Dans ce contexte, l'IA est un catalyseur qui compresse le temps d'apprentissage et libère l'archéologue d'une activité chronophage au profit de sa recherche.

L'IA agit comme un amplificateur de capacité pour les archéologues, permettant de couvrir un champ élargi d'action. Cependant, il convient de souligner que pour bénéficier

pleinement de ces objectifs, l'archéologue doit acquérir de nouvelles compétences ou être sensibilisé au résultat et à l'interprétation d'un algorithme, comprendre les limites de son outil, préparer des données d'entraînement validées. Avec l'arrivée de l'IA, la formation des archéologues aux méthodes numériques devient un enjeu de plus en plus majeur, comme cela a pu l'être pour la 3D il y a quelques années. L'IA ne doit pas remplacer l'archéologue, mais l'archéologue doit comprendre comment utiliser l'IA pour l'aider à aller plus loin dans ses démarches. C'est également une opportunité pour la prise en charge de tâches routinières automatisées. L'archéologue peut alors se concentrer sur l'interprétation, la synthèse, et tout ce qui représente le cœur de son métier. L'IA contribue non seulement à accélérer les découvertes et les hypothèses, mais également à brouiller les frontières entre compétences. Il s'agit là d'une convergence qui élargit le profil professionnel de l'archéologue, qui devient alors plus polyvalent et apte à s'inscrire dans des projets numériques beaucoup plus complexes.

5.2.2 Limite : Outil d'accompagnement, non substitut aux choix scientifiques.

Il est nécessaire d'insister sur les limites et la nécessité de considérer l'IA comme un outil d'accompagnement. Aucune intelligence artificielle si sophistiquée soit-elle ne peut avoir pour vocation dans un cadre scientifique à se substituer au choix et au discernement de l'archéologue.

Les systèmes d'IA fonctionnent par apprentissage à partir de données existantes. Cela signifie que leurs résultats sont conditionnés par la qualité, la représentativité et l'étendue des jeux de données utilisés pour leur entraînement. En archéologie, les données sont souvent fragmentaires, inégales selon les régions ou les périodes, et porteuses de biais (par exemple, surreprésentation de certains types d'objets étudiés au détriment d'autres). Une IA entraînée majoritairement sur de la céramique gallo-romaine risque d'être inefficace ou erronée face à de la céramique d'une culture non représentée dans son corpus. Sans vigilance humaine, l'IA pourrait négliger des découvertes importantes simplement parce qu'elles ne correspondent pas à ce qu'elle a appris à détecter. De même, un algorithme de prospection prédictive pourrait privilégier systématiquement certains contextes (parce qu'historiquement on a plus fouillé dans tel type d'endroit) et ainsi renforcer un biais de recherches en délaissant des zones non classiques où se trouvent pourtant des sites insoupçonnés. L'archéologue doit donc garder un regard critique et interpréter les suggestions de l'IA à la lumière du contexte, plutôt que de les accepter aveuglément.

À l'heure actuelle beaucoup de méthodes d'IA, notamment les réseaux de neurones profonds, opèrent de manière dite « boîte noire » : elles fournissent un résultat sans toujours permettre d'explicitier la chaîne de raisonnement ayant conduit à ce résultat. Or, en science, il est indispensable de comprendre et justifier les conclusions. L'outil doit rester au service de la réflexion, et non l'inverse. Cela signifie que l'archéologue doit utiliser l'IA comme un assistant

fournissant des pistes, tout en conservant la maîtrise du diagnostic final. Par exemple, si une visionneuse automatique propose un assemblage de tessons, c'est à l'expert de valider en examinant physiquement les pièces, en vérifiant les ajustements proposés et en mobilisant ses connaissances tacites (texture de la pâte, traces d'usure, etc.) que l'IA ne prend pas en compte. Sans cette étape de validation humaine, le risque est de propager des erreurs difficilement détectables par la suite, tant le vernis numérique peut leur donner une apparence d'autorité.

Un autre écueil serait de tomber dans une dépendance technologique telle que les compétences humaines traditionnelles s'atrophient. Si l'on s'en remettait aveuglément aux logiciels pour toutes tâches, telles que dessiner un relevé, classer des objets, traduire un texte ancien, on pourrait voir disparaître certaines expertises manuelles ou intellectuelles essentielles. Des chercheurs ont déjà souligné le risque de « perte de savoir-faire » chez certains archéologues à cause du tout-numérique (Tufféry 2022b, p. 62-65). Par exemple, le dessin d'archéologie, réalisé à la main, oblige à observer en détail un objet et souvent à en percevoir des caractéristiques subtiles – la photogrammétrie fournit une image parfaite mais pourrait conduire à ne plus regarder l'objet lui-même avec la même attention. De même, si l'IA propose automatiquement des correspondances typologiques, l'archéologue débutant risque de moins exercer sa mémoire et son jugement comparatif. Il est donc vital de trouver un équilibre : utiliser l'IA pour ce qu'elle fait mieux et plus vite sans abandonner l'apprentissage des méthodes traditionnelles ni la compréhension fine du terrain. Une analogie peut être faite avec l'arrivée du GPS en topographie : c'est un outil fantastique, mais on continue à enseigner la lecture de carte et la navigation à la boussole car le jour où la technologie fait défaut (ou donne une mesure aberrante), le professionnel doit pouvoir s'orienter.

Enfin, l'IA pose des questions de validation et d'éthique. Validation, parce que chaque résultat produit par un algorithme en archéologie devrait idéalement être soumis à relecture, test ou reproduction par d'autres méthodes. Par exemple, si une IA identifie 100 nouvelles structures sur imagerie aérienne, une démarche scientifique exige d'en vérifier un échantillon sur le terrain pour s'assurer qu'il s'agit bien de vestiges archéologiques et non de faux positifs (jeux d'ombres naturelles, particularités géologiques, etc.). L'apport doit être mesuré à l'aune des méthodes plus classiques. De plus, l'IA peut parfois tromper par excès de zèle : détecter des « patterns » partout, y compris là où il n'y en a pas réellement, simplement parce qu'elle est programmée pour trouver des motifs. Seul l'esprit critique de l'archéologue peut différencier la découverte réelle de l'illusion statistique. Sur le plan éthique, l'usage de l'IA soulève des enjeux de souveraineté des données, et même de crédit scientifique. Il convient d'établir des lignes directrices claires. L'IA doit être présentée comme un outil, et ses résultats comme des aides à la décision plutôt que des faits accomplis.

En conclusion de cette réflexion, on retiendra que l'intelligence artificielle, tout comme les autres techniques numériques, doit trouver sa place comme adjuvant de la méthode archéologique, et non comme substitut. Elle accélère des opérations, élargit les possibilités

analytiques, mais ne dispense aucunement de la pensée critique, de la prudence empirique et de l'interprétation experte. L'archéologue de demain pourra s'appuyer sur des IA de plus en plus performantes, mais son rôle restera central pour donner du sens aux données, faire des choix d'orientation de recherche, et en dernier ressort raconter l'histoire humaine que ces données permettent d'esquisser. Ainsi, articuler valorisation et conservation à l'ère du numérique, c'est aussi intégrer les nouveaux outils (IA, 3D, web sémantique) en conservant le socle épistémologique de la discipline. Le numérique, aussi sophistiqué soit-il, n'a pas vocation à prendre le pas sur les autres méthodes. La clé du succès d'une intégration intelligente et rationnelle du numérique en archéologie réside dans une combinaison entre innovation, maîtrise technologique et rigueur scientifique, entre ouverture au public et exigences scientifiques. L'archéologie est une discipline capable de se renouveler techniquement par sa nature pluridisciplinaire.

Conclusion

Au terme de ces deux expériences et des réflexions apportées à ces dernières, il apparaît clairement que la numérisation 3D couplée aux plateformes web sémantiques renouvelle profondément les pratiques de la valorisation du patrimoine archéologique. Chaque stage a illustré, par son contexte différent, les potentiels et les défis qu'impliquent l'intégration profonde du numérique en archéologie.

Dans un premier temps, les résultats ont montré que la 3D apporte une plus-value certaine pour la médiation et la diffusion en archéologie. La fouille du camp des zouaves ainsi que la mise en place d'un site dédié pour un espace unique a permis de démontrer qu'il est possible de développer un support innovant de médiation pour un public varié. Grâce à ces méthodes, un visiteur peut appréhender le contexte d'un site archéologique à travers la visualisation de mobilier en trois dimensions, ce qui permet de renforcer le discours scientifique et historique. La 3D intégrée à un récit de médiation en ligne suscite l'intérêt du public et permet de renouveler les présentations d'un site archéologique à une échelle locale. Ce sont des supports qui offrent des modalités d'accessibilité flexibles avec une consultation à distance, une interaction ludique, qui est susceptible de toucher divers publics mais également de nouveaux publics. Toutefois, ce premier cas d'étude a mis en lumière des limites sur cette valorisation. Ce projet semble efficace pour une valorisation ponctuelle, mais souffre d'une absence de pérennisation, car le stage terminé, le site web réalisé peut manquer d'une maintenance, car actuellement, au SRA Île-de-France, il n'existe pas de service dédié à la gestion continue des productions numériques. Cela signifie qu'un projet innovant porté par un stagiaire risque de ne pas avoir de lendemain s'il ne s'inscrit pas dans une infrastructure plus large disposant de moyens techniques et humains adéquats. Ce constat souligne les problématiques de soutenabilité des initiatives de valorisation numérique, c'est-à-dire de garantir la durée de vie d'une plateforme de valorisation patrimoniale et de conservation des données produites et qui y sont stockées. Allant au-delà d'un enthousiasme et d'une tendance momentanée, cela met en lumière l'importance d'organiser en amont de ces projets, la mise en place d'une structure pérenne et de potentiels partenariats destinés à les soutenir dans le temps. Cette expérience au SRA révèle que la transformation numérique des pratiques de valorisation archéologique a besoin d'intégrer une réflexion sur des modèles organisationnels, ainsi que les ressources à mobiliser sur le temps long. À défaut, les ressources allouées et les progrès réalisés risquent de s'éteindre après l'achèvement du projet. Il s'agit là encore une fois d'une rationalisation de nos pratiques numériques.

En second lieu, le projet de conservatoire 3D de l'université Paris 1 Panthéon Sorbonne a offert un aperçu des conditions nécessaires pour réaliser à l'échelle institutionnelle une plateforme de valorisation numérique pérenne. Ce conservatoire interne, adossé à un CMS dédié et respectueux des principes FAIR, permet d'inscrire une institution universitaire dans des pratiques courantes, de gestion patrimoniale, d'enseignement et de recherche, au sein des principes de science ouverte. L'étude comparative des visionneuses, des outils et des plateformes existants a souligné qu'il n'existe à l'heure actuelle pas de solution miracle en fonction des objectifs de valorisation et scientifiques demandés. Dans ce contexte, il a fallu opérer des choix techniques raisonnés respectant les objectifs pédagogiques et scientifiques visés. En effet, l'adoption d'une solution open source interopérable et maîtrisée en interne, démontre une volonté de souveraineté numérique afin de minimiser une dépendance vis-à-vis d'une plateforme externe. Il s'agit là d'un positionnement stratégique qui permet de concilier une visibilité immédiate offerte par les services clés en main tels que Sketchfab, avec une exigence scientifique et éthique d'un contrôle sur la diffusion, le partage, la visualisation ainsi que le stockage de la donnée. L'un des enseignements majeurs de cette expérience est que la valorisation patrimoniale par des jeux de données numériques, dans notre cas la 3D, ne peut être dissociée d'une conservation durable de ces données. Ce conservatoire 3D cherche justement à articuler une valorisation et une conservation en une seule démarche cohérente, où chaque modèle est mis à disposition pour le public et est archivé avec l'ensemble de ces données sources pour une étude approfondie. Cette articulation répond à la problématique initiale de ce mémoire, puisque l'on s'aperçoit que la numérisation 3D et les plateformes sémantiques transforment les pratiques de valorisation patrimoniale, à condition de penser la chaîne complète de la donnée, depuis son acquisition jusqu'à son archivage à long terme. Il ne suffit pas de faire de la 3D pour faire de la 3D. Ces technologies doivent être intégrées dans un cycle de vie maîtrisé, où chaque étape anticipe la suivante. De cette manière, cette approche garantit une innovation en matière de médiation sans compromettre une rigueur scientifique et la pérennité de ces connaissances.

Un regard transversal permet une confrontation des deux cas d'études et met en évidence un équilibre entre centralisation et fragmentation des initiatives de valorisation numérique. D'une part, il apparaît que multiplier des micro-projets, comme par exemple des plateformes isolées pour chaque fouille archéologique, peut répondre à des besoins locaux précis, diluer les initiatives et les ressources allouées, et que d'autre part, s'appuyer sur des plateformes mutualisées à une échelle plus large, régionale ou nationale, offre une solution harmonisée et durable. Cependant, cela peut être moins réactif ou moins adapté à des contenus très spécifiques. Le Conservatoire National des Données 3D, qui incarne la volonté à l'échelle nationale de centralisation et d'uniformisation des pratiques numériques en 3D, n'est pas sans défaut. L'accès limité à certains services archéologiques contraint de nombreuses institutions à stocker et à publier leurs données par leurs propres moyens parfois précaires. Le paysage de diffusion numérique en archéologie est morcelé et non homogène. Dans ces conditions, on peut

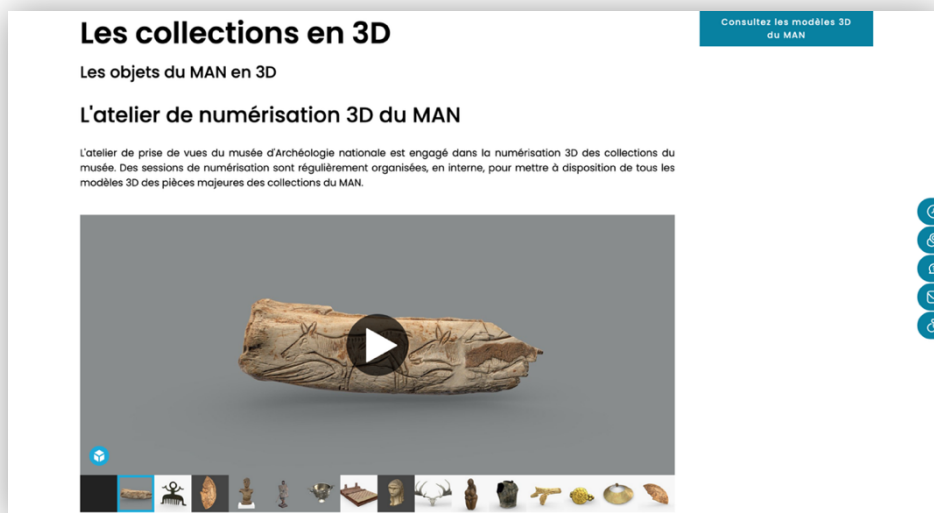
s'interroger sur l'opportunité d'encourager des initiatives décentralisées à l'échelle de musées, de services régionaux, d'universités, développant chacun leur plateforme au risque d'une dispersion. En effet, une interconnexion assure une harmonisation des pratiques et une interopérabilité des données. Ce mémoire suggère qu'une nuance est possible avec des plateformes institutionnelles locales, conçues afin de répondre à des besoins spécifiques, tout en coexistant et en s'adaptant avec un réseau national garantissant une interopérabilité, et un archivage durable. L'enjeu est alors de mettre en place des passerelles entre ces différentes plateformes.

En termes d'apprentissage, ces deux stages ont été extrêmement formateurs. Ils m'ont permis d'acquérir et de consolider de nombreuses compétences techniques, en passant par une compréhension et une gestion de bases de données patrimoniales. Au-delà de l'aspect technique, la dimension pluridisciplinaire de la valorisation numérique m'a offert une prise de conscience en termes de gestion de projet. Il semble complexe de vouloir exceller seul dans tous ces domaines à la fois, et un travail d'équipe et de collaboration avec des spécialistes de différentes origines permet de bénéficier de regards croisés, de vérifier la pertinence des choix effectués, et d'assurer une mise en œuvre plus robuste du projet. Ce fut également l'occasion de développer un esprit critique vis-à-vis des outils numériques utilisés, tels que les visionneuses 3D. Les recherches effectuées à ce sujet m'ont fait comprendre qu'il ne s'agit pas d'un outil neutre, mais que ses fonctionnalités vont permettre d'orienter la perception et l'analyse d'un objet virtuel. Cette prise de recul sur les outils numériques semble aujourd'hui essentielle, car l'archéologue doit rester maître de ses instruments, et garder en mémoire les implications de chaque choix technique sur la production de données.

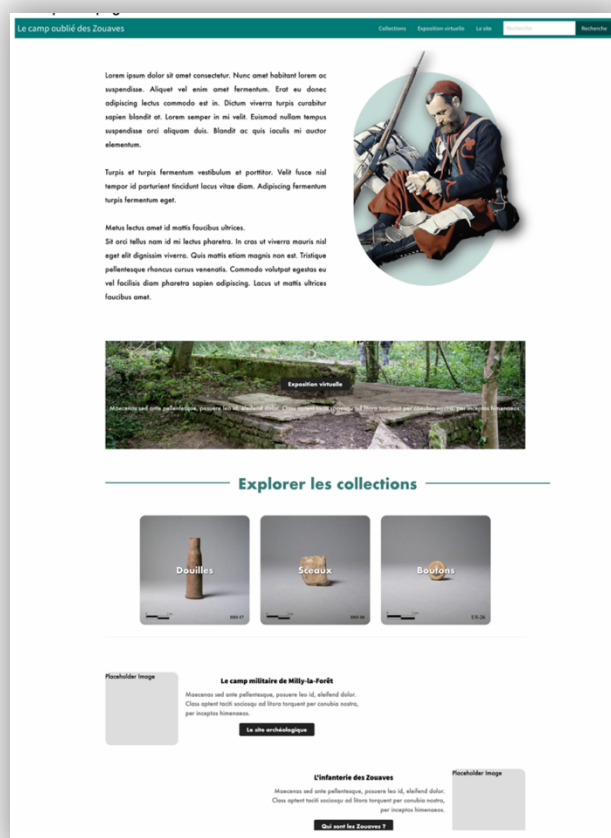
Le bilan de ces deux expériences est positif. Cela a permis de renforcer ma conviction que le numérique est loin d'appauvrir l'archéologie. Au contraire, il offre des opportunités à condition d'en maîtriser les usages et les limites. Il s'agit d'une science humaine, il faut accepter que toute interprétation, idée, ou hypothèse est subjective. Le numérique n'a pas de fondement à primer sur les autres méthodes, même si certains entretiennent cette crainte. Des professionnels émergent en tant que spécialistes de ces méthodes archéologiques. Chaque étude d'objet doit être nuancée dans son enregistrement et interprétation, par sa nature unique, une adaptation est nécessaire. La beauté de cette science réside dans le fait qu'aucune étude n'a vocation à ressembler à une autre, la reproductibilité n'est possible que sur le plan technique des méthodes et outils mis en application. La numérisation 3D et les plateformes web sémantiques concilient innovation, rigueur scientifique, ouverture au public et conservation des données. Ces deux domaines englobent l'ensemble de la vie des données patrimoniales. Cela soulève des défis à relever, comme la standardisation des pratiques afin de faciliter l'interopérabilité entre plateformes, ainsi que l'implication des institutions sur le long terme, ou bien la façon d'appréhender de nouvelles technologies émergentes telles que l'intelligence artificielle.

Ces travaux ont confirmé mes perspectives professionnelles dans une voie dédiée à l'archéologie numérique et plus particulièrement sur le cycle de la vie de la donnée ainsi que les méthodes et les outils numériques appliqués dans ce domaine. J'envisage de mettre mes compétences au service d'institutions patrimoniales et archéologiques ou de projets de recherche innovants dans ce secteur de façon à contribuer à l'essor de ces pratiques tout en conciliant leur rationalisation. Ce mémoire permet de tirer des enseignements sur la nécessité de planifier durablement, de documenter rigoureusement ainsi que de garder une approche critique sur l'ensemble de ces méthodes. La transformation de l'archéologie par le numérique est un chantier passionnant mais exigeant, auquel je souhaite activement participer tout en contribuant à définir et à bâtir des passerelles entre la recherche, les moyens technologiques et les divers publics. Afin que les traces du passé continuent de vivre et de parler au plus grand nombre.

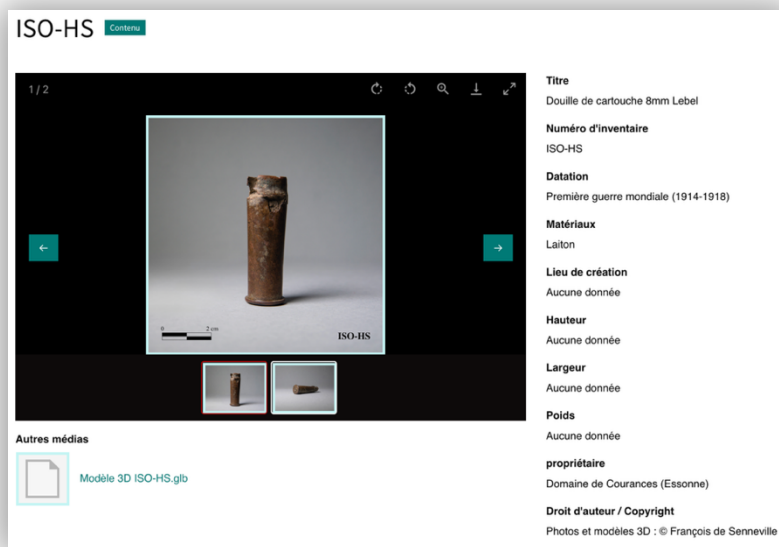
Annexes



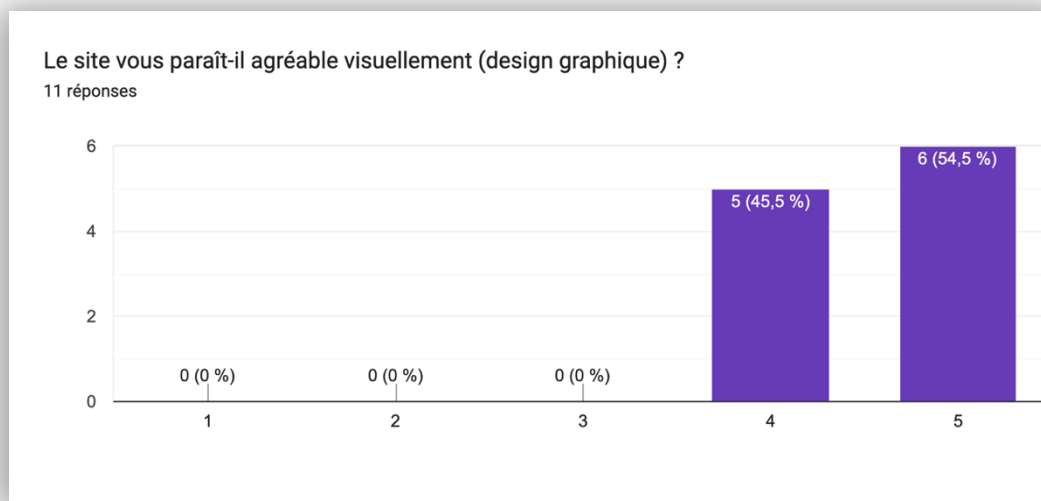
Annexe 1 : Capture d'écran de la page d'accueil des collections 3D du Musée d'archéologie National de Saint-Germain-en-Laye.



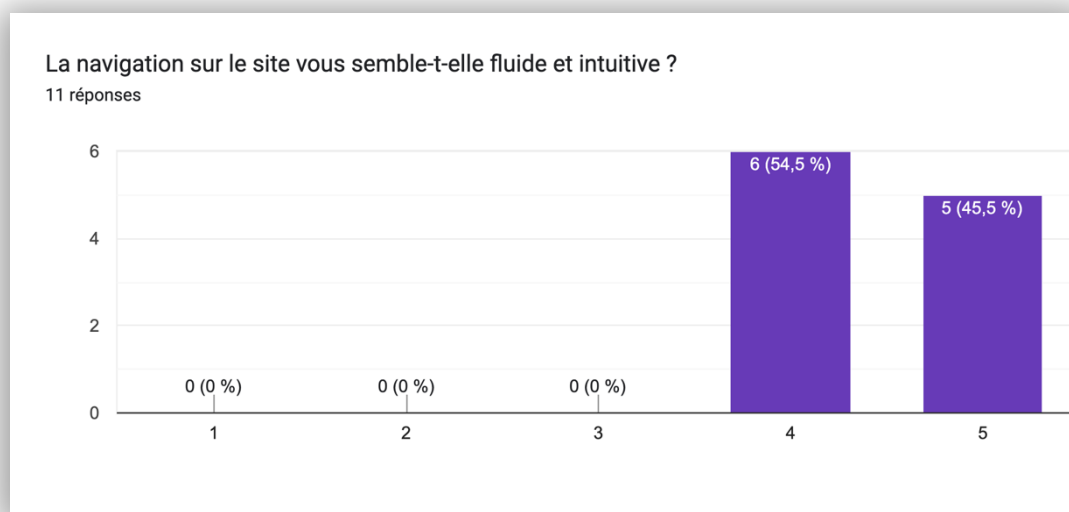
Annexe 2 : Première version de la page d'accueil du site web du Camp des Zouaves.



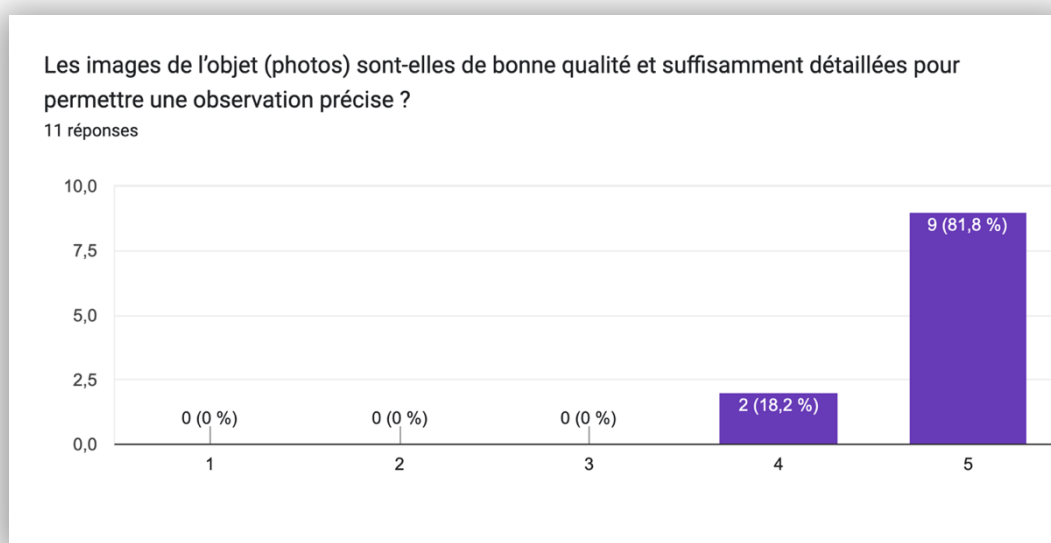
Annexe 3 : fiche objet avec métadonnées.



Annexe 4 : Graphique des réponses en lien avec le design graphique.



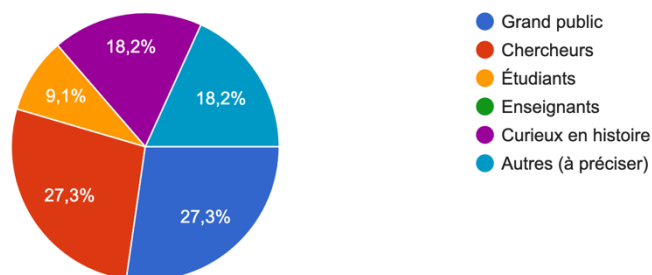
Annexe 5 : Graphique des résultats du retour de fluidité et d'intuitivité.



Annexe 6 : Graphique des réponses en lien avec la qualité des photographies muséales.

Quels publics, selon vous, sont les mieux servis par ce site ?

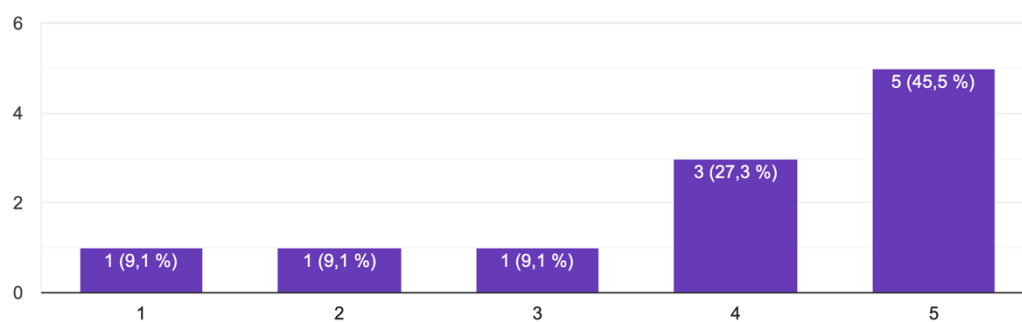
11 réponses



Annexe 7 : Graphique des publics les mieux desservis par le site web.

Le modèle 3D vous a-t-il permis de mieux comprendre la forme ou les particularités de l'objet ?

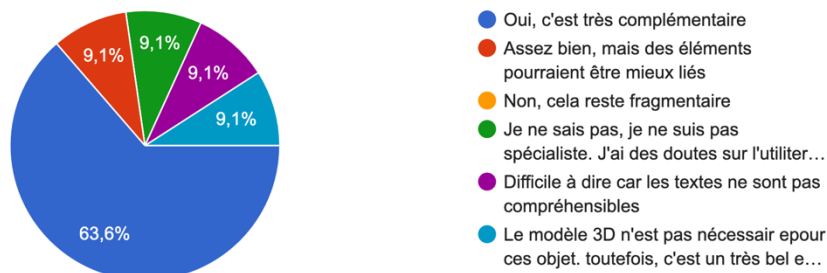
11 réponses



Annexe 8 : Graphique des réponses en lien avec la compréhension au travers des modèles 3D.

Pensez-vous que l'association des photos, du modèle 3D et du texte permet une bonne compréhension de l'objet ?

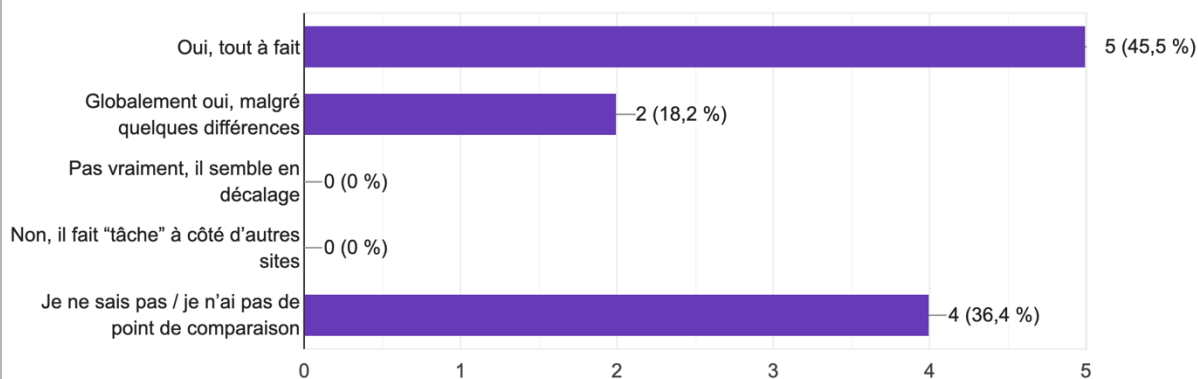
11 réponses



Annexe 9 : Graphique des réponses en lien avec la pertinence entre photographie, modèle 3D et documentation.

Selon vous, le site "Le Camp oublié des Zouaves" est-il cohérent avec les autres plateformes de valorisation de collections archéologiques ou historiques ?

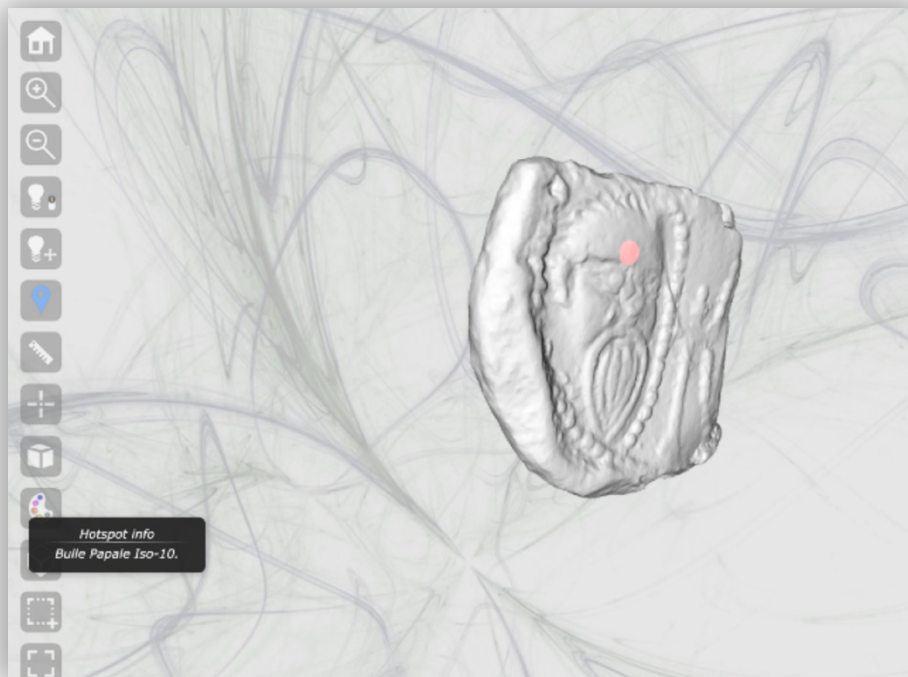
11 réponses



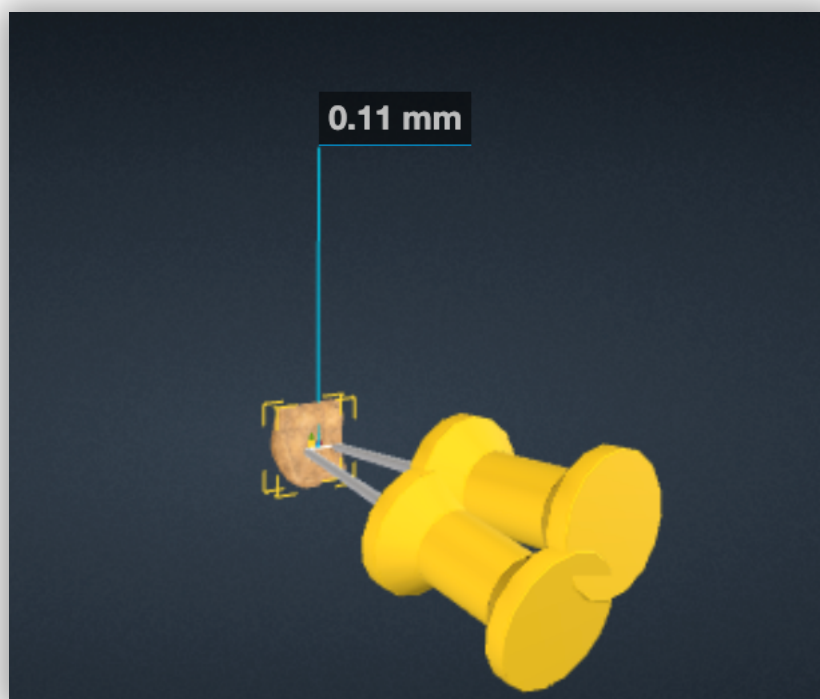
Annexe 10 : Graphique de la cohérence du site web avec d'autres plateformes de valorisation de collections patrimoniales

Libellé d'origine	Types de données	Libellé alternatif	Commentaire alternatif	Requis ?
Titre	...		Intitulé donné à la ressource	Oui
has type	... • Getty: Art & Architecture Thesaurus (AAT)	Identification	Typologie normalisée : choisissez une valeur contrôlée décrivant la catégorie d'objet	Oui
has time-span	...	Chronologie / Datation	Période ou date de fabrication/usage (1345 / IIIe s. av. J-C.)	Oui
consists of	... • Getty: Art & Architecture Thesaurus (AAT)	Matériau	Matière(s) principale(s)	Oui
used general technique	...	Technique	Procédé de fabrication dominant. Si plusieurs, répétez la propriété	Oui
has dimension	...	Dimensions	Une ou plusieurs mesures chiffrées (hauteur, diamètre, etc.) avec unité explicite (Hauteur : 125 mm ; Longueur : 200 mm ; Largeur : 110 mm ; Profondeur : 50 mm)	Oui
took place at	... • Text • Geonames: The GeoNames geographical database	Provenance / Site de découverte	Lieu exact et site archéologique où l'objet a été découvert.	Oui
geonames identifier	... • Geonames: The GeoNames geographical database	Localisation actuelle	Emplacement où l'objet est conservé aujourd'hui	Oui
Format	... • Format 3D		Spécifiez le format du modèle numérique	Oui
wasGeneratedBy	... • Processus de numérisation	Processus de numérisation	Spécifiez le processus de numérisation	Oui
used	...	Jeu de donné utilisé	Ressources consommées par l'activité : photos, scans, etc. (120 photos)	Oui
Texte	... • Logiciel 3D	Logiciel	Nom du ou des logiciel principal ayant permis la création du modèle	Oui
wasAttributedTo	...	Auteur/Opérateur	Personne ou institution responsable de la numérisation	Oui

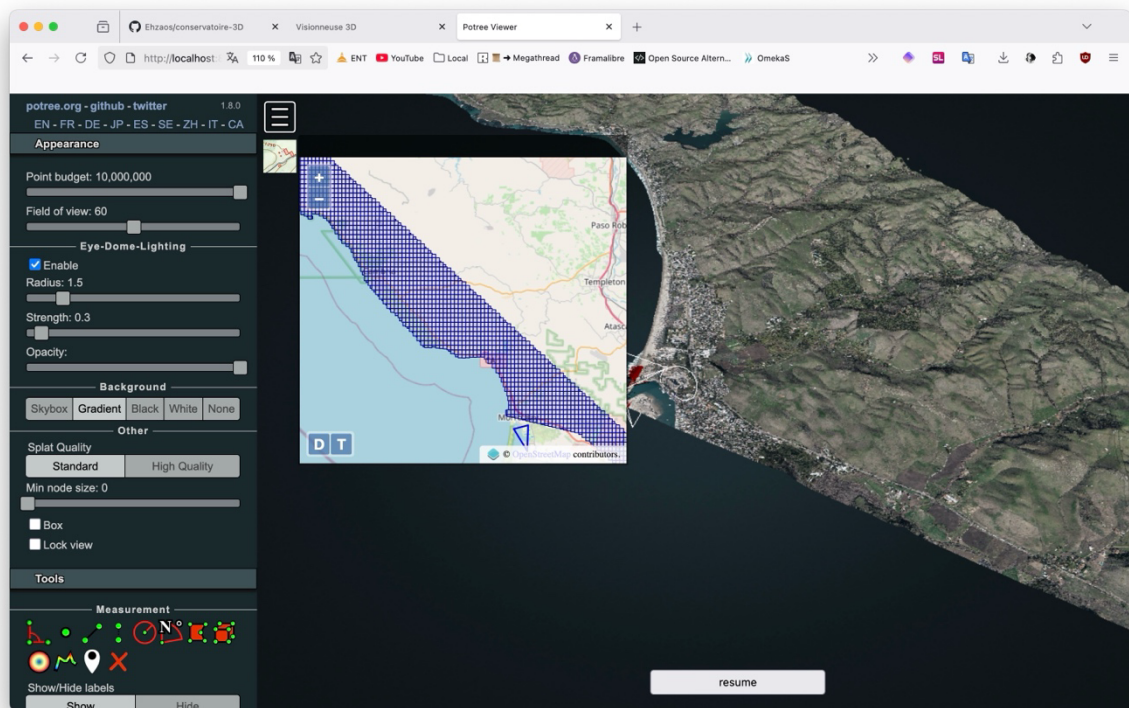
Annexe 11 : Modèle de ressources mis en place pour le conservatoire 3D de Paris 1.



Annexe 13 : Exemple d'annotation au sein de la visionneuse 3DHOP.



Annexe 12 : Exemple d'annotations sur un petit objet dans la visionneuse Smithsonian Voyager.



Annexe 14 : Exemple de géolocalisation disponible dans les fonctionnalités de la visionneuse Potree.

Année universitaire 2024/2025



Convention de stage n° 128974 entre

En référence à l'arrêté du 29 décembre 2014 relatif aux conventions de stage

Nota : pour faciliter la lecture du document, les mots "stagiaire", "enseignant référent", "tuteur de stage", "représentant légal", et "étudiant" sont utilisés au masculin.

1 - L'ÉTABLISSEMENT D'ENSEIGNEMENT ou DE FORMATION Nom : Université Paris 1 Panthéon - Sorbonne Adresse : 12, place du Panthéon 75005 PARIS Tél : Représenté par (signataire de la convention) : Francis PROST Qualité du représentant : Directeur de l'UFR Composante/UFR : ECOLE D'HISTOIRE DE L'ART ET ARCHEOLOGIE DE LA SORBONNE : LICENCE 3, MASTER 1 & 2 ET DOCTORAT Adresse de retour de la convention : Institut d'art et d'Archéologie 3 rue Michelet 75006 Paris Tél : 01 53 73 71 11 Mél : ufr03sec@univ-paris1.fr	2 - L'ORGANISME D'ACCUEIL Nom : DRAC ILE-DE-FRANCE Adresse : 47 Rue Le Peletier 75009 PARIS 09EME FRANCE Représenté par (nom du signataire de la convention) : M. ROTURIER Laurent Qualité du représentant : Directeur régional des affaires culturelles Service dans lequel le stage sera effectué : SERVICE REGIONAL DE L'ARCHEOLOGIE Tél : Mél : laurent.roturier@culture.gouv.fr
3 - LE STAGIAIRE Nom : DENIS DE SENNEVILLE Prénom : François-Olivier Sexe : M Né(e) le : 30/09/2001 Numéro d'étudiant : 12309352 Adresse : 99 Boulevard de l'Hôpital 75013 PARIS 13EME FRANCE Tél : 0762169237 Portable : 0762169237 Mél : Francois-Olivier.Denis-de-Senneville@etu.univ-paris1.fr INTITULÉ DE LA FORMATION OU DU CURSUS SUIVI DANS L'ÉTABLISSEMENT D'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET VOLUME HORAIRES (ANNUEL OU SEMESTRIEL) : Master 2 Patrimoine et musées parcours Valorisation et médiation du patrimoine archéologique (finalité Professionnelle) Nombre d'heures de formation : Plus de 200 heures.	
SUIJET DE STAGE : Stage pour lier imagerie 3D et l'archéologie pour enquêter sur le passé. L'archéologie tire profit de la 3D pour améliorer ses méthodes de recherche et de présentation des découvertes au grand public. Grâce à cet outil de médiation et de valorisation, un public de non-spécialistes est initié à la discipline, à ses enjeux et ses méthodes, un stage donc au service de la démocratisation culturelle et de l'élargissement des publics. Type de stage : Formation Initiale - Stage dans le cursus Dates : du 03/02/2025 au 07/04/2025 Correspondant à 308 heures de présence effective dans l'organisme d'accueil et représentant une durée totale de 2 mois 0 jour(s) et 0 heure(s) Commentaire : Les heures seront fluctuantes par semaine. En raison des projets à réaliser et de leur production parfois en télétravail. <i>Chaque période au moins égale à sept heures de présence, consécutives ou non, est considérée comme équivalente à un jour et chaque période au moins égale à vingt-deux jours de présence, consécutifs ou non, est considérée comme équivalente à un mois. (art. D124-6 Code de l'éducation)</i>	
Encadrement du stagiaire par l'établissement d'enseignement Nom et prénom de l'enseignant référent : CAPOZZOLI Vincenzo Tél : +33 1 89 68 45 28 Mél : Vincenzo.Capozzoli@univ-paris1.fr	Encadrement du stagiaire par l'organisme d'accueil Nom et prénom du tuteur de stage : TIGREAT Pierrick Fonction : Ingénieur d'études chargé de l'inventaire archéologique Tél : 0156065184 Mél : pierrick.tigreat@culture.gouv.fr
CONTACTS Caisse Primaire d'Assurance Maladie à contacter en cas d'accident (lieu de domicile de l'étudiant sauf exception) : Caisse primaire d'assurance maladie (CPAM) du Lot-et-Garonne - 2 rue Diderot 47914 Agen Cedex 9 Service de médecine préventive de l'établissement d'enseignement (le cas échéant) : Contact en cas de conflit (médiateur, conciliateur, etc.) :	

Article 1 - Objet de la convention

La présente convention règle les rapports de l'organisme d'accueil avec l'établissement d'enseignement et le stagiaire.

Article 2 - Objectif du stage

Le stage correspond à une période temporaire de mise en situation en milieu professionnel au cours de laquelle le stagiaire acquiert des compétences professionnelles et met en œuvre les acquis de sa formation en vue de l'obtention d'un diplôme ou d'une certification et de favoriser son insertion professionnelle. Le stagiaire se voit confier une ou des missions conformes au projet pédagogique défini par son établissement d'enseignement et approuvées par l'organisme d'accueil.

Le programme est établi par l'établissement d'enseignement et l'organisme d'accueil en fonction du programme général de la formation dispensée.

ACTIVITÉS CONFIEES :

* Photographie, non technique, photographie type « catalogue de musée » • numérisation et élaboration de modèles 3D d'un échantillon d'objets relatifs l'habillement (boutons d'uniformes), à l'hygiène, aux contenants alimentaires (en verre, gamelle) et à l'armement • modèle 3D publié sous licence et charte graphique 3D • fac-similés d'objets archéologiques par l'impression 3D conçus comme matériel pédagogique. Les techniques de numérisation du site (nuage de points du LiDAR, modèle numérique de terrain) permettent de recréer une partie de l'environnement avec un haut niveau de précision, en complément des relevés (topographie, orthophotographies, dessins). Le stagiaire s'inspire des méthodes archéologiques de reconstitution, les hypothèses archéologiques basées sur des traces matérielles, pour donner vie à un baraquement disparu du cantonnement. Cela introduira souvent des dilemmes de restitution, des questions sur lesquelles les archéologues échangeront avec le stagiaire.

Compétences à acquérir ou à développer :

LES ATTENDUS DU STAGE : Ils prennent plusieurs formes : briques technologiques souveraines concourant à la production d'expériences culturelles immersives, solution(s) d'espace(s) de diffusion en ligne, valorisation des collections et du site. La médiation en archéologie, couplée aux technologies, se révèle être un moyen puissant pour rendre l'archéologie accessible et engageante pour le public. Sur ce site archéologique, et au sujet historique de la Première Guerre mondiale, il s'agit de travailler en partenariat avec le Parc naturel régional du Gâtinais français et Office national des forêts pour l'impression 3D au service de la valorisation dans les années futures.

Article 3 - Modalités du stage

La durée hebdomadaire de présence effective du stagiaire sera de **35.00 heures** sur la base d'un **Temps Plein**.

Si le stagiaire doit être présent dans l'organisme d'accueil la nuit, le dimanche ou un jour férié, préciser les cas particuliers :

Article 4 - Accueil et encadrement du stagiaire

Le stagiaire est suivi par l'enseignant référent désigné dans la présente convention ainsi que par le service de l'établissement en charge des stages.

Le tuteur de stage désigné par l'organisme d'accueil dans la présente convention est chargé d'assurer le suivi du stagiaire et d'optimiser les conditions de réalisation du stage conformément aux stipulations pédagogiques définies.

Le stagiaire est autorisé à revenir dans son établissement d'enseignement pendant la durée du stage pour y suivre des cours demandés explicitement par le programme, ou pour participer à des réunions ; les dates sont portées à la connaissance de l'organisme d'accueil par l'établissement. L'organisme d'accueil peut autoriser le stagiaire à se déplacer.

Toute difficulté survenue dans la réalisation et le déroulement du stage, qu'elle soit constatée par le stagiaire ou par le tuteur de stage, doit être portée à la connaissance de l'enseignant-référent et de l'établissement d'enseignement afin d'être résolue au plus vite.

L'organisme d'accueil ne doit pas confier de tâches dangereuses au stagiaire.

MODALITÉS D'ENCADREMENT (visites, rendez-vous téléphoniques, etc.)

Article 5 - Gratification - Avantages

A l'étranger, les règles de gratification ou de rémunération relèveront du droit local.

Lorsque le stage a lieu en France et que la durée du stage est supérieure à deux mois, consécutifs ou non, celui-ci fait obligatoirement l'objet d'une gratification, sauf en cas de règles particulières applicables dans certaines collectivités d'outre-mer françaises et pour les stages relevant de l'article L4381-1 du code de la santé publique.

Le montant horaire de la gratification est fixé à 15% du plafond horaire de la sécurité sociale défini en application de l'article L.241-3 du code de la sécurité sociale. Une convention de branche ou un accord professionnel peut définir un montant supérieur à ce taux. La gratification d'un montant maximum de 15 % du plafond horaire de la sécurité sociale n'est pas soumise à cotisation sociale. Au-delà, les cotisations sociales sont calculées sur le différentiel entre le montant de la gratification et 15 % du plafond horaire de la Sécurité Sociale.

La gratification due par un organisme de droit public ne peut être cumulée avec une rémunération versée par ce même organisme au cours de la période concernée.

La gratification est due sans préjudice du remboursement des frais engagés par le stagiaire pour effectuer son stage et des avantages offerts, le cas échéant, pour la restauration, l'hébergement, et le transport.

L'organisme peut décider de verser une gratification pour les stages dont la durée est inférieure ou égale à deux mois.

En cas de suspension ou de résiliation de la présente convention, le montant de la gratification due au stagiaire est proratisé en fonction de la durée du stage effectué.

La durée donnant droit à gratification s'apprécie compte tenu du nombre de jours de présence effective du stagiaire.

LE MONTANT DE LA GRATIFICATION est fixé à : 0

Article 5 bis - France - Accès aux droits des salariés - Avantages

(Organisme de droit privé en France sauf règles particulières applicables dans certaines collectivités d'outre-mer françaises) : Le stagiaire bénéficie des protections et droits mentionnés aux articles L.1121-1, L.1152-1 et L.1153-1 du code du travail, dans les mêmes conditions que les salariés.

Le stagiaire a accès au restaurant d'entreprise ou aux titres-restaurants prévus à l'article L.3262-1 du code du travail, dans les mêmes conditions que les salariés de l'organisme d'accueil. Il bénéficie également de la prise en charge des frais de transport prévue à l'article L.3261-2 du même code.

Le stagiaire accède aux activités sociales et culturelles mentionnées à l'article L.2323-83 du code du travail dans les mêmes conditions que les salariés.

Article 5ter - France - Accès aux droits des agents - Avantages

(Organisme de droit public en France sauf en cas de règles particulières applicables dans certaines collectivités d'outre-mer françaises) :

Les trajets effectués par le stagiaire d'un organisme de droit public entre son domicile et son lieu de stage sont pris en charge dans les conditions fixées par le décret n°2010-676 du 21 juin 2010.

Est considéré comme sa résidence administrative le lieu du stage indiqué dans la présente convention.

Article 6 - Régime de protection sociale

Pendant la durée du stage, le stagiaire bénéficie d'une protection maladie et accident dès lors qu'il est affilié à un régime de sécurité sociale et que le droit français s'applique.

Les stages effectués à l'étranger sont signalés préalablement au départ du stagiaire à la Sécurité sociale lorsque celle-ci le demande. Pour les stages à l'étranger, les dispositions suivantes sont applicables sous réserve de conformité avec la législation du pays d'accueil et de celle régissant le type d'organisme d'accueil.

6.1 - Gratification d'un montant maximum de 15% du plafond horaire de la Sécurité sociale :

En cas d'accident survenant au stagiaire soit au cours d'activités dans le ou les lieux du stage, soit au cours du trajet entre le domicile et le lieu de stage, soit sur les lieux rendus utiles pour les besoins du stage et pour les étudiants en médecine, en chirurgie dentaire ou en pharmacie qui n'ont pas un statut hospitalier pendant le stage effectué dans les conditions prévues au b du 2e de l'article L.412-8, l'organisme d'accueil envoie la déclaration à la Caisse Primaire d'Assurance Maladie ou la caisse compétente (voir adresse en page 1) en mentionnant l'établissement d'enseignement comme employeur, avec copie à l'établissement d'enseignement.

6.2 - Gratification supérieure à 15 % du plafond horaire de la Sécurité sociale :

En cas d'accident survenant au stagiaire soit au cours des activités dans l'organisme, soit au cours du trajet, soit sur des lieux rendus utiles pour les besoins de son stage, l'organisme d'accueil effectue toutes les démarches nécessaires auprès de la Caisse Primaire d'Assurance Maladie et informe l'établissement dans les meilleurs délais.

6.3 - Protection maladie du/de la stagiaire à l'étranger :

1) Protection Protection issue du régime de sécurité social français

- pour les stages au sein de l'Espace Economique Européen (EEE) effectués par des ressortissants d'un Etat de l'Union Européenne, ou de la Norvège, de l'Islande, du Liechtenstein, de la Suisse, ou encore de tout autre Etat (dans ce dernier cas, cette disposition n'est pas applicable pour un stage au Danemark, Norvège, Islande, Liechtenstein ou Suisse), le stagiaire doit demander la Carte Européenne d'Assurance Maladie (CEAM).

- pour les stages effectués au Québec par les étudiant(e)s de nationalité française, le stagiaire doit demander le formulaire SE401Q (104 pour les stages en entreprises, 106 pour les stages en universités) ;

- dans tous les autres cas, le stagiaire qui engage des frais de santé doit vérifier ses conditions de prise en charge. Des écarts importants peuvent exister entre les frais engagés et les tarifs français, base du remboursement. Il est donc fortement conseillé au stagiaire de souscrire une assurance maladie complémentaire spécifique, valable pour le pays et la durée du stage, auprès de l'organisme d'assurance de son choix ou, éventuellement et après vérification de l'étendue des garanties proposées, auprès de l'organisme d'accueil si celui-ci fournit au stagiaire une couverture maladie en vertu du droit local (voir 2e ci-dessous).

2) Protection sociale issue de l'organisme d'accueil

En cochant la case appropriée, l'organisme d'accueil indique ci-après s'il fournit une protection Maladie au stagiaire, en vertu du droit local :

☐ **OUI** : cette protection s'ajoute au maintien, à l'étranger, des droits issus du droit français.

☐ **NON** : la protection découle alors exclusivement du maintien, à l'étranger, des droits issus du régime de sécurité social français.

Si aucune case n'est cochée, le 6.3-1 s'applique.

6.4 - Protection Accident du Travail du stagiaire à l'étranger

1) Pour pouvoir bénéficier de la législation française sur la couverture accident de travail, le présent stage doit :

- être d'une durée au plus égale à 6 mois, prolongations incluses ;

- ne donner lieu à aucune rémunération susceptible d'ouvrir des droits à une protection accident de travail dans le pays d'accueil ; une indemnité ou gratification est admise dans la limite de 15% du plafond horaire de la sécurité sociale (cf point 5), et sous réserve de l'accord de la Caisse Primaire d'Assurance Maladie sur la demande de maintien de droit ;

- se dérouler exclusivement dans l'organisme signataire de la présente convention ;

- se dérouler exclusivement dans le pays d'accueil étranger cité.

Lorsque ces conditions ne sont pas remplies, l'organisme d'accueil s'engage à cotiser pour la protection du stagiaire et à faire les déclarations nécessaires en cas d'accident de travail.

- 2) La déclaration des accidents de travail incombe à l'établissement d'enseignement qui doit en être informé par l'organisme d'accueil par écrit dans un délai de 48 heures.
- 3) La couverture concerne les accidents survenus :
- dans l'enceinte du lieu du stage et aux heures du stage,
 - sur le trajet aller-retour habituel entre la résidence du stagiaire sur le territoire étranger et le lieu du stage,
 - dans le cadre d'une mission confiée par l'organisme d'accueil du stagiaire et obligatoirement par ordre de mission,
 - lors du premier trajet pour se rendre depuis son domicile sur le lieu de sa résidence durant le stage (déplacement à la date du début du stage),
 - lors du dernier trajet de retour depuis sa résidence durant le stage à son domicile personnel.
- 4) Pour le cas où l'une seule des conditions prévues au point 6.4-1) n'est pas remplie, l'organisme d'accueil s'engage à couvrir le stagiaire contre le risque d'accident de travail, de trajet et les maladies professionnelles et à en assurer toutes les déclarations nécessaires.
- 5) Dans tous les cas :
- si le stagiaire est victime d'un accident de travail durant le stage, l'organisme d'accueil doit impérativement signaler immédiatement cet accident à l'établissement d'enseignement ;
 - si le stagiaire remplit des missions limitées en dehors de l'organisme d'accueil ou en dehors du pays du stage, l'organisme d'accueil doit prendre toutes les dispositions nécessaires pour lui fournir les assurances appropriées.

Article 7 - Responsabilité et assurance

L'organisme d'accueil et le stagiaire déclarent être garantis au titre de la responsabilité civile.

Pour les stages à l'étranger ou en cas de risque identifié par l'établissement, le stagiaire s'engage à souscrire un contrat d'assistance (rapatriement sanitaire, assistance juridique...) et un contrat d'assurance individuel accident.

Lorsque l'organisme d'accueil met un véhicule à la disposition du stagiaire, il lui incombe de vérifier préalablement que la police d'assurance du véhicule couvre son utilisation par un étudiant (qui dispose du permis adéquat pour le conduire).

Lorsque dans le cadre de son stage, l'étudiant utilise son propre véhicule ou un véhicule prêté par un tiers, il déclare expressément à l'assureur dudit véhicule et, le cas échéant, s'acquitte de la prime y afférente.

Article 8 - Discipline

Le stagiaire est soumis à la discipline et aux clauses du règlement intérieur qui lui sont applicables et qui sont portées à sa connaissance avant le début du stage, notamment en ce qui concerne les horaires et les règles d'hygiène et de sécurité en vigueur dans l'organisme d'accueil.

Toute sanction disciplinaire ne peut être décidée que par l'établissement d'enseignement. Dans ce cas, l'organisme d'accueil informe l'enseignant référent et l'établissement des manquements et fournit éventuellement les éléments constitutifs.

En cas de manquement particulièrement grave à la discipline, l'organisme d'accueil se réserve le droit de mettre fin au stage tout en respectant les dispositions fixées à l'article 9 de la présente convention.

Article 9 - Congés - Interruption du stage

Lorsque le stage a lieu en France (sauf en cas de règles particulières applicables dans certaines collectivités d'outre-mer françaises ou dans les organismes de droit public), en cas de grossesse, de paternité ou d'adoption, le stagiaire bénéficie de congés et d'autorisations d'absence d'une durée équivalente à celle prévues pour les salariés aux articles L.1225-16 à L.1225-28, L.1225-35, L.1225-37, L.1225-46 du code du travail.

Pour les stages dont la durée est supérieure à deux mois et dans la limite de la durée maximale de 6 mois, des congés ou autorisations d'absence sont possibles.

A l'étranger, les congés ne sont pas obligatoires.

Toute interruption temporaire ou définitive du stage, est signalée aux signataires de la convention. Une modalité de validation est mise en place le cas échéant par l'établissement. En cas d'accord des parties à la convention, un report de la fin du stage est possible afin de permettre la réalisation de la durée totale du stage prévue initialement. Ce report fera l'objet d'un avenant à la convention de stage.

Un avenant à la convention pourra être établi en cas de prolongation du stage sur demande conjointe de l'organisme d'accueil et du stagiaire, dans le respect de la durée maximale du stage fixée par la loi (6 mois).

Les raisons invoquées seront examinées en étroite concertation. La décision définitive d'arrêt du stage ne sera prise qu'à l'issue de cette phase de concertation.

Article 10 - Devoir de réserve et confidentialité

Le devoir de réserve et de confidentialité est de rigueur absolue et apprécié par l'organisme d'accueil compte-tenu de ses spécificités.

Le stagiaire prend donc l'engagement de n'utiliser en aucun cas les informations recueillies ou obtenues par eux pour en faire publication, communication à des tiers sans accord préalable de l'organisme d'accueil, y compris le rapport de stage. Cet engagement vaut non seulement pour la durée du stage mais également après son expiration. Le stagiaire s'engage à ne conserver, emporter, ou prendre copie d'aucun document ou logiciel, de quelque nature que ce soit, appartenant à l'organisme d'accueil, sauf accord de ce dernier.

Dans le cadre de la confidentialité des informations contenues dans le rapport de stage, l'organisme d'accueil peut demander une restriction de la diffusion du rapport, voire le retrait de certains éléments confidentiels.

Les personnes amenées à en connaître sont contraintes par le secret professionnel à n'utiliser ni ne divulguer les informations du rapport.

Article 11 - Propriété intellectuelle

En France, dans le cas où les activités du stagiaire donnent lieu à la création d'une œuvre protégée par le droit d'auteur ou la propriété industrielle (y compris un logiciel), un contrat doit être signé entre le stagiaire (auteur) et l'organisme d'accueil. Le contrat devra notamment préciser une mission inventive, l'étendue des droits cédés, l'éventuelle exclusivité, la destination, les supports utilisés et la durée de la cession, ainsi que, le cas échéant, le montant de la contrepartie financière due au stagiaire au titre de la cession. Ces dispositions s'appliquent sauf en cas de règles particulières relatives aux stages réalisés au sein d'une personne morale de droit public ou de droit privé réalisant de la recherche qui sont soumis à l'article L611-7-1 du code de la propriété intellectuelle.

Article 12 - Fin de stage - Rapport - Evaluation

1) Attestation de stage : à l'issue du stage, l'organisme d'accueil délivre une attestation dont le modèle figure en annexe, mentionnant au minimum la durée effective du stage et, le cas échéant, le montant de la gratification perçue.

2) Qualité du stage : à l'issue du stage, les parties à la présente convention sont invitées à formuler une appréciation sur la qualité du stage. Le stagiaire transmet au service compétent de l'établissement d'enseignement un document dans lequel il évalue la qualité de l'accueil dont il a bénéficié au sein de l'organisme d'accueil. Ce document n'est pas pris en compte dans son évaluation ou dans l'obtention du diplôme ou de la certification.

3) Evaluation de l'activité du stagiaire : à l'issue du stage, l'organisme d'accueil renseigne une fiche d'évaluation de l'activité du stagiaire qu'il retourne à l'enseignant référent (ou préciser si fiche annexe ou modalités d'évaluation préalablement définies en accord avec l'enseignant référent).

4) Modalités d'évaluation pédagogiques : Mémoire, Mémoire
NOMBRE D'ECTS (le cas échéant) : 30.00

5) Le tuteur de l'organisme d'accueil ou tout membre de l'organisme d'accueil appelé à se rendre dans l'établissement d'enseignement dans le cadre de la préparation, du déroulement et de la validation du stage ne peut prétendre à une quelconque prise en charge ou indemnisation de la part de l'établissement d'enseignement.

Article 13 - Droit applicable - Tribunaux compétents

La présente convention est régie exclusivement par le droit français.

Tout litige non résolu par voie amiable sera soumis à la compétence de la juridiction française compétente.

Conformément à la réglementation relative à la protection des données personnelles, le stagiaire devra être informé du traitement réservé aux données personnelles qu'il aura été amené à fournir à l'établissement de formation et à l'organisme d'accueil.

FAIT À Paris le 22 Janvier 2025

DIRECTEUR
POUR L'ETABLISSEMENT D'ENSEIGNEMENT

Viseur du centre par délégation, Francis PROST

STAGIAIRE (ou son représentant légal le cas échéant)

François-Olivier DENIS DE SENNEVILLE

L'enseignant référent du stagiaire

Vincenzo CAPOZZOLI

POUR L'ORGANISME D'ACCUEIL (AVEC CACHET)

Laurent ROTURIER

Le chef adjoint du bureau des ressources humaines
Direction régionale des affaires culturelles d'Ile-de-France
Nabil LAHIANE

Le tuteur de stage de l'organisme d'accueil

Pierrick TIGREAT

Fiches à annexer à la convention : 1) Attestation de stage / 2) Fiche de stage à l'étranger (pour informations sécurité sociale voir site cleiss.fr - pour fiche pays voir site diplomatie.gouv.fr) / 3) Autres annexes (le cas échéant)



Expérience pédagogique en laboratoire

Formulaire d'inscription

Nom étudiant :

Expérience pédagogique en laboratoire

Formulaire d'inscription

Le document présent doit être dûment rempli par l'étudiant/e et, signé par l'ensemble des parties avant le début de l'activité pédagogique. Tant que ce formulaire ne sera pas signé, l'étudiant ne pourra commencer sa formation. Ce formulaire ne saurait en aucun cas constituer ou être assimilé à une convention de stage.

Données personnelles de l'étudiant

Nom de famille	Denis de Senneville	Prénom	François
Date de naissance	30/09/2001	Ville de naissance	Saint-Étienne
Sexe [M/F]	M	Téléphone	0762169237
E-mail	de-senneville.francois@protonmail.com	Numéro étudiant	070342639BF
Inscription en L3/M1/M2	M2 VMPA	Numéro assurance	1010942218463 56

Informations sur le responsable de l'expérience pédagogique

Nom du responsable	Vincenzo Capozzoli	Composante/UFR	03
E-mail	vincenzo.capozzoli@univ-paris1.fr		

Informations sur le laboratoire d'accueil et le tuteur

Nom laboratoire / équipe de recherche		UFR	03
Description de la structure			
Nom tuteur (si différent du responsable pédagogique)		E-mail tuteur	
Nombre d'étudiants déjà en formation à la date présente ¹			

¹ Le tuteur ne peut suivre plus de 8 étudiants (quota maximum à respecter) par année universitaire.

Programme d'expérience pédagogique

Titre de l'expérience pédagogique : ..Création d'un conservatoire des modèles 3D à l'aide du CMS OmekaS

Durée totale : 175 heures ☒ ; 82,5 heures ☐

à partir du ..19.mai..... **jusqu'au** 27.juin.....

Calendrier détaillé :

Mois	Jours / Heures
Mai	10 jours / 70 heures
Juin	15 jours / 105 heures

Programme détaillé de l'expérience pédagogique (missions assignées aux étudiants définies par le tuteur en concertation avec le responsable pédagogique) :

Création d'un conservatoire des modèles 3D à l'aide d'OMEKA S, incluant la définition (à travers le recours aux ontologies du web sémantique) des métadonnées et paradonnées nécessaires à un dépôt numérique pérenne. Réflexion sur les visionneuses web les plus adaptées pour ce conservatoire (3DHOP, Potree, Smithsonian Voyager ou ATON Framework)

Lieu dans lequel se déroulera l'expérience pédagogique :

Institut d'art et d'archéologie : ☒

Galerie Colbert (INHA) : ☐

Autre : Musée de l'armée ./ Distanciel

Connaissances et compétences requises :

Maîtrise d'Omeka S (ressources, vocabulaires, modules) ; compréhension du web sémantique (RDF, ontologies, URI) ; modélisation de métadonnées et paradonnées (Dublin Core, CIDOC CRM, etc.) ; notions d'archivage numérique pérenne (formats ouverts, principes FAIR, OAIS) ; compétences en code (HTML, CSS, JavaScript de base) ; évaluation et intégration de visionneuses web adaptées (3DHOP, Potree, Smithsonian Voyager, ATON) ; structuration de dépôts numériques interopérables ; rédaction de documentation technique.

Connaissances et compétences acquises à la fin de l'expérience pédagogiques :

Mise en place d'un conservatoire numérique sur Omeka S ; définition et structuration de schémas de métadonnées sémantiques ; intégration de modèles 3D et réflexion sur leur archivage pérenne ; évaluation comparative et implémentation de visionneuses web 3D ; adaptation de vocabulaires et ontologies aux besoins patrimoniaux ; développement de solutions web légères pour la visualisation 3D ; rédaction de documentation technique et méthodologique.

A l'issue de sa formation en laboratoire, dans un délai n'excédant pas les 15 jours, l'étudiant/e remettra au responsable pédagogique et au tuteur un rapport détaillé de son activité faisant apparaître le bilan pédagogique de celle-ci.

L'étudiant/e est tenu à communiquer toute modification éventuelle de son programme (durée ou contenu) non seulement au responsable de l'expérience pédagogique mais aussi au secrétariat.

CONDITIONS GENERALES POUR L'ETUDIANT/E

Durée, propriété intellectuelle, assurance, déplacement

- La durée de l'expérience pédagogique est de 25 jours ouvrés (175 heures, soit 5 semaines au total à raison de 5 jours par semaine à temps complet ou l'équivalent à temps partiel). La durée ne peut en aucun cas dépasser les 308 heures (équivalent 44 jours). Les étudiants salariés sur l'année universitaire (de septembre à juin), sur présentation d'un justificatif, sont dispensés de la moitié de cette expérience.
- L'expérience pédagogique ne prévoit aucune forme de rémunération ou de gratification.
- Les données traitées lors de la formation (images, vidéos, archives, recherches textuelles, etc.) appartiennent aux fonds et aux personnels de la structure d'accueil et sont strictement confidentielles. Toute diffusion et/ou reproduction est interdite et l'étudiant/e s'engage à respecter cette clause de confidentialité pendant et après sa formation.
- L'étudiant/e prend donc l'engagement de n'utiliser en aucun cas les informations recueillies ou obtenues pour en faire publication, communication à des tiers sans accord préalable de l'organisme d'accueil, y compris le rapport d'activité. Cet engagement vaut non seulement pour la durée de l'expérience pédagogique mais également après son expiration.
- Le stagiaire s'engage à ne conserver, emporter, ou prendre copie d'aucun document ou logiciel, de quelque nature que ce soit, appartenant à l'organisme d'accueil, sauf accord de ce dernier.
- Dans le cadre de la confidentialité des informations contenues dans le rapport d'activité, le laboratoire d'accueil peut demander une restriction de la diffusion du rapport, voire le retrait de certains éléments confidentiels. Les personnes amenées à prendre connaissance des informations confidentielles du rapport sont contraintes par le secret professionnel à ne pas les utiliser et/ou les divulguer.
- Pendant ses activités d'expérience pédagogique et dans les lieux indiqués au sein de l'Université Paris 1, l'étudiant est couvert par le régime de protection dont il bénéficie dans le cadre de sa formation. L'Université ne saurait être considérée ou assimilée à un employeur.
- En cas de déplacement en dehors des sites de l'Université, il est indispensable de se conformer aux règles définies dans la circulaire relative aux déplacements pédagogiques. Les étudiants seront alors couverts par l'assurance responsabilité civile de l'université.

- Cette expérience de formation ne doit en aucun cas empêcher les étudiants d'assister à leurs cours. C'est pourquoi il est préférable de la réaliser en dehors des périodes de cours ou à temps partiel durant les périodes d'enseignement.
- Le tuteur désigné dans le document présent est chargé d'assurer le suivi de l'étudiant et d'optimiser les conditions de réalisation de la formation conformément aux stipulations pédagogiques définies.

Rapport final et attestation

- L'étudiant/e s'engage à remettre à la fin de sa période de formation un rapport qui sera rédigé suivant les indications disponibles dans les circulaires sur les stages au lien suivant :
<https://www.univ-paris1.fr/ufr/ufr03/formations/stages>
- A la fin de la formation et une fois reçu le rapport final de l'étudiant/e, le tuteur s'engage à remettre une attestation d'expérience pédagogique contenant l'évaluation du stage avec une note comprise entre 0 et 20 (ou nombre d'ECTS, le cas échéant).
- L'attestation sera remise au responsable pédagogique pour sa validation finale.
- Une copie de cette attestation devra être transmise également au Directeur de l'UFR 03 et au responsable administratif de l'UFR 03.

OBLIGATIONS POUR LE TUTEUR

- En cas de travail collaboratif dans le cadre d'un projet de recherche, d'un programme de récolement, de valorisation patrimoniale ou encore d'une publication en ligne (base de données, site web, portail, etc.), le tuteur s'engage à publier le nom de l'étudiant parmi les contributeurs ou, en tout cas, à le mentionner dans les crédits.
- Le tuteur s'engage à rédiger sous forme de tableau EXCEL un registre des présences des étudiants en formation. Il s'engage également à remettre ce registre au Directeur et au responsable administratif de l'UFR 03 à la fin de chaque année universitaire.

En signant ce formulaire, l'étudiant/e, le responsable de l'expérience pédagogique ainsi que le tuteur du laboratoire d'accueil confirment la validité du contenu pédagogique de la formation ainsi que le respect de toutes les conditions.

Fait à Paris, le 14...../05...../2025.....

L'étudiant/e (signature précédée de la mention manuscrite « lu et approuvé »)

lu et approuvé _____



Le responsable de l'expérience pédagogique

Vincenzo Capozzoli

Le tuteur du laboratoire d'accueil

Le directeur de l'UFR ou le responsable administratif :

François Denis de Senneville

23 ans

99 Boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris

☎ 07 62 16 92 37

✉ de-senneville.francois@protonmail.com

🚗 Permis B et Véhicule

Compétences

Informatique :

- **DAO** : Illustrator, Photoshop
- **SIG** : Qgis
- **3D / Modélisation et Photogrammétrie** : Metashape, Reality capture, Cloudcompare, Meshlab, Substance 3D, Blender, RTI
- **Photographie**
- **Retouche Photo** : Lightroom, Photoshop
- **PAO** : InDesign
- **Base de données** : Filemaker, Syslat, Excel
- **Suite Office** : Word, Excel, Powerpoint

Terrain :

- Responsable de secteur : **encadrement** de 3 à 4 fouilleurs, Initiation aux méthodes de post-fouille, enregistrement, interprétation des unités stratigraphiques, relevé stratigraphique, inventaire et enregistrement du mobilier.
- **Diagnostic et suivi de pelle mécanique**
- **Médiation**
- **Photogrammétrie**
- **Rédaction de rapport de fouilles**

Langues :

- Anglais : B2 / Espagnol : A2

Centres d'intérêts :

- Informatique / Photographie / Dessin / Tennis (12 ans)

Parcours universitaire

- | | |
|-------------|--|
| 2024 - 2025 | • Master 2 : Valorisation et médiation du patrimoine archéologique
<i>Université Paris 1 - Panthéon-Sorbonne</i> |
| En cours | |
| 2023 - 2024 | • Master 1 : Patrimoine & Musées
« mention bien »
<i>Université Paris 1 - Panthéon-Sorbonne</i> |
| | • Auditeur en Archéologie et Histoire de l'art à l'École du Louvre |
| 2019 - 2022 | • Licence d'Histoire spécialisation Archéologie
<i>Université Bretagne Sud - Lorient</i> |

Formations

- **D.A.O** et **P.A.O**
« Paris I - Panthéon Sorbonne »
- **CMS** « Paris I - Panthéon Sorbonne »
- Archéologie numérique : **Pratique de l'acquisition 3D de terrain**
« Paris I - Panthéon Sorbonne »
- **Infographisme** en stage d'entreprise « Féroce Graphique » (Auray, 56400)
- Initiation à la **Topographie**
« Toulouse II - Jean Jaurès »
- Pratique de la **valorisation et médiation**
« Paris I - Panthéon Sorbonne »

Expériences Professionnelles

2025 : Stage à l'université Paris 1 | (en cours)

- **Création d'un conservatoire des modèles 3D** à l'aide d'OMEKA S (CMS).
- Mise en place d'une visionneuse web adaptée pour ce type de conservatoire 3D (3DHOP, Potree, Smithsonian Voyager ou ATON Framework)

2025 : Stage au SRA Île de France | (2 mois)

- **Numérisation 3D et modélisation** du mobilier archéologique du site du « camp oublié des zouaves ».
- Création d'un **site web (CMS) de valorisation du site archéologique pour des collections** du mobilier numérisé

2023 - 2024 : (CDD) Responsable de Secteur | « Las Craveros » Fanjeaux (11) : (fouille programmée, 2 mois)

- Responsable de **l'inventaire et analyse notamment statique du petit mobilier** archéologique.
- Élaboration et instauration d'un **protocole de numérisation du petit mobilier** (D.A.O, 3D, Photo)
- **Photographe de l'ensemble du mobilier archéologique**
- **Responsable et encadrant** de fouilleurs sur un secteur

2024 : Stagiaire en Diagnostic INRAP | «Abilly » Les Roches (37) : (diagnostic, 1 mois)

- Apprentissage de la **méthodologie opérée sur un diagnostic**
- **Repérage des structures et suivi de pelle-mécanique**
- fouilles et interprétation des structures testées

2024 : Fouilleur Bénévole | « Château de Montagu » Marcoussis (91) : fouille programmée, 1 mois)

- Fouille de latrines, Enregistrement et interprétation de structure bâtie (**archéologie du bâti**)
- **Tamissage, inventaire** céramique et du verre

2021 - 2022 : Fouilleur Bénévole | « Las Craveros » Fanjeaux (11) : (fouille programmée, 2 mois)

- Initiation des méthodes de fouilles, d'enregistrement, de lecture et d'interprétation
- Initiation à la post-fouille : inventaire, conditionnement, D.A.O, base de données

Post-fouilles :

2023 - 2025 : 3 rapports de Fouilles - « Las Craveros » Fanjeaux (11)

- **Rédaction**, analyse et interprétation
- **Numérisation, Photographie, analyse statistique, D.A.O**, inventaire

Publications

- à paraître (2025) Favennec Benoit, Faisandier Claire (dir.) et al., *Le groupement artisanal de l'Antiquité tardive de Las Craveros à Fanjeaux (Aude) : lieu de production de poteries, de matériaux de construction et du travail du fer - troisième rapport de la 3e triennale (2022-2024)*, 2024.
- 2024 Favennec Benoit, Faisandier Claire (dir.) et al., *Le groupement artisanal de l'Antiquité tardive de Las Craveros à Fanjeaux (Aude) : lieu de production de poteries, de matériaux de construction et du travail du fer - deuxième rapport de la 2e triennale (2022-2024)*, 2023.

Médiation et Valorisation

- **Guide Journée Européenne de l'archéologie** : « fouille du Château de Montagu » - Marcoussis
- **Documentaire** : Carnets de fouilles : Fanjeaux, Las Craveros (3 épisodes, 15 min.), par Stéphane Kowalczyk.
<https://www.youtube.com/watch?v=kLQZ5nMsaL>

Productions photographiques



Bibliographie

Abergel et al. 2017

ABERGEL V., BÉNISTANT P., BERGEROT L., BERNARD J.-F., BOHBOT H., CASSEN S., CHAYANI M., DE LUCA L., DUTAILLY B., EPAUD F., ESPINASSE L., EUSÈBE S., FLAMMIN A., FLEURY P., GRIMAUD V., JEANSON L., JOFFRES A., KEROUANTON J.-L., LAROCHE F., LE MORT F., LEFÈVRE N., LESCOPI L., MADELEINE S., MANSÉRI H., MARLET O., MATHIEU V., MORA P., MORINEAU C., PAITIER H., PAMART A., POUYET T., QUANTIN M., RODIER X., SANZ LALIBERTÉ S., SCHMITT A., SORIN S., TOURNON-VALIENTE S., VERGNIEUX R., *Livre blanc du Consortium 3D SHS* [en ligne], s.l., URL : <https://hal.science/hal-01683842>.

Belarbi et al. 2012

BELARBI M., RAYMOND P., SAULIÈRE N., TOUQUET R., « L'acquisition 3D par photogrammétrie en archéologie », *archeopages*, 34, pp. 90-91.

Bonnaud-Le Roux 2020

BONNAUD-LE ROUX S., « Les enjeux juridiques liés à la numérisation tridimensionnelle du patrimoine », *insitu*, 42.

Cannoni 2022

CANNONI C., « Les nouvelles technologies pour l'archéologie du bâti. Applications, apports et limites », in SAPIN C., BULLY S., BIZRI M., HENRION F. (éd.), *Archéologie du bâti. Aujourd'hui et demain*, Dijon : Arthehis.

Carpentier 2019

CARINE CARPENTIER, « 3D pour l'archéologie : quelles interactions, pour quoi faire ? » [en ligne], URL : <https://sstinrap.hypotheses.org/1429>.

Delamare 2024

DELAMARE S., *La modélisation 3D en archéologie : objectifs, enjeux et contexte d'utilisation : Du terrain à la réalité virtuelle : études de cas en archéologie programmée et préventive* [en ligne], thèse de doctorat (univ., Paris 1 Panthéon-Sorbonne), URL : <http://www.theses.fr/2024PA01H034/document>.

Delevoie et al. 2012

DELEVOIE C., DUTAILLY B., MORA P., VERGNIEUX R., « Un point sur la photogrammétrie », *archeopages*, 34, pp. 86-89.

Djindjian 2011

DJINDJIAN F., « Chapitre 3 - L'archéologie de 1950 à nos jours », in *Manuel d'archéologie*, Paris : Armand Colin, coll. « Collection U », pp. 41-52, Cairn.info.

Eusèbe 2019

EUSÈBE S., « Imagerie numérique et représentation des données en archéologie », *insitu*, 39.

Garniaux 2023

GARNIAUX J., « Jumeaux numériques et 3D géospatiale sur le web pour la recherche en archéologie : développements open source pour l'analyse, le travail collaboratif et la visualisation », *Préhistoires méditerranéennes*, 11, pp. 9-16.

Giligny, Desachy 2019

GILIGNY F., DESACHY B., « Informatique et archéologie en France : les années 1980 », *Les nouvelles de l'archéologie*, 157-158, pp. 114-118.

Granier et al. 2019

GRANIER X., CHAYANI M., ABERGEL V., BÉNISTANT P., BERGEROT L., BOHBOT H., CASSEN S., DE LUCA L., DUTAILLY B., EPAUD F., ESPINASSE L., EUSÈBE S., FLAMMIN A., FLEURY P., GRIMAUD V., JEANSON L., JOFFRES A., KEROUANTON J.-L., LAROCHE F., LE MORT F., LEFÈVRE N., LESCOPI L., MADELEINE S., MANSÉRI H., MARLET O., VERGNIEUX R., MATHIEU V., MORA P., MORINEAU C., PAITIER H., PAMART A., POUYET T., QUANTIN M., RODIER X., SANZ LALIBERTÉ S., SCHMITT A., SORIN S., TOURNON-VALIENTE S., BERNARD J.-F., *Les recommandations du Consortium 3D SHS* [en ligne], s.l., URL : <https://hal.science/hal-01683842>.

Laroche, Kerouanton 2016

LAROCHE F., KEROUANTON J.-L., « Muséologie, patrimoine, humanités numériques et 3D », in *Conférence Digital Intelligence* [en ligne], Québec, Canada : Université de Laval à Québec, coll. « Conférence Digital Intelligence », URL : <https://hal.science/hal-01280767>.

Laurent 2024

LAURENT A., *De l'utilité aux usages de la numérisation 3D pour le patrimoine archéologique* [en ligne], thèse de doctorat (univ., Toulouse), URL : <https://theses.hal.science/tel-04879718>.

Marlet et al. 2022

MARLET O., BAUDOIN B., BERNARD L., BÉZARD L., BOISSAT R., BUARD P.-Y., HALCZUK A., HIVERT F., HÉLÈNE J., NOUVEL B., RODIER X., ROUSSET M., SCHOLTUS L., *Le Livre Blanc du consortium Mémoires des Archéologues et des Sites Archéologiques : Guide des bonnes*

pratiques numériques en archéologie [en ligne], Research Report, s.l. : Consortium MASA, URL : <https://shs.hal.science/halshs-03561376>.

Ministère de la Culture 2018

MINISTÈRE DE LA CULTURE, *Les enjeux de la 3D pour la numérisation des ressources culturelles* [en ligne], Paris : Ministère de la Culture, URL : https://www.culture.gouv.fr/Media/medias-creation-rapide/Les_enjeux_de_la_3D.pdf.

Mora 2016

MORA P., « Retour d'expérience sur des cas d'acquisition 3D et leurs usages en archéologie », *Les nouvelles de l'archéologie*, 146, pp. 11-16.

Nicolas et al. 2016

NICOLAS T., GAUGNE R., TAVERNIER C., ARNALDI V. G. E. B., « La tomographie, l'impression 3D et la réalité virtuelle au service de l'archéologie », *Les nouvelles de l'archéologie*, 146, pp. 16-22.

Thivet et al. 2019

THIVET M., VERRIEZ Q., VURPILOT D., « Aspectus : développement d'une plateforme collaborative en ligne d'analyse des données 3D pour l'archéologie et le patrimoine », *insitu*, 39.

Tuffery 2019

TUFFERY C., « Les compétences numériques en archéologie : un défi majeur et des risques de déni », *Interrogations ? Revue pluridisciplinaire de sciences humaines et sociales* [en ligne], 28, URL : <https://inrap.hal.science/hal-02380894v1>.

Tufféry 2022a

TUFFERY C., *Ce que le numérique fait à l'archéologie et aux archéologues. Contribution historiographique et épistémologique à l'étude des évolutions d'une discipline et de ses pratiques en France depuis les années 1970*. [en ligne], thèse de doctorat (univ., CY Cergy Paris Université), URL : <http://www.theses.fr/2022CYUN1129/document>.

Tufféry 2022b

TUFFERY C., « Les effets du numérique sur l'archéologie et les archéologues: Premiers résultats d'une recherche en cours », *Les nouvelles de l'archéologie*, 168, pp. 62-65.

Tufféry 2023

TUFFÉRY C., « Ce que le numérique fait à l'archéologie et aux archéologues. Contribution historiographique et épistémologique à l'étude des évolutions d'une discipline et de ses pratiques en France depuis les années 1970 », *Archeopages*, 49, pp. 123-123.

Vergnieux, Giligny 2016

VERGNIEUX R., GILIGNY F., « Pour un usage raisonné de la 3D en archéologie », *Les nouvelles de l'archéologie*, 146.

Verriez 2023

VERRIEZ Q., *Rationaliser les pratiques numériques en archéologie : l'exemple des chantiers de fouilles de Bibracte* [en ligne], thèse de doctorat (univ., Bourgogne Franche-Comté),
URL : <http://www.theses.fr/2023UBFCH035/document>.

Webographie

2011

« Numérisation en ligne du patrimoine culturel | EUR-Lex » [en ligne], URL : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=LEGISSUM:cu0008> [lien valide au 30 juin 2025].

2019

« Directive - 2019/790 - FR - directive droit d’auteur - EUR-Lex » [en ligne], URL : <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/790/oj/fra> [lien valide au 30 juin 2025].

2021

« Manuel Utilisateur Omeka S » [en ligne], URL : <https://omeka-s-enduser-fr.readthedocs.io/fr/latest/> [lien valide au 30 juin 2025].

2023

« Potree — potree-templates 0.1 documentation » [en ligne], URL : <https://potree-templates.readthedocs.io/en/latest/index.html> [lien valide au 30 juin 2025].

2025

« Explorer - Voyager Documentation » [en ligne], URL : <https://smithsonian.github.io/dpo-voyager/explorer/> [lien valide au 30 juin 2025].

Table des figures

FIGURE 1 : ORGANIGRAMME DE LA DIRECTION RÉGIONALE DES AFFAIRES CULTURELLES.	11
FIGURE 2: LES MODÈLES 3D SONT AU CŒUR DE TROIS ENJEUX ET LA CONSERVATION TIENT UN RÔLE PARTICULIER, (DUTAILLY ET AL. 2019, P. 29).	24
FIGURE 3 : FACTEURS DE DÉCISIONS D'APPLICATION DE LA 3D, SCHÉMA S. DELAMARE	25
FIGURE 4 : TABLEAU COMPARATIF DES DEUX TYPES DE STOCKAGE PRINCIPAUX.	29
FIGURE 5 : MILLY-LA-FORÊT, LE RUISSEAU, CANTONNEMENT DE ZOUAVES.	33
FIGURE 6 : LATRINES DE LA ZONE 3, NICOLAS GIRAULT.....	34
FIGURE 7 : LES DIFFÉRENTES TAILLES DE CAPTEUR EN PHOTO, NIGHTSKYPIX.COM.	37
FIGURE 8 : EXEMPLE DU RENDU FINAL DE CHAQUE TYPE DE MOBILIER PHOTOGRAPHIÉ.	39
FIGURE 9 : PREMIÈRE ÉTAPE DE PROTOCOLE DE NUMÉRISATION 3D.....	41
FIGURE 10 : DEUXIÈME ÉTAPE DU PROTOCOLE DU NUMÉRISATION 3D.	43
FIGURE 11 : TROISIÈME ÉTAPE DU PROTOCOLE DE NUMÉRISATION 3D.	45
FIGURE 12: QUATRIÈME ÉTAPE DU PROTOCOLE DE NUMÉRISATION 3D.	46
FIGURE 13 : CINQUIÈME ET DERNIÈRE ÉTAPE DU PROTOCOLE DE NUMÉRISATION 3D.	47
FIGURE 14 : EXEMPLE DE RÉSULTATS DE RAPPORT METASHAPE (ISO US-26).	48
FIGURE 15 : COMPARAISON DES RÉSULTATS ENTRE LE SCANNER ARTEC SPIDER ET LA PHOTOGRAMMÉTRIE.....	50
FIGURE 16 : SITE MAP DU SITE DU CAMP DES ZOUAVES.	51
FIGURE 17 : VERSION ACTUELLE DE PAGE D'ACCUEIL DU SITE WEB DU CAMP DES ZOUAVES.....	53
FIGURE 18 : EXEMPLE DE L'INTERFACE DE LA COLLECTION DE DOUILLES ET DE BALLES.	54
FIGURE 19 : PANEL REPRÉSENTATIF DES DIFFÉRENTES PLATEFORMES D'HÉBERGEMENT ET DE VISUALISATION 3D EN LIGNE.	66
FIGURE 20 : PANEL NON EXHAUSTIF DES VITRINES 3D UNIVERSITAIRES À L'INTERNATIONAL.	68
FIGURE 21 : TABLEAU DES USAGES DES DIFFÉRENTS FORMATS DE FICHIERS 3D.....	73

FIGURE 22 : TABLEAU DES DIFFÉRENTS BESOINS DE DIFFUSION DE MODÈLES 3D SELON DIFFÉRENTS PUBLICS.	74
FIGURE 23 : TABLEAU DES FORMATS LUS PAR 3DHOP.....	76
FIGURE 24 : TABLEAU DES FORMATS NÉCESSAIRES À SMITHSONIAN VOYAGER.....	77
FIGURE 25 : TABLEAU DES FORMATS INTÉGRÉS À POTREE	78
FIGURE 26 : TABLEAU RÉCAPITULATIF DES TROIS VISIONNEUSES SÉLECTIONNÉES.....	78

Table des annexes

ANNEXE 1 : CAPTURE D'ÉCRAN DE LA PAGE D'ACCUEIL DES COLLECTIONS 3D DU MUSÉE D'ARCHÉOLOGIE NATIONAL DE SAINT-GERMAIN-EN-LAYE.	100
ANNEXE 2 : PREMIÈRE VERSION DE LA PAGE D'ACCUEIL DU SITE WEB DU CAMP DES ZOUAVES.....	100
ANNEXE 3 : FICHE OBJET AVEC MÉTADONNÉES.....	101
ANNEXE 4 : GRAPHIQUE DES RÉPONSES EN LIEN AVEC LE DESIGN GRAPHIQUE.	101
ANNEXE 5 : GRAPHIQUE DES RÉSULTATS DU RETOUR DE FLUIDITÉ ET D'INTUITIVITÉ.....	102
ANNEXE 6 : GRAPHIQUE DES RÉPONSES EN LIEN AVEC LA QUALITÉ DES PHOTOGRAPHIES MUSÉALES.	102
ANNEXE 7 : GRAPHIQUE DES PUBLICS LES MIEUX DESSERVIS PAR LE SITE WEB.	103
ANNEXE 8 : GRAPHIQUE DES RÉPONSES EN LIEN AVEC LA COMPRÉHENSION AU TRAVERS DES MODÈLES 3D.....	103
ANNEXE 9 : GRAPHIQUE DES RÉPONSES EN LIEN AVEC LA PERTINENCE ENTRE PHOTOGRAPHIE, MODÈLE 3D ET DOCUMENTATION.	104
ANNEXE 10 : GRAPHIQUE DE LA COHÉRENCE DU SITE WEB AVEC D'AUTRES PLATEFORMES DE VALORISATION DE COLLECTIONS PATRIMONIALES	104
ANNEXE 11 : MODÈLE DE RESSOURCES MIS EN PLACE POUR LE CONSERVATOIRE 3D DE PARIS 1.	105
ANNEXE 12 : EXEMPLE D'ANNOTATIONS SUR UN PETIT OBJET DANS LA VISIONNEUSE SMITHSONIAN VOYAGER.	106
ANNEXE 13 : EXEMPLE D'ANNOTATION AU SEIN DE LA VISIONNEUSE 3DHOP.	106
ANNEXE 14 : EXEMPLE DE GÉOLOCALISATION DISPONIBLE DANS LES FONCTIONNALITÉS DE LA VISIONNEUSE POTREE.	107
ANNEXE 15 : CONVENTION DE STAGE N°1 : SERVICE RÉGIONALE ARCHÉOLOGIQUE D'ÎLE-DE-FRANCE.	108
ANNEXE 16 : CONVENTION DE STAGE N°2 : PARIS 1 PANTHÉON-SORBONNE.....	113
ANNEXE 17 : CURRICULUM VITAE.....	118

