



HAL
open science

La maquette numérique au service de la restitution archéologique et de la valorisation du patrimoine bâti

Alexandre Rétat

► **To cite this version:**

Alexandre Rétat. La maquette numérique au service de la restitution archéologique et de la valorisation du patrimoine bâti. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2023. dumas-04412611

HAL Id: dumas-04412611

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04412611>

Submitted on 23 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
ECOLE SUPERIEURE DES GEOMETRES ET TOPOGRAPHES

MEMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : Géomètre et Topographe

par

Alexandre RÉTAT

La maquette numérique au service de la restitution archéologique et de
la valorisation du patrimoine bâti

Soutenu le 07 septembre 2023

JURY

Monsieur Jean-Michel FOLLIN	Président du jury
Madame Anne BAUD	Maître de stage
Monsieur Jérémie ROBERT	Enseignant référent

Remerciements

Avant la présentation des résultats de ce travail de recherche, je tiens à remercier toutes les personnes qui y ont contribué.

Je tiens à remercier en premier lieu Charlotte GAILLARD et Anne BAUD pour m'avoir fait découvrir le monde de l'archéologie du bâti, pour leur disponibilité et plus généralement pour leur soutien apporté tout au long de ce travail.

Je remercie aussi Gérard CHARPENTIER pour ses conseils avisés en architecture et pour l'intérêt qu'il a porté à ce projet.

Je remercie également Anne FLAMMIN, Frédéric LETERLE et Amélie ROGER pour les échanges que nous avons eu autour de ce travail.

Je remercie ensuite mon professeur référent, Jeremy ROBERT, pour ses conseils et sa disponibilité.

Enfin je tiens à remercier ma famille pour m'avoir donné la curiosité et la rigueur qui m'ont permis de mener à bien ce travail préprofessionnel.

Glossaire

Cloître : Partie d'un monastère réservé aux moines/moniales et fermée par une enceinte

Monachisme : Mode de vie des moines et moniales

Mur pignon : Mur orthogonal au faitage dans un bâtiment à toiture à deux pans

Mur gouttereau : Mur parallèle au faitage dans un bâtiment et pouvant supporter une gouttière

Architecture simplifiée d'une église

(1) Nef / Vaisseau principal(e) : Dans une église de plan allongé, partie comprise entre la façade principale et la croisée du transept

(2) Transept : Nef transversale d'une église séparant la nef principale du chœur et donnant ainsi à l'édifice une forme de croix

(3) Cœur : Partie de l'église où se déroulent les cérémonies autour de l'autel et où se tiennent le clergé et les chantres qui participent à la célébration liturgique

(4) Abside : Espace arrondi formant l'extrémité orientale d'une église

(5) Absidiole : Espace arrondi de plus petite taille que l'abside servant souvent de chapelle secondaire

(6) Porche : Construction couverte devant le portail d'une église

(7) Bas-côtés / collatéraux : Nefs latérales situées de part et d'autre de la nef principale

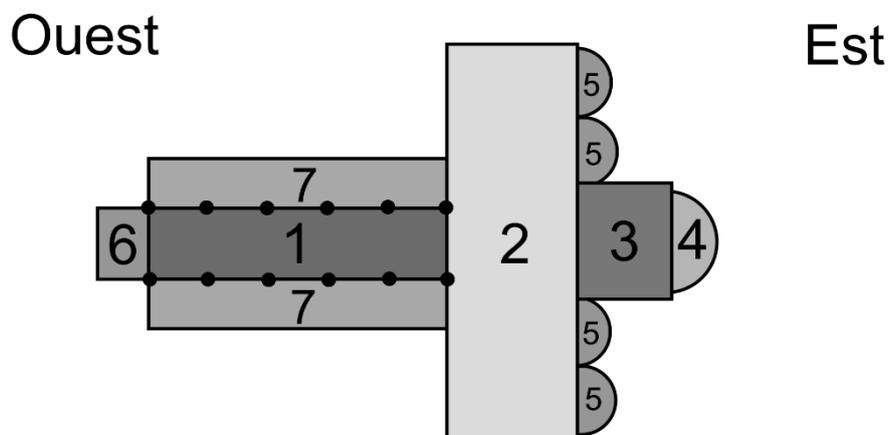


Figure 1 : Plan schématique d'une église

Tables des matières

Remerciements	2
Glossaire.....	3
Tables des matières.....	4
Introduction	6
I) Les fondamentaux de la restitution archéologique	8
I.1) Histoire de la restitution archéologique	8
I.2) La maquette numérique comme support de la restitution	10
I.2.1) Définition	10
I.2.2) Atout de la maquette numérique lors de sa conception.....	10
I.2.3) Finalités de la maquette numérique de restitution.....	11
I.2.3.1) Pour la recherche historique	11
I.2.3.2) Pour la valorisation du patrimoine.....	11
I.2.3.3) Pour la sauvegarde.....	12
I.2.3.4) Pour de la reconstruction	12
II) Les sources de la restitution archéologique du bâti.....	14
II.1) Travaux archéologiques	14
II.1.1) L'archéologie du bâti.....	14
II.1.2) L'analyse de matériaux	15
II.1.3) Le phasage.....	16
II.1.3.1) Carbone 14	16
II.1.3.2) Thermoluminescence.....	17
II.1.3.3) Archéomagnétisme	17
II.2) Sources historiques	18
II.2.1) Sources textuelles.....	18
II.2.2) Sources graphiques	18
II.3) Données topographiques.....	19
II.3.1) Archéologie et topographie, une histoire croisée.....	19
II.3.2) Vers une plus grande utilisation de la 3 ^{ème} dimension	20
II.3.2.1) Une donnée inhabituelle.....	21
II.3.2.2) Une donnée complexe à construire	21
III) Création d'une maquette numérique pour la restitution archéologique : application à l'abbaye de l'Île-Barbe.....	22
III.1) Contexte	22
III.1.1) Contexte topographique.....	22

III.1.2) Contexte historique	23
III.1.3) Contexte archéologique	24
III.2) Modélisation.....	25
III.2.1) Stratégie de modélisation.....	25
III.2.1.1) Le maillage de la numérisation	25
III.2.1.2) Le BIM.....	27
III.2.1.3) Choix final pour la restitution de l'abbaye de l'Île-Barbe	28
III.2.2) Quel niveau de détail pour quel niveau de connaissance	29
III.2.3) Église Notre-Dame	33
III.2.3.1) Présentation du site	33
III.2.3.2) Point d'intérêt – Le Scan-to-BIM	34
III.2.4) Prieuré Saint-André-et-Saint-Anne	35
III.2.4.1) Présentation du site	35
III.2.4.2) Point d'intérêt – Les charpentes.....	36
III.2.5) Chatelard.....	37
III.2.5.1) Présentation du site	37
III.2.5.2) Point d'intérêt – La maquette numérique comme outil de synthèse.....	37
III.2.6) Secteur Claustral	38
III.2.6.1) Présentation du site	38
III.2.6.2) Point d'intérêt – L'abbatiale St Martin et St Loup.....	39
III.2.7) Topographie de l'île.....	40
III.3) Texturation.....	40
III.3.1) Quelles méthodes pour un rendu réaliste.....	40
III.3.2) Banque de données	41
III.4) Bilan de la restitution de l'abbaye de l'Île-Barbe	42
III.4.1) La maquette numérique	42
III.4.2) Valorisation au grand public	43
Conclusion.....	44
Bibliographie.....	46
Table des annexes.....	49
Table des figures.....	58
Table des tableaux	59

Introduction

Le travail de recherche que ce document vise à synthétiser consiste en une réflexion scientifique sur les atouts de la maquette numérique et de l'environnement 3D dans le domaine de la restitution archéologique. Cette réflexion sera soutenue par une application sur l'abbaye de l'Île-Barbe, site historique remarquable de la métropole Lyonnaise.

Le terme de restitution peut évoquer de nombreux sujets. Afin de faciliter la compréhension de ce concept nous pouvons formuler sa définition comme la représentation graphique totale ou partielle d'un site, avec son environnement ou non, tel qu'on suppose qu'il était à un instant défini.

En archéologie, la restitution agit comme une synthèse des connaissances acquises d'un site, une présentation d'hypothèses fondées sur un processus scientifique rigoureux croisant de nombreux domaines tels que l'archéologie du bâti, l'architecture, l'archéométrie, la géomorphologie etc... Elle nourrit la réflexion scientifique par de nombreux aspects et agira comme vecteur de la transmission des connaissances du patrimoine historique. Lors de la conception et de l'analyse de restitutions, il faut donc obligatoirement garder en mémoire deux instants : celui que veut représenter la restitution et celui de la création de la restitution. Des études postérieures pourront en effet remettre fortement en question des hypothèses préalables et donc des choix de restitution. De plus, une restitution implique de la part de ses auteurs un ensemble de choix non nécessairement fondés sur des preuves matérielles mais qui peuvent être issus d'un exercice de comparaison. Le degré de véracité de la restitution doit donc être qualifiée par la justification de l'ensemble des choix pour ne pas tromper les destinataires de la restitution sur la connaissance réelle du site. On peut enfin confondre la notion de restitution archéologique avec la notion de reconstitution. La différence entre restitution et reconstitution intervient sur le mode de création d'une part et le support d'autre part. Le ministère de la culture et de la communication décrit la restitution comme basée sur des critères « de plus grande probabilité » (2013) quand la reconstitution se base nécessairement sur des preuves matérielles. De plus la reconstitution consiste en un objet matériel quand la restitution peut demeurer sur un support numérique ou imprimé. Néanmoins cette frontière est, dans les faits, souvent brouillée.

La réalisation d'une restitution est ordinairement le fruit de campagnes archéologiques et est donc confiée aux principaux acteurs de ces recherches. Néanmoins l'élévation d'un modèle 3D requerra d'associer une parfaite compréhension des données archéologiques et

historiques avec une relative maîtrise de l'architecture et de la géomatique. Pour cette raison, il est nécessaire pour réaliser un projet de restitution sur maquette numérique d'associer les compétences des archéologues avec celles d'un géomètre ou d'un architecte. Cette complémentarité permettra de résoudre les principales problématiques que le processus de restitution 3D mettra en évidence. Lors d'une restitution se posent en effet des questions d'ordre scientifique concernant l'agencement de pièces internes au bâti (croisement de charpente, dimensionnement de maçonnerie, ...) ou entre le bâti et la topographie du site. Le rôle du géomètre, ou de l'architecte, sera alors de pointer ces problèmes et de proposer des solutions pour les résoudre sans créer de nouvelles problématiques, cette fois d'ordre historique, quant à la cohérence de cette solution dans le contexte de la restitution. Qu'elles soient révélées par le processus de modélisation 3D ou issues de problématiques architecturales, ces questions historiques demandent pour être résolues une connaissance très importante du contexte spatio-temporel et thématique du site de la restitution, connaissance dont seuls les archéologues peuvent disposer.

Tout d'abord sera décrit l'état actuel de l'emploi de la maquette numérique dans le monde archéologique en revenant sur différents cas concrets d'utilisation et en cherchant à montrer les bénéfices de la 3^{ème} dimension sur les restitutions 2D. Ensuite seront abordées les différentes sources de la restitution archéologique. Enfin, il s'agira de décrire concrètement le processus de production de la maquette numérique historique notamment par le cas de l'abbaye de l'Île-Barbe.

I) Les fondamentaux de la restitution archéologique

I.1) Histoire de la restitution archéologique

Dans le domaine de la restitution, tout est donc une question de choix. Cela commence par le choix initial de l'instant de la représentation mais interviennent par la suite les nombreux choix moins évidents de représenter des éléments sans être scientifiquement sûr de leur présence, de leur forme ou de leur composition...

L'histoire de la restitution archéologique suit ainsi celle des avancées scientifiques d'analyse des matériaux et des artefacts. En effet plus il y a de preuves scientifiques matérielles, plus le choix de la représentation est justifié. Toutes ces méthodes d'analyse se retrouvent dans la discipline scientifique nommée archéométrie. Cette discipline, dont le nom est rentré peu à peu dans les mœurs depuis la création du journal « Archaeometry » en 1958 à l'Université d'Oxford, résulte de nombreux travaux de recherche développés au cours des XIXe et XXe siècles. Elle fournit aux archéologues des clés de compréhension du passé par des méthodes de datation absolue, d'analyse minéralogique, étude géophysique etc...

Dans le cadre de la restitution du patrimoine bâti, deux domaines intéressent en particulier les archéologues : la datation absolue et l'analyse de matériaux. Ils fournissent en effet des preuves scientifiques sur les éléments constitutifs du bâti et permettent ainsi une analyse fondée sur des critères fiables. L'ensemble de ces techniques permet de mieux comprendre comment évoluaient les sociétés du passé et ainsi participent de près ou de loin à la justification des choix de représentation. Nous rentrerons plus tard dans ce document sur le détail de ces méthodes d'analyse.

Si l'on peut appeler toute représentation d'un élément architectural une restitution, elle ne résulte pas nécessairement d'un processus scientifique de confrontations d'hypothèses. En ce sens, les premiers travaux de restitutions archéologiques qui sont parvenus jusqu'à nous concernent principalement le cas de Rome. En effet, à partir du XVe siècle, l'intérêt pour l'ère antique commence à croître dans les arts et la littérature. Les vestiges commencent à être protégés et leur valorisation devient une question publique. Exemple de cette volonté à la fois politique et culturelle, le pape Pie II rédige en 1462 une bulle interdisant la destruction et la dégradation des monuments antiques romains (CHEVALLIER Georgette, 2016). Une première restitution de la Rome antique a lieu en 1446 dans l'ouvrage « Roma instaurata » où l'auteur, Flavio Biondo, s'appuie sur ses recherches historiques et archéologiques pour décrire la forme des bâtiments romains dans l'antiquité. S'il reste textuel pour ses descriptions, des exemples

graphiques pourront être trouvés dans des ouvrages plus tardifs : les envois de Rome (PHILIPPE Sénéchal et al., 1988). Ces travaux sont l'œuvre des titulaires du prix de Rome et ainsi étudiants de l'école des beaux-arts de Rome sous l'égide de l'académie royale de France, et ont pour objet premier la restitution de monuments romains. Un exemple de ces travaux est le travail de Louis Boitte sur les Propylées d'Athènes (figure 2).



Figure 2 : Propylées, coupe longitudinale restaurée et état actuel, Louis Boitte

Parmi les types de restitutions nous trouvons des dessins, des coupes horizontales ou verticales ou encore des plans-reliefs. La plus célèbre d'entre elle est sans doute le plan de Rome de Paul Bigot, conçu entre 1900 et 1942 (figure 3). Long de 11m, large de 6m et composé de 102 pièces, il représente à l'échelle 1/400^e les 3 cinquièmes de Rome au début du IV^e siècle.

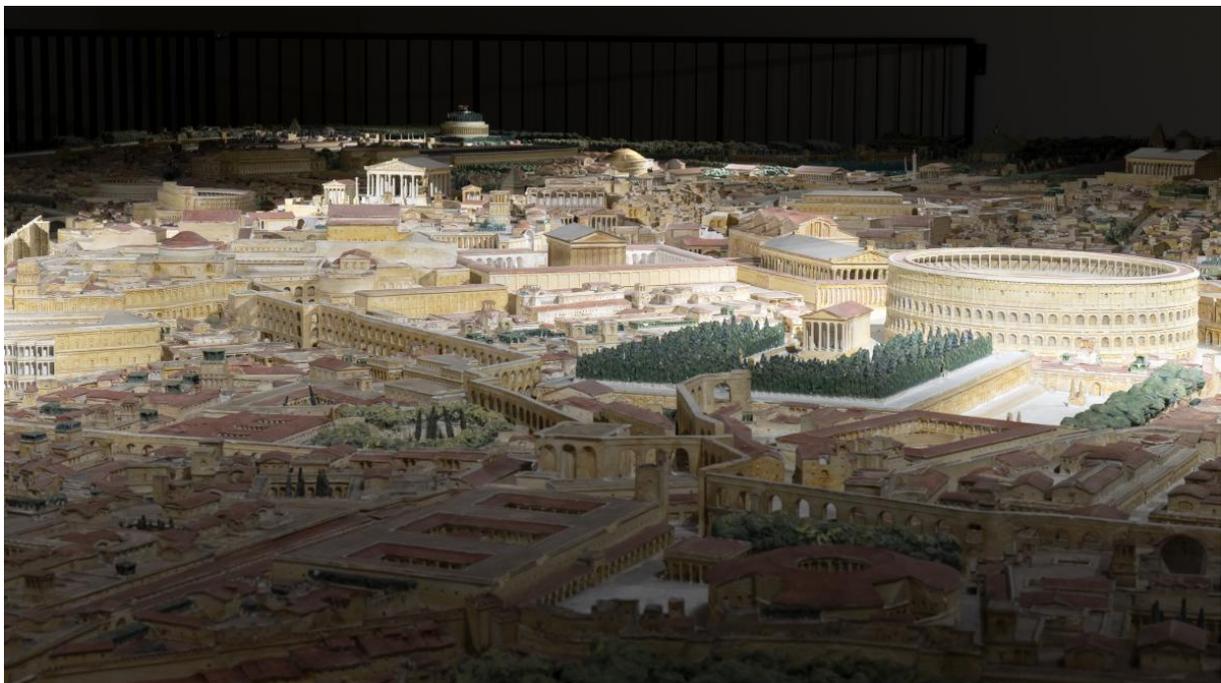


Figure 3 : Plan de Rome, Paul Bigot

Ce plan relief, classé au titre des monuments historiques depuis 1978, et son double numérique élaboré par l'université de Caen, sont aujourd'hui des modèles majeurs pour la compréhension de la Rome antique.

I.2) La maquette numérique comme support de la restitution

I.2.1) Définition

Conçue en 2 ou 3 dimensions, la restitution peut revêtir plusieurs formes. Plus loin dans le passé comme dans les envois de Rome, de nombreux architectes et artistes ont fourni des vues de bâtiments, villes, ..., réalisé sous forme de gravures, de dessins, de maquettes... Cela avait davantage une vocation artistique que scientifique. Aujourd'hui, la restitution se doit d'avoir un aspect davantage technique. Les archéologues vont donc chercher à effectuer des rendus objectifs et à l'échelle sous forme de coupes, de plans, jusqu'à la maquette numérique. Néanmoins celle-ci n'est pas encore le support privilégié des archéologues comme nous le prouve le fait qu'elle soit si peu mentionnée dans le rapport « Idée et débat de la restitution archéologique » du centre de monuments nationaux publié en 2014.

Mais comment peut être définie une maquette numérique ? Une maquette numérique est une représentation d'un élément ou d'un ensemble d'éléments sur ordinateur. Elle peut être réalisée pour numériser ou modéliser un objet ou un bâtiment autant que la topographie d'un lieu. Pour cette étude, nous nous intéressons exclusivement à la représentation en 3 dimensions de bâtiments. Nous nous appuyerons sur divers processus de conception que nous aborderons en partie III.

I.2.2) Atout de la maquette numérique lors de sa conception

Travailler en trois dimensions plutôt qu'en deux apporte son lot d'atouts lors de la phase de création de la maquette. En effet, certaines problématiques peuvent être soulevées lors de cette étape simplement par le fait que la visualisation dans l'espace offre une meilleure représentation du sujet. Ces problématiques peuvent être d'ordre architectural ou historique. Un problème architectural peut concerner l'agencement de maçonnerie entre elles, la position ou la forme d'une charpente par rapport aux maçonneries relevées etc... Un problème historique peut concerner un élément incohérent par sa présence, sa forme ou sa constitution dans son contexte spatial, temporel ou thématique.

I.2.3) Finalités de la maquette numérique de restitution

I.2.3.1) Pour la recherche historique

La maquette numérique, en tant que restitution, porte l'avantage d'être la synthèse d'hypothèses issues de nombreuses thématiques architecturales telles que celles de la maçonnerie mais aussi de la charpente, du couvrement, etc... De nombreux acteurs peuvent ainsi trouver un intérêt à l'étude d'une maquette numérique. Pour ce même principe, la maquette numérique peut servir dans un cadre d'enseignement.

Dans un contexte de recherche scientifique, la maquette numérique permet aussi d'analyser les structures et de faire subir numériquement au sujet de l'étude certains types de contraintes qu'il est difficile de simuler sur l'objet en lui-même ou sur une maquette physique. Ces outils numériques, initialement prévus pour l'analyse de bâti pré-construction, peuvent être appliqués de la même façon aux bâtis anciens. Peut être ainsi quantifié par exemple le volume des matériaux nécessaires à la construction. Cela communiquera des informations aux archéologues pour leur permettre de retracer les matériaux, de leur extraction à leur transport. Peut-être aussi expérimenté et mesuré l'impact d'aléas climatiques tels que le vent ou la pluie. En connaissant les divers événements de cet ordre que le bâtiment a pu subir, cela offrira des pistes aux archéologues pour expliquer le pourquoi de certaines phases de reconstruction. Néanmoins pour que les résultats soient réellement exploitables, la maquette devra être extrêmement renseignée du point de vue des volumes et des matériaux.

I.2.3.2) Pour la valorisation du patrimoine

Dans un objectif de diffusion auprès du plus grand nombre, la maquette numérique est un outil pédagogique à plusieurs points de vue. D'une part elle est davantage manipulable qu'une donnée en 2 dimensions et permet à n'importe qui de s'y déplacer comme il le souhaite. Lorsqu'il peut être difficile de visualiser un bâtiment ou son intégration dans un environnement uniquement avec des données 2D, une maquette 3D permet d'offrir directement une vision réaliste à la personne qui la regarde. De plus, si l'outil et les modèles réalisés le permettent, la possibilité de proposer l'évolution chronologique d'un même bâtiment au cours de son histoire offre une immersion incomparable par rapport à des données planaires. Cette immersion peut être encore accentuée avec des outils de visite virtuelle. C'est par exemple le cas du projet Gunzo développé par l'École nationale supérieure des Arts et Métiers de Cluny, portant sur la visite de l'ancienne abbaye en réalité augmentée. Enfin, la maquette numérique est pédagogique dans le sens où le niveau de détail peut être réduit ou centré sur certains points pour s'adapter au public cible.

Il existe de nombreux canaux de diffusion d'une donnée 3D pour le grand public, toujours dans une idée de valorisation. Elle peut être présentée sur des tablettes en réalité augmentée comme à l'abbaye de Cluny ou au château de Chambord, imprimée en 3 dimensions pour revenir sur un support physique ou encore être utilisée de manière indirecte par la création de vidéo depuis la maquette. En tant que miroir du patrimoine, elle participe ainsi à la diffusion de la culture auprès du plus grand nombre à travers des supports variés.

I.2.3.3) Pour la sauvegarde

Certains sites historiques sont aujourd'hui partiellement ou totalement inaccessibles. Ce procédé peut être choisi si le site risque de subir des dégradations (à l'image de la grotte de Lascaux) mais cela peut simplement être dû au fait de sa destruction. Or, si le site originel devient peu à peu inconnu du grand public pour ces différentes raisons, son intérêt patrimonial peut rapidement tomber dans l'oubli. La restitution permet que celui-ci puisse toujours être perçu par le grand public.

En 2001, le monde a assisté impuissant à la destruction des deux statues géantes des bouddhas de Bamiyan en Afghanistan par les talibans. En 2015 les cités antiques de Ninive en Irak et de Palmyre en Syrie sont à leur tour détruites par l'État Islamique. Aussitôt, de nombreuses missions à vocation de préservation ont vu le jour et de nombreux sites culturels ont aujourd'hui été numérisés, et pour certains modélisés, afin de créer une archive du passé en cas de démolition (COLOMÈS Michel, 2015). Nous pouvons citer pour l'exemple l'initiative « Syrian Heritage » de la startup Iconem s'assurant depuis 2015 de la numérisation de nombreux éléments du patrimoine syrien.

I.2.3.4) Pour de la reconstruction

Enfin, la restitution peut être la première étape de divers processus visant à recréer l'objet de l'étude par une reconstruction sur place ou en réplique. Dans la pratique, la plupart des reconstructions se base sur une restitution elle-même créée avec une numérisation. La quantité de preuves matérielles ne laissera ainsi que peu de place aux doutes sur la présence, la forme et la composition des éléments à reconstituer. Pour illustrer cette pratique nous pouvons citer l'exemple de Notre-Dame de Paris et de la grotte Chauvet.

Concernant les reconstructions in-situ, la reconstruction en cours de la cathédrale Notre-Dame de Paris après l'incendie du 15 avril 2019 est en effet un bon exemple car elle utilise des données numériques restituées de l'édifice. Une grande partie de ces données proviennent

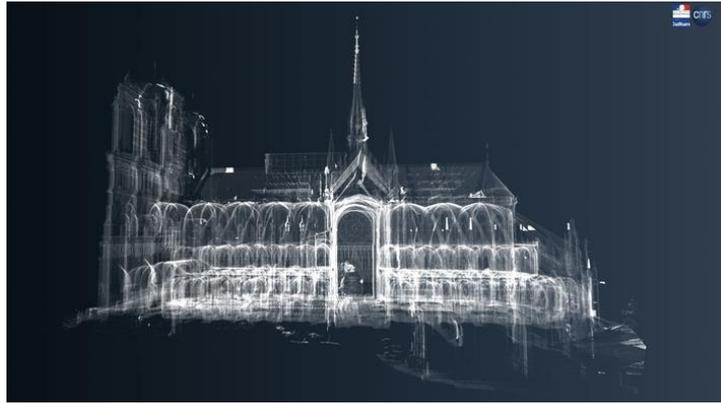


Figure 4 : Nuage de points de Notre-Dame de Paris (CNRS)

d'une campagne photogrammétrique d'Andrew Tallon (Vassar College) (SANDRON Dany et TALLON Andrew, 2019) réalisée entre 2006 et 2012 soit quelques années avant l'incendie. Elle fut depuis complétée par diverses missions menées avant et après l'incendie. Toutes ces données ont permis la réalisation par le CNRS d'un Système d'Information Monumentale (SIM) ainsi composé de données lasergrammétriques et photogrammétriques (figure 4). Il participe à l'idée de la création d'un jumeau numérique de la cathédrale, avant et après l'incendie, ayant pour but de fournir aux bâtisseurs d'aujourd'hui des clefs de compréhension pour la reconstruction.

Un autre exemple de l'utilisation de la restitution pour la reconstruction mais cette fois en fac similé est la grotte Chauvet en Ardèche. Ici l'idée de la restitution prend tout son sens en étant le vecteur de la préservation et de la valorisation du patrimoine. La grotte Chauvet est un

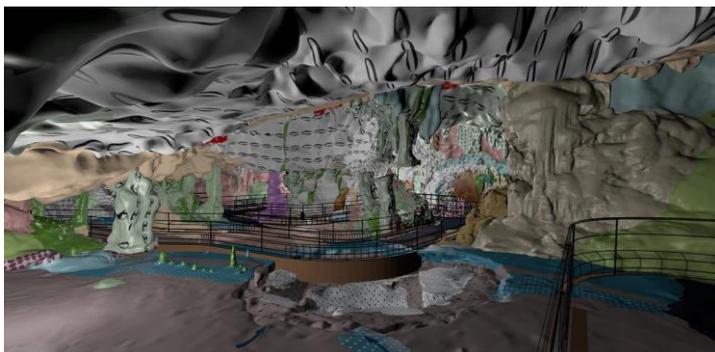


Figure 5 : Modèle 3D de la grotte Chauvet avec des textures géologiques

site exceptionnellement orné il y a 36.000 ans de centaines de représentations d'animaux et autres gravures et sculptures. Découverte en 1994, elle ne fut jamais ouverte au public en raison de la menace qu'implique la présence nombreuse d'individus. En effet il a été relevé à Lascaux des dégradations comme

l'acidification des parois liée à une sur-présence de dioxyde de carbone, l'apparition de moisissures, etc... Afin de valoriser au mieux ce lieu remarquable, la question de la création d'une réplique fut posée, après l'exemple concluant de Lascaux II en 1983. Pour cela une restitution numérique fut faite par lasergrammétrie afin de rendre un modèle à la bonne échelle du site. Néanmoins, une réplique à l'échelle 1/1 ne fut pas choisie pour des raisons à la fois

techniques et financières. L'intérêt d'une réplique numérique fut alors qu'une anamorphose du lieu a pu être faite, c'est-à-dire un modèle déformé du site original dans un objectif de réduction de l'espace mais tout en conservant « *l'apparence des volumes originaux, l'esprit de la grotte, de ses paysages souterrains et la mise en scène des parois ornées* » (Benjamin Sadier pour le journal du CNRS – 11.02.2014) (figure 5). La grotte Chauvet II fut ainsi réalisée à partir de ce nouveau modèle et fut ouverte au grand public en 2015.

Dans ces deux cas, la maquette numérique fut utilisée comme un outil vers la reconstruction, ce qui n'est qu'un des moyens, et probablement un des plus complexes, d'utiliser une restitution.

II) Les sources de la restitution archéologique du bâti

II.1) Travaux archéologiques

A la suite de fouilles archéologiques et de campagnes de numérisation s'y rapportant, différents types de rendus seront créés et pourront être utilisés lors d'une restitution. Nous verrons quels sont ces rendus ainsi que les méthodes employées à leur réalisation.

II.1.1) L'archéologie du bâti

L'archéologie du bâti est un domaine de l'archéologie qui s'intéresse aux évolutions des structures et des techniques de construction. Pour cela elle se penche d'une part sur les bâtis existants en tentant de déterminer les différentes périodes de construction et les remaniements mais aussi l'analyse de la construction (choix de matériaux, mise en œuvre, approvisionnement, organisation du chantier). D'autre part, elle s'appuie sur toutes les sources textuelles, iconographiques et planimétriques se rattachant à la construction. L'archéologie du bâti peut s'appuyer sur un autre pan de l'archéologie : l'archéométrie. L'archéométrie est une branche de l'archéologie qui la rapproche des sciences dites « dures » par l'exploitation de données physiques. La finalité de ces travaux est une restitution du bâti aujourd'hui ou à travers les époques par la compréhension de l'évolution de sa structure.

En vue de ces analyses, un archéologue du bâti doit donc pouvoir se fier à des relevés. Avant le rapide développement des technologies de levé tridimensionnel, ceux-ci se faisaient uniquement à la main. Manuscrit, le relevé est alors un outil d'analyse sur lequel l'auteur transcrit ce qu'il observe sur le terrain. Si les relevés se font aujourd'hui de plus en plus de manière numérique (photogrammétrie, lasergrammétrie), cette démarche purement objective et fondée sur la volonté de la meilleure précision ne doit pas être perçue comme la solution optimale du relevé. En effet la subjectivité du dessin, par la sélection, de la part de l'auteur des

observations retranscrites, est une donnée totalement perdue avec un relevé tridimensionnel automatisé. Cette dualité anime alors un débat qu'Andreas HARTMANN-VIRNICH vient trancher en soulignant que le relevé archéologique traditionnel comme le moulage virtuel sont « l'un comme l'autre, indispensables et indissociables » (2018, p4).

Parmi le type de donnée au cœur de ce débat se trouve le relevé dit « pierre-à-pierre ». Ce relevé consiste à dessiner une portion de bâtiment avec toutes les pierres de maçonnerie le constituant (figure 6, annexe 1)..

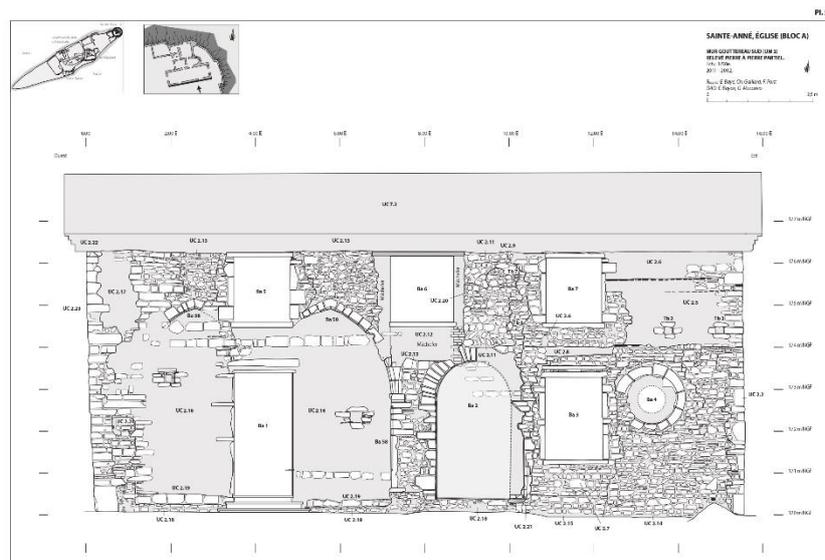


Figure 6 : Relevé pierre-à-pierre du mur sud de l'ancienne église Sainte-Anne sur l'Île-Barbe à Lyon

II.1.2) L'analyse de matériaux

Afin de comprendre au mieux la chronologie relative du bâti, les archéologues vont s'intéresser aux matériaux utilisés lors de son élévation. Pour cela ils vont réaliser des relevés pierre-à-pierre des différents murs du bâti, dans lesquelles va être précisé, pour chacune des pierres, son matériau (annexe 2). Ces relevés seront une aide précieuse afin d'analyser les étapes de construction et en dégager une chronologie. Afin de connaître la nature de ces matériaux, leur formation en matière géologique ainsi que leur connaissance des habitudes de constructions du secteur d'étude leur suffisent la plupart du temps. En cas de doute, ils peuvent effectuer une analyse par microscope jusqu'à l'analyse par spectrométrie de masse.

La connaissance de ces matériaux offre aussi une aide dans la chronologie absolue du bâti. En effet, le réseau d'extraction et d'acheminement de pierre peut être connu et ainsi permettre d'affiner la datation du bâti. D'autres sites peuvent aussi avoir été conçus selon les

mêmes méthodes et avec les mêmes matériaux, éventuellement du même fournisseur. Le travail de comparaison peut ainsi se justifier et l'analyse conjointe de ces bâtis peut permettre de formuler de nouvelles hypothèses de restitutions.

II.1.3) Le phasage

Le phasage consiste à diviser les maçonneries en fonction des résultats de datations sur les mortiers, les briques, etc... Sont ainsi utilisées des méthodes de datations dites absolues ou relatives, absolues si elles offrent une estimation directe de l'âge d'un échantillon (par exemple avec l'an 0 en référence) et relatives si elles donnent une estimation de la chronologie d'évènements autour de plusieurs échantillons. Il existe aujourd'hui différentes méthodes selon l'élément à dater et sa datation approximative. Étant un outil essentiel à la réalisation d'une restitution, intéressons-nous à quelques méthodes de datations absolues avec leurs limites en archéologie du bâti. En annexe 3 figure le phasage de murs sur leur relevé pierre-à-pierre. Le fonctionnement de ces méthodes de datation est brièvement développé en annexe 4.

II.1.3.1) Carbone 14

La plus courante et la plus populaire est la méthode dite « Carbone 14 ». Cette méthode, bien que très employée, présente des limites importantes. La première limite est la nature des échantillons possibles à analyser, c'est-à-dire ceux qui sont capables d'assimiler du carbone 14. Cela comprend quasi-uniquement la matière organique. En effet les organismes vivants captent le carbone 14 au cours de leur vie sous forme de dioxyde de carbone. L'âge déterminé par cette méthode sera ainsi celui de la fin de vie de l'organisme. Est donc exclue la matière minérale d'une analyse au C14. Néanmoins il est possible d'obtenir des informations de manière détournée, en déterminant l'âge de matière organique contenue dans une roche telles que les coquillages ou fossiles.

La seconde limite est la période possible de datation. En effet une datation fiable par carbone 14 chute au-delà d'une certaine durée estimée à 50.000 ans pour plusieurs raisons. D'une part la quantité de C14 décroît dans le temps et peut devenir difficilement mesurable. D'autre part la connaissance de la production de C14 par l'atmosphère est limitée, car elle résulte d'une comparaison entre « l'âge carbone 14 » et l'âge réel, connu par une méthode différente, de nombreux échantillons.

Enfin la dernière limite vient du fait d'erreurs dues à d'éventuelles contaminations de la matière. En effet une matière organique peut-être contaminée par des matières carbonées

avoisinent, faussant ainsi la mesure. Ce risque est évidemment amplifié avec le temps rendant encore de moins en moins fiable la datation carbone 14.

Dans l'analyse du bâti, des datations carbone 14 sont principalement effectuées sur des charbons conservés dans les mortiers et issus du procédé de fabrication de la chaux. Des difficultés peuvent néanmoins advenir du fait du caractère parfois très résiduel des charbons. Il y a de plus un risque que le charbon analysé ait été prélevé en même temps que les sables au moment de la fabrication du mortier, d'où la nécessité de multiplier les datations pour avoir une date fiable.

II.1.3.2) Thermoluminescence

La méthode de datation par thermoluminescence comme son nom l'indique consiste à mesurer la lumière émise par une roche lorsque celle-ci est chauffée (GUIBERT Pierre, 2019).

Cette méthode a de nombreux avantages tels que celui de mesurer des âges de plusieurs centaines de milliers d'années ou celui d'être applicable à des éléments dont il n'est pas possible de déterminer l'âge par datation C14. Il s'agit néanmoins aussi d'une limite. Les éléments datables par cette méthode sont divers cristaux comme le quartz, les feldspaths ou la fluorite, contenue dans divers matériaux comme les céramiques, la brique, les verres ou divers sédiments. Une autre limite est la possibilité d'erreur de datation en cas par exemple d'exposition à une source radioactive ou à une forte source de chaleur. Enfin cette méthode est plus difficile à appliquer d'un point de vue pratique car elle exige davantage de matériel et de quantité d'échantillon que la méthode C14.

Pour l'archéologie du bâti, la datation par thermoluminescence est limitée car elle se heurte au possible réemploi des matériaux.

II.1.3.3) Archéomagnétisme

L'archéomagnétisme est une méthode relativement simple dans sa théorie, comparée aux deux précédentes, mais elle possède néanmoins des limites. Son principe repose sur la mesure du champ magnétique de l'élément donc sa première limite est que la méthode est utilisable uniquement sur les matériaux ferromagnétiques ayant été chauffés au-delà de la température de Curie, ce qui peut être par exemple le cas de la brique. De plus le matériau ne doit pas avoir subi des variations de son champ par un champ magnétique externe. Enfin il est nécessaire d'avoir une très bonne connaissance de l'évolution du champ magnétique terrestre, or ce n'est pas le cas après une certaine période. Cette méthode de datation est donc limitée à environ 10.000 ans.

Il existe enfin de nombreuses méthodes de datation plus rares ou plus spécifiques telles que d'autres méthodes de radiodatation (potassium-argon, plomb-uranium, etc...), la méthode de datation par résonance paramagnétique électronique pour certains minéraux ou la dendrochronologie pour les arbres, très utilisée dans l'analyse du bâti pour dater les bois de charpentes, des planchers etc...

Quelle que soit la méthode de datation, celle-ci est simplement une méthode intégrée dans un programme de recherche. Elle doit donc être précédée d'une réflexion scientifique quant aux éléments à analyser et suivie d'une interprétation justifiée des résultats afin de servir l'analyse générale du bâti.

II.2) Sources historiques

II.2.1) Sources textuelles

En France, l'écriture s'est développée à partir de la fin de l'antiquité particulièrement avec le monachisme. La rédaction et l'archivage des documents étaient une mission majeure pour de nombreux monastères si bien qu'il s'agit encore aujourd'hui d'une source importante de documents anciens. Tout document évoquant le site de l'étude peut intéresser les acteurs de la recherche dans l'objectif de comprendre au mieux l'environnement du site au cours de l'Histoire. Néanmoins, pour l'exercice de la restitution, les archéologues du bâti vont particulièrement s'intéresser aux documents renseignant, parfois avec des mesures, sur l'architecture du bâtiment. Il peut s'agir de facture d'artisans, de procès-verbaux de visites...

II.2.2) Sources graphiques

Au cours du Moyen-Age, moins développé dans le monde religieux que l'écriture, le dessin servait principalement à illustrer des textes : iconographie, enluminures... Si des formes d'arts naturalistes nous sont parvenues depuis l'antiquité par des fresques ou des mosaïques, cette tendance a été particulièrement redécouverte au début de la renaissance par des artistes comme Raphaël ou Léonard de Vinci. Or, la représentation de la vie et notamment des paysages est ce qui intéresse particulièrement les archéologues. Néanmoins, cette donnée doit être prise avec beaucoup de réserve. En effet, afin de dépeindre les éléments du paysage qu'il souhaite, l'artiste peut être tenté de jouer sur les perspectives et les dimensions en s'éloignant par le fait même de la réalité. Au-delà de l'aspect purement géométrique, l'intérêt de ces représentations

est de confirmer ou d'infirmer la présence d'éléments. L'estimation de leur dimensionnement sera issue d'une comparaison entre plusieurs documents, les relevés archéologiques et la topographie.

De manière non exhaustive, les illustrations anciennes retrouvées peuvent être des dessins au fusain, au crayon, de la peinture, de la gravure sur cuivre, des estampes...

II.3) Données topographiques

II.3.1) Archéologie et topographie, une histoire croisée

L'archéologie et la topographie ont une histoire croisée. L'histoire de la topographie et in fine de la cartographie est difficilement datable dans l'histoire de l'humanité. Parmi les premières données cartographiques nous pouvons citer la carte de Bedolina (figure 7), une roche sculptée représentant des villages, des routes et des cours d'eau et estimée à la fin de l'âge de Bronze (BROCARD Marlène, 2005). Si à cette époque cette donnée devait être utile pour s'orienter et se déplacer, elle joue un rôle tout à fait différent aujourd'hui. Il en va de même pour toutes les données cartographiques retrouvées. Si beaucoup ne peuvent plus être utilisées pour leur fonction primitive en raison de l'évolution naturelle de la topographie du lieu, elles retrouvent une nouvelle raison d'exister en permettant une meilleure compréhension de l'évolution de nos territoires. Elles agissent ainsi comme un témoin du passé et offrent des clés, notamment aux archéologues, pour mieux appréhender l'évolution du commerce, de l'urbanisme, de l'agriculture, etc... Analyser les cartes anciennes pour appréhender les dynamiques de peuplement et de structuration des territoires est la mission de la discipline nommée « archéo-géographie ».

Figure 7 : Carte de Bedolina



Ainsi pour leurs recherches, les archéologues utilisent tout autant des données cartographiques et des mesures topographiques anciennes que modernes, dans un objectif de comparaison.

Au XIXème siècle voit le jour une technologie qui révolutionnera de nombreux domaines : la photographie. Certes il existait déjà des représentations graphiques de la réalité comme bien évidemment l'art pictural, les gravures, etc... mais aucune ne pouvait se targuer de s'affranchir du regard de son créateur. Pour les archéologues, l'analyse de ces données devait se faire dans le prisme de la subjectivité de l'artiste quand la photographie permet de figer une représentation objective de la réalité.

Au cours du XIX^{ème} et du XX^{ème} siècle, développée notamment par Aimé Laussedat, la science de la photogrammétrie va permettre une utilisation de la donnée photographique pour la mesure. L'avènement de l'informatique permettra de démocratiser le processus et remplacera progressivement jusqu'à aujourd'hui certains relevés effectués lors de fouilles archéologiques. C'est le cas par exemple du relevé pierre-à-pierre. Néanmoins ce type de relevé peut-être particulièrement difficile à réaliser, selon le type de relevé (surfaces courbes, difficulté de poser un carroyage...). La photogrammétrie permet, en plus de raccourcir le temps nécessaire sur le terrain, de s'assurer de la qualité métrique du levé. La création d'un relevé pierre-à-pierre par photogrammétrie résulte d'un processus assez complexe dans sa théorie. Son principe est la prise de photographies rapprochées autour d'un objet de tel sorte qu'il y ait une grande zone commune entre deux clichés. Par traitement d'images, des points communs entre différentes photographies vont être calculés et en connaissant les caractéristiques de la caméra employée il sera possible de connaître les coordonnées de ces points dans l'espace. Une fois ces étapes effectuées, il est possible de tirer de ce nuage de points une orthophotographie, c'est-à-dire une image reprojétée de la zone d'étude où il est possible d'effectuer des mesures. Depuis ces images, sont alors réalisés des relevés pierre-à-pierre respectant fidèlement les dimensions.

Il est intéressant de noter que depuis les années 2005-2010, la technologie du scanner 3D se développe énormément. Par rapport à des relevés photogrammétriques, il s'agit d'un investissement encore très coûteux aujourd'hui mais la nature du résultat est la même (nuage de points puis orthoimages) pour un traitement plus fiable et moins fastidieux. Il faut cependant préciser qu'en comparaison avec la méthode photogrammétrique la précision du rendu peut-être rapidement détériorée à mesure que l'on s'éloigne de l'objet mais la rapidité d'exécution permettant d'effectuer des relevés à bien plus vaste échelle, n'est pas négligeable.

Toujours est-il que ce sont ces orthoimages, réalisées par l'une ou l'autre des méthodes citées précédemment, qui intéressent particulièrement les archéologues.

Ainsi, les archéologues effectuent aujourd'hui des relevés appartenant aux domaines de la 3D. Cependant si des nuages de points 3D sont créés, ils ne seront majoritairement exploités que pour revenir sur des données 2D : les orthoimages. La 3D est donc davantage un outil qu'une finalité.

II.3.2) Vers une plus grande utilisation de la 3^{ème} dimension

Mais alors comment expliquer que la donnée 3D ne soit pas davantage mise à profit ? Cela peut provenir de deux points.

II.3.2.1) Une donnée inhabituelle

La documentation historique s'est faite de manière pratique principalement par des données planaires. S'il a toujours existé des maquettes de bâtiments ou de territoires, nous pouvons par exemple penser aux plans reliefs des fortifications du maréchal Vauban avec pour exemple le plan relief du fort de Besançon (figure 8), leur copie et leur archivage étaient bien évidemment difficiles.

La recherche historique s'est donc très logiquement tournée vers la donnée 2D, bien plus nombreuse, plus simple d'analyse, et davantage publiable et reproductible.

Néanmoins l'ère de l'informatique va rebattre les cartes en permettant une modélisation,



Figure 8 : Plan relief du fort de Besançon

un archivage et une transmission largement accélérés de la donnée 3D. Toutes ces données restent bien plus lourdes à traiter et à stocker que la donnée 2D mais les technologies dans ce domaine évoluent rapidement.

II.3.2.2) Une donnée complexe à construire

Avant l'utilisation de la donnée 3D dans un cadre de recherche, celle-ci doit être créée. Elle peut se baser sur une numérisation, comme évoquée en partie II.2.1, mais cela n'est pas le cas dès lors que le bâtiment est détruit ou inaccessible.

Si la donnée 3D se base sur une numérisation, les recherches historiques s'arrêtent généralement au nuage de points de la zone d'étude. Or celui-ci est très difficile d'interprétation car sa lisibilité est limitée. Pour améliorer cela, il convient de passer d'un nuage de points à un modèle 3D, c'est-à-dire un modèle constitué de faces. Il existe différentes méthodes pour ce faire, dépendant de la qualité recherchée du modèle, du temps alloué au traitement, de la nature de l'exploitation et enfin du public cible mais toutes ces méthodes ont une particularité : elles nécessitent une formation complète. Cette complexité dans la modélisation 3D est encore plus importante lorsque celle-ci ne se base pas sur une numérisation. La donnée 3D est en effet une donnée lourde et ainsi longue à exploiter, les logiciels de traitements sont pour la plupart

onéreux et ne sont adaptés qu'à certains type de traitement et enfin les capacités informatiques requises ne sont pas celles d'un poste « classique ».

Pour toutes ces raisons, le traitement de la donnée 3D est un investissement lourd d'un point de vue matériel mais aussi humain.

Aujourd'hui, de nombreux laboratoires de recherches cherchent à se doter de matériel et d'opérateurs de la numérisation et de la modélisation 3D. Si le potentiel de telles données n'est pas encore poussé à son maximum, l'intérêt de la ressource en 3 dimensions tend à être mieux perçue et il ne reste qu'à une démocratisation de l'acquisition et de la modélisation 3D de finir ce travail.

III) Création d'une maquette numérique pour la restitution archéologique : application à l'abbaye de l'Île-Barbe

Afin d'étudier les techniques modernes de création d'une maquette numérique pour un projet concret, ce travail de recherche a été centré sur un site remarquable : l'abbaye de l'Île Barbe. Aidé par plusieurs travaux universitaires et les recherches menées par le Projet Collectif de Recherche (PCR) de l'Île Barbe, la restitution archéologique de cette abbaye pourra se fonder sur de nombreuses sources et servira, à terme, non seulement au public, mais principalement comme le support et la synthèse des travaux de recherche antérieurs.

III.1) Contexte

III.1.1) Contexte topographique

L'Île-Barbe est une île située sur la Saône, anciennement rattachée à la commune de Saint-Rambert et depuis 1963 à celle de Lyon (9^{ème} arrondissement). Elle est située à 9km en amont du centre-ville, juxte au nord la commune de St-Cyr-au-Mont-d'Or et à l'est la commune de Caluire-et-Cuire (figure 9). Elle est reliée au bord de la Saône par un pont suspendu construit en 1827 au niveau de la pointe Sud.

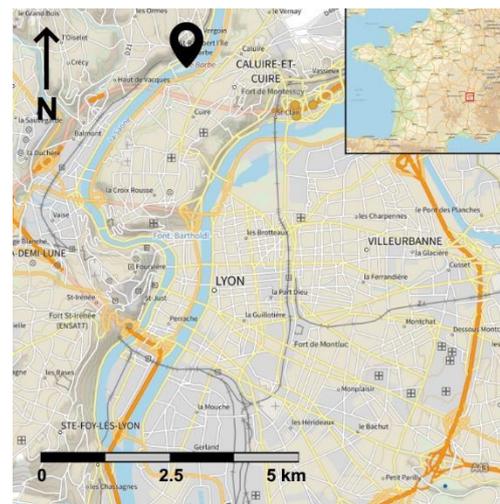


Figure 9 : Situation de l'Île-Barbe à Lyon

L'Île-Barbe est longue de 570m, large d'au maximum 120m soit une surface de 4.5ha (figure 10), dans une orientation nord-est/sud-ouest, tout comme la rivière qui se courbe à cet endroit. Elle coupe la Saône en deux bras large de 50m au plus fin.

L'Île-Barbe est constituée principalement de gneiss, une roche métamorphique, dans laquelle s'ancrent les fondations de nombreuses structures. La majorité de l'île se situe entre 166 et 171m NGF alors que le niveau de la Saône avoisine aujourd'hui les 164m NGF. A l'est se trouve un promontoire culminant à 180m NGF. L'urbanisme actuel de l'Île-Barbe s'étend exclusivement sur la partie est de l'île, aujourd'hui entièrement privatisée. La zone ouest, plus basse, est davantage susceptible de subir des inondations. Autour du chemin du bas du port se retrouve un parc et une aire de jeux.

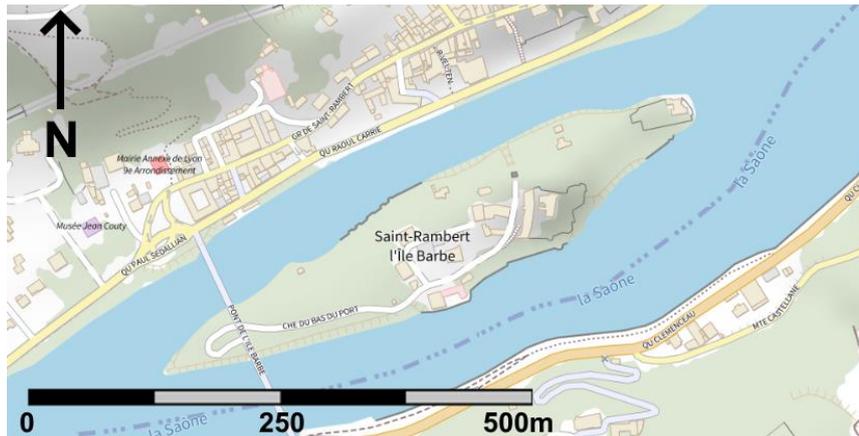


Figure 10 : Plan IGN de l'Île-Barbe

III.1.2) Contexte historique

Connue dans les sources depuis le début du Ve siècle, l'abbaye est sans doute fondée à la fin de l'Antiquité tardive, issue ainsi de la première vague d'implantation monastique en Gaule. Or, les travaux récents d'Alain DUBREUCQ ont montré l'importance de la ville de Lyon dans les réseaux monastiques du haut Moyen Âge, jouant le rôle de relais et de diffusion dans les courants en vigueur – notamment lérinien et martinien : l'Île-Barbe participe pleinement à ce jeu d'influences. La réforme carolingienne et l'arrivée de l'évêque Leidrade à Lyon marquent un tournant dans l'histoire du monastère. Restauré matériellement par l'évêque, il suit la règle bénédictine de manière certaine à partir de 816. M. RUBELLIN a souligné le statut tout particulier qu'occupait alors le monastère dans le diocèse, comme en témoigne l'octroi de privilèges et d'immunités par les souverains carolingiens dès 815.

Le monastère demeure particulièrement important durant les XIe-XIIIe siècles, développant et consolidant un patrimoine foncier réparti sur trois grandes zones géographiques – la Dombes, le Forez et la Provence. En outre, à de prestigieuses reliques, s'adjoint un pèlerinage marial attesté par l'archéologie et les sources à partir du XIe siècle, qui occupe une place croissante dans la région.

À partir du milieu du XIIIe siècle, de nombreuses réformes initiées par l'abbé Girin restructurent le monastère – réduction du nombre de moines, suppression et réunion de charges

comme celle de l'hôtelier ou du communier – jusqu'à aboutir à la mise en place de la commende au XV^e siècle, puis à la sécularisation de l'établissement en 1551. Devenue collégiale, l'établissement subit d'importantes destructions lors des Guerres de Religion en 1562, et les chanoines reconstruisent donc en partie les bâtiments. Par ailleurs, l'ouverture de la clôture favorise le pèlerinage – qui de la Vierge s'élargit à celui d'autres saints réputés inhumés dans les édifices de culte (Loup, Anne et Longin), favorisant la prospérité de l'établissement. Cependant, la concurrence créée par la basilique de Fourvière ainsi que les dissensions internes entre perpétuels et chanoines entraînent le déclin progressif du pèlerinage et la suppression du collège en 1751. Les bâtiments sont alors en partie loués, puis vendus à la Révolution française et divisés en lots, ce qui explique sa configuration actuelle, formée de 10 propriétés privées distinctes (RUBELLIN M., PICOT J. – 1995).

III.1.3) Contexte archéologique

Dirigée par Charlotte GAILLARD, archéologue au Service Archéologique de la Ville de Lyon (SAVL), de nombreux chantiers de fouille ont eu lieu à l'Île-Barbe afin de mieux comprendre le bâti de l'ancienne abbaye.

Année	Nature	Site
2008	Fouille programmée	Notre-Dame
2010	Plan topographique	Île entière
2011	Prospection thématique (archéologie programmée)	Cloître, Saint-Anne, Notre-Dame, mur des Donnés
2011	Fouille préventive	Sainte-Anne
2012	Prospection thématique (archéologie programmée)	Cloître
2013	Étude préalable	Châtelard
2015	Diagnostic	Notre-Dame
2015	Fouille programmée	Notre-Dame
2017-19	Fouille préventive	Notre-Dame

Tableau 1 : Liste des différents chantiers archéologiques à l'Île-Barbe

La finalité de ces chantiers est un ensemble de rapports dans lesquels sont répertoriés les principales données textuelles et graphiques retrouvées, les différents relevés effectués lors des fouilles ainsi que des analyses complètes de ces informations au travers de la connaissance historique. Tous ces documents ont ainsi formé une base solide et indispensable pour la phase de modélisation de la restitution 3D.

III.2) Modélisation

III.2.1) Stratégie de modélisation

De manière primitive, un modèle 3D est un ensemble de faces triangulées dont les sommets sont connus dans l'espace. La question qui se pose est alors quel est la méthode idéale pour dessiner cet ensemble de faces et quel en est l'outil adapté.

En matière de modélisation 3D, la grande difficulté est en effet de trouver un logiciel répondant à toutes les stratégies différentes de modélisations. La plupart sont spécialisés dans un type de traitement et pas dans d'autres si bien qu'il faut parfois jongler entre différents logiciels et entre différents formats d'objet 3D pour pouvoir mélanger différentes méthodes de modélisation. Le choix du ou des logiciels est donc une étape primordiale en matière de modélisation et donc pour une restitution. Il va se baser bien évidemment sur la formation des opérateurs mais aussi sur la donnée primitive, la fidélité et la simplicité voulue pour le modèle ou encore de l'importance d'ajouter des méta-données.

Il existe donc de nombreux outils de modélisation 3D. Par leurs fonctionnalités et les rendus, ceux-ci peuvent être davantage dédiés aux architectes comme Sketchup, aux ingénieurs mécaniques comme SolidWorks ou Autodesk Inventor, aux artistes comme Blender ou Autodesk Maya, aux géomètres comme Agisoft Metashape ou la gamme Cyclone de Leica ou encore à l'ensemble des acteurs de la construction. Ces derniers sont regroupés dans le terme de logiciels BIM.

Pour la restitution de l'abbaye de l'Île-Barbe, deux méthodes ont été employées.

III.2.1.1) Le maillage de la numérisation

La solution de dessin certainement la plus fidèle à la réalité est d'effectuer en préalable à la modélisation une numérisation 3D de la scène par photogrammétrie ou lasergrammétrie. Du nuage de points ainsi obtenu nous pouvons appliquer un algorithme dit « de maillage » pour relier les points entre eux par des faces. De nombreux algorithmes différents existent et proposent de paramétrer plus ou moins la reconstruction : algorithme de Poisson, « Ball-Pivoting Algorithm » etc... Ils sont aujourd'hui disponibles dans de nombreux logiciels comme Agisoft Metashape ou Leica Cyclone 3DR et même des logiciels libres tels que MeshLab ou CloudCompare. D'aucun pourrait se dire qu'il s'agit alors de la meilleure solution : une modélisation fidèle de la réalité et un temps de modélisation alloué uniquement au lancement d'un algorithme et d'un contrôle du résultat. Ces arguments sont certes vrais mais ce traitement apporte de nombreuses difficultés qui seront difficilement compatibles avec la modélisation

d'un sujet à grande échelle tel qu'un bâtiment. Trois grandes limites à cette méthode peuvent être déterminées concernant la modélisation d'un bâtiment, et particulièrement d'un monument historique.

Pour commencer la numérisation doit être exempte de tout défaut notamment par l'absence de zone blanche, c'est-à-dire d'espace non représenté. Si cela était le cas, au mieux les faces contiguës seraient étirées afin de combler l'absence de donnée et en résulterait un modèle peu fidèle et au pire la modélisation disposerait d'un trou dans le modèle à cet endroit. Or il est courant d'avoir dans un nuage de points des espaces vides car l'acquisition peut être assez longue et les détails nombreux. C'est particulièrement le cas dans des monuments historiques car beaucoup d'entre eux disposent de détails fins tel que des corniches, des chapiteaux ou des arcs et parfois à des hauteurs difficilement accessibles.

La seconde limite est que la modélisation ne serait pas catégorisée. En effet, dans leur forme primitive, les points d'un nuage de points issus de traitements lasergrammétrie ou photogrammétrie ne sont pas classés, c'est-à-dire qu'il n'est pas possible de dire que tel ou tel point est situé sur un mur, une porte etc... De ce fait le modèle 3D issu du maillage ne sera pas catégorisé et donc il sera par le fait même impossible de déterminer si telle ou telle face représente un mur ou une porte. Or ces informations peuvent être utiles dans l'analyse de la donnée 3D par exemple si on voulait associer aux maçonneries un matériau pour déterminer le volume total de ce matériau dans l'édifice.

Une troisième limite est que la modélisation sera extrêmement lourde en raison du nombre de faces la constituant. Un nuage de points peut représenter des dizaines de millions de points et suivant la résolution du maillage, le résultat final peut aboutir à des centaines de milliers de faces. Un sous-échantillonnage est encore possible mais le nombre de sommets réduira inexorablement la fidélité tant souhaitée de la modélisation.

Enfin et certainement la plus grande des limites est simplement le fait que cette stratégie nécessite une numérisation. Or cela exclue tous les éléments disparus ou remaniés ainsi que tous les espaces indisponibles. Il peut ainsi s'agir d'une bonne méthode pour une restitution actuelle d'un monument ou pour une restitution partielle d'éléments qui nous sont parvenus mais en aucun cas pour imaginer des éléments aujourd'hui inexistantes.

Pour toutes ces raisons l'unique stratégie de modélisation par maillage d'une numérisation 3D est difficilement conciliable avec la modélisation à l'échelle d'un bâtiment et avec l'idée même de restitution archéologique. Néanmoins elle s'applique facilement à certains

détails, à une échelle ainsi réduite, difficilement modélisables sans numérisation préalable ou en cas de nécessité d'une importante fidélité géométrique. Si cette méthode est employable à tout élément existant, elle sera donc souvent le complément d'un modèle figurant les éléments disparus.

III.2.1.2) Le BIM

Dans le monde de la construction, la maquette numérique est très vite associée à la modélisation de bâtiments préalablement ou non à leur construction dans un objectif d'analyse et/ou de contrôle. Cette notion porte le nom anglophone de « Building Information Model » (BIM).

La notion de BIM regroupe plusieurs éléments. Certains la voient simplement comme la modélisation d'un bâtiment intégrant des données techniques de construction et de structure quand d'autres la voient comme le processus entier de développement du modèle de sa création jusqu'à son analyse et sa gestion. Toujours est-il qu'il s'agit aujourd'hui d'un outil primordial lors de travaux publics et de création d'ouvrage d'art.

Le principe des logiciels spécialisés en BIM est que leurs fonctionnalités sont orientées directement au secteur du bâtiment pour faciliter d'une part la modélisation et à posteriori assurer un contrôle et une interopérabilité entre les différents acteurs de la construction. La maquette agit premièrement en prévisualisation d'ouvrage, autrement dit comme un prototype virtuel. Une fois la phase de construction terminée elle continuera d'agir comme un outil de gestion car elle disposera par exemple de toutes les informations nécessaires quant à la localisation de l'ensemble des réseaux et pourra par exemple faire l'objet de simulations de risques naturels. Ainsi le BIM est avant tout un système complet de gestion numérique d'un bâtiment et a davantage vocation à être utilisé dans le contexte d'un projet de construction de sa conception jusqu'à son suivi.

Une maquette BIM est-elle donc adaptée et nécessaire à l'usage des archéologues du bâti ?

En matière de modélisation du bâti, les logiciels BIM apportent de nombreux avantages. En effet la plupart ont des fonctions permettant de dessiner automatiquement des murs, des fenêtres, des portes etc..., de dupliquer ces éléments et de régler facilement leurs dimensions. Ces outils, spécifiques au monde du bâtiment, rendent la création de modèle de bâtiments plus intuitifs qu'avec des logiciels davantage polyvalents. Pour ces raisons, la maquette BIM a un réel intérêt dans le cadre d'une restitution de bâti. Cependant il est important de réaliser qu'un

logiciel BIM n'est pas parfaitement adapté aux bâtiments historiques. En effet, l'immense majorité des monuments historiques, pour des raisons principalement techniques, n'est pas constitué d'éléments que l'on peut normaliser. C'est-à-dire qu'il est rare de trouver un mur parfaitement d'aplomb, une arche parfaitement symétrique ou un sol uniformément épais. Or l'un des principes des logiciels BIM est que les objets sont paramétrés et donc difficilement manipulables. Dans la plupart des logiciels BIM il est par exemple impossible de déplacer un à un les sommets d'un objet pour le faire mieux correspondre au nuage de point ou il est laborieux de créer des formes complexes comme des voutes ou des archivoltas, d'autant plus si l'on rajoute des contraintes de courbure, de rotation etc...

Un logiciel BIM est donc parfaitement conçu pour réaliser la maquette d'un bâtiment pré-construction, c'est-à-dire à un instant où l'on peut idéaliser l'ouvrage mais pas tant pour des bâtiments anciens. Dans ce cas, le modèle BIM cherchera à se rapprocher de la réalité mais il ne l'atteindra jamais.

Néanmoins, dans le cadre d'une restitution, il est nécessaire de rappeler que la plupart des éléments peuvent avoir disparus. Dans ce contexte, les imaginer idéalement reste la principale solution pour les archéologues du bâti et les outils BIM demeurent alors adaptés. Prenons l'exemple d'un temple dont il ne resterait que les pieds de colonnes. Lorsque les colonnes seront restituées numériquement et en l'absence de fragments, iconographie ou indices quelconques, il serait illogique de dessiner les colonnes autrement que parfaitement circulaires.

III.2.1.3) Choix final pour la restitution de l'abbaye de l'Île-Barbe

Dans l'objectif d'une restitution de l'abbaye de l'Île-Barbe, le choix fut ainsi de réaliser la majeure partie des édifices via la méthode BIM. En effet, le principal inconvénient qu'est le caractère rigide du processus BIM décrit précédemment est réduit lorsque les bâtiments ont disparu ou lorsque la numérisation est impossible. Or c'est le cas de la majorité des édifices à restituer car la seule numérisation disponible est l'église Notre-Dame.

Le modèle BIM ainsi conçu fut complété par des modèles issus de maillage pour les chapiteaux des colonnes de la galerie de l'église Notre-Dame.

Concernant les outils, la modélisation BIM fut réalisée sur le logiciel Autodesk Revit pour des raisons pratiques et financières. C'est par ce logiciel que diverses restitutions archéologiques ont déjà pu être réalisées comme celle des voutes de Notre-Dame de Paris (MEDINA Alfredo, 2019) ou du sanctuaire d'Hercule à Tivoli (CURRA Edoardo et al., 2022).

Le maillage fut quant à lui réalisé sur le logiciel Agisoft Metashape, considéré comme l'un des meilleurs logiciels de traitement photogrammétrique et ainsi l'outil principal des archéologues du bâti dans ce domaine. A noter que certains éléments, comme l'archivolte et le trilobe de l'ouverture nord de la galerie de Notre Dame, furent remaniés via l'outil open-source Blender.

III.2.2) Quel niveau de détail pour quel niveau de connaissance

Appliquer le BIM à la recherche historique et archéologique est l'occasion de mélanger deux notions propres à chacun de ces domaines : le LoD et ce que nous définirons comme le LoR.

Le LoD, pour « Level of Detail » ou « Level of Development », est une convention fréquemment utilisée en BIM pour qualifier la quantité d'information du modèle. Situé généralement entre 100 et 500, le LoD permet de décrire un modèle selon qu'il n'est connu qu'en position sans information de volume (LOD 100) et jusqu'au modèle contenant tous ses éléments constitutifs : baies, réseaux etc.... leur volume et leurs matériaux (LOD 500). La figure 11 illustre la notion de LoD en BIM.



Dans le cadre du travail de restitution, cette notion propre au BIM sera amenée à être utilisée. Or, il est possible de la rapprocher d'une notion propre au travail de restitution qu'est le niveau de certitude sur la représentation d'un élément.

Pour faciliter le lien entre ces deux notions, nous développerons ce que nous appellerons LoR, pour « Level of Reliability ». Le LoR qualifie la fiabilité de 4 informations constitutives de tout élément à une époque donnée : sa présence, sa forme (ses volumes), son/ses matériau(x) et son aspect. Le LoR est donc fortement lié à la quantité et la qualité des sources attestant de ces informations. Nous pouvons proposer une décomposition telle que :

	Présence / Absence	Formes	Matériau(x)	Aspect
LoR 100	La présence de l'élément n'est mentionnée que par peu de source et est atypique dans le contexte de la restitution *.	Des informations de volumes, matériaux et aspect ne peuvent se baser sur aucune donnée matérielle et peu de données comparables.		
LoR 200	La présence peut être déduite d'après quelques sources anciennes et/ou par le caractère typique de cet élément dans le contexte de la restitution.	En l'absence de vestiges et donc sans analyses, les informations peuvent être supposées que par la comparaison avec des éléments du même type dans le même contexte.		Un premier aspect de l'élément peut être déduit à partir du/des matériau(x).
LoR 300	L'élément est cité ou illustré sur de nombreuses sources anciennes, textuelles ou graphiques.	Des volumes peuvent être déduits des sources graphiques ou reconstruits à partir de description textuelle.	Des sources textuelles ou graphiques anciennes permettent d'affiner le choix du/des matériau(x)	Les sources graphiques peuvent être utilisées pour améliorer le rendu de l'élément.
LoR 400	L'élément est constaté sur des sources plus récentes et/ou objectives : photographies, rapport scientifique sur la base d'éléments conservés au moment de l'étude...	Des volumes plus précis peuvent être extraits de données schématiques de l'élément (plan à l'échelle) ou de sources géométriquement objectives (photographies)	Le(s) matériau(x) peut être déduit de sources graphiques précises ou renseigné dans des rapports.	Une photographie de l'élément permet d'affiner la question de son aspect.
LoR 500	L'élément est encore existant et une analyse de datation atteste sa présence à l'époque de la restitution.	Les formes sont déterminées à l'aide d'une numérisation 3D de l'élément.	Des analyses de matériaux ont pu être appliquées à l'élément.	Une ortho-image de l'élément a pu être réalisée

Tableau 2 : Qualification du LoR d'un élément

* Le « contexte de la restitution » mentionnée dans ce tableau évoque à la fois le contexte spatial, temporel mais aussi historique du site de la restitution.

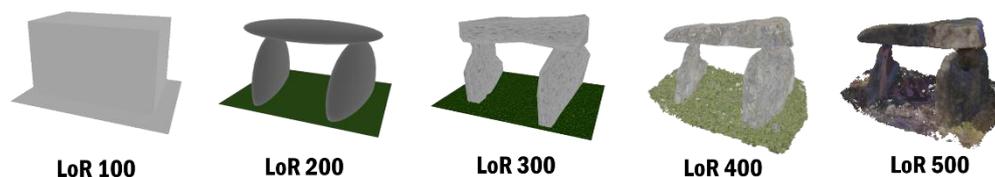
Le LoR global de l'élément est ainsi moyenné à partir du LoR de ses 4 informations constitutives tel que décrit dans le tableau 1 ci-dessus. Ce nombre n'est pas une vérité absolue et renseigne simplement sur la quantité d'informations disponibles et déduites sur l'élément. Il donne une idée sur l'état de la connaissance scientifique et peut rester sujet à discussion et à modification.

De plus, il est important de noter qu'un même élément peut avoir un LoR différent suivant l'époque de la restitution en raison de la quantité de sources de cette époque.

Nous avons donc construit volontairement le LoR parallèlement à la notion de LoD. Lors de la conception d'une restitution archéologique, un choix de LoR minimal pour la présence doit alors être fait. Celui-ci agira alors comme un filtre sur l'ensemble des éléments pour savoir lesquels seront à représenter et lesquels sont trop hypothétique pour l'être. Par exemple il peut être choisi d'exclure tous les éléments manquant de preuves en choisissant un LoR de présence minimal de 300.

Dans le cadre de la modélisation et de la texturation, les auteurs de la restitution devront en plus d'un LoR, associer un LoD à chaque élément. Le LoR ne représente en effet qu'un état de la connaissance, un concept théorique. Pour une restitution, il faudra choisir le niveau de détail avec lequel le représenter, donc un LoD. En choisissant d'associer l'échelle du LoD avec l'échelle du LoR les volumes, matériaux et aspect partiront du schématique pour aller vers le réaliste à mesure que le LoR augmente, tel qu'illustré en figure 12.

Figure 12 : Illustration d'un LoD aligné au LoR



Néanmoins le choix peut être pris de représenter certains éléments en détails sans que ceux-ci ne disposent d'un LoR important. Concernant la présence d'un élément, ce choix est binaire et revient à décider du choix du LoR minimal. Cependant, concernant les volumes, les matériaux et l'aspect, il peut être souhaitable d'utiliser un LoD plus haut que le LoR. En effet le choix de représenter en détail ce que l'on pourrait qualifier d'hypothèse permettra d'améliorer le détail et ainsi conséquemment l'immersion et l'imagination et pourra aboutir à une meilleure réflexion scientifique sur ces hypothèses.

C'est avec cette idée que fut développée la maquette numérique des restitutions de l'Île-Barbe. Le LoR de présence minimal choisi est entre 200 et 300, c'est-à-dire que la quasi-totalité des éléments représentés sont basés sur au moins une source de données, anciennes ou non, graphiques ou non, à l'exception d'éléments dont le contexte ne laisse que peu de doute sur leur présence (charpentes, autels...). En terme de matériaux, les modèles finaux ne sont pas catégorisés car les outils logiciels pour lire cette classification ne sont pas à disposition des acteurs de la recherche scientifique sur l'Île-Barbe, et cela apporte peu dans le cadre d'une diffusion auprès du grand public. Néanmoins ces matériaux sont à de nombreux endroits connus

après analyse, et leur présence est représentée par l'aspect rendu aux modèles. En effet les maquettes numériques ont toutes un aspect LoR 400, soit un aspect photo-réaliste correspondant au mieux au matériau déterminé. Nous y reviendrons plus en détail dans la partie consacrée à la texturation.

Néanmoins le choix de représenter des éléments présents hypothétiquement peut ne pas être évident pour tout autre que les auteurs de la maquette.

Dans tout autre cas qu'une utilisation strict du LoR maximal, soit la seule représentation des éléments encore existants, un modèle BIM d'une restitution archéologique ne pourra se suffire à lui-même dans le cadre d'une diffusion. En effet la qualité de la connaissance doit être connue de l'utilisateur pour conserver son esprit critique sur la maquette numérique. Il peut être rapide d'interpréter une maquette pseudo réaliste en une vérité absolue et, pour le grand public, de croire en une connaissance parfaite d'un site de la part des acteurs de la recherche historique.

Pour ces raisons de rigueur scientifique, ces maquettes numériques doivent toujours être accompagnées d'une description du niveau de connaissance du site et des raisons motivant les choix effectués. Cela peut prendre différentes formes selon le public cible. La rédaction d'un rapport descriptif sur la restitution sera le meilleur biais mais peut être trop brut pour une diffusion au grand public. Dans le cadre de la réalisation de la maquette numérique de l'Île-Barbe, le choix fut fait de quantifier le LoR des éléments du modèle par une colorisation dégradée en plus de la rédaction d'une publication.

Au vu de la topographie, de l'urbanisme et de l'histoire de l'Île-Barbe, la restitution a été divisée en 4 sites : l'église Notre-Dame, le prieuré Sainte Anne, le Chatelard et enfin le secteur claustral. Le choix de cette division a été fait en raison de leur nette séparation géographique ainsi que par des périodes de restitutions différentes. Cela facilitera la conception sur logiciel BIM ainsi que la diffusion. Le LoR sur ces différents sites est également très hétérogène et la conception des modèles fut donc assez différente.

La partie de ce document relative à l'Île-Barbe n'a pas vocation de décrire l'ensemble des questions et des problématiques liées à la restitution mais plutôt de revenir, pour chacun des quatre sites, sur un cas marquant d'une part de la relation entre le LoD et le LoR dans le cadre du BIM et d'autre part de l'intérêt de la maquette numérique comme support de la restitution.

III.2.3) Église Notre-Dame

III.2.3.1) Présentation du site

L'église Notre Dame est le site dont le LoR moyen est le plus élevé car la grande majorité de l'édifice, d'une part, est toujours existant et, d'autre part, a été le sujet d'une numérisation par scanner 3D.

Parmi les autres sources d'informations concernant le site de Notre-Dame nous retrouvons de nombreux relevés archéologiques : des relevés pierre-à-pierre de matériaux et phasage, des plans au sol de sondage et une première idée de restitution développée dans le cadre de la thèse de Charlotte GAILLARD. Nous avons aussi de nombreuses sources iconographiques, la plus ancienne étant d'Anonyme FABRICZY datée du milieu du XVI^e siècle. L'édifice a de plus été relevé par un géomètre en 2010.

Bordé au sud par la Saône, l'église de Notre-Dame fut, selon les estimations, reconstruite autour du XI^e siècle. Les maçonneries existantes nous renseignent sur un premier état de l'église au début de XII^e siècle constitué d'une seule nef, un cœur et une abside. Au cours du XII^e fut érigé un clocher au-dessus du cœur ainsi qu'une galerie charpentée au nord et à l'ouest. À son apogée, le site est constitué d'une église de 24m de long et 9.5m de large et surmonté d'un clocher haut de 27m, auxquelles s'adosse une galerie voutée sur ses côtés ouest et nord. En 1840, le mur sud de l'église chute dans la Saône. Aujourd'hui subsistent les galeries nord et ouest séparées par un mur, le cœur, le clocher et l'abside de l'église (figure 13).



Figure 13 : Vue NO de l'église Notre-Dame en 2023

III.2.3.2) Point d'intérêt – Le Scan-to-BIM

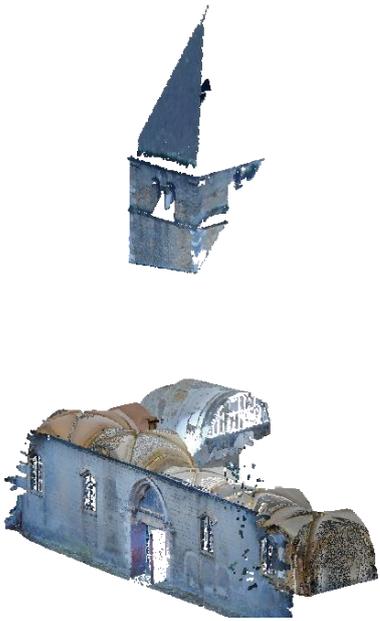


Figure 14 : Scan 3D de l'église de Notre-Dame

La numérisation (figure 14) a offert un bon aperçu du dernier état de l'édifice. Elle a pu être réalisée sur la totalité de l'intérieur de l'édifice, à l'exception de la galerie ouest, ainsi que sur le mur nord de la galerie.

La modélisation fut ainsi faite de manière inversée, c'est à dire en commençant par la phase la plus moderne pour aller vers la plus ancienne.

Du XIIe siècle, les maçonneries sont pour la plupart encore visibles sur la numérisation et ont donc pu être dessinées à l'aide du nuage de points soit un LOR entre 400 et 500 pour les volumes.

A pu être réalisé un processus dit de Scan-to-BIM qui consiste à diviser au maximum le nuage de points issu du scanner en des formes paramétrées. Ce processus fut ici entièrement manuel en raison de la trop forte complexité du nuage pour des algorithmes automatisés et davantage adaptés au bâti moderne (figure 16).



Figure 15 : Nuage de points accolé au modèle BIM

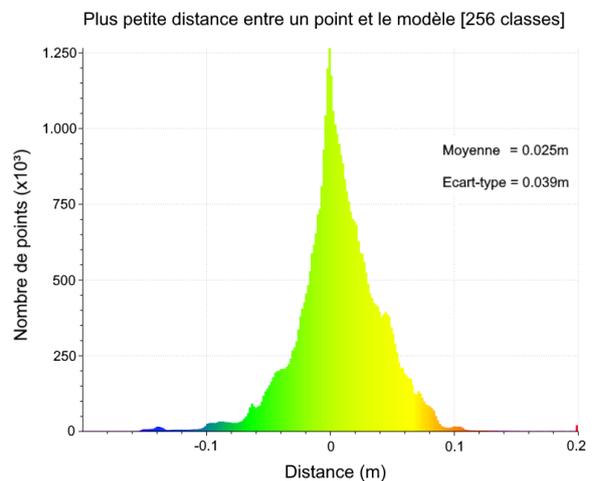


Figure 16 : Histogramme de la distance nuage-modèle

L'intérêt de recréer un modèle depuis un nuage de points est que la précision des volumes peut être quantifiée. En effet il suffit de calculer la distance moyenne entre les points du nuage et le modèle final pour déterminer la précision de ce dernier. Nous obtenons une distance moyenne de 2.5cm sur l'ensemble du site de Notre-Dame pour la restitution la plus récente, ce qui est en terme de justesse largement suffisant au besoin des archéologues du bâti

et pour une diffusion grand public. L'histogramme de la figure 15 présente ainsi la distance entre les points et le modèle sur le site de Notre Dame.

Non présents sur le scan, il a néanmoins fallu recréer le mur sud de la nef aujourd'hui effondré ainsi que les murs et le voutement de la galerie ouest. Ces murs ont été délimités à l'aide d'un plan de géomètre et le voutement copié sur celui de la galerie nord afin d'avoir un LoD similaire même si le LoR ne l'est pas.

III.2.4) Prieuré Saint-André-et-Saint-Anne

III.2.4.1) Présentation du site

Le prieuré Saint-André-et-Sainte-Anne est situé à l'extrémité nord est de l'île.

Ce site est présent sur de nombreuses sources archéologiques et iconographiques. De nombreux relevés ont pu être faits accompagnés d'analyse de matériaux et de datation : relevé pierre-à-pierre, plan de fouilles et phasage. Parmi les sources les plus anciennes on compte la gravure d'Anonyme FABRICZY du milieu du XVIème siècle, un dessin de Martellange daté précisément du 12 juin 1618 ou encore une gravure d'Israël SYLVESTRE du milieu du XVIIème siècle.

Situé à la pointe de l'île, le site du prieuré est bordé par la Saône sur 3 de ses côtés. On y retrouve les plus anciens sarcophages retrouvés sur l'île, datés du VIème siècle, soit peu de temps après les premières mentions de l'abbaye. Ses maçonneries sont également les plus anciennes retrouvées avec des portions datées du Xème siècle. A cette époque, les relevés tendent à indiquer la présence d'un seul édifice religieux à nef unique. L'église était ainsi constituée d'une nef sans piliers de 7m de long pour 6 m de large, prolongé par un chevet plat de 4m de long et croisée par un transept de 12m de long et 4m large. Au XIIIème l'édifice est complété par deux absidioles. Au XVème l'église se dote d'un collatéral au niveau du mur gouttereau sud et l'habitation du prieur se développe depuis le transept nord. Enfin au XVIIème l'habitation se développe davantage avec des annexes et l'élévation d'une tour.



Figure 17 : Vue Est du prieuré St Anne en 2023

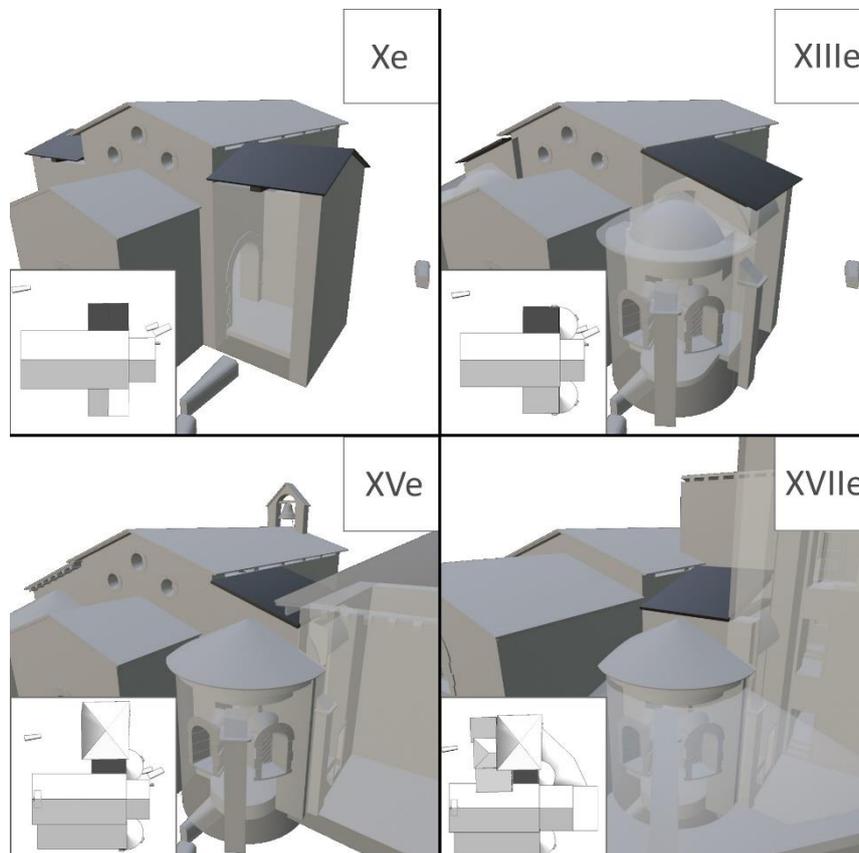
Aujourd'hui, le transept, l'absidiole et le collatéral sud ont disparu. Le chevet s'est aligné à la même hauteur que la nef et d'autres annexes se sont développées le long de la berge nord (figure 17).

III.2.4.2) Point d'intérêt – Les charpentes

En raison des nombreuses adjonctions, les charpentes ont été amenées à être revues à presque chaque époque de restitution, comme le montre la figure 18. Le chevet, les absidioles, le transept et le collatéral sont des parties voutées respectivement en plein cintre, en cul-de-four, en plein cintre et en croisée d'arêtes sur lesquelles reposaient les charpentes. Le cas de la charpente du transept nord a été particulièrement fastidieux à analyser car il aurait subi de nombreuses variations.

Au Xe siècle, ce transept n'est pas encore vouté, la charpente envisagée est constituée de deux pans perpendiculairement à la nef. Au XIIIème, le transept est vouté en plein cintre dans le sens de la nef et les absidioles adjointes. Il a ainsi fallu revoir la charpente initiale pour deux raisons. La première est son très probable démantèlement lors de la création de la voûte et la seconde est que la nouvelle charpente a dû reposer sur la nouvelle voûte. La charpente

Figure 18 : Évolution de la charpente du transept nord



XIIIème siècle au niveau des transepts est donc à un pan et dans un sens opposé à celle du Xème siècle. Au XVème siècle avec l'adjonction de la tour au nord du transept nord, rien ne laisse à penser que la charpente évolue. Au XVIIème siècle est adjoint à l'ouest de ce transept une annexe plus haute que celui-ci rendant la forme de l'ancienne charpente incohérente. La charpente du XVIIème siècle est donc à nouveau perpendiculaire à la nef comme au Xème siècle mais cette fois à un seul pan.

En terme de LoR, la présence de ces charpentes est difficilement contestable. Néanmoins, il n'est pas possible de considérer comme très fiables les choix qui ont été ceux de leur forme. Si celles du XVIIème siècle et certaines du XVème siècle se basent sur des gravures et la forme des toitures existantes, celles des deux premières époques se basent davantage sur la logique architecturale et sur la forme des édifices du même type à cette période, soit un LoR de 200 concernant le volume.

III.2.5) Chatelard

III.2.5.1) Présentation du site

Le Chatelard est une maison forte située sur un promontoire, à l'est de l'Île-Barbe. Ancienne demeure du cellérier de l'abbaye, le Chatelard n'a cessé d'évoluer entre le XIIIème et le XVIIIème siècle. Il se compose d'un logis principal, de plusieurs annexes ainsi que de la chapelle Ste-Marie-Madeleine, classée avec les façades au titre des monuments historiques en 1993 (figure 19). Aujourd'hui le bâtiment est menacé, étant à l'abandon depuis plusieurs années.

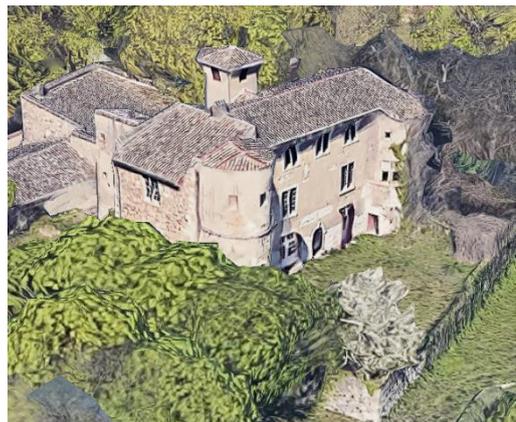


Figure 19 : Vue Sud du Chatelard en 2023

III.2.5.2) Point d'intérêt – La maquette numérique comme outil de synthèse

Le principal point d'intérêt du Chatelard est de prouver l'atout de l'environnement 3D par rapport à l'environnement 2D dans sa capacité de synthèse. Le bâtiment principal et ses annexes occupent environ 1300m² répartis dans 46 pièces sur trois niveaux. A la suite d'une étude patrimoniale, ce n'est pas moins que 10 relevés en plans et 12 relevés de façades qui ont été réalisés. Indispensables pour réaliser la reconstitution de ce site, ces relevés ont ainsi pu être synthétisés en une seule maquette numérique (figure 20). Maquette qui à son tour peut être utilisée afin de réaliser des coupes et des plans en tout endroit souhaité.

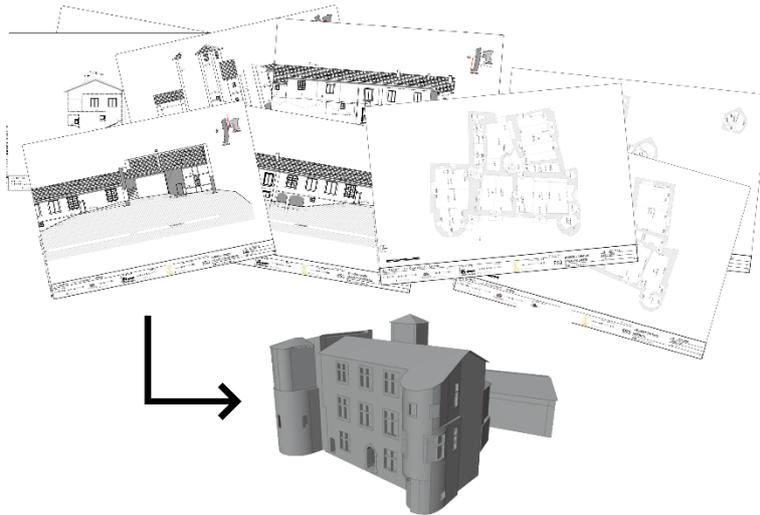


Figure 20 : La maquette numérique comme synthèse des relevés 2D

III.2.6) Secteur Claustral

III.2.6.1) Présentation du site

Le secteur claustral de l'Île-Barbe est le site où il subsiste le moins d'éléments en élévation. Fondé au XI^{ème} siècle, il fut composé à son apogée d'une grande abbatale dédiée à St Martin et St Loup (1 sur la figure 21), d'un cloître (2), d'une salle capitulaire (3), d'un réfectoire (4), de celliers (5), d'une chapelle. Aujourd'hui, ne subsistent que l'ancienne salle capitulaire, un mur du cloître, le mur pignon du transept de l'abbatale et une niche dans le mur pignon du bas-côté de l'abbatale. Visible sur de nombreuses illustrations et mentionnée dans de nombreux textes, l'abbatale, détruite au cours du XVIII^{ème} siècle, fut l'objectif principal de cette restitution.



Figure 21 : Hypothèse de restitution du secteur claustral au XIII^e siècle

III.2.6.2) Point d'intérêt – L'abbatiale St Martin et St Loup

Le cas de l'abbatiale est intéressant car nous disposons pour sa restitution de sources très différentes. Avec si peu de preuves matérielles, la restitution s'est principalement basée sur 3 éléments. D'une part, un procès-verbal effectué peu de temps après la guerre de religion de 1562 nous renseigne sur bon nombre de dimensions de l'ancienne abbatiale. D'autre part la plupart des bâtiments et particulièrement l'abbatiale sont visibles sur de très nombreuses illustrations datées pour la plus ancienne du XVème siècle. Enfin, l'architecte Amédée Cateland, se basant lui-même sur les données décrites précédemment, a proposé au début du XXème siècle sa propre restitution de l'abbatiale dans le cadre d'un concours d'architecture.

En planimétrie, les formes de l'abbatiale sont relativement contraintes par les 2 éléments encore existant et certaines mesures effectuées lors du procès-verbal.

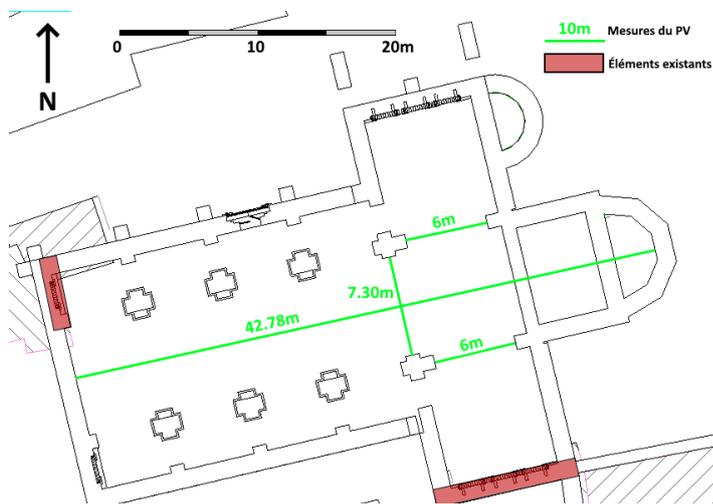


Figure 22 : Plan au sol de la restitution de l'abbatiale

La difficulté fut principalement le déchiffrement du procès-verbal étant donné que la langue et le vocabulaire ont beaucoup évolué. Les mesures étaient effectuées en pieds et pouces lyonnais nécessitant une conversion

Pour exemple, les dimensions du clocher furent décrites tel que : « lequel clocher est fait en forme carrée, ayant de longueur de vent à

bise [nord au sud] vingt quatre piedz dix poulces [8.5m], de largeur de matin à soir [ouest en est] vingt ung piedz deux poulces [7.24m], et d'hauteur au long des quatre murailles douze piedz et demy [4.4m] ». Nous avons aussi pu constater que l'orientation de leurs points cardinaux était erronée et nécessitait donc de pivoter l'ensemble de 90°.

La combinaison de ces mesures avec l'existant, comparée aux nombreuses représentations graphiques a permis une restitution de l'abbatiale en 3D malgré certaines incohérences. Du fait de ces contraintes en planimétrie nous retrouvons à peu de différences près le même résultat que la restitution d'Amédée Cateland. Ce n'est néanmoins pas le cas sur l'altimétrie de l'édifice.

La hauteur des éléments fut en effet la cause du plus grand nombre d'incertitude. Les seuls éléments de hauteur dont nous disposons afin de placer les voutes, les charpentes et le

clocher sont le nombre de marches entre le sol et les galeries puis entre les galeries et le clocher. De là des mesures ont été faites entre le clocher et l'intégralité des charpentes (nef, transept et cœur). La hauteur des galeries, du clocher, des charpentes et par conséquent des voutes et donc des murs dépendent ainsi de la hauteur des contremarches des escaliers, non fournie par le PV. Nous avons cherché à fixer celles-ci pour tendre vers la représentation de l'abbatiale donnée par les illustrations. Ce choix fut de 20cm.

Le niveau de fiabilité de l'abbatiale reste donc limité étant donné le peu d'élément matériel à notre disposition. L'emprise du bâtiment au sol reste plus certaine que les différentes hauteurs de l'édifice.

III.2.7) Topographie de l'île

La topographie de l'île a elle aussi été questionnée, de la même manière que n'importe quel autre site. Lors de la restitution de l'abbaye de Cluny, les auteurs de la maquette numérique ont fait le choix de disposer les bâtiments sur un plan ancien afin d'éviter de trop hypothétiser sur la topographie. Néanmoins dans le cas de la restitution de l'abbaye de l'Île-Barbe, il nous semblait important de percevoir les contraintes engendrées par le caractère insulaire du site en rendant compte de la topographie réelle du lieu. Notre volonté première était donc d'utiliser le plus fidèlement possible la topographie actuelle en employant les données LiDAR HD de l'IGN, mais cette idée a été remise en question. En effet si certains bâtiments sont fondés sur le rocher et ont donc a priori connu peu d'altération, ce n'est pas le cas de la majorité de l'île. L'environnement insulaire a été au contraire la cause de nombreux bouleversements de la topographie avec de fréquentes inondations et donc de déplacements de sédiments. Preuve en est le niveau de sol autour de l'église Notre Dame, aujourd'hui 1.4m au-dessus du niveau du XIIème siècle. La décision fut donc d'utiliser comme base le MNT 1m du RGE Alti fourni par l'IGN. La connaissance du niveau du sol ancien sur la quasi-totalité des sites nous a ensuite permis de modifier ce MNT en conséquence. Ainsi, la topographie peut, elle aussi, être considérée comme une restitution car son niveau de fiabilité est très variable dans l'espace et le temps.

III.3) Texturation

III.3.1) Quelles méthodes pour un rendu réaliste

Dans le domaine de la modélisation 3D, la texture correspond à l'aspect rendu par un objet. Il peut s'agir d'une couleur unie jusqu'à l'aspect photo-réaliste.

Afin de réaliser un texture photo-réaliste, 2 principales méthodes sont envisageables :

La première est, dans le cas d'un objet encore existant et ayant été numérisé, d'appliquer directement une ortho-image sur le modèle. Il s'agit de la méthode offrant le rendu le plus proche de la réalité mais cela devient de plus en plus difficile à mesure que la quantité de détails de l'objet augmente et que sa forme se complexifie. Il s'agit ainsi d'une solution envisageable pour des éléments comme des murs, des toitures, soit des objets ayant peu d'aspérités. A noter que le modèle 3D doit être géométriquement très proche de l'objet initial pour éviter des erreurs de colorisation dû à une mauvaise apposition de l'ortho-image. A noter que cette méthode est par défaut celle utilisée lorsque le modèle 3D est issue du maillage d'un nuage de point (III.2.1.1).

La seconde méthode est d'utiliser différentes images réalistes de matériaux afin de coloriser le modèle 3D. C'est cette méthode que nous avons utilisée majoritairement lors de la restitution de l'Île-Barbe car très peu d'ortho-images ont pu être produites étant donné la destruction de nombreux édifices. Certaines ortho-images ont néanmoins été appliquées pour des zones d'intérêts (fresques) et lorsque la transition avec les autres textures n'était pas choquante.

III.3.2) Banque de données

Pour cette restitution, nous avons fait le choix de l'immersion optimale en choisissant quasi-uniquement des textures réalistes.

Ces textures sont des images remplissant une principale condition, elles doivent être « seamless ». Ce qualificatif décrit une image qui peut

s'accoler à elle-même sans créer une limite visible et ce pour deux intérêts. Le premier est de limiter la taille des images, dans notre cas réduit au format 1024x1024 pxs, et le second est encore d'améliorer le réalisme, effet qui se retrouve facilement sur la figure 23 avec l'exemple d'une texture bois.

L'intégralité de ces textures sont des données libres disponibles sur divers sites internet comme ambient-cg ou thurbosquid et sont issues de traitements photogrammétriques. Les images ont été sélectionnées en fonction du matériau qu'elles représentent. En effet, la maquette



Figure 23 : Accolement de 4 textures seamless et non seamless

n'étant pas classifiée au niveau de ses matériaux, le seul moyen de les reconnaître passe par l'aspect donné à la maquette. Ont ainsi été sélectionnées des textures de différentes roches (Calcaire Seyssel, Oolithique, Calcaire Blanc, Argile, Granite...), ainsi que divers bois, métaux et tuiles, dans des états plus ou moins dégradés. Pour le sol du terrain ont été choisies des images de différentes couvertures : herbe, gravier, terre...

La méthode de texturation dans le cadre de la restitution de l'Île-Barbe fut la suivante, réalisée et automatisée sous le logiciel libre Blender (figure 24) :

1) La première étape est de réaliser ce que l'on appelle « carte UV » de l'objet. Il s'agit d'une image, souvent carrée, où toutes les faces de l'objet sont représentées sans qu'il n'y ait de chevauchement entre elles.

2) A l'aide de cette carte UV ainsi que de diverses images représentant ce que l'on souhaite coloriser, on peut alors associer aux faces la texture souhaitée.

3) Enfin il suffit d'indiquer à l'objet l'image de texture pour que celui-ci attribue la bonne texture à chaque face suivant la cartographie UV.

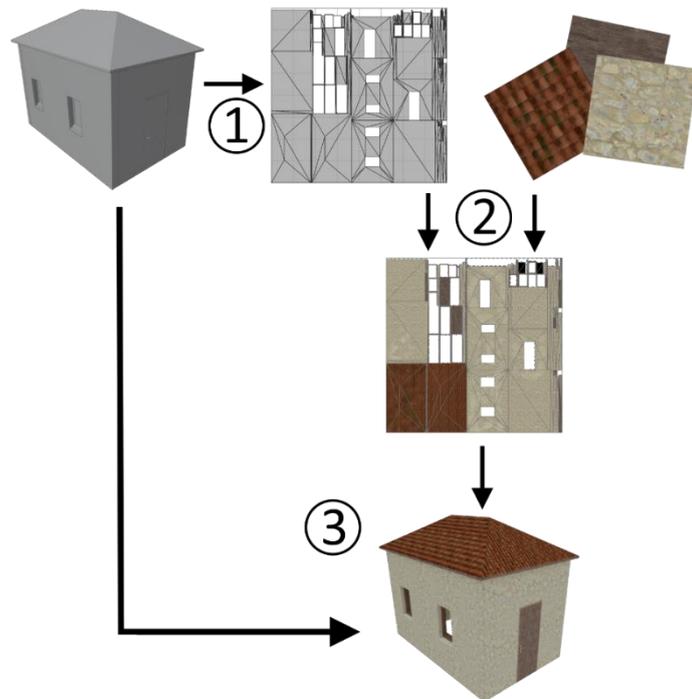


Figure 24 : Apposition d'une texture à un modèle 3D

III.4) Bilan de la restitution de l'abbaye de l'Île-Barbe

III.4.1) La maquette numérique

Après cinq mois dédiés à la création de la maquette numérique, le bilan de ce travail de recherche est ainsi une restitution 4D des 4 principaux sites de l'étude au cours de la période Xème-XVIIème siècle. Chacun de ces sites comprend 4 à 5 phases auquel s'ajoute la restitution de l'enceinte crénelée et de la topographie de l'île. Néanmoins il est important de garder à l'esprit que ce travail n'est qu'un ensemble d'hypothèses basées sur les connaissances actuelles du site. Si la maquette numérique offre une meilleure immersion dans le site, elle ne reste qu'un type de support de la restitution. Comme nous avons questionné et remis en question la restitution

d'Amédée Cateland, celle-ci se doit de l'être à son tour, dans le but de converger vers la vérité. Vous trouverez en annexe des illustrations de ces maquettes phase par phase.



Figure 25 : Restitution XVIIème de l'Île-Barbe

Pour les acteurs de la recherche, 5 maquettes ont été produites. Quatre d'entre elles correspondent aux quatre sites principaux et une dernière les assemble ainsi que l'enceinte et la topographie (figure 25). L'idée est de pouvoir travailler sur les sites individuellement afin de ne pas alourdir conséquemment le fichier mais de conserver en plus une vision globale de l'île.

III.4.2) Valorisation au grand public

Il existe aujourd'hui de nombreux canaux de diffusion applicables à la maquette numérique. Ces canaux peuvent se distinguer par l'utilisation de la maquette en tant qu'objet 3D (environnement 3D web, impression 3D...) ou par la création de support 2D figurant la maquette numérique (images, vidéos...). Pour la restitution de l'abbaye de l'Île-Barbe, il fut choisi de réaliser des vidéos décrivant non seulement la restitution en elle-même mais l'ensemble du processus de sa création. La vidéo montrera ainsi la phase de modélisation par l'élévation progressive des édifices puis la texturation par l'ajout des couleurs définitives du modèle. Afin de décrire certaines données utilisées lors de la conception, la vidéo s'attardera sur les points de vue estimés des auteurs des gravures de l'Île-Barbe afin de réaliser une comparaison entre ces gravures et le modèle final. Cette vidéo sera ensuite diffusée sur les réseaux du laboratoire ArAr de Lyon.

Conclusion

Au cours du travail sur l'abbaye de l'Île-Barbe, l'utilisation de la 3D dans le cadre de sa restitution a permis aux archéologues d'avoir une meilleure interprétation et parfois même une toute nouvelle vision de l'environnement bâti de ce site remarquable. Au travers de coupes et de relevés en plan rendus possibles en tout point de l'île et au travers de la vue 3D général, les hypothèses préalables de restitution, constituées lors de travaux archéologiques précédents, ont été fortement repensées pour aboutir à un résultat en certains points bien différent et plus cohérent. Les données de références étant sensiblement identiques, la différence se joue dans la capacité qu'a l'environnement 3D de faire réaliser les dimensions et les proportions pour faciliter la lecture, la compréhension et le travail de comparaison.

La modélisation du patrimoine bâti par méthode BIM agissant, à l'image de la modélisation pré-construction, comme une synthèse de la réflexion sur différents domaines de la construction, elle n'est donc pas exempte de la nécessité de diverses données topographiques, archéologiques et historiques. Si le cas de l'abbaye de l'Île-Barbe est particulièrement connu et documenté de par les nombreux travaux archéologiques qui y ont été menés, ceci ne constitue pas la norme. Si la volonté des acteurs de la restitution est la réalisation d'une maquette immersive, comme ce fut le cas lors de la restitution de l'Île-Barbe, toutes les données manquantes seront amenées à être remplacées par des hypothèses, basées sur le contexte spatio-temporel et thématique de la restitution. La quantité de ces données ne doit ainsi pas être sous-estimée car elle détermine le niveau de fiabilité de la maquette. Dès lors, la connaissance de sites présentant de nombreuses similitudes avec le site de la restitution est primordiale. Un travail de comparaison architecturale et stylistique permettra de recréer les espaces disparus et peu mentionnés ou représentés graphiquement. Ce travail servira ainsi à justifier ces hypothèses même si le niveau de fiabilité s'en retrouve inexorablement réduit.

La nécessité de la justification des hypothèses, inspirée par une volonté de rigueur scientifique, met le doigt sur la grande problématique de l'utilisation de la 3D comme support de la restitution. Cette problématique consiste à ne pas se perdre dans la volonté de réalisme et d'immersion, rendus possibles par la création d'environnement 3D, en réduisant par le fait même la fiabilité attendue de la maquette. La difficulté est ainsi de choisir la limite entre deux extrêmes : reconstituer uniquement l'existant, sans prendre aucun risque sur la présence d'autres éléments, et restituer le site avec un niveau de détail maximal, par exemple en représentant des fresques sur les bâtiments, de la flore, de la faune... Tendre vers la première

option, c'est faire le choix de la reconstitution et de quitter l'exercice de la restitution mais tendre vers la seconde c'est risquer de se perdre en conjectures trop hasardeuses pour disposer d'une validité scientifique. Cette limite n'est néanmoins pas amenée à être figée au cours du processus de restitution. Elle dépendra de nombreux facteurs comme le public visé par la restitution (grand public, acteurs de la recherche...), le nombre de données archéologiques issues de travaux sur site, de la quantité de documentations historiques, de descriptions et de représentations du passé, etc... Cependant cette limite doit être le premier élément à fixer avant même le processus de modélisation et même si elle peut être amenée à évoluer dans un sens ou dans l'autre. En effet au cours de la modélisation elle devra toujours être gardée à l'esprit par les personnes en charges du dessin et celles en charge de la réflexion historique et archéologique sur la restitution.

En tant qu'ingénieur géomètre, ce travail m'a permis de mettre au service d'acteurs proches de la topographie des méthodes de travail propres au monde de la géomatique. L'esprit scientifique que m'a apporté ma formation m'a permis de voir les problématiques de manière pragmatique en cherchant à trouver des solutions pour optimiser la production de modèles, synthétiser les nombreuses données en entrée en une seule donnée 3D et développer des outils pour faciliter le travail. Enfin je pense que cette recherche a contribué encore à la prise de conscience de l'intérêt de la maquette numérique pour les acteurs de la restitution archéologique et pour le grand public.

Bibliographie

Ouvrages imprimés

- BIONDO Flavio - *Roma Instaurata* - 1444-1448 - Édition Les Belles Lettres (2005)
- PHILIPPE Sénéchal et al. - *Les envois de Rome (1778-1968). Architecture et archéologie* - Ecole française de Rome - 1988 - 458p
- *Idées et débats de la restitution archéologique* - Édition du Patrimoine (Centre des monuments nationaux) - Direction de VALLET Christophe - 2014
- SANDRON Dany et TALLON Andrew - *Notre-Dame de Paris : Neuf siècles d'histoire* - Edition Parigramme Eds - 2019 - 189p
- BROCARD Marlène - *Les gravures rupestres à parcellaire* - Édition de l'EHESS - 2005 - 19p
- M. RUBELLIN, J. PICOT - *L'histoire de l'Île-Barbe, dans Mémoire de pierre. Abbaye de l'Île-Barbe* - dans Mémoires de pierre. Abbaye de l'Île-Barbe. Lyon : Musée historique de Lyon - 1995 - p. 17-23.
- GAILLARD Ch., REVEYRON N. - *Île-Barbe – Chapelle Notre-Dame* - Document Final de Synthèse. Lyon : Drac Rhône-Alpes - 2009.
- GAILLARD Ch., en coll. avec J. Torgue - *Île-Barbe – Plan topographique* - Document Final de Synthèse. Lyon : Drac Rhône-Alpes - 2010.
- GAILLARD Ch. et alii - *Île-Barbe, prospection thématique* - Document Final de Synthèse. Lyon : DRAC Rhône-Alpes - 2012.
- GAILLARD Ch. et alii - *Île-Barbe, prospection thématique* - Document Final de Synthèse. Lyon : - GAILLARD Rhône-Alpes - 2012.
- GAILLARD Ch. et alii - *Île-Barbe, Sainte-Anne, Chemin du Bas-Port* - Document Final de Synthèse. Bron : Inrap - 2013.
- GAILLARD Ch. et alii - *Île-Barbe, Le Châtelard (69). Étude préalable* - Document Final de Synthèse. Lyon : SAVL - 2013.
- GAILLARD Ch et al. - *Île-Barbe, Chapelle Notre-Dame (69). Rapport de diagnostic* - Document Final de Synthèse. Lyon : SAVL - 2016.
- GAILLARD Ch. Et al. - *Chapelle Notre-Dame (69). Rapport de fouille en archéologie programmée* - Lyon : DRAC Rhône-Alpes Auvergne - 2017.
- GAILLARD Ch. Et al., *Chapelle Notre-Dame (69). Rapport de fouille en archéologie préventive* - Lyon : SAVL - 2020.

Chapitre dans un ouvrage imprimé

Travaux universitaires

- GAILLARD Charlotte - *L'abbaye de l'Île Barbe à Lyon Ve-XIIIe siècles. Tome 1 : Texte* - Thèse d'archéologie médiévale – Université Lumière Lyon 2 – 2016 – 497p

- GAILLARD Charlotte - *L'abbaye de l'Île Barbe à Lyon Ve-XIIIe siècles. Tome 2 : Planches* - Thèse d'archéologie médiévale – Université Lumière Lyon 2 – 2016 – 129p

- GAILLARD Charlotte - *L'abbaye de l'Île Barbe à Lyon Ve-XIIIe siècles. Tome 3 : Annexes* - Thèse d'archéologie médiévale – Université Lumière Lyon 2 – 2016 – 183p

Articles de périodiques imprimés

- Archaeometry Volume 1. Issue 1 - *Research Laboratory for Archaeology and the History of Art* - University of Oxford - 1958 - 22p

- CHEVALLIER Georgette - *Le Pape Pie II Et Amédée VIII : Un Écrivain Et Un Diplomate* - Les Rendez-vous de l'Académie salésienne n°27 - 2016 - 20p

- COLOMÈS Michel - *Des "monuments men" contre la folie destructrice de Daesh* - Le Point - 2015

Articles de périodiques électroniques

- Ministère de la Culture et de la Communication Français- *Termes Relatifs Aux Interventions Sur Les Monuments Historiques* - 2013 - 24p

- SOBOCINSKY Aurélie - *Réplique de la grotte Chauvet : un chantier unique* - CNRS Le Journal – 2014

- GUIBERT Pierre - *La luminescence : Un bref éclairage sur une méthode de datation pour l'archéologie* - Reflets de la Physique n°63 - 2019 - 6p

- LANOS Philippe - *Physique de l'archéomagnétisme pour la datation de bâtiments du haut Moyen Age* - Reflets de la Physique n°63 - 2019 - 6p

- CURRA Edoardo et al. - *HBIM between Antiquity and Industrial Achaeology: Former Segre Pepermill and Sanctuary of Hercules in Tivoli* - 2022 - 30p

- HARTMANN-VIRNICH Andreas et al. - *Pourquoi et comment ? Réflexions sur le sens et les finalités des méthodes de relevé en archéologie du bâti* - CRAHN-SNEPH Hors-série n° 1 – 2018 – 13p

Sites web

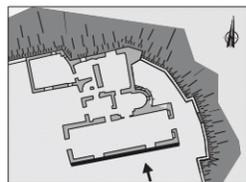
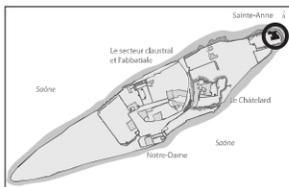
- Syrian Heritage Archive - disponible sur "syrian-heritage.org" (consulté le 10/05/2023)
- Ministère de la Culture - Notre-Dame de Paris - disponible sur "<https://notre-dame-de-paris.culture.gouv.fr/fr/un-systeme-dinformation-monumental>" (consulté le 15/04/2023)

Communication dans un congrès

- MEDINA Alfredo - *Parametric Modeling of Vaults for Notre Dame in Revit* - Autodesk University Las Vegas 2019 - 80p

Table des annexes

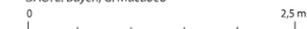
Annexe 1 Relevé pierre à pierre partiel – Mur gouttereau sud de l’église Ste Anne	50
Annexe 2 Relevé pierre à pierre partiel – Mur gouttereau sud de l’église Ste Anne - Matériaux	51
Annexe 3 Relevé pierre à pierre – Église Sainte Anne - Phasage	52
Annexe 4 Rappel sur le fonctionnement des méthodes de datations	53
Annexe 5 Maquettes du prieuré Sainte Anne	54
Annexe 6 Maquettes de l'église Notre-Dame	55
Annexe 7 Maquettes du Chatelard	56
Annexe 8 Maquette du secteur claustral	57



SAINTE-ANNÉ, ÉGLISE (BLOC A)

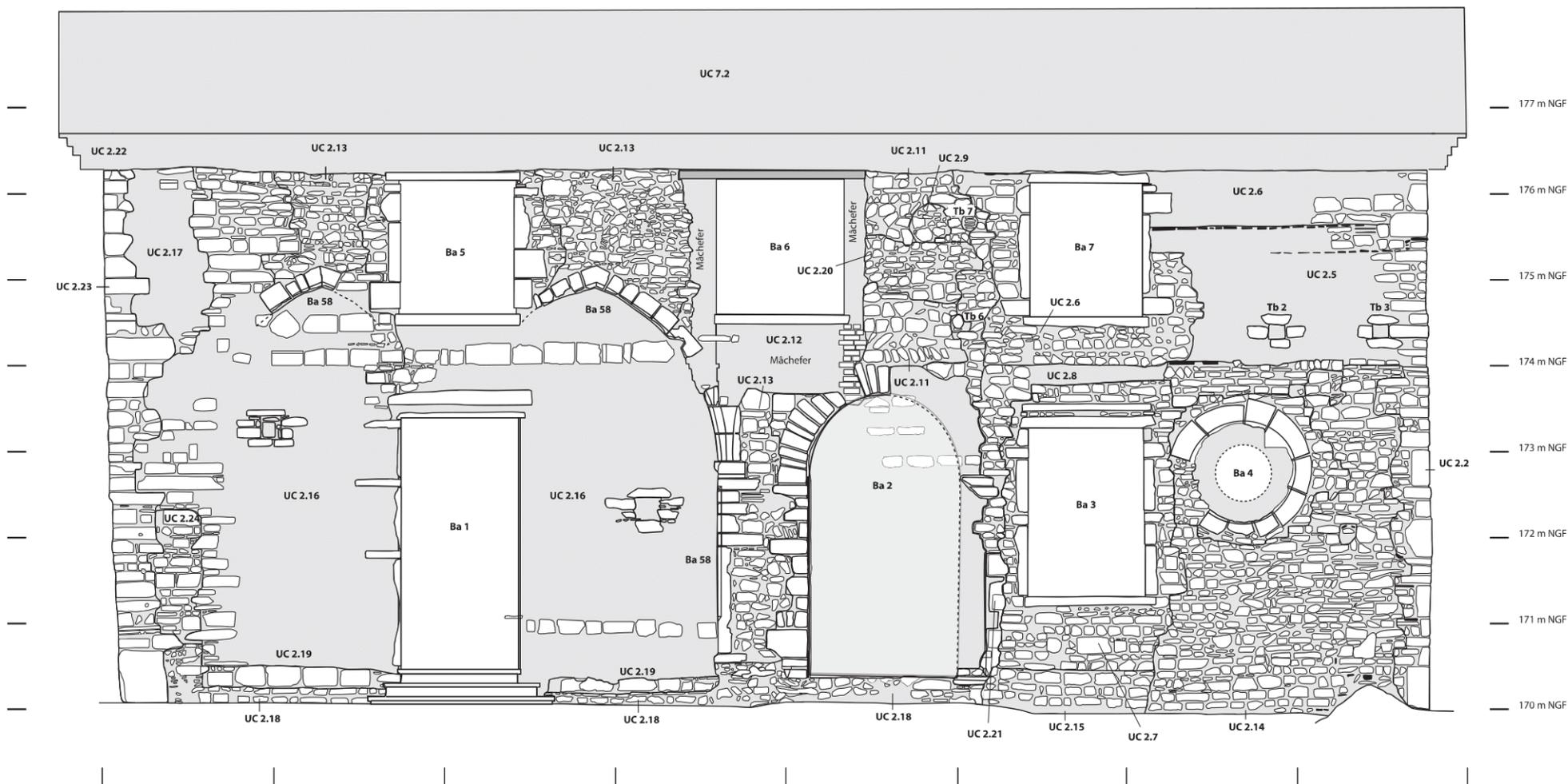
**MUR GOUTTEREAU SUD (UM 2)
RELEVÉ PIERRE À PIERRE PARTIEL.**
Éch.: 1/50e.
2011 - 2012.

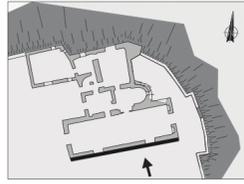
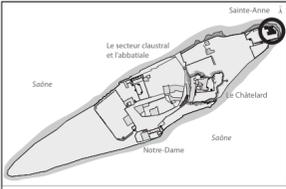
Relevé: E. Baye, Ch. Gaillard, F. Pont
DAO: E. Bayen, G. Macabeo



Annexe 1

Relevé pierre à pierre partiel – Mur gouttereau sud de l'église Ste Anne





Identification (estimation) des matériaux

SAINTE-ANNE, ÉGLISE (BLOC A)

MUR GOUTTEREAU SUD (UM 2)
MATÉRIAUX.
 Ech.: 1/50e.
 2011 - 2012.

RELEVÉ: E. Baye, Ch. Gaillard, F. Pont
 DAO: E. Bayen, G. Macabeo

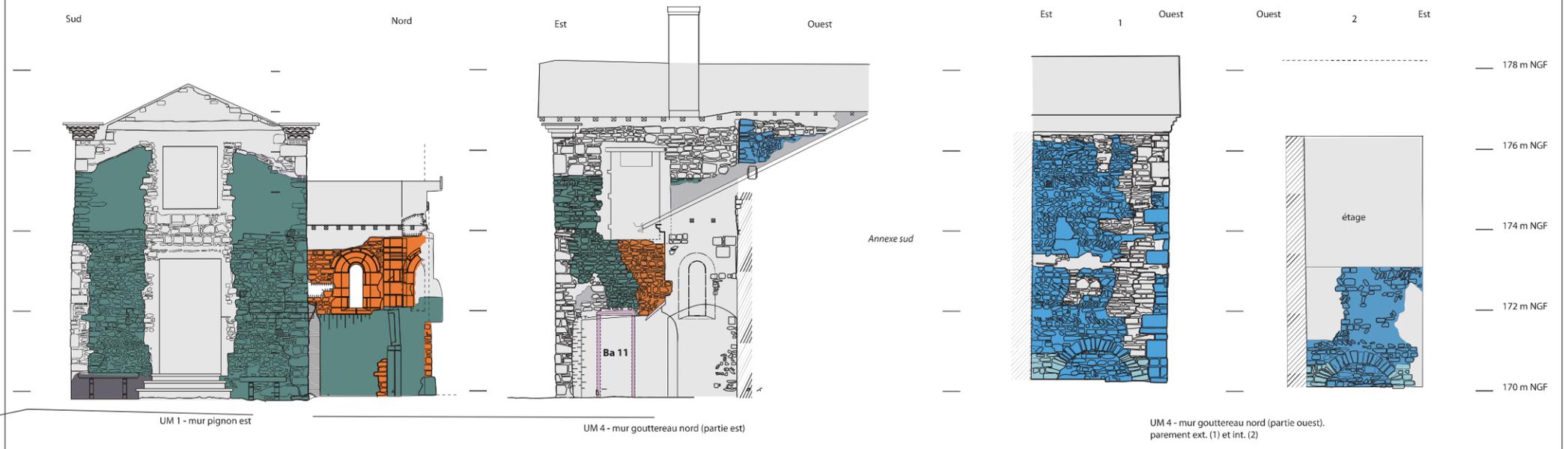


Annexe 2

Relevé pierre à pierre partiel – Mur gouttereau sud de l’église Ste Anne - Matériaux



Annexe 3 Relevé pierre à pierre – Église Sainte Anne - Phasage



Annexe 4

Rappel sur le fonctionnement des méthodes de datations

- **Carbone 14**

Cette méthode, dite de radiodation, se base sur des travaux du chimiste Williard Frank Libby effectués à partir de 1939 et qui lui vaudront le prix Nobel de chimie en 1960. Le principe repose sur la présence de carbone dans un échantillon. Celui-ci peut se décomposer en plusieurs isotopes dont les carbones 12 et 13 en grande majorité et le carbone 14. La présence de carbone 14 provient de réaction nucléaire entre les rayons cosmiques et les atomes d'azote présent dans l'atmosphère. La différence entre le C12 et le C14 peut être caractérisée par leur nombre de neutrons (respectivement 6 et 8) ou par le fait que le carbone 14 soit radioactif. L'analyse carbone 14 d'un échantillon va s'intéresser au rapport C14/C12 qui décroît exponentiellement au cours du temps en raison de la désintégration du carbone 14 du fait de son caractère radioactif. La quantité de C14 sera déterminée par spectrométrie de masse ou détection de scintillation pour obtenir un « âge carbone 14 ». Cet âge sera ensuite comparé à une courbe de calibration car la production de carbone 14 par l'atmosphère n'est pas constante au cours du temps. En résultera une datation absolue de l'échantillon.

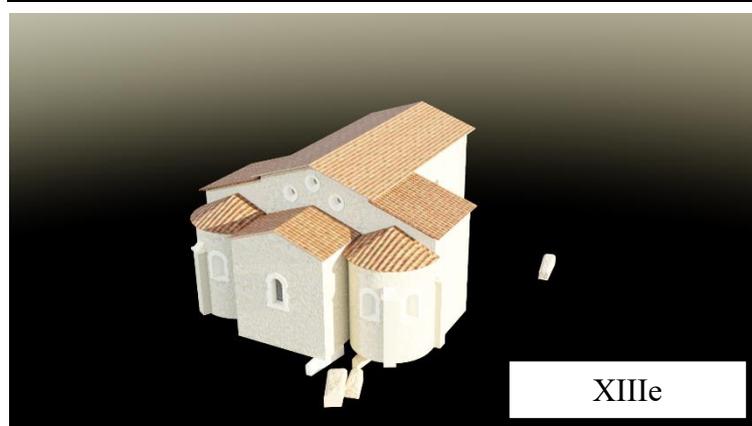
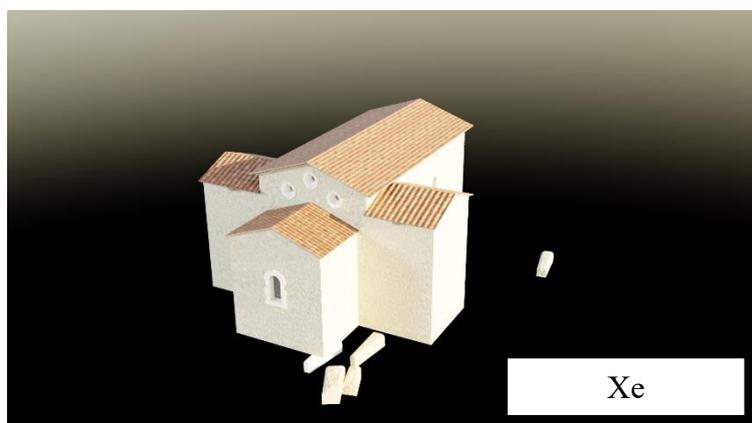
- **Thermoluminescence**

La thermoluminescence repose sur le principe de l'accumulation de charges électriques dans les minéraux lorsqu'ils sont exposés à des rayonnements ionisants, tels que les rayons cosmiques. Lorsque ces minéraux sont chauffés, les charges emmagasinées sont libérées sous forme de lumière. En mesurant l'intensité de cette lumière, les chercheurs peuvent estimer le temps écoulé depuis la dernière exposition aux rayonnements ionisants.

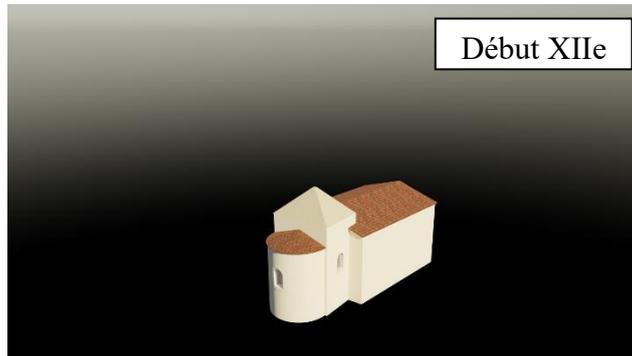
- **Archéomagnétisme**

Divers éléments comme le fer, ses oxydes (magnétite, hématite...) et ses alliages (acier, fonte...) ont la capacité lorsqu'ils sont chauffés au-delà d'une température appelée « Température de Curie » de perdre leur aimantation et lorsqu'ils sont refroidis de regagner une aimantation parallèle et proportionnelle au champ magnétique terrestre (LANOS Philippe, 2019). C'est ainsi le cas lors de la cuisson de l'argile car celle-ci contient des minéraux ferromagnésiens. Elle devient ainsi une image du champ magnétique (déclinaison, inclinaison et intensité) de sa période de cuisson. Or le champ magnétique terrestre évolue avec le temps, et cette évolution est relativement connue. Ainsi la datation de la cuisson peut être déterminée.

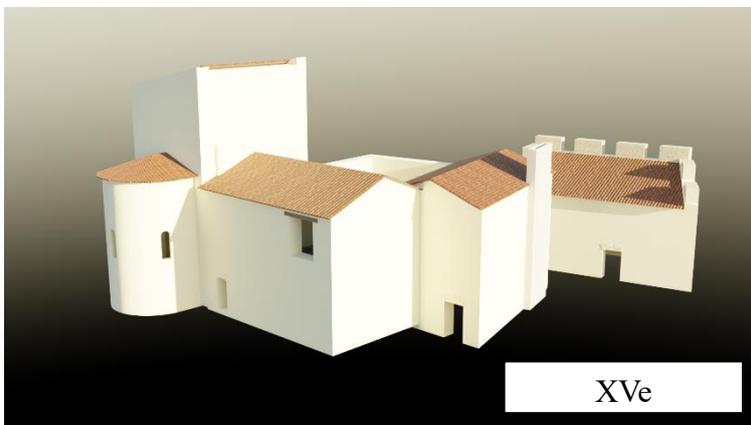
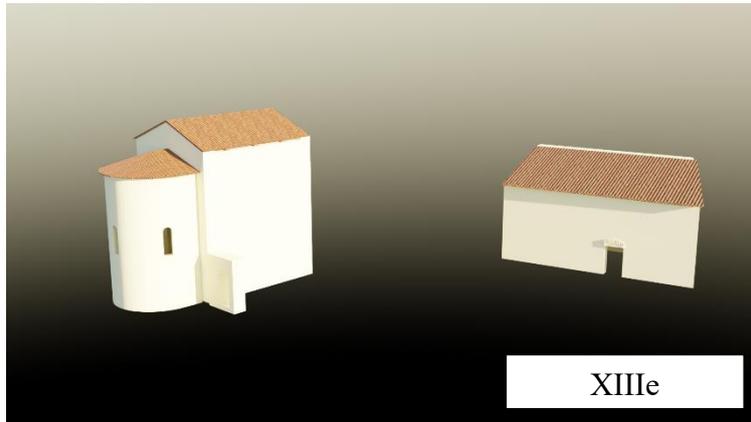
Annexe 5 Maquettes du prieuré Sainte Anne



Annexe 6 Maquettes de l'église Notre-Dame



Annexe 7 Maquettes du Chatelard



Annexe 8
Maquette du secteur claustral



Table des figures

Figure 1 : Plan schématique d'une église	3
Figure 2 : Propylées, coupe longitudinale restaurée et état actuel, Louis Boitte - Source : <i>Monuments antiques, relevés et restaurés par les architectes pensionnaires de l'Académie de France à Rome (1911)</i>	9
Figure 3 : Plan de Rome, Paul Bigot - Source : <i>artandhistory.museum</i>	9
Figure 4 : Nuage de points de Notre-Dame de Paris (CNRS) - Source : <i>culture.gouv.fr</i>	13
Figure 5 : Modèle 3D de la grotte Chauvet avec des textures géologiques – Source : <i>lejournal.cnrs.fr</i>	13
Figure 6 : Relevé pierre-à-pierre du mur sud de l'ancienne église Sainte-Anne sur l'Île-Barbe à Lyon – Source : <i>relevé du Service Archéologique de la ville de Lyon</i>	15
Figure 7 : Carte de Bedolina - Source : <i>celaniecellini.com</i>	19
Figure 8 : Plan relief du fort de Besançon – Source : <i>France3-regions.francetvinfo.fr</i>	21
Figure 9 : Situation de l'Île-Barbe à Lyon – Source : <i>Géoportail</i>	22
Figure 10 : Plan IGN de l'Île-Barbe – Source : <i>Géoportail</i>	23
Figure 11 : Illustration du LoD en BIM – Source : <i>biblus.accasoftware.com</i>	29
Figure 12 : Illustration d'un LoD aligné au LoR	31
Figure 13 : Vue NO de l'église Notre-Dame en 2023 – Source : <i>Google Maps</i>	33
Figure 14 : Scan 3D de l'église de Notre-Dame	34
Figure 16 : Nuage de points accolé au modèle BIM	34
Figure 15 : Histogramme de la distance nuage-modèle	34
Figure 17 : Vue Est du prieuré St Anne en 2023 – Source : <i>Google Maps</i>	35
Figure 18 : Évolution de la charpente du transept nord	36
Figure 19 : Vue Sud du Chatelard en 2023 – Source : <i>Google Maps</i>	37
Figure 20 : La maquette numérique comme synthèse des relevés 2D	38
Figure 21 : Hypothèse de restitution du secteur claustral au XIIIe siècle	38
Figure 22 : Plan au sol de la restitution de l'abbatiale	39
Figure 23 : Accolement de 4 textures seamless et non seamless	41
Figure 24 : Apposition d'une texture à un modèle 3D	42
Figure 25 : Restitution XVIIème de l'Île-Barbe	43

Table des tableaux

Tableau 1 : Liste des différents chantiers archéologiques à l'Île-Barbe.....	24
Tableau 2 : Qualification du LoR d'un élément	30

La maquette numérique au service de la restitution archéologique et de la valorisation du patrimoine bâti

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2023

RESUME

La restitution archéologique consiste, pour les archéologues du bâti, à envisager une construction ou un ensemble de constructions tel qu'il aurait pu exister à une époque donnée, en se basant sur des recherches historiques et leurs travaux archéologiques. Pendant une longue période, cette pratique s'est limitée à des représentations en deux dimensions, mais l'essor de l'utilisation de modèles numériques en trois dimensions offre une expérience immersive sans égale dans le domaine de la restitution.

Appliquée à l'abbaye de l'Ile Barbe, située au nord de Lyon, la maquette numérique a grandement simplifié la conception de la restitution au travers d'un processus BIM. Son caractère immersif ainsi que sa capacité à explorer de multiples hypothèses y ont joué un rôle décisif. A travers les différentes phases de restitution ainsi réalisées, la maquette numérique promet d'apporter une compréhension améliorée de ce site remarquable, tant pour les chercheurs que pour le grand public.

Mots clés : Restitution archéologique, maquette numérique, archéologie du bâti, BIM.

SUMMARY

Archaeological restitution, for built heritage archaeologists, involves envisioning a construction or a set of constructions as they might have existed during a given period, based on historical research and archaeological work. For a long time, this practice was limited to two-dimensional representations. However, the rise of Digital MockUp (DMU) offers an unparalleled immersive experience in the field of restitution.

Applied to the Abbey of Ile Barbe, located north of Lyon in France, the DMU significantly streamlined the restitution design through a BIM process. Its immersive nature and capacity to explore multiple hypotheses played a decisive role. Through the various phases of restitution carried out using the DMU, it promises to provide an enhanced understanding of this remarkable site, both for researchers and the general public.

Key words : Archaeological restitution, Digital MockUp, built heritage archaeology, BIM.