

La modélisation paramétrique : un outil de connaissance interdisciplinaire, de transmission et de production de savoir

Parametric modeling : an interdisciplinary tool for knowledge acquisition and dissemination

Wided Arfaoui ^{1,2,3*}

¹ Maître assistante et docteure en Architecture

² École nationale d'Architecture et d'urbanisme de Tunis ENAU (Université de Carthage – Tunisie)

³ Membre du laboratoire de recherche GADEV

Résumé : Dans cet article, nous nous intéressons à exposer un retour d'expérience pédagogique dans le cadre de l'enseignement de la CAO Conception Assistée par Ordinateur à l'école nationale d'architecture et d'urbanisme de Tunis : un apprentissage opérationnalisé et mis à l'épreuve auprès des étudiant-es de la 4ème année (diplôme national d'architecte). D'abord, il s'agit de montrer que la CAO dont le BIM et HBIM sont vus comme des évolutions spécialisées et l'histoire de l'architecture, champs apparemment distincts peuvent faire l'objet d'approches transversales et que l'enseignement de la CAO ne peut se limiter au juste apprentissage et maîtrise des outils de modélisation paramétrique mais qu'il doit dépasser ces aspects strictement instrumentaux afin de montrer que cet outil est un atout majeur pour la connaissance interdisciplinaire, la transmission et la production de savoir. Nous commençons par mettre en contexte l'enseignement, ses notions opératrices et ses objets de modélisation (les villas palladiennes) pour ensuite nous intéresser au cadre pédagogique par l'exploration des différentes étapes du processus de modélisation engagé afin de bien illustrer le rôle positif de cette méthode pour la manipulation et le transfert des savoir-faire architecturaux dans le cadre d'une modélisation paramétrique historique. En conclusion, un bilan, des atouts et des limitations de l'expérimentation pédagogique seront proposées.

Mots-clés : conception assistée par ordinateur, processus de modélisation paramétrique, villas palladiennes, analyse architecturale

[Abstract : In this article, we focus on presenting a pedagogical experience in the context of teaching Computer-Aided Design (CAD) at the National School of Architecture and Urbanism of Tunis: an operationalized learning experience tested with fourth-year students (National Architect Diploma). First, it is essential to demonstrate that CAD, including Building Information Modeling (BIM) and Historical BIM (HBIM), seen as specialized evolutions, and the history of architecture, seemingly distinct fields, can be approached transversally. Teaching CAD cannot be limited to mere learning and mastery of parametric modeling tools; it must surpass these strictly instrumental aspects to show that this tool is a major asset for interdisciplinary knowledge, transmission, and knowledge production. We begin by contextualizing the teaching, its operative notions, and its modeling objects (Palladian villas), then delve into the pedagogical framework by exploring the different stages of the modeling process engaged to effectively illustrate the positive role of this method in manipulating and transferring architectural know-how. In conclusion, an assessment of the benefits and limitations of the pedagogical experiment will be provided.

Keywords : *computer-aided design, parametric modeling process, palladian villas, architectural analysis*

INTRODUCTION

L'objectif de cet article est de présenter une pédagogie spécifique à l'apprentissage de la modélisation paramétrique en atelier de la conception assistée par ordinateur (CAO) à l'école nationale d'architecture et d'urbanisme de Tunis. Ce retour d'expérience provient d'un cours spécialisé dédié à l'utilisation de la CAO dans la reproduction des œuvres architecturales d'Andrea Palladio (1508-1580) et plus particulièrement sur ses villas vénitiennes. Le choix des villas palladiennes comme objet de modélisation était motivé par le fait qu'après cinq siècles, Palladio exerce aujourd'hui encore une grande fascination auprès des architectes, comme en témoignent les textes et travaux d'archi-stars du XXe tel Aldo Rossi ou Peter Eisenman etc.

L'ENSEIGNEMENT : MISE EN CONTEXTE, NOTIONS OPÉRATRICES ET OBJETS :

Mise en contexte

Dans le cadre des cours de la conception assistée par ordinateur (CAO - (M.4.2.2¹)) destinés aux étudiant-es de la quatrième année du diplôme national d'architecte que nous assurons à l'école nationale d'architecture et d'urbanisme de Tunis, il nous était impératif, depuis quelques années, d'anticiper et d'adapter cette nouvelle démarche BIM qui représente une évolution complexe mais nécessaire avec des implications multiples et de favoriser le développement de son enseignement afin de former des architectes compétitifs sur les marchés national et international.

A cet effet, et pour les sensibiliser à l'importance de cette nouvelle approche BIM, afin de développer leur potentialité à l'analyse et à l'interprétation et les préparer aux méthodes critiques spécifiques, nous nous étions appelés, dans un premier temps, à donner aux étudiant-es les moyens de constituer un BIM et avons élaboré ensemble un protocole de construction d'une maquette numérique à partir du logiciel Autodesk Revit².

¹ D'après le recueil pédagogique des enseignements de l'ENAU (<http://www.enua.rnu.tn/recueils-pedagogiques/>), « Informatique appliquée, CAO, DAO » est l'intitulé de cette matière dont l'enseignement est assuré sous forme d'un Labo informatique et dont les objectifs sont de Permettre à l'étudiant d'acquérir une compétence dans la manipulation de logiciels de conception 3D et de lui Montrer comment peut être utilisé l'outil informatique pour valoriser et justifier les choix architecturaux.

² Revit est un logiciel de modélisation de l'information du bâtiment (BIM) développé par Autodesk. Il est utilisé pour

Subséquentement, il a été observé qu'elles ou ils représentent un réel manque de familiarité avec les capacités ce logiciel et son utilisation potentielle dans d'autres domaines annexes et dérivés de l'architecture, tels que la reproduction d'architectures existantes, anciennes, patrimoniales ou même disparues.

Mais comme l'enseignement en architecture doit aller au-delà de la simple pratique du projet, nous étions toujours convaincu-es que de manière similaire, l'enseignement de la (CAO) ne devrait pas se réduire à la simple acquisition basique et apprentissage des outils de modélisation pour l'exploration conceptuelle. En effet, cet outil présente un potentiel éducatif beaucoup plus étendu, capable d'enrichir l'apprentissage des étudiants en architecture de multiples façons.

Une transversalité pédagogique intégrant l'enseignement de l'histoire et la théorie de l'architecture avec les technologies contemporaines offre une approche holistique pour relever les défis architecturaux d'aujourd'hui, en permettant aux étudiant-es de tirer parti et profit du passé tout en utilisant les ressources modernes à leur disposition. De plus, en combinant ces enseignements avec l'analyse architecturale des œuvres existantes qui ont marqué l'humanité par leur esthétique, leur fonctionnalité et leur technicité, les étudiant-es seront mieux équipé-es et capables de résoudre des obstacles techniques complexes, par la suite, dans leurs propres projets architecturaux.

Dans cette dialectique pédagogique, l'enseignement de la CAO doit chercher à autonomiser les apprenant-es en leur fournissant des ressources qu'elles ou ils pourront utiliser de manière indépendante à l'avenir. Et l'accent doit être mis sur le processus d'apprentissage de chaque apprenant-e. Cela est particulièrement pertinent lorsqu'il s'agit de modéliser des maquettes numériques historiques et de créer une couverture informative numérique permettant de documenter tout un ensemble de bâtiments, comme c'est le cas des villas palladiennes.

Notions opératrices : BIM ET HBIM

Le BIM (*building information modelling*) émerge spécifiquement pour le domaine de l'architecture et place les modèles 3D au cœur de l'ensemble du processus de conception : le modèle est l'outil pour le développement du projet, et il sert d'interface partagée, collaborative et interopérable entre différents professionnels. La modélisation

conçoit, modélise et documente des projets de construction en créant des modèles 3D détaillés qui intègrent des informations sur la construction, la gestion et la maintenance d'un bâtiment.

numérique et paramétrique de l'existant a beaucoup changé la perspective de la connaissance du patrimoine culturel, en particulier en termes de résultats attendus. (Apollonio et al. 2010). Le concept de l'information y est central car le BIM fait référence à des modèles constitués d'objets avec des informations dédiées, sémantiquement définis comme des éléments de construction, qui sont l'expression de composants constructifs en fonction de leurs caractéristiques métriques, géométriques, matérielles, structurelles et énergétiques, etc.

Ces objets "incarnent" des murs, des planchers, des fenêtres, des portes, tout en incluant des données textuelles etc. Ils sont prédéfinis par des bibliothèques, donc ils sont liés à des types. Cela est dû au fait que dans la conception de nouveaux bâtiments, les objets découlent de la production industrielle, mécanique et en série. C'est-à-dire qu'ils sont prédéfinis avant la conception du bâtiment.

Cependant, l'application du BIM à une architecture historique ou existante nécessite une réflexion prudente. Voilà pourquoi et afin de parvenir à une connaissance approfondie, mais jamais complète, d'une telle architecture dans toute sa complexité, il est nécessaire d'organiser une vaste étude des documents d'archives, afin de bien déceler toutes des phases de construction et les éléments constructifs (matériaux et techniques) qui rêvent une grande importance pour l'analyse historico-critique, car ces éléments témoignent des cultures, des événements et des acteurs qui ont marqué le temps. Cet ensemble ou structure d'informations de natures diverses : géométriques, matérielles, techniques, textuelles, constructives, historiques, etc., très souvent, ne réside pas au sein de la même plateforme numérique ou la base de données, où les caractéristiques géométriques et techniques doivent être associées aux données, et qui est le moyen privilégié aujourd'hui pour enregistrer et transmettre des données.

Ainsi lorsque le résultat attendu est la génération d'un modèle BIM à partir d'un bâtiment existant qui est un modèle polygonal organisé par des objets paramétriques avec des attributs, la perspective du processus doit changer. La littérature a prouvé qu'il pouvait également être extrêmement utile pour le patrimoine culturel et l'architecture existante, quel que soit l'âge du contexte étudié sous la forme d'un HBIM (*Historic Building Information Modelling*)³.

- Préservation et Restauration Précises (Eastman et al. ,2011) : Le (H)BIM permet la documentation détaillée de chaque élément du bâtiment existant, offrant une précision sans égale pour les travaux de restauration. Il a été largement utilisé dans la restauration de bâtiments historiques, y compris ceux datant de plusieurs siècles.
- Gestion du Cycle de Vie du Bâtiment (Murphy et al. ,2013) : Il permet de gérer le cycle de vie complet d'un bâtiment historique, de la documentation initiale à la maintenance continue. Il offre une vision holistique du bâtiment, aidant à planifier la préservation à long terme.
- Visualisation et Communication (Ioannidis et al., 2016) : Ces modèles BIM permettent des visualisations réalistes et des simulations qui aident à communiquer efficacement les concepts de préservation aux parties prenantes, y compris les décideurs politiques et le grand public.
- Planification Urbaine et Conservation du Patrimoine (El Meouche et al., 2014) : Le BIM/HBIM peut être utilisé à l'échelle urbaine pour la planification et la conservation du patrimoine, aidant à équilibrer le développement urbain moderne tout en préservant l'intégrité des quartiers historiques.

Ainsi, HBIM (*historical building information modelling*) constitue cette solution pour étudier et préserver le patrimoine à travers les siècles et peut devenir un outil formidable pour préserver l'architecture et sa mémoire. Il repose sur une caractéristique fondamentale, représentée par ses composants paramétriques qui sont conscients de leur identité architecturale et de leurs interactions sémantiques mutuelles (Dore et al. 2012). Ainsi, un modèle HBIM est une base de données idéale où les éléments, du bâtiment entier au plus petit détail, peuvent être liés à des données hétérogènes, en suivant leurs relations et rôles dans la construction globale. En d'autres termes, un modèle HBIM, paramétrique, est une représentation qui lie l'architecture de ses composants à des variables numériques qui peuvent être modifiées et mises au jour en fonction des relations sémantiques.

³ La modélisation d'informations pour les bâtiments historiques (HBIM) a été introduite en 2009 par Maurice Murphy, Eugene McGovern et Sara Pavia (Murphy et al., 2009) que selon leur définition originale, le HBIM doit être principalement considéré comme "le processus de capture de données à distance à l'aide

de la numérisation laser et du traitement ultérieur nécessaire pour identifier une méthodologie de création de plans d'architecture complets (plans orthographiques et modèles 3D) à partir de données de mesurage par lasergrammétrie et photogrammétrie pour les structures historiques".

Contexte historique et objets de la modélisation - les villas palladiennes : Saraceno, Foscari et la Rotonde

De 1538 à 1567, Palladio a conçu plus de 30 villas à travers la Vénétie, dont vingt-quatre ont été documentées sous forme de dessins dans son ouvrage phare « les Quatre Livres de l'Architecture », les six villas restantes ont été enregistrées par Scamozzi sous forme de gravures au XVIII^e siècle. Sur les trente dessins, seuls dix-neuf ont été réalisés, et parmi ceux-ci, seulement deux ressemblent à certains des dessins. La plupart des réalisations différaient considérablement des dessins présents dans les Quatre Livres ou dans le texte de Scamozzi (Olivato, 1980). Le plus important est que Palladio a rédigé les règles et les dessins pour les Quatre Livres après la construction des villas. Les dessins reflètent ce qu'il souhaitait que les bâtiments soient - non pas leur état construit. La plupart des projets se développent à partir de programmes assez similaires, et leur variation est une fonction directe de la proportion et de la distribution des parties d'une villa.

Dans la conception de cette architecture blanche d'abstraction et pédagogiquement fonctionnelle, Palladio, suivant les traces d'Alberti, utilise une idée de beauté⁴ basée sur des lois mathématiques, se référant à la définition de la symétrie déjà proposée par Vitruve. Plus que tout autre architecte de son époque, Palladio a cherché à donner forme à cette définition, en utilisant des relations mathématiques de proportion pour concevoir des espaces. Il a fait de cette définition une caractéristique de sa démarche, qu'il observait non seulement dans ses projets, mais aussi dans la conception de son traité de 1570.

Une villa palladienne était composée de deux ailes différentes : un corps central, destiné à l'usage du propriétaire et de sa famille, que Palladio appelait "casa di villa" (la maison principale sur un domaine rural) ; et deux corps latéraux destinés à l'usage et à l'exploitation d'une ferme (*barchesa* et *arcada*). C'est ce complexe que Palladio appelle "villa".

Nous notons que l'approche générale de cet exercice est non seulement de collecter et d'indexer les métadonnées telles que présentes à la source, mais aussi de réconcilier, "*clusteriser*" et normaliser certains éléments de métadonnées afin de proposer des facettes qui soient utiles et

efficaces. Autrement, l'objectif était de rapprocher la modélisation des conditions réelles des constructions existantes telles que documentées dans le dossier d'inscription des villas sur la liste du patrimoine mondial tout en les confrontant aux intentions idéales et aux prévisions de Palladio lors de la rédaction de son ouvrage et que pour un choix de méthode nous allons nous limiter à représenter les trois cas d'étude dont la villa Saraceno qui a été construite clairement d'une manière différente de celle prévue d'ores et déjà par Palladio.

La villa Saraceno : située en pleine campagne, dans la commune de Finale di Agugliaro en Vénétie et insérée dans un complexe rural qui comprend d'autres bâtiments des communs. Dans la planche publiée par Palladio, la villa se développe autour d'une cour délimitée latéralement par deux bâtiments à portique, qui tournent à angle droit en s'adossant sur les flancs de la maison de maître. En réalité, Palladio ne réalisera que la demeure de maître en l'élaborant comme une entité achevée. Formellement, il s'agit d'une architecture d'une extrême simplicité munie des formes austères. Une composition claire, symétrique, centralisée gérant le plan et l'élévation. On y retrouve la combinaison : perron frontal/ loge/ fronton triangulaire comme couronnement de la villa.

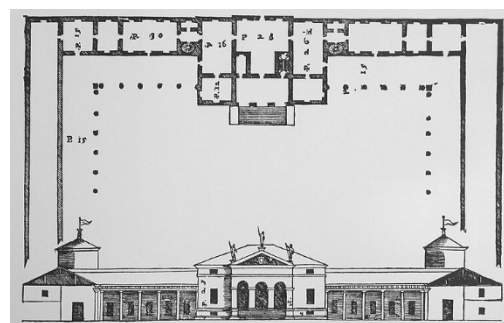


Figure 1 - Le plan de Palladio de la Villa Saraceno (Palladio, 2002).

La villa Foscari, également appelée « La Malcontenta », est située à proximité d'un méandre du Naviglio qui garantissait autrefois la liaison fluviale entre Venise et Padoue. Il s'agit d'un palais suburbain auquel la proximité de l'eau confère le charme et le caractère d'une résidence lagunaire. Construite entre 1550 et 1560 pour les frères Nicolò et Alvise Foscari. L'édifice en bossage lisse, divisé en trois ordres par de légères saillies, présente côté canal de la Brenta un pronaos ionique soutenu par une base solide. On y accède par deux rampes d'escaliers latéraux. Les spécialistes la comparent au temple romain de Clitumnus à Spoleto.

⁴ "La beauté découlera d'une forme gracieuse et de la relation de l'ensemble aux parties, ainsi que des parties entre elles et par rapport à l'ensemble" (Andrea Palladio. Les quatre livres d'architecture. Livre I, chapitre I. Traduit par Robert Tavernor et Richard Schofield).

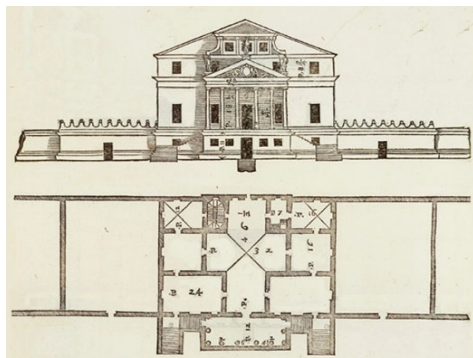


Figure 2 - Le plan de Palladio de la Villa Foscari (Palladio, 2002).

La Villa Rotonda (1566-1569) a été conçue par Andrea Palladio et achevée par Vincenzo Scamozzi. Également connue sous le nom de Villa Almerico Capra Valmarana, la Villa Rotonda est située à l'extérieur de Vicenza, en Italie. Elle est située sur le sommet d'une colline, entourée de vignobles et de terres agricoles. Il s'agit probablement du bâtiment le plus significatif de la Renaissance, vénérée à la fois pour sa connexion au classicisme romain inspiré du Panthéon (avec son dôme central circulaire allégorique des idéaux classiques) et pour sa conception novatrice qui aurait une influence sur les architectes pendant des générations. Elle est unique, car elle présente non pas une, mais quatre façades dramatiques. La structure est carrée et bilatéralement symétrique, mettant en évidence la maîtrise par Palladio des formes géométriques classiques et de la symétrie. Chacune des quatre façades possède un portique saillant avec des escaliers menant à ses six colonnes ioniques, entourant le hall circulaire central et son dôme.

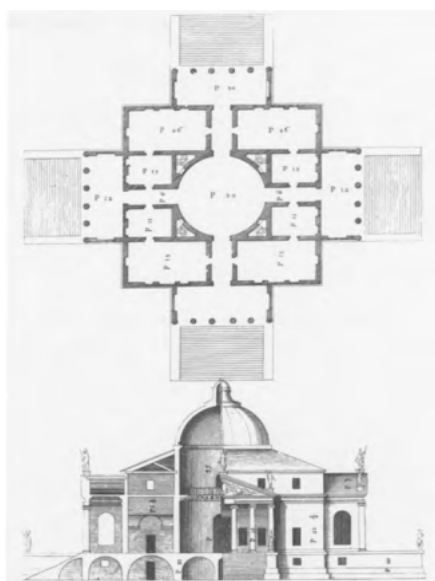


Figure 3 - Le plan de Palladio de la Villa Rotonda (Palladio, 2002).

CADRE PÉDAGOGIQUE

Les objectifs en terme d'apprentissage et de compétences

L'Objectif pédagogique ultime (l'output visé) de l'exercice consiste à la construction par l'apprenant-e d'une maquette numérique qui reproduit quelques villas palladiennes. Ces villas qui se présentent comme des empreintes de principes classiques de proportion, d'harmonie et de symétrie et qui arborent une maîtrise technique exceptionnelle en termes de conception structurelle, de disposition spatiale et d'utilisation intelligente de la lumière.

« La représentation paramétrique ou la maquette numérique » est placée au cœur du propos de l'exercice étant donné qu'elle peut être réellement considérée comme une abstraction, qui sert à approfondir la connaissance des processus de conception et de création artistique, en réinterprétant les concepts architecturaux et d'en déduire les techniques et les matériaux de construction ainsi qu'un index géométrique pour des contenus de données étendus.

Mais comme nous partons du principe suivant : Reproduire numériquement l'architecture suppose la compréhension du contexte environnemental et culturel de l'époque et doit permettre de fournir des enseignements pratiques précieux aux étudiant-es en architecture, en leur montrant comment résoudre des défis techniques complexes par étude de cas.

Alors notre visée didactique impliquerait de concevoir une méthode d'enseignement efficace et ciblée pour permettre aux étudiant-es d'acquérir les compétences nécessaires de manière approfondie et durable par le moyen :

- d'un apprentissage Concret : Travailler sur des modèles numériques concrets permet aux étudiant-es d'appliquer les connaissances théoriques dans un contexte pratique. Cela renforce leur compréhension des principes architecturaux mais aussi des principes de modélisation basiques et avancés ;
- d'un développement de Compétences Techniques : Les étudiant-es acquièrent des compétences pour interpréter les plans, les élévations et autres documents historiques afin de les traduire en modélisation 3D avancées, en rendu et en animation, ce qui est essentiel dans le monde professionnel de l'architecture ;
- d'une compréhension des Techniques Historiques : En reproduisant des détails architecturaux et architectoniques (tels que les colonnes, les chapiteaux, les architraves, les

fresques, les sculptures et les motifs décoratifs), les étudiant-es peuvent comprendre les techniques de construction et les méthodes utilisées à l'époque, ce qui élargit leur bagage de connaissances techniques. Ensuite, elles ou ils peuvent les intégrer dans la conception paramétrique ;

- d'une initiation à des collaborations interdisciplinaires avec des historiens de l'art, des ingénieurs structurels et d'autres experts. Travailler en groupe prépare les étudiant-es à collaborer efficacement dans des équipes diversifiées ;
- des Réflexion Critiques et Créatives : Étudier des modèles architecturaux complexes encourage la réflexion critique sur les choix de conception. Les étudiant-es sont amené-es à réfléchir de manière créative pour résoudre des problèmes de conception tout en respectant l'intégrité historique.

Les orientations pédagogiques :

L'exercice débute par une importante recherche documentaire⁵ basée sur une collecte de documents (monographies, articles, radiographies, plans, photographies, comptes rendus écrits, fichiers informatiques, etc.).

Cette documentation a été mise en œuvre par les groupes d'étudiant-es pour établir les documents graphiques précis, faire une analyse architecturale approfondie de l'objet de modélisation (par décomposition), pour identifier et repérer les différents éléments architecturaux (au moyen du vocabulaire approprié) et pour retracer les hypothèses concernant la composition et ensuite la modélisation.

Comme cet exercice prolonge des enseignements menés dès les premières années d'étude en architecture, impliquant une analyse par des méthodes classiques (représentations graphiques, textes, maquettes) de réalisations emblématiques de l'histoire de l'architecture. L'analyse architecturale est, alors, cette étape déterminante de l'exercice. Car l'objectif n'est plus simplement de reproduire un objet architectural, comme cela est généralement pratiqué dans ce type d'exercice. Mais ça lui dépasse vers une compréhension approfondie (critique et analytique) de cet objet historique.

Les étudiant-es possèdent des prérequis en matière de techniques d'analyse traditionnelles et ont une connaissance des particularités des différents types de représentation utilisés dans ces

analyses. Ceci n'empêche que cette phase est relativement complexe puisqu'elle consiste à dégager du corpus de villas palladiennes, une série de règles, fruit d'un important travail graphique, qui s'inscrit dans une définition de l'objet qui va du général au particulier.

Les outils Revit au service du HBIM

Un élément qui caractérise un HBIM est la complexité, parfois, des éléments à modéliser. Certains éléments ornementaux se révèlent particulièrement difficiles et chronophages à dessiner en 3D. A cet effet et en avançant dans la modélisation, nous (les étudiant-es et encadrant-es) avons choisi d'engager et de suivre un processus majoritairement manuel et chronophage.

Le développement d'API Revit⁶ et la mise en œuvre de la programmation visuelle Dynamo⁷ ont été introduits, au fur et à mesure, dans le processus de modélisation afin de l'étendre de deux manières: la première est évidemment l'automatisation et l'autre est l'amélioration de la précision. En fait, une approche HBIM telle que définie à l'origine (Murphy et al., 2009) a été partiellement poursuivie vue que nous avons basé tout le travail sur le document graphique historique parvenant d' Andrea Palladio dans son livre et complété par la recherche bibliographique poussée⁸

Le moteur paramétrique de Revit, contrairement à un logiciel CAO générique, gère la construction d'un modèle tridimensionnel en *verticalisant* le résultat à l'échelle architecturale : il n'est pas possible d'utiliser cet environnement de modélisation comme un outil de dessin électronique, car son objectif ultime est la construction virtuelle d'un prototype numérique du bâtiment étudié. Au final, une reconstruction⁹

⁶ "Revit API" (Application Programming Interface) est le langage de programmation propre au logiciel Revit. Il permet aux développeurs de créer des extensions personnalisées, des scripts et des fonctionnalités automatisées pour étendre les capacités de Revit.

⁷ Dynamo est un outil de programmation visuelle développé pour Autodesk Revit et dont on n'a pas obligé de connaître un langage de programmation pour l'utiliser. Il permet, à travers un environnement de programmation visuelle, d'aborder la modélisation de géométrie complexe et de rationaliser la création de formes architecturales.

⁸ Au lieu d'une approche de numérisation vers la modélisation d'informations construites (Scan-to-BIM) qui se base sur l'exploitation des modèles de nuages de points générés et segmentés et qui ne peuvent pas être utilisés de manière efficace pour effectuer des simulations ou des relevés de quantités, même si leur précision géométrique est importante pour créer un modèle numérique précis (Benedetti et al., 2011)

⁹ Le terme « reconstruction » détient différentes significations et connotations dans les domaines des sciences humaines. Il englobe un large éventail de processus allant de la reconstruction d'arguments dans un débat historique, en

⁵ Ensemble d'informations produites, collectées, conservées et mises à jour pour les besoins de toutes actions et/ou mesures de conservation-restauration présentes et futures et pour comparaison

paramétrique a été mise en place, donnant lieu à une grammaire cohérente capable de décrire les détails architecturaux et leur système de composition générale dans une approche paramétrique soutenue par ce logiciel.

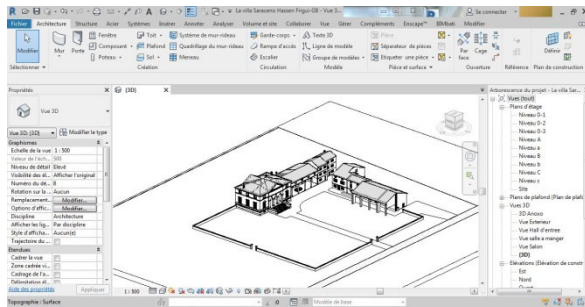


Figure 4 – Modèle (Avatar) numérique de la Villa saraceno élaboré par les étudiant-es sous Revit 2022.

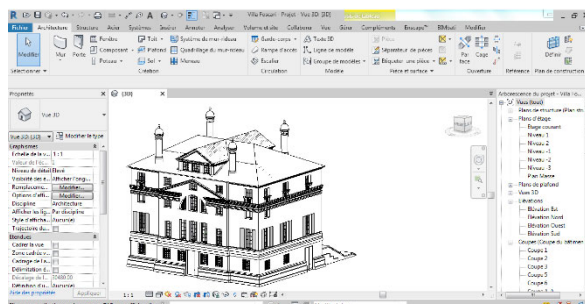


Figure - 5 Modèle (Avatar) numérique de la Villa Foscari élaboré par les étudiant-es sous Revit 2022.

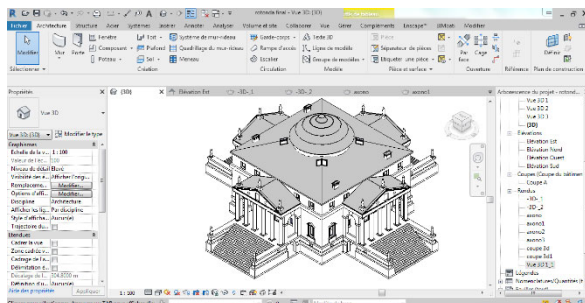


Figure - 6 Modèle (Avatar) numérique de la Villa Rotonda élaboré par les étudiant-es sous Revit 2022.

Enfin, Revit se présente comme cette plateforme partagée pour la modélisation et la gestion de ce savoir-faire architectural. Dynamo a été utilisée pour rationaliser la création des formes architecturales et des géométries complexes, la prise en charge de géométries constructives solides et pour le transfert au format Revit IFC (*Industry Foundation Class*), la manipulation d'éléments Revit grâce à des fonctions intégrées et l'analyse détaillée du modèle HBIM.

passant par la reconstruction de contextes et de conditions de recherche, jusqu'à la reconstruction d'artefacts.

Les stratégies d'évaluation utilisées

Pour mesurer les progrès des apprenant-es dans ce processus de modélisation, au-delà de l'évaluation de :

- 1) leurs capacités à mener des recherches historiques et documentaires approfondies et d'en déduire une synthèse ;
- 2) leurs capacités à analyser l'architecture de ces bâtiments, y compris les détails architecturaux, les éléments décoratifs, et l'évolution stylistique au fil du temps ;
- 3) leurs compétences dans l'utilisation et la maîtrise du logiciel pour recréer ces bâtiments avec précision. Cela peut inclure l'exactitude des proportions, la texture des matériaux, et la représentation détaillée des éléments architecturaux.

Nous avons adopté et suivi une stratégie d'évaluation entre pairs, où les apprenant-es peuvent examiner et commenter les travaux des autres, en favorisant l'apprentissage collaboratif, en développant leurs aptitudes à l'analyse critique et l'échange d'idées dans le cadre d'un feedback constructif ou elles ou ils sont appelé-es à fournir des retours constructifs basés sur leur propre perspective. Cela a permis de les aider à voir leur travail sous un nouvel angle et à identifier des aspects qu'elles ou ils pourraient avoir manqués et de les orienter vers ce qu'il faut améliorer.

LE PROCESSUS DE MODÉLISATION

Le processus utilisé de modélisation des données historiques comprend trois étapes, commençant par un manuel de chaque villa et se concluant par un référentiel tridimensionnel paramétrique appelé modèle de villa. Le manuel de villa est une clarification des règles issues des Quatre Livres, réécrivant et illustrant chaque règle sous la forme d'une simple ligne de texte. Ce manuel contient toutes les saisies relatives aux données, aux dessins et à la documentation historiques, ainsi que les règles de programmation, de construction et d'ornement nécessaires pour reconstruire une villa à partir d'un plan et des élévations 2D.

La deuxième étape relative à la modélisation consiste à appliquer les règles de construction à la représentation 3D du plan afin de créer une représentation numérique des intentions de conception de Palladio en prenant en compte les conditions de construction réelles telles que documentées dans le dossier d'inscription des villas sur la liste du patrimoine mondial¹⁰. Les

¹⁰ « La ville de Vicence et les villas de Palladio en Vénétie », Textes, photos, recherche iconographique, planimétries, projet

étudiant-es ont commencé par reconstruire le plan du site et de la villa sous forme d'une maquette topographique du site 3D avec toutes ses composantes (Figure 7).



Figure 7 - Modèle numérique de la Villa Saraceno montrant la surface topographique du site (Revit 2022).

A la fin, ce processus génère un modèle tridimensionnel paramétrique de villa : une reconstruction de bâtiment semi-automatisée des plans, des façades, des coupes, des perspectives, des vues intérieures, des animations, des visites virtuelles et une base de données jouant un rôle essentiel en intégrant des données géométriques 3D avec des informations historiques et documentaires. Elle stocke des informations variées sur les éléments historiques du bâtiment, telles que les matériaux utilisés, les techniques de construction, les changements au fil du temps, les détails architecturaux, etc. Ces données sont souvent interconnectées avec les composants du modèle 3D, créant ainsi un système complet d'information.

En résumé, ces modèles paramétriques obtenus combinent la modélisation tridimensionnelle paramétrique avec une base de données riche en informations historiques, créant ainsi une ressource précieuse pour la préservation et l'étude des bâtiments historiques, par la suite.

Ils offrent plusieurs avantages, y compris des mesures précises, l'impression tridimensionnelle et la création de rendus pour des espaces complexes à la fois intérieurs et extérieurs. Ils pourront être largement utilisés dans l'architecture pour diverses applications, y compris la restauration et la préservation, de l'ingénierie et de la recherche, la visualisation et la simulation, mais également dans d'autres domaines tels que la réalité virtuelle, la réalité augmentée et le jeu vidéo pour créer des environnements 3D interactifs et immersifs.

graphique et mise en page Rossana Viola et Rosario Ardini , bureau UNESCO en partenariat avec le ministère des biens et des activités culturelles italienne , Comune di Vicenza , traduit de l'italien par Deanna Valente. 2009-2012

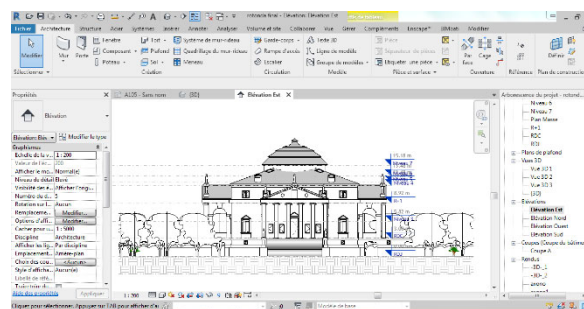


Figure - 8 Vue en Façade (la rotonde) en mode d'affichage ligne filaire issue de Revit.

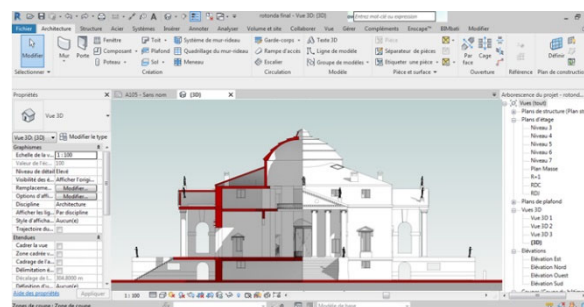


Figure 9 - Vue en coupe en mode d'affichage ombré.

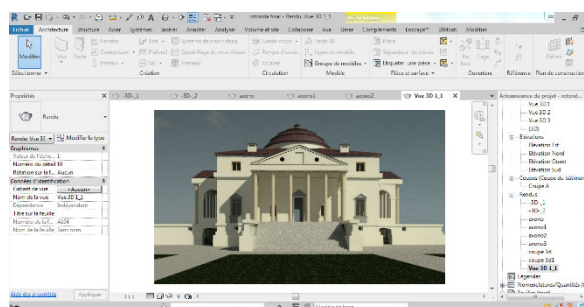


Figure - 10 Vue en Façade en mode rendu issue Revit-Enscape.

Dans les modèles HBIM obtenus, la modélisation consiste, aussi, à la création de Familles Revit paramétriques intégrées dans le processus de reconstruction de bâtiment semi-automatisée. Deux types de modèles HBIM de différents formats de Familles Revit sont créés : des classes "Familles" paramétriques créées manuellement constituant une bibliothèque de solutions BIM qui pourra être réutilisée (Portes, fenêtres, toit, dalles, murs, colonnes, éléments de décoration etc.), et des Familles Revit non modifiables dites « *in situ* » (dôme, voûtes et coupes, fronton, nervures, planchers en bois, niches, architrave etc.). Ces familles sont énormément utilisées dans le cas d'un « HBIM ». En effet, les éléments sont très souvent non standardisés et nécessitent donc une modélisation individuelle sur base des relevés effectués.

Les matériaux sont acquis grâce à des relevés des conditions existantes, en mesurant et en documentant les conditions d'origine, les techniques de construction et l'évaluation des dommages (Doglioni 1997). En plus de déterminer le matériau de construction, le processus doit également contenir des méthodes pour vérifier l'application des règles pendant le processus et dans le modèle résultant. En résumé, le processus implique des méthodes qualitatives et quantitatives pour évaluer et tester le processus ainsi que le modèle résultant.

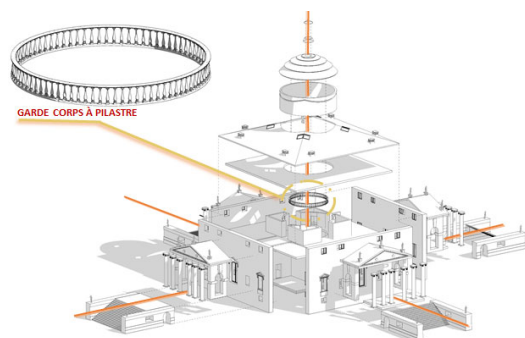


Figure 11 - Vue en perspective éclatée décomposant et mettant en évidence les Familles Revit paramétriques créées (la rotonde).

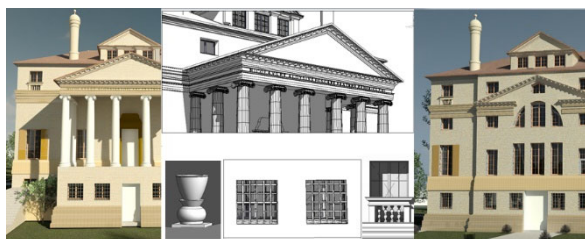


Figure 12 - Deux vues en Façade en mode rendu avec un zoom sur les Familles Revit paramétriques créées (Villa Foscari).

Comme la réalisation d'images photoréalistes est importante car elle repousse les limites de la créativité et de l'expression artistique puisque la reproduction de la réalité avec un tel niveau de détail permet d'explorer des thèmes complexes en terme de texturisation, d'éclairage et de rendu. Alors, les étudiant-es ont utilisé l'outil de rendu réaliste en temps réel Enscape¹¹. Ce dernier permet de visualiser les modifications apportées dans Revit instantanément. Grâce à l'édition et à la visualisation simultanée, les modifications apportées au modèle sont immédiatement disponibles pour évaluation dans Enscape : le modèle 3D obtenu est ainsi dynamique et navigable en temps réel.

¹¹ Enscape est un outil de rendu réaliste en temps réel qui fonctionne en tant que plugin pour plusieurs logiciels de modélisation 3D, y compris Revit, SketchUp, Rhino, et ArchiCAD. Il permet aux utilisateurs de visualiser leurs modèles 3D de manière immersive et réaliste en temps réel.

CAS D'ÉTUDE : LA VILLA LA ROTONDE



Etape 1



Etape 2



Etape 3



Etape 4



Etape 5

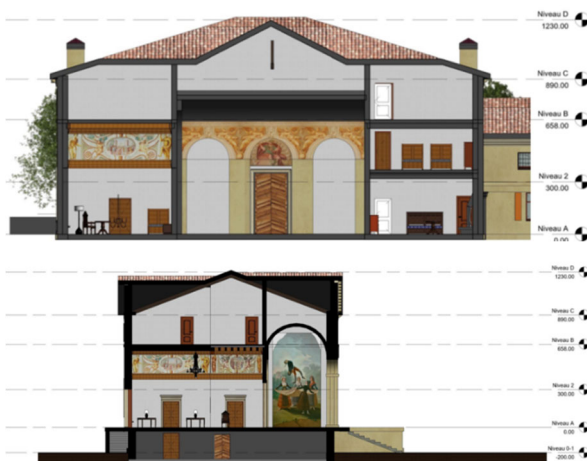
Ci-dessous , des rendus photoréalistes montrant des vues intérieures et extérieure sur la villa **Sarceno** issus du logiciel. Chaque image, chaque point-de-vue, chaque type de représentation ont fait l'objet d'essais et d'erreurs qui ont d'une part mis en exergue la spécificité du support obtenu, d'autre part exigés de la part des étudiant-es une réflexion à caractère fondamental sur la nature de la représentation architecturale, sur sa capacité (ou incapacité) à véhiculer les informations.



Figure 13 - Vue en perspective de la villa Sarceno.



Figure 14 – Détail de la structure en bois sur une vue.



Figures 15 - Détails fresque et aménagement intérieur sur deux vues en coupe issues de Revit

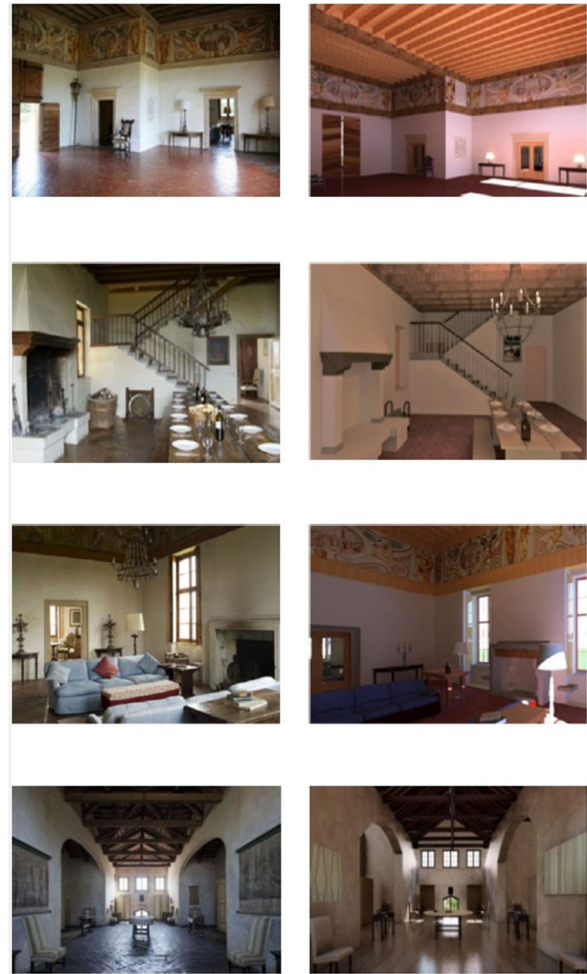


Figure 16 - Photos réelles (à gauche) Vs photos-réalistes (à droite).

Des éléments de décors des façades ont été aussi développés. Tout cela a été facilité par l'importation du maillage texturé obtenu en exploitant tout le potentiel de la fonctionnalité orthophotographie, qui permet de superposer les photos 'de voyageurs' accessibles sur le web et de les redresser sur les élévations de la modélisation 3D.

L'une des applications concrètes des procédés HBIM au sein de la maquette numérique est la possibilité d'intégrer des informations dans la famille Revit. Celles-ci sont regroupées dans les propriétés de type, sous l'onglet « données d'identifications ». Un certain nombre d'informations est contenu dans ces données, qui ont été complétées par les étudiant-es en fonction de degré de sémantisation désiré. Ces données ont été assignées au modèle et font partie d'un export au format IFC.

Une des limitations du processus de modélisation est relative à l'absence ou la non-disponibilité d'informations détaillées sur la construction des

murs, plafonds, toits et sous-sols, ce qui peut rendre le processus de modélisation plus complexe. Cependant, nous soulignons que les étudiant-es sont conscient-es de la nature itérative du processus, impliquant la documentation des données historiques, la modélisation dans ses différentes sous-phases, les évaluations, les critiques et les révisions (Schéma de synthèse ci-dessous).

L'itération dans le processus de modélisation est cruciale pour s'adapter aux nouvelles informations disponibles ou aux changements dans les objectifs de modélisation. Cette flexibilité permet d'améliorer continuellement les modèles, de les rendre plus précis et pertinents, même lorsque des défis tels que le manque d'informations détaillées se présentent.

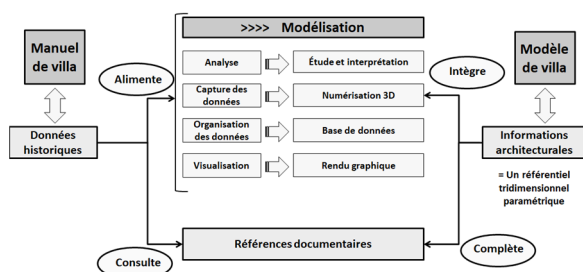


Figure 17 - Schéma de synthèse montrant le processus itératif de modélisation des données historiques suivi par les étudiant-es.

REMARQUES FINALES : LE BILAN

Cet exercice portant sur cette architecture « historique » et référentielle a pu mobiliser et réconcilier d'autres disciplines outre que l'instrument de la modélisation numérique (l'histoire de l'art et de l'architecture et sa théorie). Il a permis aux étudiant-es de renforcer leur culture architecturale, de les initier à la production de la connaissance et de le leur faire intégrer activement à un processus d'apprentissage qui nous semble être le gage d'une meilleure compréhension des moyens techniques, des caractéristiques et des concepts architecturaux de la Renaissance et qui pourront être réutilisés pour enrichir leur processus de conception.

Cependant, le savoir-faire nécessaire à la réalisation d'un tel travail est important de même que les connaissances à acquérir, tant patrimoniales que techniques. C'est pourquoi nous pensons que ce processus serait rendu plus performant par un travail collaboratif d'une équipe composée d'un certain nombre d'experts et de spécialistes dans tous les domaines touchant de près ou de loin au bâtiment étudié contribuant, échangeant et interprétant des informations et des

données complexes le concernant afin d'éclairer la compréhension de sa valeur et de sa signification.

Mais comme l'œuvre architecturale possède une propre matérialité et forme ; et comme elle est un objet chiffré et substantiellement hermétique : la modélisation d'une maquette numérique de ces dites œuvres phares de la renaissance a favorisé un positionnement critique qui a permis de désacraliser et de briser cet hermétisme. Dans leur travail, les étudiant-es ont essayé d'établir avec le dessin et le modèle tridimensionnel un champ d'analyse critique et expérimentale de la forme, en considérant le bâtiment et les dessins comme des parties fondamentales de l'architecture, en extrayant les principaux arguments, car ils sont toujours plus complexes que les énoncés théoriques.

Malgré les limites du processus de modélisation inhérentes à la non-disponibilité d'informations détaillées sur les techniques et les matériaux de construction ou l'absence des opérations réalisées sur le terrain (tel que le relevé et l'acquisition de données géométriques réalisées grâce au scanner laser 3D), nous estimons que les étudiant-es ont pu surmonter les difficultés liées à la modélisation (même en présence de quelques variabilités et de l'irrégularités relatives à ces structures) .

Elles ou ils ont pu profiter des avantages de l'HBIM qui a permis l'intégration structurée à la fois d'informations géométriques et non géométriques (incluant des valeurs tangibles relatives aux dimensions physiques de ces bâtiments et intangibles relatives à celles socio-culturelles ou architecturales) ainsi que de documents externes dans un modèle unique donnant naissance à un output final. Celui-ci est **un référentiel central** basé sur des paramètres modifiables, peut être utilisé et enrichi par plusieurs personnes, est conçu pour durer dans le temps, peut évoluer avec l'ajout de nouvelles informations, et permet aux utilisateurs de poser des questions spécifiques pour extraire des données pertinentes.

Ce référentiel est décrit comme paramétrique, collaboratif, durable, évolutif et interrogeable. Il offre une vision holistique des biens historiques. De plus, l'inclusion de documents externes, tels que des photographies d'archives ou des documents historiques, enrichit encore davantage la compréhension des bâtiments et de leur contexte. Ce processus de modélisation itératif HBIM semble avoir permis aux étudiant-es de créer une ressource riche et complète, qui peut servir de base pour des recherches approfondies, des projets de préservation et des études et recherches architecturales. Cela met en avant l'importance de l'intégration de divers types

d'informations dans le domaine du BIM, créant ainsi des modèles plus complets et informatifs pour la gestion et la préservation du patrimoine architectural.

CONCLUSION

Un modèle numérique HBIM est conçu pour améliorer la qualité et la quantité d'informations au fur et à mesure que la connaissance du bâtiment existant évolue. Lorsque cette approche est appliquée à des monuments existants, comme les villas palladiennes, la collecte de données devient un référentiel numérique complet visant la connaissance de ce patrimoine architectural héritage de la renaissance.

Les étudiant-es ont d'après nous démontré qu'un tel procédé représente un atout en termes de communication, afin de faire comprendre au grand public les modifications successives apportées à un bâtiment et qu'une seule maquette numérique correctement construite peut être utilisée tant pour la vulgarisation que pour les études techniques.

Bien qu'elles ou ils semblent avoir compris, aussi, que le processus mené et les outputs générés mettent en évidence la nécessité d'améliorations continues en termes de précision, de fiabilité et d'automatisation.

L'ouverture sur la question de la précision du modèle est une démarche honnête et importante. La transparence sur les limites et les incertitudes du modèle a pu aider les étudiant-es à comprendre dans quelle mesure elles ou ils peuvent faire confiance aux données générées. Cette démarche se trouve dans l'optique de les encourager à engager des recherches continues dans le domaine de la modélisation historique des bâtiments, conduisant éventuellement à des améliorations significatives dans la précision des modèles¹² et de les inciter à la collaboration interdisciplinaire pour développer des approches plus sophistiquées et précises pour la modélisation des bâtiments de cette nature.

Il est probable que les futurs progrès technologiques, combinés à une expertise approfondie dans le domaine, contribueront à résoudre certains de ces défis.

Toutefois, cette proposition pédagogique a mis en évidence de nombreux avantages et limites liés à la transition HBIM appliquée aux bâtiments historiques existants dans le cadre de l'enseignement de la CAO, en la considérant comme un outil de connaissance interdisciplinaire, de transmission, de production de savoir et de préservation du patrimoine culturel.

Les perspectives futures de ce travail seront axées sur l'enquête et la modélisation de tout le corpus des villas palladiennes, car un référentiel HBIM doit se référer au contexte d'enquête complet, afin de mieux comprendre comment Palladio et les constructeurs consécutifs ont pu résoudre de nombreux problèmes.

Enfin, notre défi est d'appuyer cette pédagogie par un support didactique et de le baser sur les retours des étudiant-es et leurs observations tout au long du processus de l'apprentissage et de modélisation :

- en utilisant les plateformes d'apprentissage en ligne pour héberger du contenu interactif afin que les étudiant-es peuvent interagir avec le contenu et entre eux, facilitant ainsi l'apprentissage collaboratif ;
- en organisant des ateliers où les historiens de l'architecture et les experts du patrimoine ont pu parler de leurs expériences, partager des conseils et répondre aux questions des étudiants. Cela a permis d'offrir une perspective du monde réel et susciter l'intérêt des étudiants ;
- en partageant ce retour et les études de cas sur des plateformes de publication en ligne d'articles scientifiques visant à aider l'apprenant à se construire un espace des savoirs de la modélisation paramétrique en général et de l'architecture numérique issue de l'héritage Palladien en particulier ([dnarchi.fr], [ScienceDirect]) et/ou des bases de données de samples permettant l'assistance de l'usage de la méthode des patterns. Ainsi que des bibliothèques d'objets BIM qui peuvent contenir des ensembles de données (de modèles de bâtiments, de composants architecturaux, etc.) utiles pour identifier des patterns dans les conceptions architecturales ([BIM Object Libraries]).

¹² La précision dans les modèles HBIM est cruciale, surtout si ces modèles sont utilisés pour la préservation, la restauration ou la recherche historique. Des outils plus précis, tels que des scanners laser 3D de haute qualité, peuvent être nécessaires pour capturer les détails géométriques avec la plus grande exactitude possible. L'automatisation accrue peut également aider à accélérer le processus tout en réduisant les erreurs humaines potentielles, bien que cela puisse nécessiter des avancées dans les algorithmes de modélisation et dans la technologie d'acquisition de données (Mora, 2016).

RÉFÉRENCES

- Apollonio, F. I., Gaiani, M., Remondino, F., 2010. «Una pipeline per l'acquisizione di dati 3D». Model. Digit. 3D Archeol. Caso Di Pompei. Edizioni della Normale, Pisa.
- Aicardi I., CHIABRANDO F., LINGUA Andrea et al., (2018) «Recent trends in cultural heritage 3D survey: the photogrammetric computer vision approach », Journal of Cultural Heritage, Vol. ° 32, July/August, pp. 257-266.
- Benedetti B., Gaiani M., Apollonio F.I., (2011). «Teorie per rappresentare e comunicare siti archeologici attraverso modelli critici», «SCIRES-IT», Vol.°1 N°2, pp. 33-70.
- Dore C., Murphy M., (2012). «Integration of historic BIM (HBIM) and 3D GIS for recording and managing Cultural Heritage sites», 18th International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM), Proceedings (Milano 2012), IEEEExplore digital library, pp. 369-376.
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). «BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors». John Wiley & Sons.
- El Meouche, R., Lorenz, J., Hijazi, I., & Schneider, S. (2014). «BIM-Based 3D Cadastre: A Conceptual Framework». Journal of Surveying Engineering, Vol.°140 pp. 1-10.
- Ioannidis, C., & Potsiou, C. (2016). «Visualization of Restoration Scenarios through BIM and Augmented Reality: The Case of the National Observatory of Athens». Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development, Vol.°6, pp. 281-298.
- Martin L. Pedro, LLAMAS FERNANDEZ J., MELERO G. Alavaro et al., (2010) « A practical approach to making accurate 3D layouts of interesting cultural heritage sites through digital models », Journal of cultural heritage, Vol.° 11, (Janvier-mars 2010), pp. 1-9
- Gros P.. «Palladio e l'antico». Venice: Marsilio, 2006.
- Lewis D.(2000). «The drawings of Andrea Palladio». New Orleans: Martin e St. Martin.
- Murphy, M., McGovern, E., Pavia, S., (2009). «Historic building information modelling (HBIM) », Structural Survey, Vol.°27, pp. 311-327, <https://doi.org/10.1108/02630800910985108>
- Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2013). «The Development of a Historic Building Information Model (HBIM) as a Part of a Building Conservation Master Plan». Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development, Vol.°2, pp.111-126.
- Remondino F., (2014) , «3D recording and modelling in archaeology and cultural heritage: theory and best practices», Oxford, Archaeopress, 171 p.
- Palladio A.. «Les quatre livres d'architecture» . Traduit par Robert Tavernor et Richard Schofield , 23 août 2002.
- Eisenman P.(2008), «Ten canonical buildings 1950-2000», Milano, Rizzoli
- Pascal M.,(2016) « Retour d'expérience sur des cas d'acquisition 3D et leurs usages en archéologie », Les nouvelles de l'archéologie [En ligne], 146 |
- Olivato L., Vincenzo S. (1980). «L'Idea della Architettura Universale , Architettura e utopia nella Venezia del Cinquecento», Catalogue de l'exposition, Venice, Palais Ducal, juillet-octobre , pp. 182-183.
- « La ville de Vicence et les villas de Palladio en Vénétie », Textes, photos, recherche iconographique, planimétries, projet graphique et mise en page», Rossana Viola et Rosario Ardini , bureau UNESCO en partenariat avec le ministère des biens et des activités culturelles italienne , Comune di Vicenza ,traduit de l'italien par Deanna Valente. 2009-2012.
- Centro Studi Internazionali A. Palladio, La Rotonda, Electa, 1988.
- Centro Studi Internazionali A. Palladio, Palladio 1508-2008 : il simposio del cinque centenario, Venevia, Marsilio, 2008.