



HAL
open science

Établissement de la maquette numérique d'un immeuble ancien et complexe dans le cadre d'un processus BIM

Valentin Dupré

► To cite this version:

Valentin Dupré. Établissement de la maquette numérique d'un immeuble ancien et complexe dans le cadre d'un processus BIM. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2018. dumas-02092790

HAL Id: dumas-02092790

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02092790>

Submitted on 8 Apr 2019

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

Valentin DUPRÉ

Établissement de la maquette numérique d'un immeuble ancien et complexe
dans le cadre d'un processus BIM

Soutenu le 5 Juillet 2018

JURY

PRESIDENT : Monsieur Christophe PROUDHOM

Président du jury

MEMBRES : Monsieur John DUTERTRE

Maître de stage

Madame Élisabeth BOTREL

Examinatrice

Monsieur Jean-Michel FOLLIN

Professeur référent

Remerciements

À travers cet avant-propos et pour la seule et unique fois dans la rédaction de ce mémoire, je m'exprime à la première personne et cela afin de remercier les personnes qui ont contribué à la réalisation de cette dernière étape scolaire de longue haleine qu'est le Travail de Fin d'Étude.

J'adresse tout d'abord mes remerciements pour leur accueil à Julien Dubois, président du Cabinet de géomètres-experts Pierre Bloy, ainsi qu'à ses collaborateurs.

Je tiens à remercier John Dutertre, mon maître de stage, pour son accompagnement tout au long de ces 5 mois, ses conseils avisés et sa connaissance du BIM et de la maquette numérique qu'il a su me partager.

Enfin, je souhaite exprimer ma reconnaissance envers Jean-Michel Follin, mon professeur référent au sein de l'ESGT, pour le temps qu'il m'a consacré, sa disponibilité et l'accompagnement de qualité qu'il m'a offert à travers ses conseils distillés au gré des multiples lectures de mon mémoire.

Glossaire

- 3D : les trois dimensions spatiales (X,Y,Z).
- CAO : conception assistée par ordinateur.
- DAO : dessin assisté par ordinateur, CAD en Anglais.
- MEP : mécanique – électrique – plomberie.
- Facility Management ou FM : terme anglo-saxon désignant la gestion et la maintenance d'un ouvrage.
- IPD : de l'anglais "Integrated Project Delivery", désigne une méthode collaborative issue du monde des architectes partageant des particularités avec le BIM et se définissant comme "une approche de la livraison d'un projet qui intègre les acteurs, les systèmes, les structures d'activité et les pratiques dans un processus qui rassemble de manière collaborative les talents et les visions de tous les intervenants pour optimiser les résultats du projet, augmenter la valeur pour la propriétaire, réduire les pertes et maximiser l'efficacité à travers chacune des phases de conception, fabrication et construction" (Architects International Association, 2007).
- GCP : Points de contrôle géoréférencés (de l'anglais « Ground Control Points »).

Table des matières

REMERCIEMENTS	2
GLOSSAIRE	3
TABLE DES MATIERES	4
INTRODUCTION	6
I ÉTAT DE L'ART	8
I.1 Qu'est-ce que le BIM ?	8
I.1.1 Un processus, une philosophie	8
I.1.2 Intérêts et contraintes	12
I.1.3 Les différents niveaux de BIM	15
I.2 Développement actuel	18
I.2.1 Situation internationale	19
I.2.2 Le BIM en France	19
I.2.3 Le rôle du géomètre-expert	20
I.3 La maquette numérique, support du BIM	20
I.3.1 Conception et niveaux de développement	20
I.3.2 Aspects juridiques	23
I.4 Application du processus BIM à la réhabilitation d'un immeuble parisien	24
I.4.1 Contexte parisien	25
I.4.2 Présentation du cas d'étude : un ensemble immobilier ancien et complexe	27
II REALISATION DE LA MAQUETTE NUMERIQUE	30
II.1 Acquisition des mesures	30
II.1.1 Scanner laser 3D	30
II.1.2 Drone	31
II.2 Modélisation en 3D des informations physiques	31
II.2.1 Revit	32
II.2.2 Critères de modélisation	32
II.2.3 Problèmes liés à l'architecture et solutions mises en œuvre	32
II.2.4 Limites du BIM et de la modélisation 3D pour la réhabilitation d'ouvrage ancien	48
III MODELISATION DES INFORMATIONS IMMATERIELLES	51
III.1 Intégration de données juridiques	51
III.1.1 Limites de propriété	51
III.1.2 Définition des pièces	52
III.1.3 Servitudes et contraintes	53

III.2 Difficultés d'extraction de documents nécessaires au permis de construire	54
III.2.1 Limites de propriété	54
III.2.2 Surfaces juridiques.....	55
 CONCLUSION.....	 57
 BIBLIOGRAPHIE.....	 59

Introduction

Le milieu du bâtiment et de la construction vit naître dans le courant des années 1990 une révolution qui continue aujourd'hui à se mettre en place et tente de convaincre les individus qui lui demeurent réfractaires. Permis par le développement des technologies informatiques et en particulier des modèles graphiques en 3D, le BIM s'est peu à peu imposé dans le domaine de la construction et fait la promesse d'une interaction entre les corps de métier plus efficace et de meilleurs niveaux de rendements économiques pour les maîtres d'ouvrage.

Toutefois, son implantation est un processus long et requiert une évolution des usages. Les acteurs de la construction proviennent de nombreux domaines d'activité et leur conversion à la pratique du BIM se fait à des rythmes inégaux, le degré de contrainte qui se conjugue à l'adoption des nouvelles méthodes de travail étant propre à chaque secteur. Convaincus des intérêts que procure le BIM, certains États s'engagent pour accélérer sa démocratisation, si bien que de plus en plus de projets se font désormais dans ce cadre.

Le BIM est un processus, une méthode de collaboration interprofessionnelle qui vise à s'appliquer à tous les types de projet attenant au monde du bâtiment, aussi bien pour les constructions nouvelles que pour les réhabilitations d'ouvrages. Au-delà de l'optimisation de l'interopérabilité, sa vocation est de faire du modèle numérique la pièce centrale autour de laquelle s'articule toute la vie du projet. Véritable jumeau virtuel de l'ouvrage, ce modèle constitue à la fois la carte d'identité et le carnet de santé de l'ouvrage et ce pour toute son existence.

Aussi, toutes les nouveautés qui découlent de l'application du BIM sont autant de nouveaux métiers et de nouvelles missions qui apparaissent. Les compétences du géomètre-expert lui permettent de s'approprier légitimement certaines de ces missions et de tenir un vrai rôle au sein d'un projet BIM. Les projets de réhabilitation, en particulier, mettent en exergue la place importante du géomètre-expert. La réhabilitation est, par définition, basée sur un ouvrage existant dont la mesure avec précision est nécessaire pour mettre en place un projet. En tant qu'expert de la mesure, le géomètre tient nécessairement un rôle. La vraie évolution qui s'impose à lui réside dans la forme que prend la restitution de ses mesures. Il ne s'agit plus simplement de produire des plans mais de réaliser la maquette numérique de l'ouvrage en garantissant son utilisabilité pour les autres acteurs du projet. Cela confère au géomètre-expert une place au cœur de la phase de conception du projet de réhabilitation.

Le milieu urbain concentre la quasi-totalité des projets de ce type et la pluralité des contextes propres à chaque topologie de quartier s'accompagne de contraintes inégales lors de la mise en place du processus BIM. Ainsi, il peut tout aussi bien s'agir de la réhabilitation d'une tour de 20 étages de bureaux en openspace des années 1980 à l'architecture simple, que de la réhabilitation d'un immeuble haussmannien du XIX^{ème} siècle au centre de Paris dont l'architecture est plus complexe. Chacun de ces projets a ses propres contraintes et la mission du géomètre-expert en est dépendante. Le deuxième exemple, notamment, est source de problématiques importantes quant à la faisabilité d'un processus BIM. Le modèle numérique se doit d'être le plus fidèle à la réalité possible mais, dans ce cas précis, une trop grande précision de celui-ci peut faire obstacle à son utilisabilité. Bien que paradoxal, ce fait souligne une réelle problématique pour certains acteurs du BIM : quelle est la limite entre haut niveau de détail et utilisabilité de la maquette numérique ?

Tout d'abord, il est nécessaire de bien appréhender ce que signifie le processus BIM et de comprendre ce qu'il implique. Tous les projets n'ont pas les mêmes attentes en matière de BIM, particulièrement en ce qui concerne le niveau de collaboration entre les intervenants. Cela a une incidence sur l'utilisation qui est faite de la maquette et donc sur le degré d'utilisabilité qui est attendu. À ce jour, ce processus continue son développement et reste perfectible. Le manque de recul actuel sur le sujet est la source d'interrogations, en particulier pour le cas des projets de réhabilitation de bâtiments anciens et complexes. Un exemple de ce type de projet servira donc de cas d'étude à ce mémoire.

Ce cas d'étude a pour but d'illustrer et de mettre en lumière un grand nombre des complications et interrogations qu'induit l'établissement d'un modèle numérique dans ce contexte. La modélisation des éléments physiques de la maquette est conditionnée par la complexité du bâtiment et, dans certains cas de figure, se voit limitée par les outils actuels dont l'efficacité n'est pas toujours à la hauteur des besoins. Le modélisateur doit mettre en place des solutions permettant de garantir une précision des objets numériques mais tout en gardant à l'esprit qu'ils doivent rester exploitables par les autres intervenants dans la suite du projet.

Cette modélisation matérielle doit également être suffisamment exploitable pour pouvoir intégrer les éléments immatériels qui complètent la maquette. L'intégration de ces informations, relevant pour la plupart du domaine du juridique dont le géomètre-expert est aussi le garant, sont nécessaires et s'appuient le plus souvent sur les éléments matériels. Ainsi, il est important, d'une part, de modéliser une maquette exploitable et, d'autre part, d'avoir à disposition des outils répondant aux besoins du projet.

Ce mémoire s'articule donc autour de ces axes de réflexion, sans prétendre apporter des réponses actées, mais tentant de proposer des pistes de solutions aux problématiques soulevées.

I État de l'art

I.1 Qu'est-ce que le BIM ?

I.1.1 Un processus, une philosophie

Dès l'instant à partir duquel germe l'idée de création et jusqu'au terme de la démolition, durant toute son existence, une construction fait graviter autour d'elle nombre de corps de métier qui, de près ou de loin, interviennent lors de l'élaboration du projet, sa construction, son exploitation ou sa déconstruction.

Avant même la phase de construction, ce sont les maîtres d'œuvres, les architectes, les urbanistes, les géomètres-experts qui sont appelés à participer au projet. Puis, les entreprises du BTP viennent « sortir les bâtiments de terre », accompagnées des électriciens, plombiers et autres chauffagistes. Vient alors le temps de l'exploitation du bâtiment, période qui fait la part belle au Facility Management et à l'activité des syndicats de copropriété ou bien des établissements HLM. Et enfin, à l'heure de la déconstruction, les entreprises spécialisées dans la démolition prennent, elles-aussi, part au ballet des acteurs qui ont eu à intervenir lors de la vie du bâtiment. En outre, chaque projet ayant ses spécificités, bien d'autres secteurs d'activité sont amenés à tenir un rôle lors de projet de construction.

Aussi, nous pouvons aisément imaginer les contraintes que la pluralité et la diversité d'acteurs impliquent. La communication, l'échange et la recherche d'informations sont d'autant plus compliqués que le nombre d'intervenants est important.

Retards de livraison, dépassements de budget, non-conformité des travaux ou encore opérations de maintenance inappropriées sont autant de raisons qui ont poussé les professionnels à trouver des solutions et mettre en œuvre des méthodes optimisant leurs interactions.

I.1.1.1 Essor de la technologie informatique

Les premières avancées apparaissent à partir des années 1960. Jusqu'alors, tout projet est établi à partir de plans dessinés à la main. L'arrivée dans la société civile des premières machines informatiques offre l'opportunité de faire évoluer les pratiques d'élaboration des projets. Bien que très éloignés de nos ordinateurs actuels, elles permettent aux architectes de renseigner des informations sur les composants d'une construction et d'ainsi mettre en place une base de données liée au projet. Les informations sont alors consultables de manière informatique et sont regroupées en un endroit. Ce bouleversement technologique fut la base de travaux développant la voie menant quelques décennies plus tard au BIM. Néanmoins, les interfaces graphiques demeurent peu efficaces et les plans restent sur papier. Ces plans tombent rapidement en désuétude du fait de l'impossibilité de les mettre à jour et sont la cause de surcoûts dans la phase de conception. La visualisation des objets est également compliquée et demande la production d'un nombre important de plans.

Ce n'est qu'à partir des années 1980 que les techniques de dessin font leur révolution. La conception assistée par ordinateur (CAO ou CAD en Anglais pour « computer-assisted drawing ») est une véritable avancée, notamment pour l'activité des architectes et géomètres-experts, et se démocratise rapidement avec les premiers logiciels

professionnels. Les délais et coûts de conception sont alors divisés et les informations relatives au projet sont plus facilement exploitables.

Cependant, ces avancées permises par la technologie n'améliorent véritablement que le travail des professionnels chargés de concevoir le projet et les problématiques posées par la pluralité des acteurs concernés par l'ensemble du projet ne trouvent pas réellement de réponses.

C'est dans ce contexte qu'apparaissent, dans les années 1990, les premières formes de solutions et la première utilisation du terme BIM (dans un article de van Nederveen et Tolman en 1992).

I.1.1.2 Le BIM : définition

L'essor des logiciels de CAO/DAO et leur multiplicité a marqué un grand progrès pour le domaine de la conception et de la construction. La technologie rendant désormais possible la modélisation en 3D des objets sur ordinateur, les projets sont de plus en plus établis autour de maquettes numériques.

Le bond technologique a également introduit de nouvelles problématiques. La diversité de logiciels crée des complications pour l'échange d'informations entre intervenants, notamment en raison de l'incompatibilité des fichiers entre les différents logiciels propriétaires. Le souci de compatibilité peut apparaître comme un détail mais, dans la phase de conception d'un projet, constitue un véritable frein au bon déroulement de celle-ci, empêchant les uns d'utiliser les fichiers produits par les autres et induisant des pertes de temps pour chacun.

C'est de ces constats que naît la volonté de mettre en place une nouvelle méthode de collaboration, un nouveau processus pour encadrer la vie d'un projet. Cette organisation se résumera sous le nom de BIM, acronyme qui se décline sous trois formes :

Building **I**nformation **M**odel **M**odeling **M**anagement

Ces trois déclinaisons désignent une seule et même idée, celle d'optimiser l'interopérabilité entre tous les acteurs d'un projet.

Les grands acteurs et autorités du BIM en ont, au fil des ans, modelé les contours et objectifs, sans pour autant en donner une unique définition. En voici les principales :

- Autodesk¹:
« Le BIM est un processus intelligent basé sur un modèle 3D qui donne aux professionnels de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction la

¹ Éditeur de logiciels de CAO dont Autocad et Revit font partie.

perception et les outils pour planifier, concevoir, construire et gérer plus efficacement les bâtiments et l'infrastructure. »

- Mediaconstruct²:

« Un processus métier de génération et d'exploitation des données du bâtiment pour concevoir, construire et exploiter le bâtiment lors de son cycle de vie. Dans ce cadre le BIM est un process d'échanges autour de maquettes numériques dans un esprit de travail collaboratif interne à une entreprise ou interprofessionnel. »

- Trimble³ :

« Dans l'industrie de la construction, le BIM porte sur le développement et l'exploitation de bâtiments en recourant à des données numériques accessibles à toutes les parties prenantes concernées. »

Le BIM doit se comprendre comme étant un concept de travail, un processus collaboratif, il ne s'agit pas d'un élément matériel ou d'une structure informatique qui serait simplement le modèle numérique 3D. Finalement, il n'y a pas réellement de définition pour préciser le BIM, chose peu étonnante au regard du fait que l'acronyme lui-même a plusieurs origines.

1.1.1.2.1 BIM comme Building Information Model

Traduit en Français « Modèle de l'Information du Bâtiment », cela désigne le principe d'un seul modèle numérique du projet où l'on retrouve toutes les informations qui s'y rapportent. Le BIM ainsi défini est un moyen de regrouper tous les acteurs du projet autour de la maquette du bâtiment. Tous travaillent à partir d'un modèle d'où sont extraits ou rattachés des fichiers et documents compatibles sur tous les logiciels. Le modèle numérique en lui-même ne suffit pas à parler de BIM, il faut qu'il soit renseigné et accessible à tous les intervenants. Il doit permettre de visualiser tous les éléments du projet et vérifier qu'ils interagissent ensemble de manière efficace.

En outre, il s'agit pour chaque professionnel d'inclure sa contribution dans le projet au sein du modèle numérique. Ce dernier ne doit pas être une simple source d'informations pour, par exemple, un architecte d'intérieur qui produirait des plans des fenêtres sans les rattacher au modèle numérique.

Par ailleurs, le BIM a vocation à encadrer un ouvrage de sa conception jusqu'à sa démolition, en passant par sa phase d'exploitation. Ainsi, la mise à jour du modèle tout au long de la vie de l'ouvrage est un critère essentiel à la bonne efficacité d'un processus BIM. Un modèle qui serait juste un instant donné mais ne serait pas mis à jour deviendrait

² Mediaconstruct : chapitre français de buildingSMART, présenté dans le paragraphe I.2.1.

³ Trimble : fournisseur de solutions informatiques et de matériel de mesures géodésique et topographique.

rapidement obsolète et ferait disparaître les intérêts suscités par le BIM. Un ouvrage a une durée de vie de plusieurs décennies, c'est pourquoi il est important de tenir à jour le modèle afin qu'il tienne compte des modifications opérées sur l'ouvrage. Il est primordial de garder à l'idée que le modèle doit constituer la copie numérique de l'ouvrage et être nécessairement conforme à la réalité.

Le modèle numérique doit ainsi être la base de travail pour chaque collaborateur du projet et c'est autour de cette maquette intelligente, composée d'objets pourvus d'attributs, que doit s'articuler le projet tout au long de la vie de celui-ci.

1.1.1.2.2 BIM comme Building Information Modeling

Cette déclinaison du BIM se traduit en Français par « Modélisation de l'Information du Bâtiment ». Ici, c'est le terme « modélisation » qui a son importance et qui souligne le principe de processus collaboratif pour les acteurs dans le but de construire de manière conjointe le projet. L'objectif est de faire interagir les collaborateurs de différents corps de métier entre eux.

Classiquement, tous les collaborateurs participent au projet mais de manière distante, chacun produisant sa contribution au projet et la livrant au maître d'œuvre. Si un acteur du projet rencontre un problème lié au travail d'un autre acteur impliqué en amont, nul ne doute que l'échange d'information et la communication vont être lents, rendant par conséquent la résolution du problème longue et induisant un retard dans les délais.

Le BIM a pour objectif de faire travailler ces acteurs ensemble, de les rassembler autour du projet pour qu'ils participent tous à la réalisation de celui-ci avec efficacité. Le projet doit se créer, se construire, se réaliser avec tous les collaborateurs.

1.1.1.2.3 BIM comme Building Information Management

Le terme « management » s'entend comme étant la gestion, la maîtrise, l'organisation de « l'Information du Bâtiment ». L'idée est de mettre en place une collaboration ordonnée pour mener à bien le projet.

Le BIM a pour but de mettre en œuvre une véritable gestion du projet à travers un support informatique où le planning est consultable, où tous les acteurs peuvent échanger, où les problèmes peuvent être identifiés en amont.

Le management doit permettre la bonne coordination des collaborateurs et la bonne réalisation du projet, et par conséquent réduire autant que faire se peut les pertes de temps qui surviennent à chaque étape, ralentissant l'avancement et augmentant les coûts du projet. Cet aspect du management est résumé par les termes anglais « project management » (PM).

Le BIM englobe ces trois définitions à la fois. C'est un modèle numérique intelligent qui doit être le support de travail pour tous les collaborateurs du projet, ceux-ci travaillant conjointement et interagissant de manière ordonnée tout au long de sa réalisation.

Le BIM c'est donc bien plus qu'une simple maquette 3D. Il s'agit *in fine* d'un véritable processus, d'une philosophie de travail optimisant l'interopérabilité des acteurs et l'efficacité de la réalisation et de l'exploitation d'un ouvrage.

I.1.2 Intérêts et contraintes

Si le monde de la construction est autant actif sur le développement du BIM et sa généralisation, c'est qu'il offre nombre d'intérêts. Néanmoins, il présente aussi son lot de contraintes.

I.1.2.1 Contraintes

Mettre en place un processus BIM demande aux acteurs concernés d'avoir connaissance et de comprendre ce qu'implique cette méthode de travail. De ce fait, lorsqu'une entreprise souhaite s'orienter vers le BIM pour prendre part à des projets qui s'inscrivent dans ce cadre, il est nécessaire pour elle de former ses équipes. Qui dit formation, dit coûts pour l'entreprise et perte de temps pour la production, donc manque à gagner financièrement.

En outre, le passage à un processus BIM peut demander à des entreprises un investissement IT⁴ dans des logiciels spécialisés, logiciels bien souvent coûteux.

L'impact économique dû au passage à un mode de travail orienté BIM est donc un frein important pour les entreprises, notamment pour les petites entreprises pour qui le risque à prendre est parfois trop grand.

Cependant, la seule véritable contrainte que présente le processus BIM est cet investissement initial, rapidement balayée par les avantages qu'il y a à en tirer. D'autant plus que l'État, par le biais du PIA⁵, subventionne les TPE/PME pour l'acquisition de logiciels BIM et leur formation associée à hauteur de 50% du coût et plafonné à 10 000 €. Ce programme est destiné aux entreprises de moins de 250 salariés et 50 millions d'euros de chiffre d'affaire et bénéficie d'une dotation d'un million d'euros.

I.1.2.2 Intérêts

Tout d'abord, le premier intérêt du processus est de faciliter la collaboration entre les différents corps de métier et d'optimiser l'interopérabilité. Grâce à des formats de fichiers compatibles sur tous les logiciels métiers, les échanges de données se font plus simplement et permettent un gain de temps lors de la phase de conception du projet. Cela évite les phénomènes bien trop abondants de ressaisie de l'information, un plan de bâtiment pouvant ainsi être réalisé autant de fois qu'il y a d'acteurs : architecte, géomètre-expert, électricien, entreprise gérant les réseaux d'eau, *et cætera*. Ces mêmes plans étant par ailleurs imprimés sur papier le plus souvent, des économies sur le papier et l'archivage apparaissent envisageables. En outre, la ressaisie de l'information présente le risque de produire des erreurs ou de perdre des informations. Le fait de concentrer l'information

⁴ Investissement dans les technologies de l'information (IT = « information technology »)

⁵ Programme Investissements d'Avenir – Action « Diffusion de la simulation numérique dans l'industrie »

autour d'une unique maquette facilite donc grandement son accès et permet un gain de temps considérable lors des phases de conception/construction du projet.

Lors de ces mêmes phases, le BIM permet aussi de contrôler la compatibilité des contributions des acteurs. Lors d'un chantier classique, il n'est pas rare de rencontrer au cours de la construction un « clash », c'est-à-dire une erreur de conception causée par la rencontre de deux éléments distincts. Sur l'image suivante (Figure 1), il apparaît clairement que la canalisation et la poutre, figurant en rouge, sont en conflit.

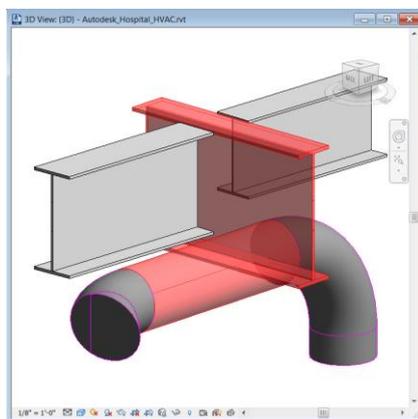


Figure 1 : exemple d'un clash détecté par un logiciel dédié au BIM.

Les logiciels dédiés au processus BIM permettent de détecter ces collisions en amont de la construction et ainsi d'anticiper ces éventuels problèmes et leurs répercussions sur le planning de la construction. Quand on sait qu'un simple conflit dû à une erreur de conception peut entraîner l'arrêt complet du chantier, il apparaît évident que détecter les « clashes » avant qu'ils ne provoquent leurs effets est primordial pour le projet.

Les progrès technologiques permettent la création de nouveaux outils, notamment grâce à la réalité augmentée. Il est désormais possible de suivre l'avancement de la construction à l'aide d'outils qui scannent le chantier et contrôlent la conformité des travaux avec le modèle 3D de l'ouvrage, puis restituent les erreurs de construction. Il s'agit là aussi de détecter en amont les problèmes qui pourraient venir perturber le bon déroulement du chantier.

Le BIM est associé au modèle numérique 3D mais en réalité ce modèle à pour objectif de prendre en compte d'autres dimensions outre ses trois dimensions spatiales. On parle alors de modèle 4D, 5D, voire 6D. L'une de ces dimensions est tout d'abord le temps. La maquette numérique doit tenir compte de la temporalité du chantier et de son évolution, c'est-à-dire permettre à son utilisateur de connaître la projection des différentes phases du projet dans le calendrier. Il est alors possible de prévoir à l'avance et d'organiser les interventions de la multitude de corps de métier qui se succèdent autour de l'ouvrage. Cela permet aussi de surveiller l'avancement du projet et de vérifier s'il tient les délais programmés. Une autre dimension intégrée au modèle est la variable financière. Pour un maître d'ouvrage, la question des coûts est majeure dans l'aboutissement d'un projet. Cette dimension de la maquette permet de connaître les coûts de l'ouvrage de manière détaillée et anticipée, mais également de prévoir les conséquences financières que pourrait avoir une

modification du projet. D'autres dimensions sont encore possibles comme la 6D avec des analyses énergétiques (consommation, pertes, économies envisageables, ...).

Par la suite, la phase de gestion et d'exploitation de l'ouvrage est également incluse dans le processus BIM. Il s'agit, avant tout, pour le propriétaire d'avoir à disposition de meilleures informations sur son patrimoine immobilier. Toutes les données issues des phases précédentes sont intégrées au modèle, modèle qui offre à son propriétaire une copie numérique de son ouvrage.

Sur l'ensemble du cycle de vie d'un ouvrage, la phase de gestion/exploitation/maintenance en constitue la quasi-totalité. Au regard de la répartition des coûts pendant le cycle de vie (Figure 2), il apparaît évident que le processus BIM a son importance lors de cette phase.

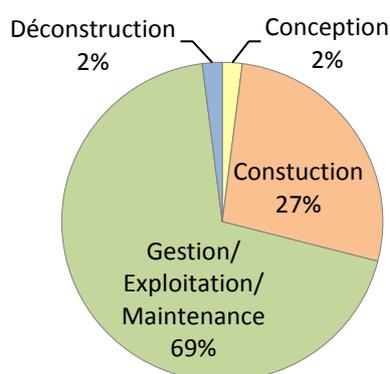


Figure 2 : répartition des coûts d'un ouvrage pendant son cycle de vie. Données de 2009.

Le BIM est particulièrement utile lors de phase de réhabilitation de l'ouvrage car il est beaucoup plus simple pour les professionnels concernés d'établir un projet à partir de la maquette richement renseignée. Avec le processus BIM, le modèle sera à jour à la suite des travaux et modifications qui ont eu lieu.

Bien connaître le bâtiment que l'on gère est un facteur important en termes de coûts. L'intérêt du BIM est de pouvoir obtenir des informations sur tous les éléments constitutifs de l'ouvrage. Cela évite alors les campagnes de diagnostics en tout genre qui n'ont parfois pour simple but que de retrouver l'emplacement de réseaux dans l'ouvrage ou encore les mesures effectuées dans le but d'obtenir des plans du site. Ces diagnostics sont à la fois très coûteux pour les gestionnaires et ralentissent l'accès à l'information. Le modèle numérique permet la diffusion de ces informations avec rapidité et sans coût.

Il permet, par ailleurs, au propriétaire de faciliter la gestion de l'espace dans l'ouvrage et l'organisation des activités qui s'y tiennent. La maquette numérique est un outil idéal pour la visualisation de l'ouvrage.

Enfin, lors de la déconstruction, les professionnels spécialisés bénéficient directement d'informations essentielles sans avoir à effectuer un ensemble de phases de diagnostic et de recherche sur le site. Cela diminue les temps de réalisation et de fait, diminue les coûts pour le maître d'ouvrage.

Un livre blanc de la Caisse des Dépôts a conclu en 2014 que le BIM permettrait de baisser les coûts des phases de conception/construction et gestion/exploitation/maintenance jusqu'à respectivement 7% et 20%. Ces chiffres sont prometteurs et encouragent les maîtres d'ouvrage à engager des projets dans le cadre du processus BIM. C'est nécessairement grâce aux maîtres d'ouvrage que le BIM peut prendre place dans le métier de la construction si son usage demeure non-obligatoire.

Toutefois, ces chiffres sont à relativiser car ils sont établis sur une étude de quelques cas précis et ne représentent pas un grand ensemble de projets. De plus, à la date où ce mémoire est rédigé, nous n'avons pas le recul nécessaire pour juger des économies faites sur la période de gestion/exploitation/maintenance de l'ouvrage qui s'étale généralement sur un minimum de 30 années.

I.1.3 Les différents niveaux de BIM

Le BIM, tel que défini précédemment, est un but à atteindre pour le monde du bâtiment. Les intérêts qu'il présente sont un moteur pour son développement, certes, mais à ce jour il serait prématuré de dire que le processus idéal peut être atteint. Beaucoup d'entreprises disent entrer dans le cadre du BIM, mais ce n'est pas toujours selon le même degré d'intensité.

Pour permettre aux différents acteurs d'y voir un peu plus clair dans les attentes et les objectifs du BIM tout en clarifiant ce que travailler dans le cadre du BIM signifie, des niveaux de maturité ont été définis : ceux-ci s'échelonnent du niveau 0 jusqu'au niveau 3.

I.1.3.1 Niveau 0, dit « pré-BIM »

À ce stade, aucun travail collaboratif n'est instauré et les livrables se limitent à des plans en 2D établis depuis les logiciels de CAO. Chaque intervenant d'un projet produit un travail isolé des autres acteurs, chacun utilisant ses propres chartes graphiques et normes de dessin, tandis que les échanges de fichiers se font sur des formats propriétaires incompatibles d'un logiciel à un autre. Ces échanges se font par courrier électronique et aucune plateforme de partage de données n'est mise en place. La plupart des entreprises ont dépassé ce stade désormais (source : Rapport BIM de NBS en 2014).

I.1.3.2 Niveau 1

Il s'agit du niveau de base du BIM. Le travail de conception passe par de la CAO 3D et la production de maquettes. Ces livrables doivent être structurés et répondre à des normes établies, sans quoi il serait impossible de parler de BIM. Au Royaume-Uni, par exemple, la norme BS 1192 : 2007⁶ encadre la production, la distribution et la qualité des informations ainsi que les conventions pour les dénominations de fichiers ou présentations. Les différents intervenants partagent leurs productions via une plateforme commune telle qu'Autodesk A360, Graphisoft BIMx ou Trimble Connect. Néanmoins, ces échanges sont

⁶ BS 1192 :2007

unidirectionnels, chacun livrant sa production et la mettant à jour mais sans une réelle interaction interdisciplinaire.



Figure 3 : illustration du niveau 1 du BIM par le site "BIM & BTP"

I.1.3.3 Niveau 2

Le travail collaboratif prend véritablement sens à ce niveau de BIM. Chaque secteur (architecte, géomètre-expert, MEP, ...) travaille sur son propre modèle 3D et les logiciels qui lui sont propres mais la grande évolution réside dans l'interopérabilité. Toutes les données sont converties dans un unique format d'échange compatible et utilisable par tous les acteurs du projet, le format IFC. Chacun doit être en mesure d'utiliser les modèles des autres et de combiner le sien à leurs données. C'est grâce à ce système de formats ouverts que tous ces modèles peuvent au final être assemblés.

Ainsi, le niveau 2 permet d'obtenir un modèle unique, fédéré et central. C'est à partir de ce modèle que peut être réalisée la détection de conflit notamment. Il est alors possible, à partir de ce niveau, de travailler avec le BIM 4D, voire 5D.

En outre, les productions doivent être structurées et répondre à des normes précises. Le processus doit être clairement défini.

Le niveau 2 constitue véritablement un BIM collaboratif asynchrone et est le niveau le plus utilisé désormais.

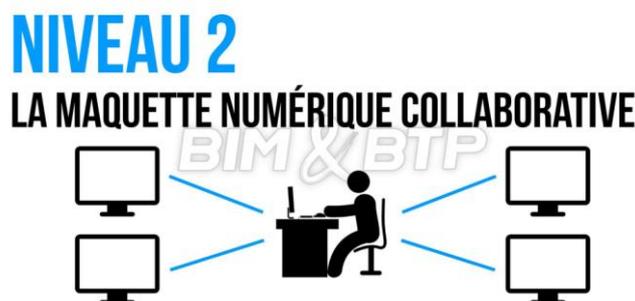


Figure 4 : illustration du niveau 2 du BIM par le site "BIM & BTP".

I.1.3.4 Niveau 3

L'iBIM⁷ ou plus simplement BIM de niveau 3 est l'objectif à atteindre. Il doit regrouper tous les avantages que présente le processus et répondre pleinement à la définition qui est faite du BIM. D'ailleurs, le véritable BIM, à proprement parler, est celui-là.

Il s'agit d'un modèle unique, accessible depuis un serveur centralisé, auquel chacun apporte sa contribution et où tous les acteurs échangent entre eux. Il est stocké en ligne durant toute la durée de vie de l'ouvrage et constitue une véritable copie numérique de celui-ci.

Un tel système demande néanmoins de faire évoluer les règles actuelles portant sur les responsabilités, la propriété intellectuelle ou bien les contrats. La technologie nécessaire limite pour l'heure son utilisation et seuls quelques grands projets testent ce que certains acteurs du monde de la construction imaginent être la grande révolution du bâtiment.

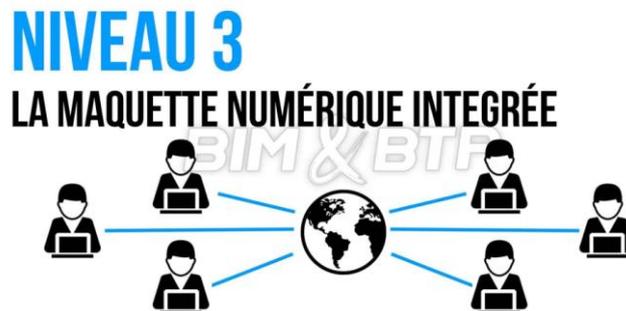


Figure 5 : illustration du niveau 3 du BIM par le site "BIM & BTP".

Afin de se rapprocher du niveau 3, Building Smart, présenté plus loin, a mis en place le projet openBIM qui a pour but de parfaire l'interopérabilité. Ce programme s'appuie sur le format de fichier ouvert IFC, permettant l'échange de données depuis des logiciels propriétaires, et surtout la bSDD, la building Smart Data Dictionary qui est une banque de données regroupant les objets BIM produits par les différents corps de métier.

⁷ iBIM : de l'Anglais « integrated BIM », en Français « BIM intégré ».

Certaines entreprises importantes utilisent des processus apparentés au BIM, notamment pour les phases de conception et construction. Il y existe un véritable travail collaboratif abouti autour d'un modèle numérique parfaitement élaboré. Seulement, ces usages se pratiquent de manière interne dans ces structures et ne constituent pas un vrai processus BIM. Le modèle numérique n'est pas utilisé lors de la vie du produit et le travail collaboratif se limite aux corps de métier présents dans l'entreprise sans intervention coopérative de l'extérieur. Cela s'applique principalement à l'industrie aéronautique, automobile ou aux grands cabinets d'architecte.

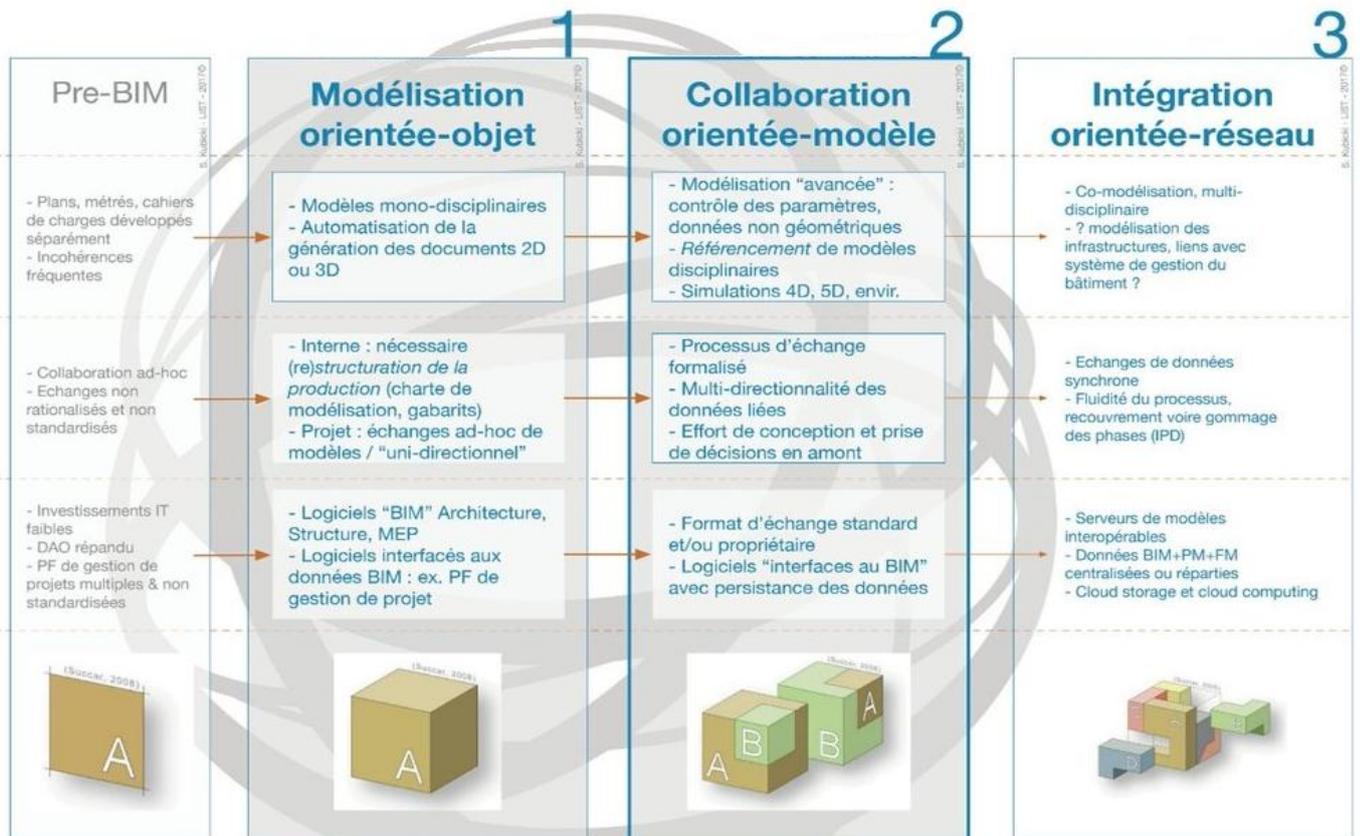


Figure 6 : les niveaux de BIM selon le Luxembourg Institute of Science and Technology.

I.2 Développement actuel

Depuis les premiers balbutiements du BIM au cours des années 1990, l'idée s'est répandue et développée à l'échelle mondiale, convaincant les grands acteurs de la construction de son bien-fondé. Cependant, l'évolution ne s'est pas faite au même rythme partout. Les changements d'habitude des corps de métier et l'arrivée de nouveaux textes de loi sont généralement des étapes laborieuses et leurs mises en œuvre suivent des durées variables.

I.2.1 Situation internationale

En 1994, un réseau de 12 entreprises, mené par le groupe Autodesk, se forme dans le but de développer un format de fichier capable de faire communiquer les différents logiciels de CAO sans perte de données et besoin de ressaisie. Ce réseau devient un an plus tard l'International Alliance for Interoperability (IAI) et prend la forme d'une organisation à but non-lucratif. C'est ainsi que naît l'Industry Foundation Classes (IFC), un format d'échange de fichiers gratuit permettant la compatibilité des informations sur tous les logiciels. L'organisation est renommée en 2005 buildingSMART et est désormais ouverte à toutes les entreprises, corps de gouvernement et institutions à travers le monde. Elle est le principal moteur du développement du BIM à l'international et du format IFC dont elle est le garant. BuildingSMART est également présente de manière locale à travers plusieurs organisations « filles » qui portent les idées à plus petite échelle. On y retrouve notamment Mediaconstruct, chapitre français de buildingSMART.

De telles organisations sont nécessaires pour développer le BIM, néanmoins elles n'ont pas le pouvoir de convaincre les entités qui demeurent réticentes à l'usage du processus. Face aux avantages évidents du BIM et la lenteur du monde de la construction pour s'y convertir, certains pays ont fait le choix de légiférer sur son usage et de le rendre obligatoire. En Europe, le Parlement européen a adopté en 2014 la directive 2014/24/UE qui laisse la liberté aux États membres d'imposer ou d'inciter l'usage du BIM. Le Royaume-Uni a, par exemple, fait le choix en 2011 de l'imposer pour tous les marchés publics à partir de 2016. Les Pays-Bas et le Danemark ont suivi le même exemple.

I.2.2 Le BIM en France

Le pouvoir législatif a transposé la directive européenne dans le droit français à travers l'ordonnance n° 2015-899 du 23 juillet 2015 relative aux marchés publics et le décret d'application n° 2016-360 du 25 mars 2016. L'article 42 de ce dernier précise notamment au paragraphe III :

« L'acheteur peut, si nécessaire, exiger l'utilisation d'outils et de dispositifs qui ne sont pas communément disponibles, tels que des outils de modélisation électronique des données du bâtiment ou des outils similaires. »

Par conséquent, les textes de loi ne rendent pas l'usage du BIM obligatoire en France, ni ne l'incitent mais se limitent simplement à offrir la possibilité d'y recourir.

Toutefois, le gouvernement a lancé une grande campagne pour promouvoir le processus à travers le Plan de Transition Numérique du Bâtiment (PTNB), lancé par Sylvia Pinel début 2015, alors ministre du logement. Le PTNB fait suite au rapport de Bertrand Delcambre⁸ de décembre 2014 qui définit les gains et avantages que présente l'adoption du

⁸ Bertrand Delcambre fut nommé président du PTNB par Sylvia Pinel. Il est également président de l'association Qualitel qui œuvre pour la qualité du logement et ex-président du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.

BIM dans le milieu de la construction. Le PTNB a pour but d'accompagner les différents corps de métier et de les encadrer dans leur conversion vers le BIM.

Le manque de mesure incitative et d'obligation a retardé l'éclosion du BIM en France, plaçant même le pays au dernier rang européen en matière d'utilisation du processus au début des années 2010 (d'après le baromètre européen d'adoption du BIM publié en 2013 par le cabinet d'étude de marché USP Marketing Consultancy). Le mouvement entamé par le PTNB a permis de familiariser nombre de corps de métier avec cette nouvelle pratique et un nouveau baromètre en 2017 plaçait la France à la 3^{ème} place du classement européen. Cela témoigne des réelles avancées faites par les professions en termes de formation et d'investissement dans le BIM. Le PTNB a présenté en Mars 2018 un « bilan d'étape » illustré de quelques chiffres. Il présente notamment un taux moyen d'adoption du BIM, toutes catégories d'acteurs confondues, de 35% à la fin de l'année 2017, contre 30% un an auparavant.

Des progrès restent encore à faire pour rattraper les pays en tête, le Royaume-Uni étant à 40% et les Pays-Bas surtout, pointant à 60% d'adoption.

I.2.3 Le rôle du géomètre-expert

Tout projet lié à des enjeux fonciers voit intervenir, parmi ses acteurs, le géomètre-expert. Véritable garant de la propriété foncière, il a pour rôle d'établir les limites de propriété et d'en dresser les plans avec précision. Il a également pour mission l'implantation d'ouvrages.

L'élément nouveau pour le géomètre-expert depuis l'arrivée du BIM concerne la modélisation en 3D de bâtiments. Il s'agit généralement d'immeubles existants dont il réalise les mesures et desquels il ne va pas simplement dessiner les plans mais modéliser une maquette numérique en trois dimensions. Cette tâche est nécessaire pour la mise en place de processus BIM « tel que construit ».

Le géomètre-expert tient donc un rôle clé dans ce procédé collaboratif. Outre la production du clone numérique de l'immeuble existant, il doit renseigner la maquette en informations juridiques telles que les servitudes, les règles de prospects, les surfaces, les informations découlant d'une copropriété et, comme énoncées plus tôt, les limites de propriété.

I.3 La maquette numérique, support du BIM

Clé de voûte du processus BIM, la maquette numérique est un outil complexe à appréhender et dont le rôle va bien au-delà de la simple représentation 3D d'un ouvrage, laquelle n'aurait d'utilité que pour la visualisation de celui-ci. Il s'agit, en effet, de construire un modèle qui serait le jumeau numérique de l'ouvrage et ce durant chaque phase de son cycle de vie. Ce faisant, la maquette numérique est soumise à de multiples contraintes, à la fois pour sa conception, sa diffusion et son exploitation.

I.3.1 Conception et niveaux de développement

Parmi le peloton de corps de métier participant à un projet, seule une poignée prend part à la phase de conception, phase à laquelle est produite la maquette numérique. On y retrouve tout d'abord les architectes, qui sont les principaux producteurs de modèle

3D et sont les seuls à réaliser un véritable travail de création. Les géomètres-experts jouent également un rôle, principalement pour la modélisation en 3D d'ouvrages existant dont ils ont réalisé les mesures et établi les limites de propriété. Viennent ensuite, les bureaux d'étude de MEP et d'ingénierie qui contribuent à la maquette dans leurs domaines d'application, sans modéliser le reste de l'ouvrage. En outre, des entreprises se sont spécialisées dans la production de maquette 3D et peuvent être amenées à tenir un rôle dans la conception de la maquette.

Le nombre d'intervenants concernés par cette phase est donc assez réduit. Tous doivent se soumettre à un niveau de développement défini et évoluant selon le stade d'avancement du projet.

I.3.1.1 Niveau de développement

Le niveau de développement est un élément important puisqu'il conditionne la réalisation de la maquette. Il doit être défini en amont entre le client et les acteurs participant à la modélisation. Généralement réduit à son acronyme anglais LOD (level of development), il est la somme de deux aspects de développement distincts :

- le niveau de détail ;
- le niveau d'information.

I.3.1.1.1 Niveau de détail

Le niveau de détail ou lod (level of detail) caractérise le degré de finesse de la maquette d'un point de vue graphique. Il permet de déterminer le niveau de précision géométrique des objets modélisés.

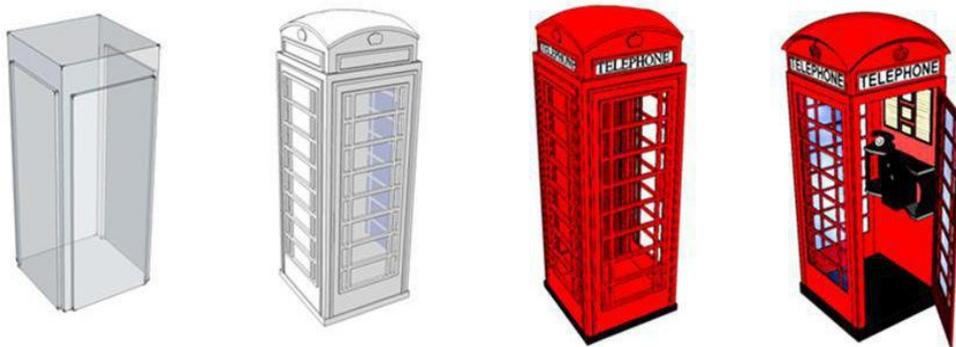


Figure 7 : illustration des niveaux de détail par le département de l'intérieur et de la mobilité de Genève.

Ainsi, un même objet peut être représenté de différentes façons (figure 7 ci-dessus) : un niveau de détail faible ne nécessitera pas plus qu'une représentation schématique sous forme de volumes, tandis qu'un haut niveau demandera un rendu parfois similaire à la réalité avec une précision inférieure au centimètre.

I.3.1.1.2 Niveau d'information

Le niveau d'information sert à décrire la granularité d'un objet et le type d'information qui doit être renseigné. La granularité permet de déterminer si les informations à indiquer concernent, par exemple, une cabine téléphonique dans son ensemble ou bien s'il faut renseigner chaque élément constitutif. De plus, le nombre d'information demandé peut varier et comprendre diverses formes de données (dimensions

de l'objet, matériaux des constituants, nom du constructeur, opérations de maintenance à effectuer, ...).

1.3.1.1.3 Échelle du niveau de développement

L'échelle la plus répandue est celle originaire des États-Unis et qui comprend 6 niveaux de développement définis du LOD 100 au LOD 500. Un projet n'est pas caractérisé par un niveau de développement précis : pour chaque étape de celui-ci le niveau de développement évolue pour s'adapter aux besoins de la phase en cours.

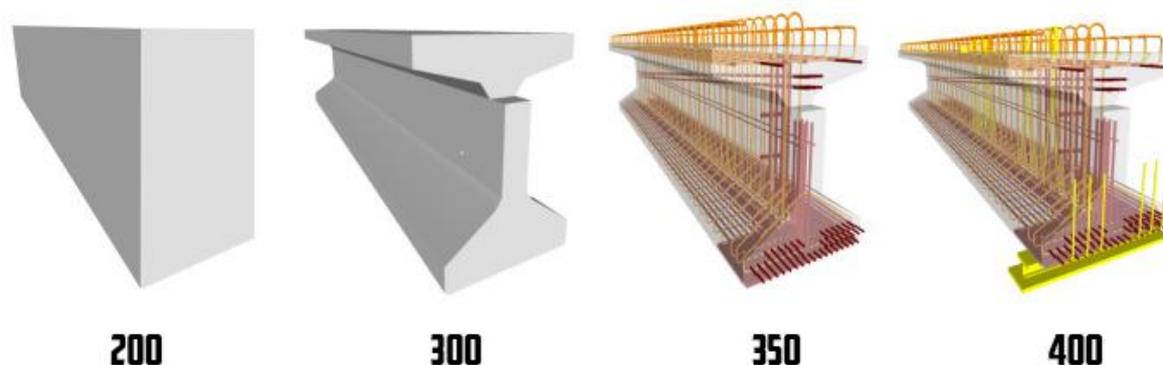


Figure 8 : poutre représentée selon différents niveaux de développement.

- **LOD 100 :**

Ce niveau convient à la phase de conception, le modèle est simplement à usage de visualisation et représente le projet de manière conceptuelle par des formes et des volumes. Aucune information non-graphique n'est nécessaire.

- **LOD 200 :**

Le modèle est représenté suivant un design basique auquel sont attachées des informations approximatives sur les dimensions, tailles, formes, quantités, position et orientation.

Une analogie peut être faite entre ce niveau de développement et des plans établis à l'échelle du 1/100^{ème} qui ont une précision de ± 3 cm.

- **LOD 300 :**

Cette fois, il s'agit d'un modèle détaillé qui est fait d'objets spécifiques et les informations renseignées doivent être précises (de l'ordre du centimètre).

Une analogie peut être faite entre ce niveau de développement et des plans établis à l'échelle du 1/50^{ème} qui ont une précision de ± 1 cm.

- **LOD 350 :**

Idem LOD 300 mais ce niveau induit que le modèle représente l'interaction des éléments entre eux. Ce niveau de développement correspond à la documentation pour la construction.

- **LOD 400 :**

Idem LOD 350 et doit en plus renseigner les éléments en termes de fabrication, assemblage et d'installation. La phase concernée est la phase de construction.

- **LOD 500 :**

Le modèle doit renvoyer à l'ouvrage tel que construit et vérifié sur place et intégrer toutes les informations déjà nécessaires aux niveaux inférieurs.

Ces niveaux de développement peuvent être mis en parallèle avec la loi MOP (Maîtrise d'Ouvrage Publique) qui définit chaque élément de mission et étape de la maîtrise d'œuvre. La réglementation de la loi MOP est parfaitement compatible avec la mise en place du processus BIM.

I.3.1.2 Conception

La conception de la maquette est donc bien encadrée par ces niveaux de développement. L'enjeu principal est de correctement définir le niveau nécessaire entre le client et le modélisateur car cela modifie profondément le type et la durée de travail de ce dernier.

Un niveau mal adapté pourrait ralentir le processus de développement du projet et/ou causer des surcoûts. Pour un géomètre-expert amené à modéliser un ouvrage, la différence entre un LOD 200 et un LOD 300 semble faible et pourtant, la plus grande précision demandée par le LOD 300 implique un travail plus long et chronophage pour dresser la maquette numérique.

I.3.2 Aspects juridiques

La présence d'une maquette numérique dans le projet et la réalisation de l'ouvrage dans un processus BIM bouleversent certains usages dans la pratique et demandent également d'anticiper bon nombre de problèmes. Des questions se posent notamment dans le domaine du droit, d'autant plus que le cadre juridique du BIM n'est pas défini par des textes de loi ou règlements.

Tout d'abord, la protection de la maquette par des droits de propriété intellectuelle pour ses auteurs est envisageable. Ces droits se décomposent en droits industriels et droits d'auteur. Ces derniers revêtent une importance singulière puisqu'ils garantissent à l'auteur d'une œuvre un droit de respect de celle-ci, un droit de représentation ou encore un droit de modification, entre autres. Il convient donc pour le maître d'ouvrage de prévoir explicitement en amont de quelle manière les droits de propriété intellectuelle doivent s'appliquer tout au long de la durée de vie d'un ouvrage et de son avatar numérique. Une mauvaise appréhension de ces droits dans les contrats peut avoir des conséquences pénales et résulter en un blocage du projet.

Par ailleurs, le BIM doit prévoir de nouvelles prises en compte en matière de responsabilité. L'article 1792 du Code Civil contraint déjà les constructeurs (tels que

définis par le Code Civil⁹) à des responsabilités via la garantie décennale, la garantie de bon fonctionnement et la garantie de parfait achèvement. En droit commun, peuvent aussi s'appliquer les responsabilités contractuelle, délictuelle (et quasi-délictuelle) et pénale. Toutefois, le modèle numérique est un objet qui est amené à évoluer tout au long de la durée de vie de l'ouvrage de manière à constamment se tenir à jour et donc, de fait, à subir des modifications. Or, si un géomètre-expert produit une maquette et que celle-ci est modifiée plusieurs fois par divers intervenants, le jour où un défaut de construction apparaîtra et sera dû à une erreur de conception de la maquette, il sera important de pouvoir désigner le réel responsable. Cet enjeu actuel met en lumière l'importance de prévoir une traçabilité des interventions opérées.

Avec ces modifications constantes, il est important de clarifier en amont du projet les responsabilités et les libertés de modification de chacun des intervenants. Un poste est né de ce besoin et vient garantir la bonne interaction de tous les acteurs, il s'agit du « BIM manager ».

Ainsi, pour qu'un projet BIM soit parfaitement viable juridiquement, les contrats doivent être l'élément clé encadrant le travail collaboratif et doivent « définir les règles du jeu de l'opération » (revue Géomètre, n°2146 d'avril 2017).

I.4 Application du processus BIM à la réhabilitation d'un immeuble parisien

Les réhabilitations immobilières visent à réaménager un bien existant, cela pouvant passer par des travaux de gros œuvre ou simplement par la pose de nouvelles cloisons. La réalisation de modifications sur un bâtiment est désormais l'occasion pour les propriétaires de passer par le processus BIM. La gestion du patrimoine immobilier via un modèle numérique, promettant une baisse des coûts de maintenance et d'entretien, constitue l'attrait majeur pour les maîtres d'ouvrage.

Les projets de réhabilitation voient principalement le jour dans les zones urbaines denses, secteurs où les terrains libres pour des constructions nouvelles sont de plus en plus rares. C'est notamment le cas du projet de réhabilitation qui va servir de cas d'étude afin

⁹ Sont définis comme constructeurs aux articles 1792 et suivants :

« 1° Tout architecte, entrepreneur, technicien ou autre personne liée au maître de l'ouvrage par un contrat de louage d'ouvrage ;

2° Toute personne qui vend, après achèvement, un ouvrage qu'elle a construit ou fait construire ;

3° Toute personne qui, bien qu'agissant en qualité de mandataire du propriétaire de l'ouvrage accomplit une mission assimilable à celle d'un locateur d'ouvrage ».

de répondre à la problématique de ce mémoire. Ce projet prend place au cœur de Paris et s'inscrit dans un processus BIM.

I.4.1 Contexte parisien

Le paysage immobilier de la capitale est essentiellement composé d'appartements et de bureaux, l'habitat individuel étant extrêmement rare et en voie d'extinction. La densité d'habitants ainsi que le besoin de logement sont à des niveaux élevés et la valeur foncière atteint des sommets importants.

Paris offre donc un contexte propice aux investisseurs, dont une des stratégies d'investissement éprouvées est la réhabilitation d'immeuble.

I.4.1.1 Haute densité du bâti

Quelques rares exceptions survivent à la pression des promoteurs et à leur chasse incessante des dernières parcelles de terre parisiennes qui n'ont pas succombé à la densification. Pour le reste, l'immobilier s'est déjà densifié au cours de vagues successives qui ont modelé le tissu urbain. Paris est ainsi devenue l'une des mégapoles les plus denses au monde avec plus de 20 000 habitants par km² (Demographia world urban areas, édition de 2018).

Cette forte densité se répercute sur la forme du bâti, d'autant plus que, contrairement aux cités très denses de sa banlieue, Paris concentre également énormément d'emplois du secteur tertiaire à travers toute la ville. Concentrant 31% des emplois de l'aire urbaine, la capitale attire plus d'un million de personnes de l'extérieur, soit la moitié des salariés de la cité. À la grande quantité de logements s'ajoutent donc celle des bureaux et commerces.

Cet environnement pousse à la densification des espaces bâtis et un certain nombre de zones sont d'ores et déjà saturées. Cela se retrouve dans l'organisation des îlots d'immeubles. Un îlot est formé d'un ensemble de parcelles contiguës entourées par des voies de circulation. Ces îlots se retrouvent dans quelque zone urbaine, cependant à Paris l'agencement du bâti témoigne de sa densité.

La figure 9 ci-dessous illustre ce propos. Il s'agit d'une vue aérienne dans le 2^{ème} arrondissement, un des quartiers historiquement les plus densément bâtis. Les îlots sont de grande taille et voient s'entremêler en leur sein une multitude de constructions laissant finalement peu d'espace vide. Les règlements d'urbanisme du XX^e siècle ont tout de même tenté de contenir la densification jusqu'à un certain seuil pour permettre de garantir certaines nécessités en termes de salubrité. Une densité du bâti plus importante n'aurait plus permis une bonne circulation de l'air dans les logements et la présence de lumière naturelle pour les étages inférieurs. Si cet enchevêtrement a tant une allure anarchique et hétéroclite, c'est parce qu'il s'est édifié au fil des réhabilitations successives avec des constructions d'époques diverses. Il n'est pas rare qu'un bâtiment fraîchement érigé soit voisin d'un immeuble de la fin du XIX^e siècle.

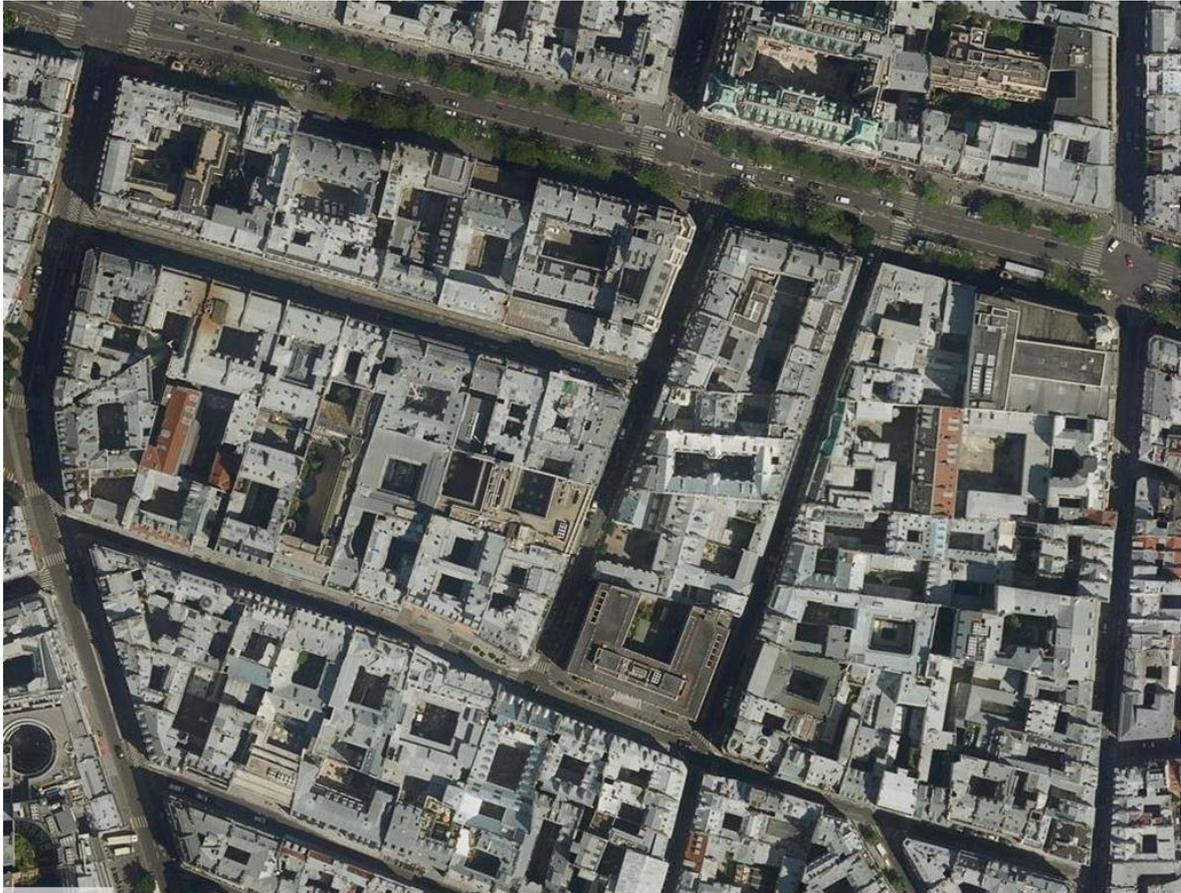


Figure 9 : photographie aérienne de Paris dans le 2ème arrondissement. Source : Géoportail.

La haute densité du bâti se traduit par une organisation complexe qui peut être source de complications lors de projets de réhabilitation, entre autres.

I.4.1.2 Prix de l'immobilier et marché tendu

La forte demande en logement dans la capitale a créé un marché de l'immobilier très actif et a alimenté les spéculations. Au fil des années, le prix au mètre carré d'un bien habitable a explosé, à tel point que Paris est devenue l'une des villes les plus chères au monde (d'après une étude du cabinet de conseil CBRE parue en septembre 2015 plaçant Paris au 4^{ème} rang mondial). La croissance de la valeur immobilière ne cesse d'être forte et les investissements spéculatifs gardent le vent en poupe.

Ce contexte conditionne les projets immobiliers et impacte les responsabilités des acteurs. En effet, les risques économiques sont plus grands pour le maître d'ouvrage et les éventuelles erreurs des intervenants plus onéreuses.

Le rôle du géomètre-expert reste le même qu'ailleurs en France, cependant, une erreur de mesure sur les surfaces d'un bien immobilier a des conséquences économiques plus importantes. La moyenne du prix du mètre carré s'établit, début 2018, à 9200 € dans la capitale. Pour certains biens de luxe, le mètre carré peut même monter jusqu'à 30 000 €. De ce fait, un écart sur les surfaces est non-négligeable et compte tenu des pertes financières que cela peut entraîner, les responsabilités qui engagent le géomètre-expert peuvent avoir des conséquences plus graves en cas d'erreur.

I.4.2 Présentation du cas d'étude : un ensemble immobilier ancien et complexe

La réflexion autour de la problématique de ce mémoire s'appuie sur le cas d'une réhabilitation d'immeuble ancien dans Paris. Le terme « ancien » a son importance dans ce type de projet, puisque, contrairement à un bâtiment plus récent, l'architecture est bien plus irrégulière et a son incidence sur le travail de modélisation de l'ouvrage.

I.4.2.1 Situation

Il s'agit d'un projet de réhabilitation d'un ensemble de quatre bâtiments mitoyens dont le plus élevé est sur 5 étages plus combles. Ils sont composés à la fois de logements et de bureaux.

L'objet de la réhabilitation est de remettre en état les appartements, dont certains sont en état d'insalubrité, ainsi que de créer des surfaces de bureaux au cœur de Paris. Ce projet répond à une stratégie d'investissement du maître d'ouvrage, lequel a acheté l'ensemble immobilier dans un mauvais état à bas coût et compte le revendre une fois sa rénovation exécutée.

Le projet a fait intervenir divers acteurs, notamment au cours de la phase de conception, et s'est naturellement orienté vers un processus BIM. Du point de vue du géomètre-expert intervenant dans ce projet, il s'agit essentiellement de coopérer efficacement avec le maître d'ouvrage et l'architecte.

L'ensemble immobilier en question se situe dans le II^e arrondissement parisien, rue Saint-Denis. Il s'agit d'un quartier historique de la ville, proche des Halles et de l'île de la Cité, dont la valeur foncière est supérieure à la moyenne de la commune.

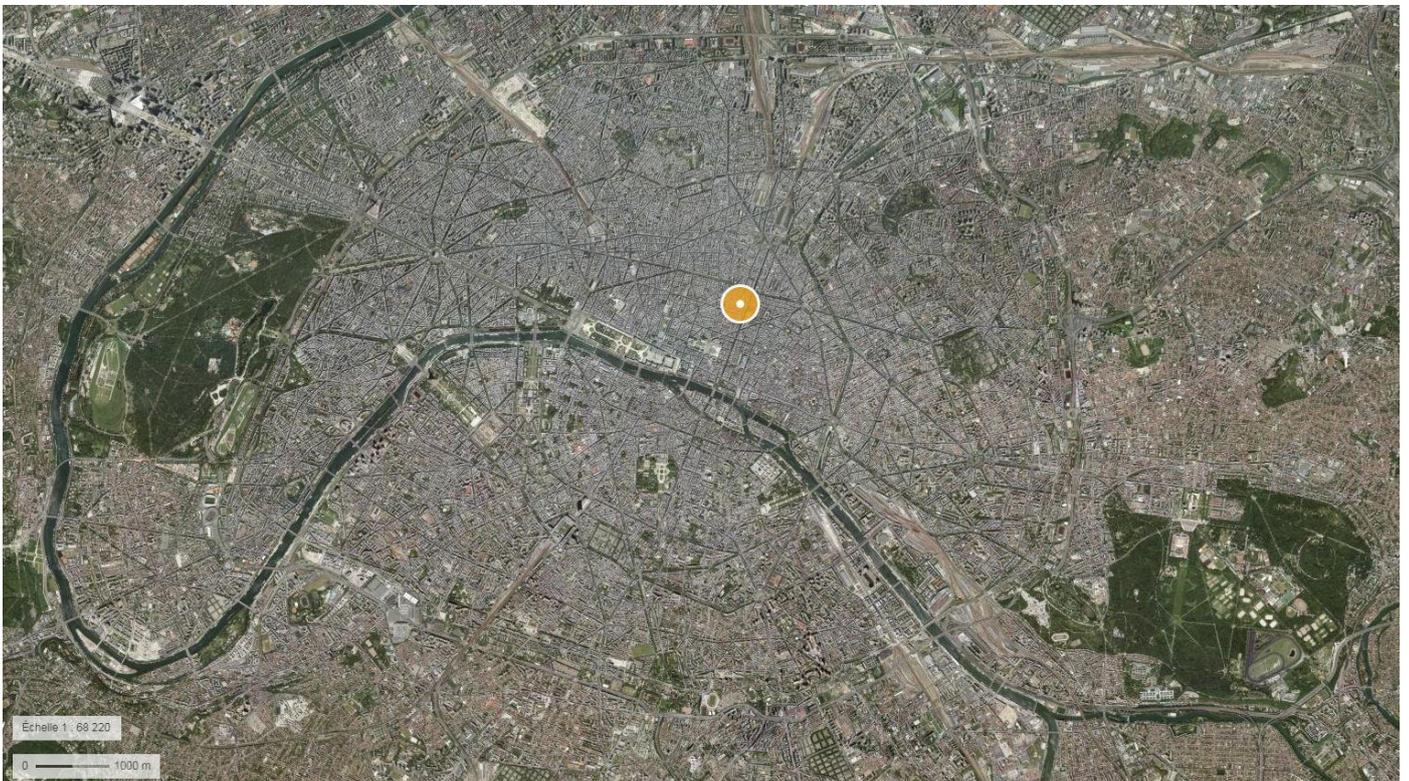


Figure 10 : vue aérienne de Paris, le point orange étant la position de l'immeuble étudié. Source : Géoportail.

I.4.2.2 Complexité structurelle et architecturale

Le quartier Bonne-Nouvelle est historiquement un quartier populaire très densément peuplé de la ville. Il est intégré à la cité lors de la seconde partie du XIV^e siècle et la construction de l'enceinte Charles V¹⁰. Le quartier se densifie vite et atteint un siècle plus tard une densité de plus de 100 000 habitants au kilomètre carré (*Vie et histoire du II^e arrondissement*).

Construits en bois, les logements sont progressivement détruits et rebâti en pierre pour des logements plus grands et plus solides à partir du XIX^e siècle. Ce renouvellement de l'habitat fait baisser la densité d'habitants au fil des décennies, celle-ci stagnant désormais autour de 23 000 hab./km². Le quartier demeure tout de même au-dessus de la densité moyenne de la ville, cela se traduisant par une configuration urbaine caractéristique. Les rues y sont étroites et les immeubles généralement dressés sur 5 à 8 niveaux. Les bâtiments sont tous mitoyens en façade de rue et ne laissent que peu d'espaces vides entre eux à l'intérieur des îlots (voir figures 11 et 12 ci-dessous).



Figure 12 : vue aérienne du quartier. Source : Géoportail.



Figure 11 : rue Saint-Denis à l'adresse de l'ensemble immobilier étudié. Source : Google Street View.

¹⁰ Rempart entourant la cité parisienne et construit de 1356 à 1383, agrandi dans les années 1640 et détruit dans les années 1670.

L'ensemble immobilier étudié est un bâti ancien vieux de plus d'un siècle. Cette ancienneté se ressent sur l'architecture de l'ouvrage et contraste avec les constructions récentes où tout est droit, perpendiculaire, parallèle, *et cætera*. Ici, les escaliers suivent des pentes irrégulières, les murs ne sont pas toujours verticaux et leurs épaisseurs varient, les sols et plafonds ne sont pas horizontaux, les pièces d'un même étage ne sont pas toutes au même niveau altimétrique ...

Cela ajouté à la haute densité du bâti, laquelle contraint les constructions à adopter des formes particulières pour pouvoir s'imbriquer avec les ouvrages du voisinage, résulte en des bâtiments aux géométries irrégulières et complexes. Les photos ci-dessous ont été prises dans l'ensemble immobilier et illustrent cette complexité.



Figure 13 : photos de l'ensemble immobilier, prises par l'auteur.

II Réalisation de la maquette numérique

En sa qualité de géomètre-expert, le cabinet Pierre Bloy est intervenu dans la réhabilitation de l'ensemble immobilier. Son rôle a été, tout d'abord, de réaliser les mesures du bâti existant, puis d'en dresser la maquette numérique et enfin, de livrer les données juridiques nécessaires au permis de construire, en particulier les plans et surfaces de l'ouvrage.

II.1 Acquisition des mesures

La première étape consiste à mesurer le bâtiment à l'état existant. Ces mesures servent de support au travail de l'architecte qui doit ensuite monter le projet de réhabilitation. Dans le but de dresser un modèle numérique exhaustif de l'ouvrage, l'emploi de plusieurs techniques de mesure est nécessaire.

II.1.1 Scanner laser 3D

Le scanner laser 3D a été utilisé pour mesurer l'ensemble des bâtiments lorsque cela était possible. Cela concerne ainsi les façades et les intérieurs de l'ouvrage, tandis que les toitures ont nécessité l'emploi d'une autre méthode.

Ces mesures ont été acquises à partir de 427 positions de scans qui ont été assemblées en post-traitement pour former un unique nuage de points. Chaque scan constitue un instantané du lieu dans la limite de ce qui est visible depuis le scanner. La présence de nombreux obstacles lors du relevé a conduit à réaliser ce nombre de scans important afin d'avoir la mesure de tous les murs, portes, poutres, recoins ou conduites d'eau.

Le nuage de points représente l'assemblage de ces 427 scans de près de 11 millions de points chacun. Avec une telle quantité d'informations, les logiciels ont beaucoup de difficulté à les traiter et perdent en fluidité. Pour pallier à ce problème, le nuage de points a été segmenté par bâtiment et par niveau.

L'appareil utilisé est un FARO X130, scanner 3D à décalage de phase¹¹. Le nuage qui en résulte est plus bruité qu'avec un scanner 3D à temps de vol¹². Étant donnée la faible distance entre le scanner et les objets mesurés, les points offrent tout de même une bonne précision avec une incertitude de mesure de ± 2 mm et un bruit sur les mesures de 0,4 mm.

¹¹ Méthode de calcul d'une distance à partir du décalage de phase (ou déphasage) de l'onde du rayon laser entre son émission et sa réception.

¹² L'instrument mesure le temps de parcours du rayon laser entre son émission et la réception de l'onde réfléchi par l'objet touché. La distance entre le scanner et l'objet en est directement déduite.

II.1.2 Drone

L'usage du drone a été nécessaire pour l'acquisition des données relatives aux toitures. Il était, en effet, impossible d'atteindre et de mesurer celles-ci avec le scanner laser 3D. Les mesures par drone sont réalisées par analyses photogrammétriques.

Ces opérations ont été sous-traitées à une entreprise spécialisée. La manipulation d'un drone en milieu urbain est strictement réglementée et ne peut être effectuée sans brevet de pilotes pour les aéronefs de plus de 800 grammes, poids facilement dépassé avec l'embarquement d'équipements photographiques. En outre, le survol d'un drone au-dessus du domaine public en agglomération est réglementé et requiert des autorisations ainsi que la fermeture des voies de circulation et espaces survolés¹³.

La société sous-traitante s'est donc chargée de réaliser les prises de vue depuis le drone, puis d'effectuer l'analyse photogrammétrique et enfin de livrer l'ensemble des prises de vue, les orthophotos¹⁴ du site et le nuage de points calculé¹⁵.

Le nuage de points livré est ensuite utilisé de la même manière que celui obtenu par scanner laser 3D. La distance d'échantillonnage des points est de 5 mm et le géoréférencement, effectué à l'aide de GCP dont les coordonnées ont été calculées et fournies par le cabinet Bloy, a une précision de 12 mm. Ces GCP ont un rôle important puisqu'ils permettent également de consolider le nuage de points calculé à partir du logiciel de photogrammétrie Pix4D.

II.2 Modélisation en 3D des informations physiques

Les différentes acquisitions effectuées ont permis de mesurer entièrement l'ensemble immobilier. La numérisation de l'ouvrage se traduit par un nuage de points géoréférencé qui va ensuite permettre de réaliser la modélisation en 3D. Ce nuage de points entièrement assemblé est le résultat de la consolidation réalisée par le cabinet Bloy des 427 scans et du nuage de points obtenu par photogrammétrie.

L'étape de modélisation requiert l'utilisation de logiciels métiers spécialisés et est soumise à un cahier des charges qui fixe le niveau de développement de la maquette à produire.

La spécificité du chantier a néanmoins des incidences sur le travail de modélisation et met en lumière certaines limites des logiciels BIM actuels.

¹³ Voir arrêté du 17 décembre 2015 en annexe.

¹⁴ Une orthophoto est une prise de vue corrigée et redressée de telle sorte que l'échelle est uniforme sur toute sa surface. De manière simplifiée, tout point de l'image est alors vu comme si la prise de vue était effectuée à la normale de ce point. Une orthophoto peut donc être superposée un plan correspondant.

¹⁵ Des exemples des données livrées sont à retrouver en annexe.

II.2.1 Revit

Le logiciel utilisé pour la création de maquette au sein du cabinet Bloy est Revit de l'éditeur américain Autodesk. Il s'agit du logiciel professionnel le plus utilisé pour la modélisation de constructions et est véritablement conçu pour répondre aux besoins du BIM. Autodesk est un acteur majeur du développement du BIM et propose une suite de logiciels spécialisés qui couvre de nombreux aspects essentiels du processus. Revit permet la création du modèle numérique et l'intégration d'informations sur ses éléments. Par le biais d'un système de familles et d'objets paramétriques, il est possible de renseigner les éléments de manière complète : type, matériau, dimensions, fabricant, projet ou existant, ...

Le logiciel permet de produire, à partir de la maquette, de nombreux documents tels que les plans d'étage, plans d'héberges, coupes, tableaux de surface, listes d'éléments, *et cætera*.

II.2.2 Critères de modélisation

Le rôle du géomètre-expert dans le projet de réhabilitation est de fournir à l'architecte un état des lieux de l'existant. Cet état des lieux se présente sous la forme d'une maquette numérique en trois dimensions.

La commande du maître d'ouvrage prévoit que la maquette produite par le géomètre-expert soit réalisée au LOD 300. Ce niveau de développement implique que la modélisation suive un niveau de détail élevé et une précision de ± 1 cm. Le niveau de détail élevé se traduit par un rendu visuel fidèle à la réalité qui respecte les formes des éléments et ne se contente plus d'un rendu schématique. Par exemple, les fenêtres ne sont pas représentées simplement par un objet de type « fenêtre », la modélisation doit représenter les bonnes dimensions, les matériaux, le nombre de vantaux de la fenêtre et s'ils sont mobiles ou encore les menuiseries et les carreaux.

II.2.3 Problèmes liés à l'architecture et solutions mises en œuvre

La spécificité du projet réside dans le fait qu'il s'agisse de réhabiliter un immeuble architecturalement complexe. Cela a deux incidences.

Premièrement, la modélisation d'un ouvrage est sensiblement dépendante du type du projet. Le procédé pour réaliser la maquette d'un projet de construction nouvelle est profondément différent de celui suivi pour monter le modèle numérique d'un bâtiment existant. Autrement dit, dans le premier cas, la modélisation constitue un travail de conception d'un ouvrage qui n'existe pas encore et les seules contraintes sont celles du cahier des charges. Dans le second, la modélisation a pour objectif de produire une copie numérique d'une construction existante, privant le modélisateur de libertés pour monter sa maquette. Celle-ci doit être conforme à la réalité et, selon la nature de l'ouvrage et le niveau de développement exigé, peut contraindre le modélisateur à détailler des éléments difficilement réalisables.

Deuxièmement, l'aspect complexe de l'ensemble immobilier a des répercussions sur la mission de création de la maquette. Plus le bâtiment à modéliser est simple, architecturalement parlant, plus la maquette sera facile et rapide à concevoir. À l'inverse, la complexité du bâti entrave fortement la progression du modélisateur, d'autant plus quand le niveau de détail attendu est élevé. Revit est un logiciel créé pour l'établissement de maquette numérique mais sensiblement orienté pour la conception de constructions nouvelles. Les outils sont efficaces et nombreux, permettent des niveaux de développement

maximaux mais sont inadaptés à la modélisation détaillée et précise de structures complexes existantes. Lorsqu'un architecte crée de toute pièce un projet, il façonne généralement l'ouvrage avec des plafonds et sols horizontaux, des murs verticaux et des cloisons perpendiculaires. Lorsqu'un géomètre-expert produit la copie numérique d'un ouvrage existant, il doit faire face à des agencements architecturaux qui ne sont pas aussi simples. Leur modélisation n'est pas pour autant impossible mais requiert un temps plus conséquent et limite parfois le renseignement attributaire des éléments.

Le logiciel Revit permet d'afficher le nuage de points obtenu après les mesures et de modéliser à partir de celui-ci. Toutefois, la complexité des intérieurs a rendu cette action difficile. Dans le but de faciliter le travail de modélisation, il a été choisi de produire d'abord des plans et des coupes des bâtiments par niveau à partir du nuage de points et d'ensuite monter la maquette 3D depuis les plans.

C'est donc dans ces conditions que l'ensemble immobilier a été modélisé et, rapidement, de nombreux problèmes sont apparus.

II.2.3.1 Murs

L'élément principal de la maquette d'un bâtiment est la modélisation de ses murs. Ceux-ci sont à la fois des objets structurels de l'ouvrage et des objets d'agencement, d'organisation de l'espace. Ce sont eux qui traduisent l'aspect visuel de l'immeuble et qui forment la majorité de sa partie visible.

Les murs jouent le rôle de structure de l'ouvrage, appui des poutres, support des portes et fenêtres, cloisonnement des espaces. Leur modélisation avec précision est donc indispensable.

Par ailleurs, la maquette numérique a pour mission de produire un certain nombre de données juridiques. Parmi elles figurent notamment les calculs de surfaces nécessaires à l'établissement d'un permis de construire (surface utile, surface de plancher, surface taxable, surface habitable, ...). Certaines de ces surfaces sont définies par les contours de pièces, autrement dit par les murs. La précision de leur modélisation est alors un enjeu important pour fournir des surfaces justes et conformes à la réalité.

Dans le contexte que présente l'ensemble immobilier, les murs ont été un élément de la maquette très compliqué à réaliser. Revit propose un système de construction des murs assez simple d'utilisation et qui permet de les renseigner à travers de nombreuses informations. Par exemple, il est possible de préciser les couches successives d'une cloison (brique 8 cm – plâtre 5 cm – isolant 2 cm). En revanche, la complexité architecturale des bâtiments et la précision attendue ont nécessité d'avoir recours à une méthode plus contraignante pour modéliser les murs.

Le problème majeur réside dans l'irrégularité des géométries de mur. La forme des murs tels qu'ils existent ne peut pas être modélisée à partir des outils génériques proposés par Revit. La cause principale est l'irrégularité de l'épaisseur des murs, c'est-à-dire que les deux faces d'un mur ne sont pas parallèles et suivent des directions variables.

Pour modéliser des murs tels que ceux de la figure 14 ci-dessous où les épaisseurs sont irrégulières, il faut passer par la création de composants dits « *in situ* ». Contrairement à l'objet générique, le composant *in situ* permet de créer un objet ou groupe d'objets unique et qui a les formes que l'on souhaite. De ce fait, il n'est pas paramétrique et permet de répondre directement aux besoins géométriques du modélisateur. Cependant, le composant *in situ* comporte un défaut majeur : son renseignement attributaire est très

pauvre et ne se limite qu'à quelques informations standards telles que le type d'objet (ex : mur, poteau porteur, toit, ...).

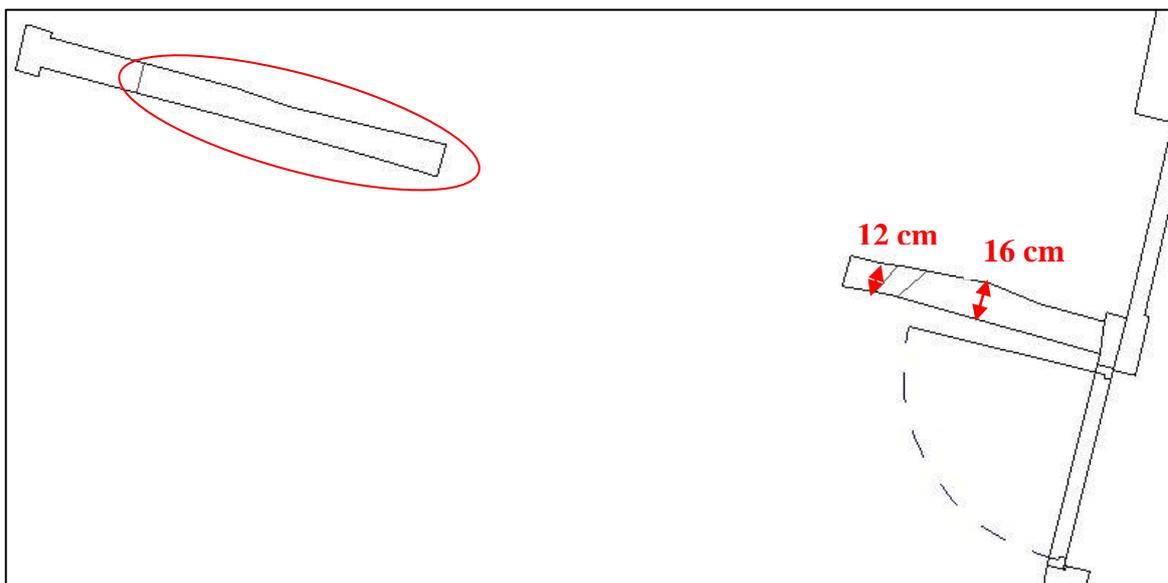


Figure 14 : murs à l'épaisseur irrégulière sur un plan depuis Revit.

Ainsi, la modélisation des murs s'est exclusivement faite avec des composants *in situ* de type « mur ». De cette façon, la maquette respecte la précision de 1cm attendue dans le cahier des charges et demeure fidèle à la réalité, condition impossible à garantir avec l'emploi de murs « génériques ».

L'utilisation de composants *in situ*, comme évoqué précédemment, limite le renseignement attributaire. De surcroît, les outils à disposition pour modéliser les murs sont beaucoup moins efficaces que pour les objets génériques. Leur modélisation est laborieuse et chronophage. Certaines formes architecturales complexes ont demandé un réel travail de réflexion pour élaborer des solutions techniques et obtenir les formes 3D souhaitées.

II.2.3.1.1 Renseignement attributaire limité

Quelque soit la méthode utilisée, l'objet sera de type « mur ». Seulement, pour les propriétés qui en découlent, la diversité d'informations disponibles n'est pas comparable. La différence est clairement visible sur la figure 15 ci-dessous. Le point le plus notable est l'absence de l'onglet « cotes » et donc l'impossibilité d'accéder aux dimensions de l'objet rapidement.

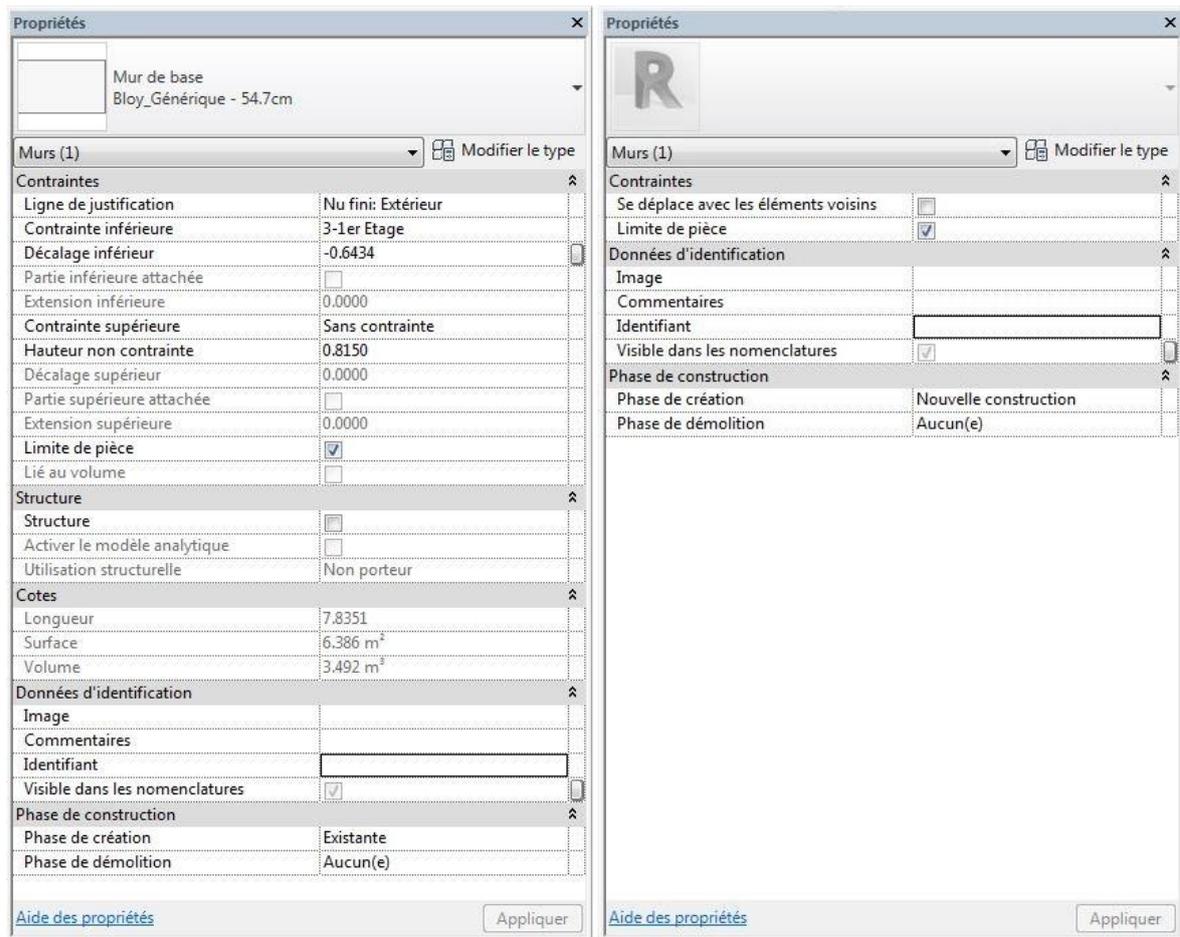


Figure 15 : propriétés d'un mur générique (à gauche) et d'un mur *in situ* (à droite).

II.2.3.1.2 Fruit et contre-fruit

Un mur aux faces verticales est dit d'aplomb. Le fruit d'un mur désigne l'inclinaison de sa face ou ses faces de telle sorte que l'épaisseur du mur décroît en s'éloignant de la base. À l'inverse, quand l'épaisseur augmente en s'éloignant de la base, on parle de contre-fruit.

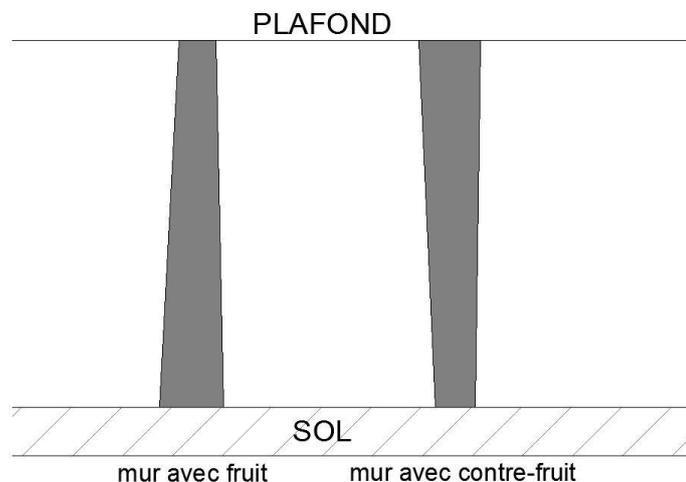


Figure 16 : schéma de murs avec fruit et contre-fruit.

Aux problèmes d'épaisseurs irrégulières vient donc s'ajouter ceux de fruit et contre-fruit. Pour modéliser ces murs particuliers avec l'emploi de composants *in situ*, il est impossible de spécifier une inclinaison des faces des murs ou de modifier leurs profils comme cela peut se faire avec les murs génériques.

Une première méthode employée consiste à créer des composants *in situ* avec l'outil « raccordement » qui demande de dessiner deux polygones, un pour la base du mur et un pour le sommet, ainsi que le niveau altimétrique de chacun d'eux. Le logiciel crée à partir de ces informations un objet qui constitue le mur souhaité. Dans les cas où l'inclinaison de la face du mur comporte des ruptures de pente, il devient nécessaire de créer le mur à partir de plusieurs raccordements, donc plusieurs objets. Il est alors préférable d'utiliser une seconde méthode.

Celle-ci consiste tout d'abord à créer un mur *in situ* d'aplomb avec l'outil « extrusion » en dessinant la base du mur et en précisant sa hauteur. Ensuite, à l'aide de l'outil « formes vides », il s'agit de créer des espaces vides qui vont amputer le mur de façon à ce qu'il prenne la forme souhaitée. Les formes vides se modélisent également par des raccordements. Les deux méthodes sont aussi longues à mettre en œuvre, la deuxième ayant l'avantage d'avoir *in fine* un mur composé d'un seul objet.

La figure 17 ci-dessous illustre la modélisation d'un mur avec contre-fruit.



Figure 17 : photo (à gauche) et modélisation (à droite) d'un mur avec contre-fruit.

II.2.3.1.3 Création d'ouvertures et intersection avec d'autres objets

Ces deux actions se réalisent habituellement avec deux outils dédiés : « ouverture » et « ajuster/prolonger ». Elles consistent respectivement à ouvrir un espace dans un objet et à allonger ou réduire un objet jusqu'à un autre objet. De même que pour les problèmes précédents, la modélisation des murs par des composants *in situ* rend ces opérations impossibles. Revit ne prend tout simplement pas en compte les murs créés quand on souhaite utiliser ces outils.

Autre outil utile, « attacher haut/bas » qui permet de joindre un mur à un sol, un plafond ou un toit de manière simple et rapide, n'est pas non plus disponible.

Là encore, ces manques de fonctionnalité ont nécessité de mettre au point des méthodes de modélisation qui contournent ces problèmes.

En ce qui concerne les ouvertures, l'outil « formes vides » est efficace tant que les géométries restent régulières. En créant des « vides par extrusion » ou « vides par raccordement », il est assez aisé de créer des ouvertures fidèles à la réalité. Sur l'exemple suivant (figure 18), l'ouverture a été modélisée en créant 3 formes vides (2 par raccordement et 1 par extrusion) dans un mur *in situ*.

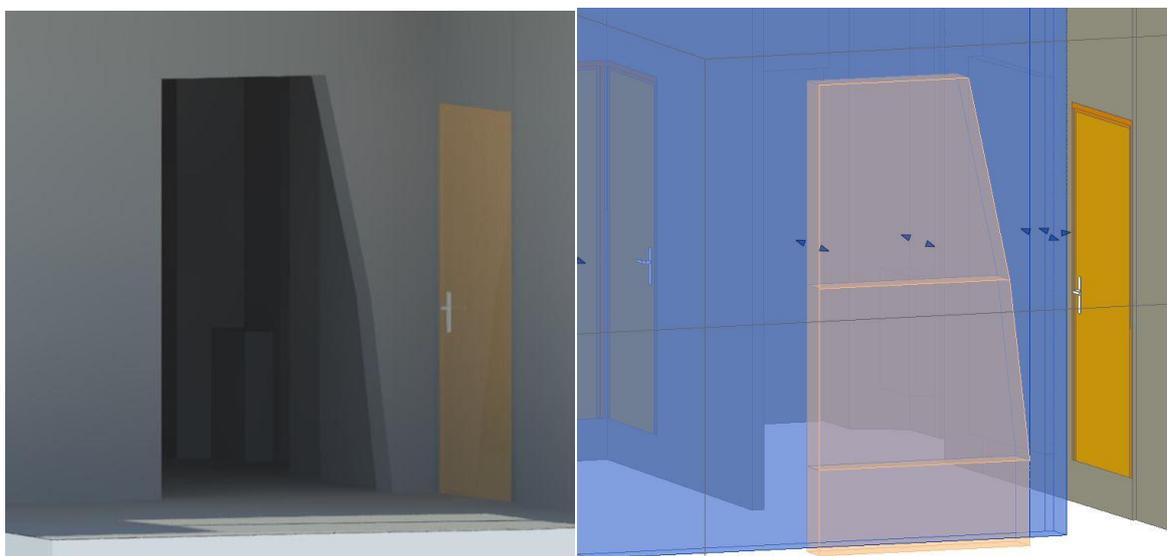


Figure 18 : rendu final de l'ouverture (à gauche) créée par trois formes vides visibles en orange (à droite).

Cet outil « formes vides » a également permis de pallier aux problèmes d'attachement des murs *in situ* aux objets voisins, en particulier pour les joindre aux toits et aux escaliers. Pour un mur générique, les différents outils permettent de facilement réaliser ces jointures. Si l'on souhaite attacher un mur au toit, l'outil « attacher haut » le fait en 3 clics. Avec les murs *in situ*, il faut réaliser la jointure manuellement.

Ce processus manuel consiste à dresser un mur plus haut que le toit auquel il se rattache et d'ensuite créer des formes vides qui coupent les parties dépassant le toit (voir figure 19 ci-dessous). La complexité de l'opération est de créer des formes vides qui épousent la forme du toit dont les faces ne sont pas planes mais irrégulières.

Les formes irrégulières des toits et escaliers demandent un travail plus complexe pour créer ces formes vides et de ce fait, un temps de modélisation plus conséquent.

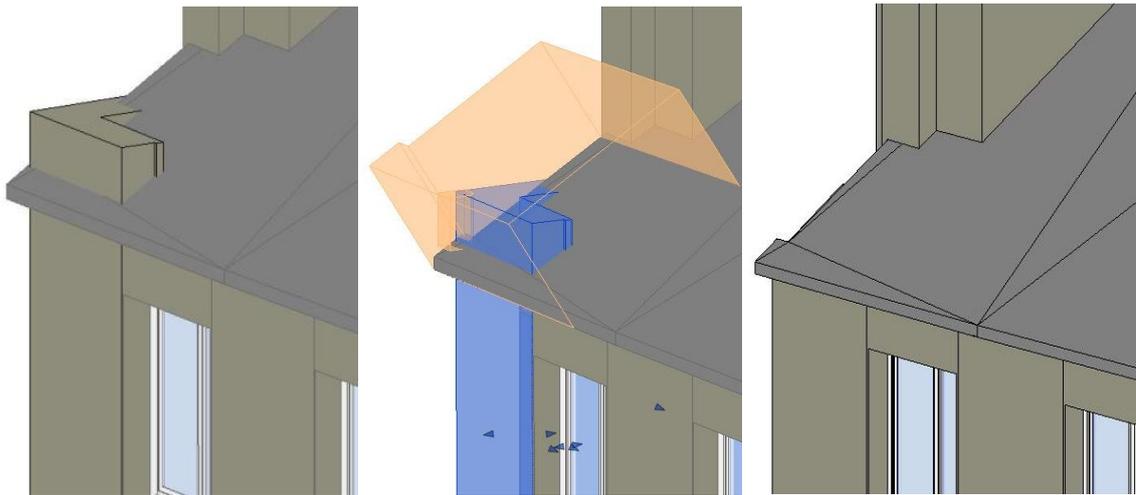


Figure 19 : ajustement d'un mur à un toit.

II.2.3.1.4 Problèmes pour l'insertion des portes et fenêtres

Un autre problème lié à l'emploi de composants *in situ* pour modéliser les murs concerne l'insertion de portes et fenêtres.

Dans certains cas et sans raisons clairement apparentes, Revit refuse de poser les portes ou fenêtres à l'endroit souhaité. La porte ou fenêtre se retrouve alors posée ailleurs dans la maquette ou est supprimée. Là encore, une opération qui devrait prendre seulement quelques secondes est entravée par l'utilisation de murs *in situ*.

La solution à ce problème est de décomposer artificiellement le mur en plusieurs parties de façon à ce que la partie accueillant la porte ou la fenêtre soit de la même largeur que cette dernière. Autrement dit, au lieu d'un seul mur avec une fenêtre au milieu, il faut alors créer trois murs successifs dont celui du milieu fait la largeur de la fenêtre qu'il porte.

II.2.3.1.5 Formes impossibles à modéliser

Malgré les différentes méthodes mises en place pour modéliser les différentes formes complexes de mur, certaines demeurent impossibles à reproduire avec précision.

Il s'agit notamment des formes arrondies. Certaines peuvent être modélisées avec les outils « révolution », « extrusion par chemin » et « raccordement par chemin ». Cependant, lorsque la complexité des formes devient trop importante ces outils ne suffisent plus à modéliser avec précision. La seule solution est alors de créer des formes les plus proches de la réalité mais sans la précision de 1 cm attendue.

La figure 20 ci-dessous illustre un exemple de murs dont la modélisation n'a pu être faite de manière fidèle à la réalité.



Figure 20 : formes de mur complexes visualisées dans le nuage de points (à gauche) et modélisées dans Revit (à droite).

II.2.3.2 Sols

Modéliser les sols est source de moins de problèmes que pour les murs et leur rôle dans la maquette est différent. Tout comme les murs, une modélisation précise des sols est nécessaire pour que l'architecte établisse son projet. En outre, la précision est également importante pour les besoins en matière de données juridiques à produire. Les sols sont la base de calcul de certaines surfaces et requièrent un soin particulier dans leur modélisation.

De manière générale, les ouvrages sont construits de façon à ce que les planchers forment des surfaces rigoureusement planes et horizontales. En pratique, il est difficile de rencontrer des planchers parfaitement conformes à la théorie et globalement, plus le bâtiment est ancien, plus on s'en éloigne.

L'ensemble immobilier à modéliser est ancien et, effectivement, aucun plancher n'est droit. Les irrégularités sont même très prononcées en certains points. Une des pièces présente par exemple une variation de niveau de son plancher de 9 cm sur moins de 2 mètres de distance.

Contrairement à la modélisation des murs, Revit propose les outils nécessaires à la modélisation des sols quand les géométries sont irrégulières. La première étape consiste à utiliser l'outil « sol » et de spécifier l'emprise du sol en question, ainsi que préciser son épaisseur et son niveau altimétrique. Pour tenir compte de la non-planéité des planchers, le logiciel permet de placer des points de niveau où l'utilisateur renseigne l'écart altimétrique entre le niveau du sol et le niveau du point en question. Les points de niveau ainsi placés correspondent à des points dont l'altimétrie a été mesurée par le géomètre-expert.

Ces points de niveau permettent donc de conférer au sol une forme irrégulière plus proche de la réalité. Cependant, le fait de placer des points de niveau sur l'emprise du sol ne permet pas de modifier l'altimétrie du contour qui demeure à son niveau initial. Or, les variations altimétriques concernent également le contour du sol. Ce périmètre est défini par des points de contour dont l'altitude peut être modifiée manuellement. Il s'agit alors de modifier le niveau de tous les points de contour concernés en interpolant leurs altitudes par rapport aux points de niveau mesurés. Les périmètres de sol étant complexes, les contours comptent généralement un nombre important de points et leur modification manuelle après interpolation de leur altitude est une étape longue à réaliser.

Pour que le sol corresponde à la réalité, les niveaux des points de contour ne doivent pas être modifiés en leur attribuant simplement l'altitude du point de niveau le plus proche. Compte tenu des variations altimétriques importantes des planchers, l'altitude des points de contour doit être interpolée manuellement pour chacun d'eux de façon à ce que le sol soit le plus fidèle possible à la réalité.

Sur la figure 21 ci-dessous, la modélisation du plancher a demandé la modification de 52 points de contour et la prise en compte de 8 points de niveaux répartis sur toute son emprise. Le temps pris à modéliser les planchers de cette façon est de loin supérieur au temps nécessaire pour un plancher simple (1 minute contre 15 minutes). Le nombre important de points de contour est notamment dû aux directions irrégulières des murs délimitant le sol.

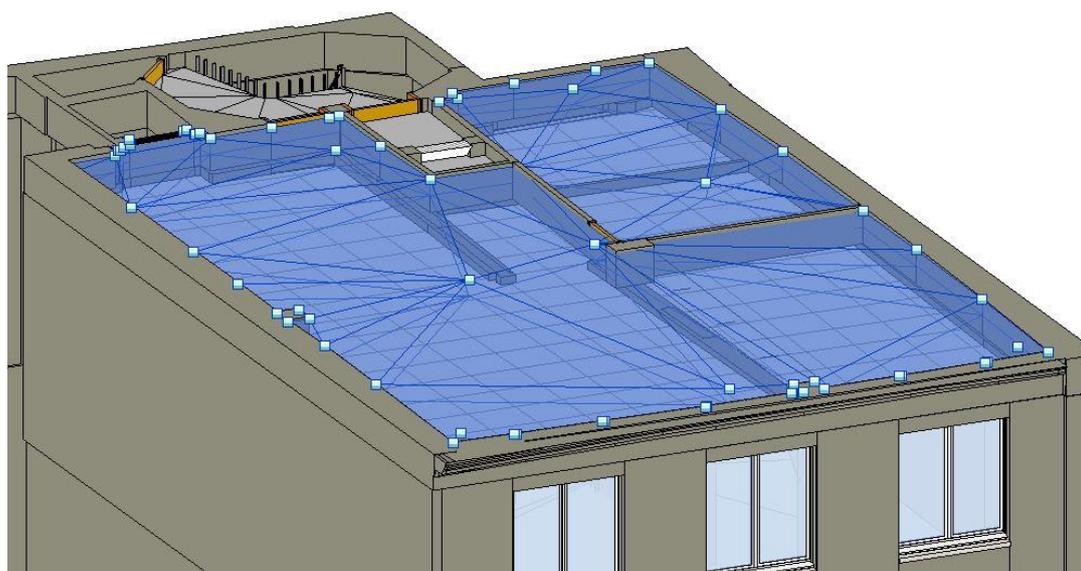


Figure 21 : sol modélisé dans Revit (en bleu avec tous ses points de contour et points de niveaux).

Autre cas de figure chronophage, les différences de niveau des planchers sur un même étage. Il ne s'agit pas là de variation altimétrique irrégulière du sol comme précédemment mais de changement de niveau de plancher entre les pièces matérialisé par des marches. Au lieu de modéliser un seul sol pour l'étage, il faut alors créer plusieurs sols en leur affectant chacun un niveau spécifique. Chacun des sols créés peut ensuite faire l'objet de réajustements via des points de niveaux comme expliqué dans les paragraphes précédents.

II.2.3.3 Plafonds

De même que pour les murs et les sols, modéliser les plafonds avec précision est indispensable pour la production des données juridiques liées aux calculs de surfaces. En effet, la modélisation des plafonds permet le calcul des surfaces où la hauteur sous plafond est supérieure à 1,80 mètre.

Les plafonds présentent les mêmes particularités que les sols, ils sont rarement horizontaux et il peut y avoir plusieurs niveaux de plafonds ou sous-plafonds dans une seule pièce.

Pour des surfaces en pente régulière ou plusieurs niveaux de plafonds, la modélisation reste simple sur Revit. Il suffit de dessiner les contours de plafonds, leurs

hauteurs et s'il y a lieu, l'inclinaison du plafond en précisant la pente et la flèche¹⁶. Pour des formes moins régulières, la modélisation devient plus laborieuse.

Tout d'abord, la modélisation du plafond est liée au sol. La position altimétrique du plafond est déterminée à partir de la hauteur sous plafond, c'est-à-dire la hauteur entre le sol et le plafond qui est mesurée depuis le nuage de points. Or, comme développé précédemment, les planchers des bâtiments ne sont pas des surfaces planes et horizontales. Lors de la lecture des hauteurs sous plafond, l'utilisateur doit donc tenir compte des irrégularités du sol pour déterminer le bon niveau du plafond.

À cette particularité s'ajoute deux cas de figures complexes.

II.2.3.3.1 Plafonds arrondis

Les formes courbées se situent à la jonction entre les plafonds et les murs au dernier étage avant les combles, telle que représentée sur la figure 22 ci-contre.

La modélisation de ces plafonds n'est pas envisagée par l'outil « plafond » de Revit. Cet outil se limite à des surfaces planes horizontales ou inclinées. Pour une forme arrondie, il faut une nouvelle fois recourir à la création d'un composant « *in situ* », ici de type « plafond ». Grâce à l'outil « extrusion par chemin », il est possible de dessiner le profil courbé du plafond et de préciser le chemin de l'extrusion, soit la largeur du mur. La forme arrondie du plafond est alors réalisée par le logiciel et ce de manière assez fidèle à la réalité. Cet outil est efficace et permet un bon rendu graphique du plafond qui serait impossible à modéliser avec un objet générique.

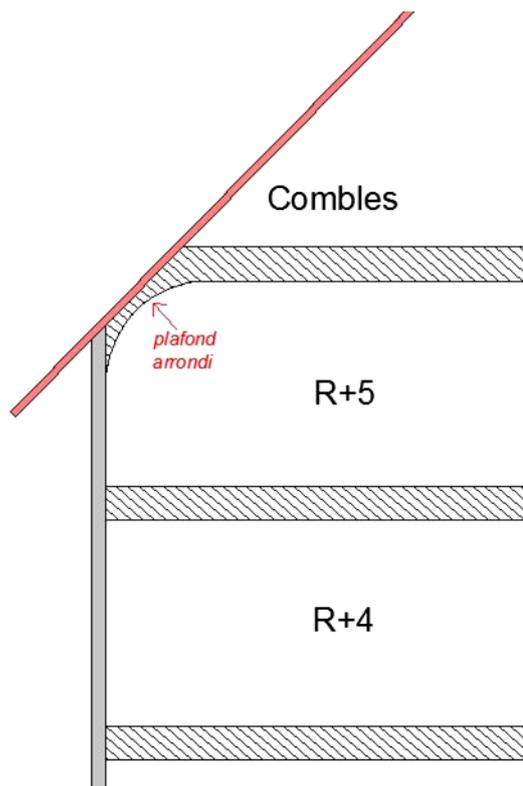


Figure 22 : schéma illustrant le cas de plafond arrondi.

Cependant, cela s'applique à des formes arrondies qui restent régulières. Dans certains cas, la courbe du plafond n'est pas identique sur toute la largeur du mur et il devient alors impossible de restituer la véritable forme du plafond lors de la modélisation. Il faut alors faire un choix entre produire un objet très proche de la réalité et un temps de modélisation raisonnable. La complexité des plafonds demandent en effet un temps considérable pour les représenter dans Revit.

¹⁶ La flèche est la direction de la pente.

Un des plafonds de l'ensemble immobilier a combiné à la fois le problème de pente et le problème d'arrondi irrégulier. La combinaison des deux contraintes a rendu la modélisation impossible. Un rendu conforme au nuage de points (figure 23 ci-dessous) n'est pas réalisable sur Revit, la maquette tente donc de traduire au mieux le comportement architectural mais avec un écart non négligeable (voir figure 24).



Figure 23 : visualisation du nuage de points d'une pièce où le plafond est, d'une part, incliné suivant une pente qui part du mur de droite jusqu'à la poutre à gauche et, d'autre part arrondi pour se raccorder au mur du fond au-dessus des fenêtres.



Figure 24 : modélisation dans Revit de la pièce correspondant à la figure 23. La forme arrondie n'est pas reproduite de manière parfaitement conforme mais la maquette s'en rapproche le plus possible.

II.2.3.3.2 Plafonds des combles

Ce cas de figure se présente moins souvent, par définition, et n'est pas toujours source de problème de modélisation. Il s'agit tout simplement d'un plafond en pente et donc réalisable sur Revit aisément. Là où cela pose problème, c'est lorsque le faitage du toit n'est pas horizontal.

Dans un des bâtiments modélisés, le faitage du toit est doublement incliné avec un point bas situé au centre. Cela a une incidence sur la forme du plafond des combles, notamment sur la direction de la pente. Pour un faitage horizontal, la flèche d'inclinaison du plafond est perpendiculaire au faitage. Pour un faitage non-horizontale, la pente de ce dernier influe sur celle du plafond. La flèche d'inclinaison n'est alors plus perpendiculaire au faitage et il faut déterminer son orientation manuellement, étape profondément chronophage comparé au temps qu'il faut pour un plafond sous les combles où le faitage est horizontal.

II.2.3.4 Escaliers

La complexité de l'ouvrage s'observe également dans la forme des escaliers. Ils s'opposent à ceux des constructions récentes, où tout est perpendiculaire, parallèle, droit et se répète à chaque étage. Les matériaux actuels les plus utilisés sont le métal et le béton qui se déforment moins au fil du temps que le bois utilisé pour l'ensemble immobilier.

Cela se traduit donc par une cage d'escalier irrégulière d'étage en étage, une pente d'escalier variable, des hauteurs de marche changeantes, des écarts altimétriques entre les paliers inégaux, *et cætera*.

Ces observations sont autant de contraintes qui viennent faire obstacle au travail de modélisation sur Revit. L'irrégularité de la cage d'escalier, visible sur la figure 25 ci-dessous, oblige à modéliser les escaliers étage par étage alors qu'il suffirait simplement de dessiner l'emprise de la cage d'escalier et le nombre d'étage dans un cas classique. Le temps de modélisation est alors multiplié par le nombre d'étage. Par exemple, pour les deux premiers bâtiments de l'ensemble immobilier, il a fallu construire 16 escaliers alors que 3 auraient été suffisants pour représenter les 3 cages d'escaliers si elles avaient été régulières.

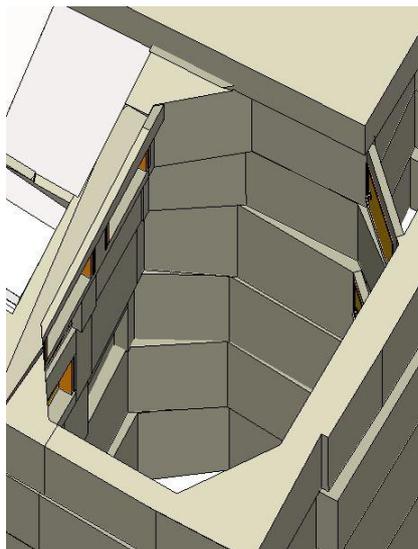


Figure 25 : cage d'escalier irrégulière vue depuis Revit.

À ces problèmes d'origine architecturale s'ajoutent d'autres liés aux limites de l'outil « escalier » de Revit. L'avantage avec ce type d'élément c'est qu'il n'est pas nécessaire de recourir aux composants *in situ*, néanmoins la complexité rencontrée et les contraintes qu'elles impliquent causent des réactions inattendues de la part du logiciel. Pour certains étages, la pente trop forte ou l'étroitesse de la cage d'escalier empêche Revit de modéliser les escaliers dans leur intégralité, ne faisant apparaître par exemple que les trois premières marches. Le logiciel annonce qu'il est impossible de créer un escalier « monobloc ». Il faut alors modifier certains paramètres du type pour que l'escalier se forme correctement. De plus, ces modifications se font au cas par cas et n'ont pas la même efficacité d'un cas à un autre. Cela demande donc de prendre du temps pour chaque étage pour que le rendu soit acceptable.

Le bilan de tous les problèmes posés par la modélisation des escaliers est assez limpide. Premièrement, la perte de temps occasionnée est bien trop conséquente pour être négligeable et deuxièmement, la complexité est telle en certains endroits qu'elle ne peut être modélisée de manière rigoureusement conforme.

II.2.3.5 Poutres

L'ancienneté du bâti est, pour les poutres aussi, source de complications architecturales. Les poutres, sauf dans les rares cas où ce sont des IPN¹⁷, sont en bois et ont des formes irrégulières. Elles peuvent être disposées à la verticale, à l'horizontale ou obliques et il n'y a pas deux poutres aux dimensions identiques. Cela rend l'utilisation de l'outil « poutre » impossible pour modéliser tous ces éléments, à l'exception des IPN.

Une nouvelle fois, la solution à ce problème est le passage par des composants *in situ*, avec toutes les contraintes que cela implique en matière de renseignement attributaire et de modélisation.

Pour les cas les moins complexes, la modélisation est cependant efficace et le rendu graphique correspond aux attentes. Un ensemble comme celui de la figure 26 ci-dessous, bien qu'étant impossible à modéliser avec des objets génériques, se modélise aisément avec les composants *in situ*.

¹⁷ Poutre en acier dont le profil à la forme d'un « I » et dont les caractéristiques sont définies par la norme NF A45-209 de 1983. IPN signifie poutrelle en I à Profil Normal.



Figure 26 : modélisation d'un ensemble de poutres horizontales, verticales et obliques dans Revit.

Pour les cas plus complexes, la modélisation demande là encore beaucoup plus de temps. C'est notamment le cas des poutres des combles qui courent sous les toits. L'exemple de la figure 27 ci-dessous illustre bien la complexité géométrique qui est à modéliser. D'une part, le profil de la poutre est irrégulier et d'autre part, aucune face n'est parallèle ou perpendiculaire au sol. Ce dernier point est la plus grosse source de complication car, jusqu'ici, toutes les modélisations se faisaient à partir d'un plan de construction horizontal. Or, il est impossible de créer de telles formes depuis un plan horizontal. Il a donc fallu définir le plafond comme un plan de construction et créer un composant *in situ* avec l'outil « extrusion » en dessinant les contours de la poutre à l'aide du nuage de points. La poutre étant particulièrement irrégulière, sa modélisation est une étape longue à accomplir et ce n'est qu'un exemple de poutre parmi toutes celles dans les combles qui sont exposées aux mêmes problèmes.

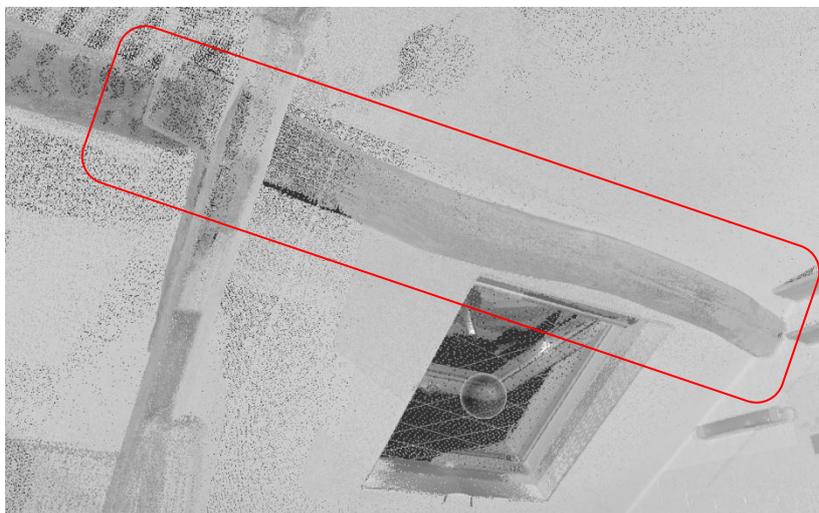


Figure 27 : poutre irrégulière vue dans le nuage de points.

II.2.3.6 Toits

Les toits des bâtiments s'inscrivent dans le contexte parisien et son architecture haussmannienne. Ce sont donc des couvertures de zinc aux formes géométriques simples. L'outil « toit » permet de modéliser facilement les éléments de couverture. En précisant l'emprise du toit, sa hauteur et les pentes à appliquer, la modélisation est rapide et efficace.

Des complications apparaissent tout de même pour modéliser les toits de l'ensemble immobilier. En effet, de la même manière que pour les sols et les plafonds, la couverture ne forme jamais une surface plane. Les irrégularités sont même plus marquées en ce qui concerne les toits.

Pour obtenir la maquette attendue, l'outil toit peut être utilisé comme l'outil « sol » dans le sens où il est possible de placer des points de niveau et ainsi modifier manuellement la position altimétrique d'un point précis. En superposant la maquette au nuage de points, il est alors possible de former un toit ajusté point par point et proche de la réalité. Néanmoins, cet ajustement est laborieux et nécessite la pose de nombreux points de niveau. Ces ajustements sont illustrés par la figure 28 ci-dessous.

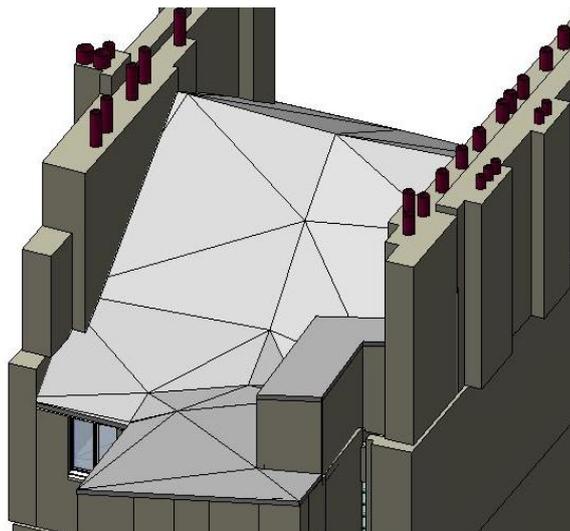


Figure 28 : modélisation d'un toit sur Revit où chaque intersection de lignes est un point de niveau.

Les toits ne sont donc pas les éléments les plus compliqués à modéliser dans la maquette mais là encore, le temps que cela prend est plus important que pour une architecture simple.

II.2.3.7 Autres cas rencontrés

D'autres formes propres à l'ensemble immobilier ont eu à être modélisées, accompagnées à chaque fois de leur lot de complications.

Dans les combles, par exemple, un des plafonds a une forme très inhabituelle (voir photo de droite sur la Figure 13 page 29). La configuration du lieu laisse à penser qu'une poutre passe à cet endroit et qu'elle est dissimulée sous ce plafond particulier. Ces conjectures ne sont cependant pas avérées et la seule mission du géomètre-expert est de modéliser l'état existant, c'est-à-dire ce qu'il voit. Ici, la modélisation doit donc seulement se contenter de représenter un plafond à l'allure spécifique. Monter en 3 dimensions une telle forme a posé quelques problèmes et la solution mise en place a été d'utiliser un composant *in situ*. En utilisant l'outil « extrusion par chemin », un objet plutôt fidèle à la réalité a pu être réalisé. Le voici sur la figure 29.

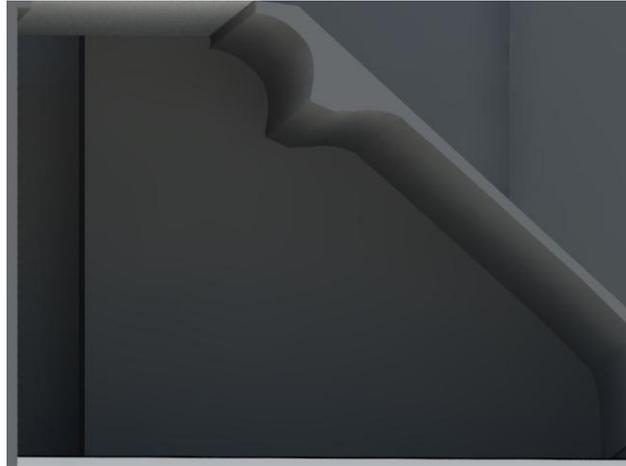


Figure 29 : vue en coupe d'un cas particulier de plafond modélisé dans Revit.

Un accès à un local technique sur le toit d'un des bâtiments est un autre exemple de configuration complexe. Il s'agit d'un puits ouvert dans le plafond du dernier étage (voir figure 30). Ses formes tout à fait irrégulières ont été impossibles à modéliser avec précision et malgré un temps important passé sur ce sujet, le rendu s'en approche simplement.



Figure 30 : puits d'accès à un local technique vu depuis le nuage de points.

II.2.3.8 Contrôle de qualité de la modélisation et export de la maquette

Le besoin de précision lors de la modélisation a contraint le modélisateur à mettre en place des solutions techniques permettant de réaliser une maquette la plus fidèle possible à la réalité. Toutefois, il est important de pouvoir opérer un contrôle de qualité pour garantir la précision attendue. Revit ne propose pas de solutions à cette problématique et le seul contrôle qui peut être effectué depuis le logiciel est un contrôle visuel en comparant la maquette au nuage de points.

La startup française MySnapkin propose cependant une solution qui semble offrir un contrôle efficace. À partir de la maquette et du nuage de points du bâtiment, leur applicatif permet de produire une carte de chaleur des écarts géométriques entre les deux fichiers (voir annexes).

Enfin, l'intérêt de réaliser une telle maquette dans un processus BIM est de pouvoir échanger facilement les informations et les données entre intervenants sur le projet. Or, le format IFC est, à ce jour, trop peu efficace et les exports de la maquette dans ce format sont en partie inexploitable. Une quantité trop importante de données sont perdues lors de l'export de la maquette en IFC pour être négligeable. Des murs, des fenêtres, des toits disparaissent au cours de cette étape et font perdre au BIM l'un de ces intérêts premiers.

II.2.4 Limites du BIM et de la modélisation 3D pour la réhabilitation d'ouvrage ancien

La modélisation d'un tel ouvrage a été une mission laborieuse et a mis en lumière certaines limites du logiciel Revit et plus largement de l'intérêt d'un processus BIM pour ce type de projet. La réhabilitation d'un ensemble immobilier ancien et complexe implique des considérations différentes que pour une réhabilitation de bâtiments plus simples et récents. Mettre en place un processus BIM ne se justifie plus de manière évidente et ce, pour deux raisons principales.

II.2.4.1 Utilisabilité du modèle numérique

Le rôle de la maquette au sein du processus BIM est de constituer le jumeau numérique de l'ouvrage sur lequel porte le projet. Elle a vocation à être la clé de voûte de la coopération entre les différents acteurs et de faire la passerelle entre leurs contributions. Elle ne se contente donc pas d'être simplement un outil de visualisation numérique de l'ouvrage, elle permet que chacun exploite efficacement le travail des autres intervenants.

Réaliser une maquette numérique implique donc pour le modélisateur de prendre en considération l'idée d'utilisabilité de son travail. L'utilisabilité, telle que définie par la norme ISO 9241-11:2018, représente « le degré selon lequel un produit peut être utilisé, par des utilisateurs identifiés, pour atteindre des buts définis avec efficacité, efficacité et satisfaction, dans un contexte d'utilisation spécifié ». Cette notion s'intègre naturellement dans la philosophie que porte le processus BIM.

Dans l'exemple du projet de réhabilitation d'immeubles anciens, cette utilisabilité est mise à mal par la complexité architecturale des bâtiments qui complique l'étape de modélisation.

Tout d'abord, le besoin de précision nécessaire à la juste production des données juridiques liées aux calculs de surface a demandé l'emploi de composants *in situ* pour modéliser certains éléments. Les objets ainsi créés ne peuvent répondre entièrement au besoin de renseignement attributaire et font perdre à la maquette l'un de ses intérêts principaux. Ces objets, qui concernent l'ensemble des murs, certains plafonds et quelques objets divers, sont par ailleurs peu maniables ou modifiables et peuvent être un frein à la bonne exploitation de la maquette par un intervenant autre que le modélisateur. En outre, le fait que les murs soient des objets *in situ* est problématique pour certains calculs exécutés par des outils Revit ou depuis le plug-in de programmation Dynamo.

D'un point de vue général, l'ensemble de la maquette est limitée en ce qui concerne le renseignement attributaire. La modélisation d'un ouvrage déjà existant signifie

que le géomètre-expert forme un modèle numérique du bâtiment à partir de ses mesures mais n'a pas la compétence pour définir certains attributs des éléments à modéliser. Contrairement à un projet de construction nouvelle, les éléments de l'ouvrage ne peuvent pas être renseignés en matière de composition, de matériau ou de fabricant par le modélisateur.

De plus, cette limite dans la modélisation ne repose pas seulement sur le renseignement attributaire. Le géomètre-expert peut modéliser uniquement ce qu'il voit ou ce dont il a connaissance. La maquette ne peut donc inclure des éléments qui ne sont pas observables dans l'ouvrage existant. C'est l'exemple notamment des maçonneries qui ont pour objectif de dissimuler des éléments. C'est le cas du plafond des combles évoqué précédemment (page 47 et figure 29) ou des coffrages qui semblent masquer le passage de réseaux. La modélisation des réseaux est un élément important dans la réalisation de la maquette d'un immeuble mais en l'absence de mesures ou de documentations suffisantes il est impossible pour le géomètre-expert de les représenter.

Le manque d'information sur les éléments de la maquette est un frein à la bonne utilisabilité du modèle numérique par la suite et constitue en soi une première limite de la mise en place du BIM pour ce type de projet.

II.2.4.2 Pertinence du processus BIM pour ce type de projet

Les projets de réhabilitation sont autant susceptibles de rentrer dans un cadre BIM que les projets de construction nouvelle. Les intérêts procurés concernent aussi bien les phases de conception, de construction et de gestion/exploitation/maintenance. L'acteur auquel le BIM profite le plus est le maître d'ouvrage. Ce processus lui promet gain de temps pour la réalisation du projet et économie d'argent lors de son exploitation. Ce sont principalement ces deux arguments qui poussent les maîtres d'ouvrage à passer commande dans le cadre du processus BIM.

Pourtant, le projet parisien remet en question la pertinence d'un tel processus lors de la réhabilitation d'un ouvrage ancien et complexe. La production de la maquette numérique de l'ensemble immobilier est une étape indispensable pour mettre en place le BIM. Or, la complexité des bâtiments rend la modélisation plus longue à réaliser et cela a des incidences sur le projet.

D'une part, le temps pris pour modéliser l'existant est bien plus important et allonge la durée de la phase de conception. La complexité de l'ouvrage peut augmenter la durée de modélisation du simple au triple. Dans le cas où cette complexité serait mal appréhendée au moment de commander la maquette, des retards conséquents pourraient apparaître dans le planning du projet. D'autant plus que pour les projets de réhabilitation, il est généralement demandé au géomètre-expert de réaliser une deuxième maquette numérique de l'ouvrage après curage, c'est-à-dire après la suppression des éléments d'habillage et de cloisonnement du bâtiment afin qu'il ne reste que sa structure. Cela implique de procéder une deuxième fois aux mesures puis à la modélisation de l'ouvrage.

D'autre part, la prestation du modélisateur est plus onéreuse, en raison de la durée de travail sensiblement plus longue. Par ailleurs, le fait de réaliser un projet BIM sur de l'existant nécessite de procéder aux diagnostics de tout ce qui n'est pas visible lors des mesures du géomètre-expert, notamment pour les réseaux et les éléments structurels. Cette phase de diagnostics doit permettre de compléter le modèle numérique de manière à le rendre le plus exhaustif et le plus fidèle à la réalité possible. Ces missions de diagnostic impliquent des coûts supplémentaires pour le maître d'ouvrage qui viennent s'ajouter aux

coûts additionnels de la modélisation. Là encore, si la complexité de l'ouvrage n'est pas bien anticipée en amont du projet, les coûts imprévus peuvent mettre à mal le projet.

Mettre en place un processus BIM pour un tel projet induit donc pour le maître d'ouvrage de prendre en compte un temps plus conséquent pour la réalisation du projet et des coûts plus importants lors de la phase de conception. Il est alors important que ces problématiques soient anticipées avant même le lancement du projet afin que la mise en place du BIM reste pertinente et que les intérêts procurés subsistent pour le maître d'ouvrage.

II.2.4.3 Pistes d'amélioration

La difficulté à modéliser l'existant est la problématique la plus contraignante pour ce type de projet. Cependant, c'est aussi celle qui a la meilleure marge de progression. Le véritable souci est le manque d'outils répondant aux besoins du modélisateur pour réaliser des objets complexes.

Dans l'optique d'échanger sur les interrogations et les idées de solutions des différents intervenants, une table ronde a été réalisée avec le cabinet d'architectes concerné par le projet. Leur avis est d'un grand intérêt puisque ce sont eux qui exploitent en premier la maquette par la suite. Il en est ressorti qu'architectes et géomètres-experts sont confrontés aux mêmes limites du logiciel Revit pour la modélisation et les pistes techniques présentées dans la partie II.2.3 sont des premières solutions efficaces qui permettent de répondre à certaines difficultés. Ces réponses sont efficaces pour ce qui est de la modélisation d'objets complexes mais le sont moins quant au temps de travail engendré.

Le plug-in de programmation Dynamo sur Revit pourrait alors être une piste de solutions plus intéressante pour créer des objets complexes. Le panel d'outils disponibles est déjà assez large mais le vrai potentiel réside dans la liberté qui est laissée à l'utilisateur pour créer des objets, des outils et des applicatifs via des scripts de programmation. De manière évidente, il ne s'agit pas de solutions facilement réalisables pour des néophytes mais après une bonne prise en main de Dynamo, ce plug-in intuitif peut permettre de répondre à des problèmes complexes.

Enfin, ce type de projet doit profiter des avantages que dégage le BIM pour contourner certains problèmes. L'aspect collaboratif doit être mis en avant, notamment pour faciliter le travail du modélisateur. Premièrement, pour mieux échanger sur les solutions mises en place par certains et qui peuvent répondre aux problèmes d'autres. Deuxièmement, pour mieux définir les attentes et les besoins de chacun des intervenants. Il est important de définir la mission du modélisateur de façon claire et exhaustive afin que ce travail de modélisation reste efficace et pertinent. Il peut alors être nécessaire de ne pas spécifier un niveau de détail pour la maquette mais de définir un niveau de détail pour chaque type d'élément, cela dans l'idée que le modélisateur ne s'attarde pas sur des éléments complexes à réaliser avec une bonne précision si cette précision n'est pas indispensable.

III Modélisation des informations immatérielles

La modélisation des informations matérielles d'un ouvrage est l'étape la plus importante dans un processus BIM et également la plus longue, notamment dans le cas d'un projet comme celui abordé dans ce mémoire. Toutefois, le travail de modélisation des informations immatérielles n'est pas pour autant négligeable et prend un rôle tout aussi important pour la délivrance d'autorisations d'urbanisme telles que le permis de construire. Ces informations immatérielles comprennent en particulier toutes les données juridiques de l'ouvrage.

La création d'un modèle numérique dans un processus BIM n'est donc pas simplement l'élaboration d'une maquette en 3 dimensions pourvue d'informations, d'attributs et de paramètres mais un ensemble regroupant toutes les données techniques liées à la structure et aux éléments de l'ouvrage ainsi que les données juridiques qui permettent de régir l'utilisation de ce dernier et son interaction avec son environnement.

Il s'agit donc, depuis Revit là aussi, d'intégrer un certain nombre d'informations juridiques à la maquette et de pouvoir extraire de cette dernière les documents relatifs aux besoins du permis de construire.

III.1 Intégration de données juridiques

La quantité de données juridiques à inclure dans une maquette peut varier sensiblement selon les besoins du projet. Les informations les plus courantes concernent les limites de propriétés, la mitoyenneté, les servitudes, les règles de prospects, la zone de constructibilité ou encore la destination des biens. Nombre des problèmes que pose la modélisation de ces informations a déjà fait l'objet de réflexion dans des TFE précédents, notamment par Maud Laurencin (« L'intégration des données complémentaires (données foncières, division en volume, environnement) au sein de maquettes numériques au format Revit », 2017) et Vivien Roy (« Intégration de données juridiques dans les maquettes numériques BIM », 2017).

Dans le cas du projet de réhabilitation, seulement certaines de ces données juridiques ont eu à être intégrées, sans que la complexité du bâti ne pose de véritable problème.

III.1.1 Limites de propriété

Les limites de propriété font l'objet de documents qui leur sont propres et ne sont pas définies par le modèle numérique. Ces limites sont définies avant tout par le procès-verbal de bornage établi par le géomètre-expert. Il est toutefois intéressant de les matérialiser dans la maquette, notamment pour exploiter, au cours du projet, les informations qui en découlent.

Sur Revit, la modélisation des limites de propriété est réalisable de manière aisée via un outil éponyme. Il est possible de placer les limites manuellement en dessinant l'esquisse ou alors en précisant directement les coordonnées des sommets d'une limite séparative.

Cet outil permet de représenter rapidement les limites de propriété dans le modèle numérique. La facilité de réalisation de cette étape s'explique par le fait que la représentation d'une limite de propriété reste en 2 dimensions et quand bien même les limites seraient complexes, leur dessin en 2D ne constituerait pas une difficulté pour Revit.

Néanmoins, le logiciel d'Autodesk ne se contente finalement que d'une représentation graphique des limites de propriété et seul le fait que les lignes représentatives soient du type « limite de propriété » permet de revendiquer une certaine utilisabilité de ces données. Extraire des informations depuis des objets de ce type reste limité, en particulier pour obtenir les coordonnées, et c'est pourquoi une des parties suivantes du développement est consacrée à ce sujet (cf. partie III.2.1).

III.1.2 Définition des pièces

La définition des pièces dans un modèle numérique a trois intérêts principaux.

Premièrement, cela a pour but de préciser la destination des pièces, chose importante pour certains documents d'urbanisme.

Deuxièmement, il s'agit de délimiter les contours de pièces afin de procéder aux calculs de surface par la suite. Ces délimitations sont particulièrement importantes pour la surface utile et doivent tenir compte de critères précis.

Troisièmement, cela permet d'extraire facilement des informations sur les pièces lors de la création de plans d'intérieur via Revit.

La définition des pièces se fait à travers un outil dédié : « pièce ». Cet outil est efficace pour la détection automatique de pièces, même lorsqu'elles sont délimitées par des murs *in situ*. Des objets de type pièce sont alors créés avec une liste d'attributs pouvant être renseignés par l'utilisateur ou calculés par le logiciel tels que la surface, le périmètre, l'occupation, le nom, *et cætera*. Via les champs modifiables par l'utilisateur, il est possible de renseigner manuellement la destination de chacune des pièces de manière assez rapide.

Quelques fois, l'outil ne détecte pas certaines pièces, notamment celles qui ne sont pas entièrement closes. Il est alors possible de dessiner le contour de la pièce manuellement et d'avoir *in fine* les mêmes caractéristiques que les pièces détectées de façon automatique. La possibilité de modifier manuellement les limites d'une pièce est particulièrement utile lorsque les hauteurs sous plafond ou sous escalier sont inférieures à 1,80 mètre et que les limites de pièce à prendre en compte pour les calculs de surface ne sont plus les mêmes (cf. partie III.2.2).

Enfin, il est possible sur Revit de créer une étiquette, c'est-à-dire un cadre d'annotation, qui permet d'afficher sur les plans certaines informations pertinentes. Dans la modélisation de l'ensemble immobilier, il a donc pu être possible de créer une famille d'étiquette prenant certaines informations de la maquette en paramètres et permettant de les afficher sur les plans d'intérieur. Une des étiquettes créées (voir figure 31 ci-contre) indique par exemple le nom de la



Figure 31 : étiquette de pièce sur Revit.

pièce en question, sa surface, sa destination, son numéro de bâtiment et son numéro d'étage. Pour placer ces étiquettes, il suffit simplement de cliquer sur une pièce et les renseignements se remplissent de manière automatique.

La définition des pièces demande de contrôler la délimitation de chacune des pièces et d'en spécifier la destination, étape qui peut prendre du temps, mais cela est nécessaire pour pouvoir par la suite extraire certaines données juridiques de la maquette.

III.1.3 Servitudes et contraintes

La question des servitudes est primordiale dans un projet et la maquette numérique est un bon outil pour les matérialiser et permettre une visualisation efficace de leurs effets sur l'ouvrage.

Sur un projet de réhabilitation, les servitudes touchant l'immeuble sont généralement déjà effectives et de ce fait, peu de nouvelles servitudes sont à mettre en place. Cependant, la matérialisation de celles déjà existantes dans le modèle numérique est importante.

Le mémoire de Maud Laurencin cité précédemment analyse de manière complète la façon dont les servitudes et les diverses contraintes réglementaires peuvent être modélisées. Dans le projet de réhabilitation parisien, l'ensemble immobilier n'est grevé d'aucune servitude d'utilité publique. La seule servitude qui frappe l'ouvrage est une servitude de vue dont le fond dominant est le fonds voisin. Il s'agit d'une servitude d'utilité privée qui protège un propriétaire de la possibilité qu'un voisin crée une ouverture, un balcon ou tout autre aménagement offrant une vue sur sa propriété. La loi est stricte sur ce sujet et fixe le cadre de ce qui est possible selon les cas de figure.

Ici, il s'agit d'ouvertures dans un mur dressé en limite de propriété et non-mitoyen. Les règles sont claires pour ce cas de figure : les ouvertures doivent être à 2,60 mètres du sol de la pièce qu'elles illuminent si c'est au rez-de-chaussée et à 1,90 mètre pour les étages supérieurs, la fenêtre doit être sur un support fixe qui ne s'ouvre pas, le verre doit être translucide mais non-transparent et des barreaux séparés d'au maximum 10 cm doivent être placés à l'extérieur de la fenêtre. Ces mesures assurent que l'occupant à qui profitent ces ouvertures ne puisse pas avoir de vue sur la propriété de son voisin.

Les deux fenêtres de l'immeuble en limite de propriété donnant sur la parcelle voisine sont donc soumises à ces contraintes. La méthode retenue pour modéliser les servitudes est de créer un volume de couleur vive à l'emplacement de l'ouverture, de telle sorte que cela soit visible sur la maquette numérique. Ce volume peut être renseigné via un le champ « commentaires » des propriétés. L'utilisateur peut ainsi préciser la nature de la servitude et indiquer les contraintes qui en découlent. Les deux ouvertures concernées sont observables sur la figure 32 ci-dessous ainsi que le tableau des propriétés dans lequel est précisée la nature de la servitude.

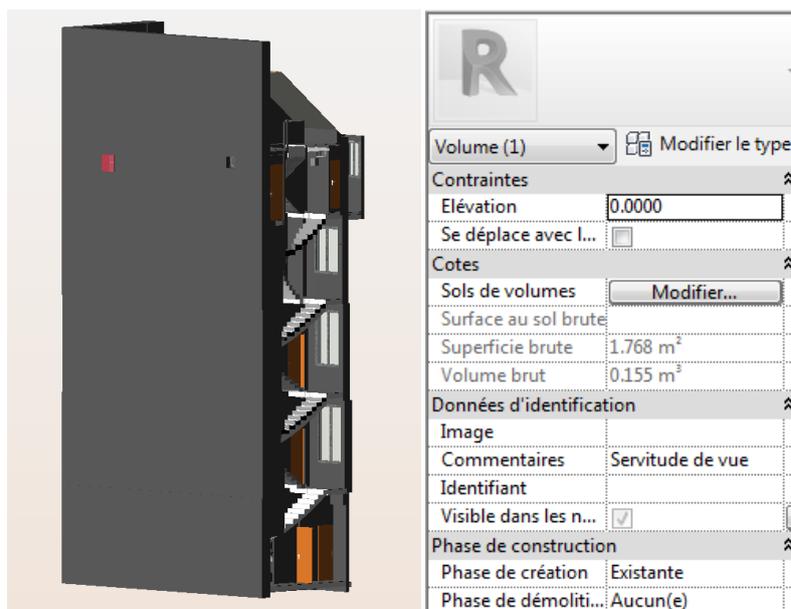


Figure 32 : les deux ouvertures du 4ème étage donnent sur la parcelle voisine. Le volume rouge superposée à l'une d'entre elles permet d'identifier plus facilement la présence d'une contrainte. Ses propriétés sont illustrées à droite.

III.2 Difficultés d'extraction de documents nécessaires au permis de construire

La réduction du nombre de logiciels par lesquels il faut passer lors de la conception d'un projet est aujourd'hui l'un des objectifs de développement du BIM. Cela a pour but de limiter le nombre de licences métiers dans lesquels les acteurs doivent investir, limiter la perte de données lors de l'exportation de fichiers d'un logiciel à un autre et permettre une plus grande efficacité et rapidité d'exécution.

C'est dans cette optique que Revit se développe et a vocation à répondre à tous les besoins de la CAO. Ainsi, toute la phase de conception se fait sur ce logiciel et ensuite les calculs de surface et l'édition des tableaux de synthèse doivent également pouvoir s'opérer depuis Revit. Toutefois, la complexité du projet de réhabilitation peut être un frein pour certains cas.

III.2.1 Limites de propriété

La modélisation des limites de propriété est une opération aisée sur Revit, comme évoqué dans la partie III.1.1, mais l'extraction d'informations concernant ces dites limites est plus compliquée.

La véritable problématique se pose lorsqu'une limite est dessinée à partir d'une esquisse manuelle et que l'on souhaite récupérer les coordonnées des sommets ainsi que les angles et distances des lignes séparatives. Revit ne propose aucun outil ou applicatif répondant à ce besoin.

Pour pallier à ce problème, l'utilisation de l'extension Dynamo a été nécessaire. La diversité des fonctions proposées par ce plug-in de programmation permet de mettre en place de nombreuses possibilités d'amélioration pour Revit. Pour extraire les informations à propos des limites de propriété, un algorithme mêlant des fonctions de Dynamo et des scripts en langage Python a été développé (voir annexe). L'exécution de cet algorithme permet, après sélection d'une limite de propriété, d'en extraire un tableau Excel

récapitulant le numéro et les coordonnées (X,Y) de chacun des sommets dans le système de coordonnées du projet, les distances entre chaque sommet et l'angle.

Pour faire simple, cet algorithme récupère les coordonnées locales des extrémités de chaque ligne composant la limite puis classe ces points dans le bon ordre en déterminant si la limite est en boucle fermée, il convertit ensuite les coordonnées dans le système de coordonnées du projet et enfin calcule les distances et angles entre ces points. Ces données sont finalement classées dans un tableau exporté au format Excel.

Au final, l'utilisateur n'a simplement qu'à ouvrir l'algorithme Dynamo, sélectionner la limite de propriété et spécifier un emplacement de sauvegarde pour le tableau de synthèse.

III.2.2 Surfaces juridiques

Le terme « surface juridique » désigne une surface dont les critères de calcul sont réglementés par des textes du législateur.

Le logiciel Revit propose des solutions efficaces pour extraire de manière automatisée différents tableaux de surfaces juridiques. Les deux principaux sont les tableaux concernant la surface de plancher et la surface utile (voir définition en annexe).

La mise en place d'une extraction automatique de ces données est pleinement développée dans le mémoire de Vivien Roy cité précédemment. Les solutions qu'il présente sont efficaces et fonctionnelles. Néanmoins, la complexité de l'ensemble immobilier limite cette efficacité en ce qui concerne la détermination des planchers dont la hauteur sous plafond est inférieure à 1,80 mètre.

L'algorithme de Vivien Roy ne peut s'appliquer à des sols irréguliers dont l'altimétrie varie fortement et il permet seulement de traiter des planchers plans. Bien que Dynamo propose une palette de fonctions géométriques importante, aucune solution automatisée n'a pu être développée pour répondre à ce cas de figure.

Pour ces cas bien particuliers, la solution la plus efficace est d'utiliser le nuage de point et de s'appuyer sur des coupes de celui-ci pour déterminer la délimitation des surfaces dont la hauteur sous plafond est inférieure à 1,80 mètre.

Le calcul des surfaces de plancher à partir des solutions de Vivien Roy repose sur l'analyse des dalles de sol. Dans un ouvrage classique, une seule dalle est utilisée pour chaque étage. Dans ce cas d'étude, il est parfois nécessaire de créer une dalle par pièce et voir ainsi le nombre de sol sur un même étage se multiplier. Pour le calcul de la surface de plancher à partir de la méthode de Vivien, il est alors nécessaire de répéter la méthode pour chaque dalle créée et l'opération qui était efficace initialement devient immédiatement longue à réaliser.

Le calcul des surfaces juridiques est une des raisons pour lesquelles l'ouvrage a nécessité une modélisation précise au centimètre. La complexité architecturale a demandé un travail long et conséquent pour la faire transparaître avec fidélité dans la maquette numérique. Cependant, pour se rendre compte de la véritable différence dans les surfaces que cela implique, les valeurs issues des calculs de surface ont été comparées à celles obtenues à partir d'une maquette du même ouvrage mais réalisée avec des objets génériques (sans murs *in situ* notamment) et donc avec moins de précision.

Cette maquette « simplifiée » représente seulement un étage du bâtiment. Sa modélisation a demandé moins de temps que pour la première maquette, passant d'environ

une semaine de travail à une demi-journée. Le calcul de la surface de plancher et de la surface utile a été réalisé selon le même procédé sur les deux maquettes de manière à pouvoir comparer objectivement les résultats.

La différence pour la surface de plancher est de l'ordre de 0,3% tandis que pour la surface utile, il n'y a pas de différence sur le total de l'étage. Cependant, en comparant pièce par pièce la surface utile, des différences proches de 2% apparaissent. Si ces différences se compensent sur l'ensemble de l'étage étudié, il ne s'agit pas d'une règle générale. Ainsi, un écart de 2% sur la surface utile peut avoir des incidences importantes d'un point de vue économique, en particulier lorsque le prix du mètre carré est élevé.

Le niveau de détail influe donc sur les valeurs des surfaces du modèle numérique et cet élément est à prendre en compte au moment de la commande de la maquette. L'écart sur la surface de plancher est suffisamment faible pour être négligeable mais ce n'est pas le cas pour ce qui concerne la surface utile. Ces différences sont la conséquence directe du niveau de précision de la maquette et cela met en lumière l'importance de définir, en amont du projet, un niveau de détail qui correspond aux besoins du projet.

Conclusion

L'établissement de la maquette numérique d'un immeuble ancien et complexe permet de mettre en lumière les limites actuelles auxquelles se confronte la mise en place du processus BIM. Le contexte est, certes, particulier mais les difficultés qu'il souligne sont un frein à l'adoption du BIM dans les projets de réhabilitation. Bien que les avantages qu'il promette semblent sans conteste, les obstacles auxquels il fait face sont nombreux et restent autant de pistes d'amélioration à développer.

La complexité du bâti est la principale cause de complications. La modélisation avec précision de la maquette semble être, de prime abord, une condition nécessaire pour extraire des informations juridiques qui en dépende et fournir aux autres intervenants du projet un modèle le plus conforme possible à la réalité et traduisant au mieux sa complexité. Cependant, modéliser avec une précision de l'ordre du centimètre une telle architecture ne peut être efficace que si les outils de modélisation le sont aussi. Or, les logiciels professionnels tels que Revit n'offrent pas pour le moment ce confort au modélisateur.

Le recours à des composants *in situ* est la meilleure façon de reproduire un élément complexe avec fidélité. Néanmoins, cela se fait au détriment du renseignement attributaire des objets, aspect essentiel du BIM. En outre, les objets ainsi créés interagissent très peu avec les éléments autour et peu d'outils sont en mesure de les prendre en compte. Le retour d'expérience d'architectes sur le sujet est patent. L'utilisation de tels objets rend la maquette très compliquée et peu pratique d'utilisation. La précision est nécessaire mais les outils efficaces manquent. L'extension Dynamo de Revit pour la programmation pourrait être une piste intéressante pour développer des premières réponses. Des solutions d'automatisation de la modélisation sont également proposées par certaines startups comme MySnapkin mais demeurent pour l'instant adaptés à des architectures simples et ne permettent pas encore de répondre à ces problématiques. Par ailleurs, la modélisation d'objets via l'insertion d'un maillage du nuage de points pourrait être une solution graphique efficace mais aurait l'inconvénient de créer des objets non-BIM sans paramètres et propriétés.

Au contraire, certains objets complexes sont chronophages lors de leur modélisation alors qu'une haute précision n'est pas forcément nécessaire. Il apparaît être primordial que la précision attendue pour chaque type d'objet soit déterminée en amont de la modélisation. Cette étape peut être longue et fastidieuse mais le gain de temps lors de la réalisation de la maquette la compense amplement. Le cabinet Pierre Bloy a mis en place une méthode de collaboration avec les maîtres d'œuvre lors de tels projets BIM pour clarifier dès le début du projet les différents niveaux de précision attendus. Les résultats semblent *a posteriori* convaincants et cela permet d'éviter au géomètre-expert des modélisations chronophages inutiles.

La question de la précision est déterminante dans la réalisation d'une maquette et est l'élément qui détermine la charge et le temps de travail pour le modélisateur. Y répondre avec clarté et définir les attentes en matière de niveau de détail dès le début du projet est nécessaire pour le bon déroulement de la phase de modélisation. Toutefois, à la fin de cette phase, il demeure difficile d'évaluer la réelle précision de la production. Revit ne propose pas à cette heure de fonctionnalité permettant un contrôle de qualité de la maquette à partir du nuage de points de l'ouvrage. Le seul contrôle possible depuis le logiciel reste celui qui s'impose au modélisateur pendant son travail et qui se fait de

manière visuelle. Toutefois, l'extension développée par MySnapkin semble être une solution efficace à cette problématique de contrôle.

Quant à la modélisation des informations immatérielles et notamment juridiques, elle est également sujette à des difficultés accentuées par le manque d'outils efficaces disponibles. La complexité du bâtiment a, là encore, une incidence sur l'efficacité des outils proposés par Revit et ralentit le travail du modélisateur. Dynamo est, cependant, une piste intéressante et permet déjà de mettre en place des solutions à travers des algorithmes à développer. C'est l'exemple en particulier des limites de propriété qui sont très peu exploitables sur Revit mais dont Dynamo permet d'en extraire certaines informations telles que les coordonnées de ses sommets ainsi que les distances et les angles des segments composant la limite séparative. Il pourrait également être intéressant de développer des applicatifs Revit qui s'appuieraient dans le même temps sur la maquette et sur le nuage de points pour certains calculs, notamment lorsque la complexité de la maquette les rend impossibles. C'est l'exemple des calculs de surface qui nécessitent de prendre en compte la hauteur sous plafond alors que celle-ci ne peut pas toujours être déterminée à partir de la maquette en raison de la complexité du bâtiment.

Enfin, la modélisation d'une maquette aussi complexe soulève des interrogations en ce qui concerne l'échange de données via des formats d'export. Travailler dans le cadre du BIM implique de faciliter les échanges entre acteurs. Seulement, cela n'a d'intérêt que si les données parviennent à s'exporter sans perte d'informations. Le fait est que l'export de la maquette au format IFC fait perdre un nombre d'informations trop important. Cela oblige les différents intervenants à travailler sur un logiciel métier commun s'ils ne souhaitent perdre aucune donnée. Cet aspect est également un élément important à prendre en compte en amont de la modélisation.

Finalement, le BIM fait la promesse de nombreux avantages mais la réalité de sa mise en place dans un tel contexte peine à les mettre en avant. Le gain de temps annoncé lors de la phase de conception est éclipsé par la durée de travail démultipliée qu'implique la réalisation de la maquette. Par ailleurs, plus la prestation du géomètre-expert est longue, plus elle est couteuse pour le maître d'ouvrage. Autrement dit, le temps de travail nécessaire pour établir le modèle numérique a une incidence directe sur le coût du projet et discrédite l'argument d'une économie financière offerte par le BIM.

De ce fait, la pertinence de la mise en place d'un processus BIM dans ce contexte peut être remise en cause. Un projet de réhabilitation classique sans production de modèle numérique semble poser nettement moins de contraintes, aussi bien en matière de budget qu'en matière de délai, où les plans 2D sont plus rapidement réalisables et plus utilisables que la maquette rendue complexe par le niveau de précision attendu.

Les besoins du projet doivent donc être clairement définis en amont. La maquette doit répondre à un niveau de détail nécessaire mais ne faisant pas obstacle à son utilisabilité. Les logiciels BIM encadrant les projets de réhabilitation d'immeubles anciens et complexes doivent aussi participer à améliorer les conditions actuelles de modélisation et proposer une palette d'outils plus adaptés et efficaces.

Bibliographie

Ouvrages imprimés :

CELNIK Olivier et LEBEGUE Eric. BIM & maquette numérique pour l'architecture, le bâtiment et la construction. Éditions Eyrolles, 2014. 622 pages.

BELLENGUER Anne-Marie et BLANDIN Amélie. Le BIM sous l'angle du droit. Éditions Eyrolles, 2016. 120 pages.

HENO Raphaële et CHANDELIER Laure. Numérisation 3D de bâtiments. iSTE editions, 2014. 178 pages.

ACLOQUE Delphine, BONNET-PINEAU Élisabeth, COLOMBEL Yves, DELPIROU Aurélien, OSTER Daniel. La France, territoires et aménagement face à la mondialisation. Éditions NATHAN, 2012.

Plan transition numérique dans le bâtiment, 2017. Stratégie française pour les actions de pré-normalisation et normalisation BIM appliquées au bâtiment.

Articles de périodiques imprimés :

DEMIGNEUX Nicolas. *Marchés publics et privés : les nouveaux risques juridiques du BIM*. Le Moniteur, 2018, n°5975, p.76-79.

HALBOUT Hervé. *Convergence BIM-SIG*. Géomatique expert, 2016, n°109, p.14-29.

COLLOMBE Julien. *BIM, géomètres et modélisation 3D*. Géomatique expert, 2016, n°111, p.38-54.

BORDIN Patricia. *SIG & BIM : quelle histoire !*. Géomatique expert, 2017, n°115, p.38-43.

HABCHI Vincent. *SIG et BIM à la Société du Grand Paris*. Géomatique expert, 2018, n°120, p.28-35.

HABCHI Vincent. *BIM et SIG, l'impossible mariage ?*. Géomatique expert, 2018, n°121, p.34-45.

Travaux universitaires

ENGELBART Douglas, 1962. Augmenting Human Intellect : A Conceptual Framework. Summary report, Stanford Research Institute, États-Unis.

VOIRIN Jean-Philippe, 2014. Le Géomètre-Expert acteur du BIM. DPLG, ESGT.

REGNARD Anne-Laure, 2015. Construction de la maquette 3D de Rennes Métropole Mise en place, analyse et optimisation des processus. TFE, ESGT.

DEHODENT Kevin, 2015. Intégration du processus BIM dans un cabinet de Géomètres Experts. TFE, ESGT.

LAURENCIN Maud, 2017. L'intégration des données complémentaires (données foncières, division en volume, environnement) au sein de maquettes numériques au format Revit. TFE, ESGT.

ATTENCIA Jordi, 2015. Création d'un plug-in Revit de gestion et mise à jour d'éléments 3D à destination de néophytes de la géomatique. TFE, ESGT.

BOUILLON Loïc, 2016. Le BIM comme support de la gestion foncière des immeubles bâtis et des ouvrages complexes. TFE, ESGT.

ROY Vivien, 2017. Intégration de données juridiques dans les maquettes numériques BIM. TFE, ESGT.

POUX Florent, 2014. Vers de nouvelles perspectives lasergrammétriques : optimisation et automatisation de la chaîne de production de modèles 3D. TFE, ESGT.

Texte réglementaire

Circulaire du 3 février 2012 relative au respect des modalités de calcul de la surface de plancher des constructions définie par le livre I du code de l'urbanisme. NOR : DEVL1202266C.

Sites internet

Objectif BIM. [en ligne] disponible sur <http://objectif-bim.com/index.php>. 12/02/2018.

FFBIM. [en ligne] disponible sur <http://www.ffbim.fr/que-veut-dire-bim>. 16/04/2018.

Engineering. [en ligne] disponible sur <https://www.engineering.com/BIM/ArticleID/11436/BIM-101-What-is-Building-Information-Modeling.aspx>. 18/04/2018.

BIM & BTP. [en ligne] disponible sur <https://bimbtp.com/pourquoi-le-bim/definition-du-bim/>. 20/04/2018.

Mediaconstruct. [en ligne] disponible sur <http://www.mediaconstruct.fr/comprendre-le-bim/maquette-numerique-et-bim>. 20/04/2018.

Livre blanc de la Caisse des Dépôts. [en ligne] disponible sur http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/Livre_Blanc_Maquette_Numerique_mai2014_PDD_bassedef-v1.pdf. 02/05/2018.

Demographia. World urban areas. 14^{ème} édition annuelle, avril 2018. [en ligne] disponible sur <http://www.demographia.com/db-worldua.pdf>. 23/05/2018.

Table des annexes¹⁸

Annexe 1 Titre.....	Erreur ! Signet non défini.
Annexe 2 Titre.....	Erreur ! Signet non défini.
Annexe 3 Titre.....	Erreur ! Signet non défini.

¹⁸ Les annexes doivent être annoncées dans le texte principal en note de bas de page. On évitera alors de renvoyer à la page où se situe l'annexe mais on renverra plutôt au n° de l'annexe. On peut ici détailler ou illustrer des informations qui n'ont pas pu être développées dans le texte mais qui méritent de l'être. Les annexes sont numérotées et titrées. On évitera donc de faire figurer plusieurs annexes sur une même page. Pour enlever cette note de bas de page, supprimer l'appel de note ci-dessus.

Annexe 1

Exemples de documents livrés suites aux mesures par drones : orthophoto et nuage de points.



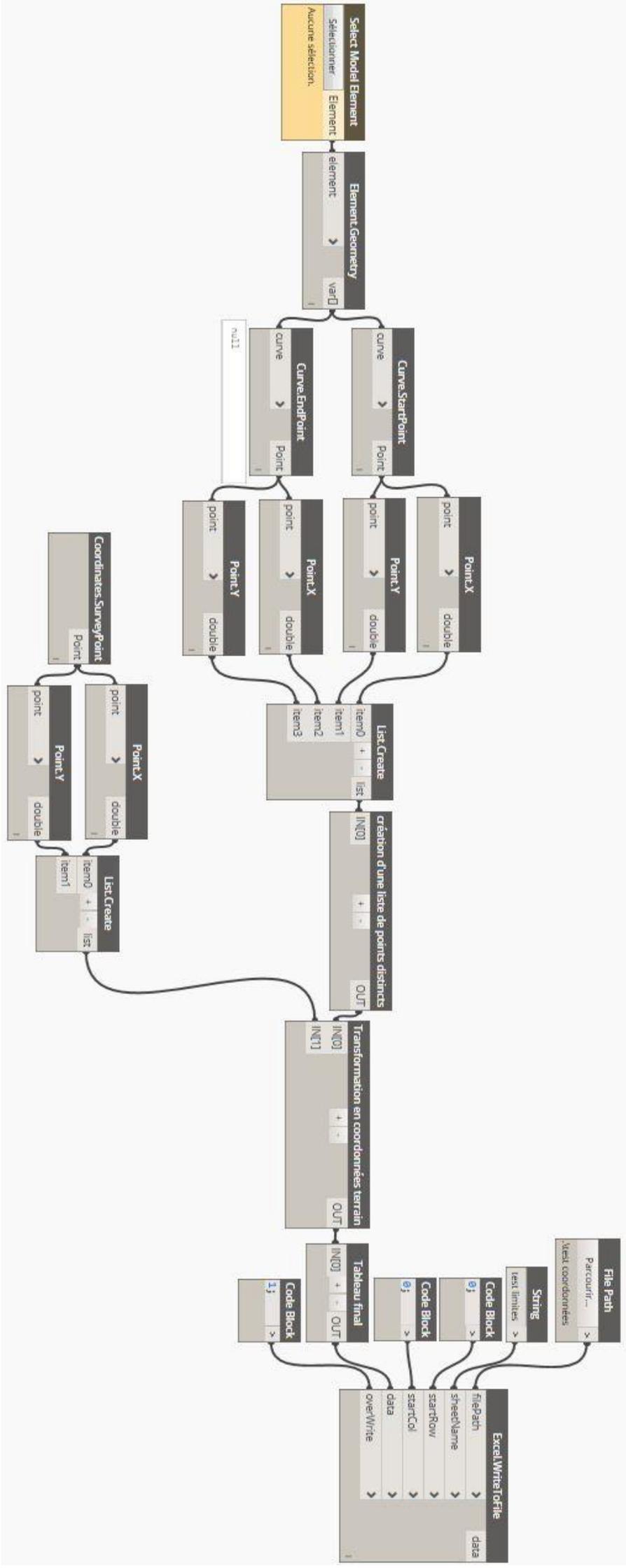
Annexe 2

Arrêté du 17 décembre 2015 de la ministre de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, du ministre de la défense et de la ministre des outre-mer, relatif à l'utilisation de l'espace aérien par les aéronefs qui circulent sans personne à bord :

- article 5, 1^o alinéa : « L'aéronef n'évolue pas au-dessus de l'espace public en agglomération, sauf en des lieux où le préfet territorialement compétent autorise la pratique d'activité d'aéromodélisme. »
- article 6, 1^o alinéa : « Les vols effectués en zone peuplée sont soumis à une déclaration préalable auprès du préfet territorialement compétent pouvant donner lieu à une interdiction ou une restriction de vol. La déclaration est effectuée par les exploitants avec un préavis de cinq jours ouvrables [...]. »

Annexe 3

Algorithme Dynamo et scripts Python



Script python pour le nœud « Tableau final »

```
6 dataEnteringNode = IN
7
8 def arctg(n,d):          #n=numérateur ; d=dénominateur
9     x=atan(n/d)
10    if d < 0:
11        x=x+pi
12    elif d > 0:
13        if n < 0:
14            x=x+2*pi
15    return x            #x E [0;2pi]
16
17 def r_g(a):
18     return a*200/pi
19
20 def dist(a,b):
21     return sqrt((b[1]-a[1])**2+(b[2]-a[2])**2)
22
23 def ang3(p,pp,ppp):
24     return arctg(ppp[1]-pp[1],ppp[2]-pp[2])-arctg(p[1]-pp[1],p[2]-pp[2])
25
26 pts = IN[0]
27 l = len(pts)
28 angle = 0
29 distance = 0
30 somme1 = 0
31 somme2 = 0
32 cond = 0
33 iteration = 0
34
35 while cond == 0 :
36     tab = [['Point','X','Y','Angle (grad)','Distance (m)']]
37     somme1 = 0
38     somme2 = 0
39     for i in range(l):
40         if i == 0 :
41             angle = 400 - r_g(ang3(pts[l-2],pts[0],pts[1]))%400
42             distance = dist(pts[0],pts[1])
43             somme1 += 400 - angle
44             somme2 += angle
45         elif i == l-1 :
46             angle = 400 - r_g(ang3(pts[i-1],pts[i],pts[1]))%400
47             distance = dist(pts[i],pts[1])
48             somme1 += 400 - angle
49             somme2 += angle
50         else :
51             angle = 400 - r_g(ang3(pts[i-1],pts[i],pts[i+1]))%400
52             distance = dist(pts[i],pts[i+1])
53             somme1 += 400 - angle
54             somme2 += angle
55         tab.append((pts[i][0],round(pts[i][1],2),round(pts[i][2],2),round(angle,2),round(distance,2)))
56     cond = 1
57     if somme2 > somme1 :
58         copie = []
59         for k in range(len(pts)) :
60             copie.append(pts[k])
61         for m in range(len(pts)) :
62             pts[-m-1] = copie[m]
63         tab = [['Point','X','Y','Angle (grad)','Distance (m)']]
64         cond = 0
65     iteration+=1
66
67
68 #Affectez la sortie à la variable OUT.
69 OUT = tab
```

Accepter les modifications

Annuler

Annexe 4

La surface de plancher est définie aux articles L. 112-1 et R. 112-2 du code de l'urbanisme :

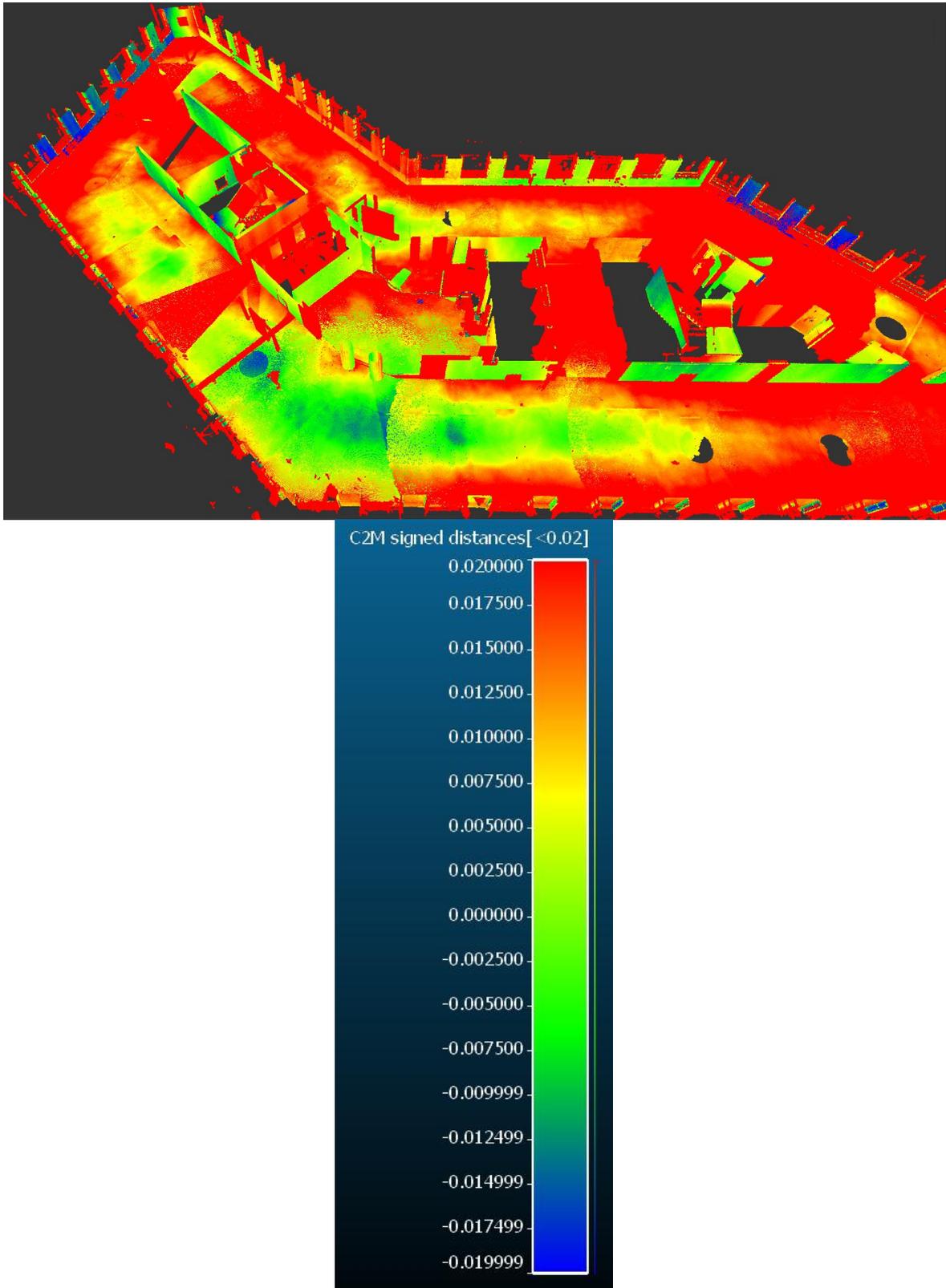
« Art. L. 112-1 : Sous réserve des dispositions de l'article L. 331-10, la surface de plancher de la construction s'entend de la somme des surfaces de plancher closes et couvertes, sous une hauteur de plafond supérieure à 1,80 m, calculée à partir du nu intérieur des façades du bâtiment. Un décret en Conseil d'Etat précise notamment les conditions dans lesquelles peuvent être déduites les surfaces des vides et des trémies, des aires de stationnement, des caves ou celliers, des combles et des locaux techniques ainsi que, dans les immeubles collectifs, une part forfaitaire des surfaces de plancher affectées à l'habitation. ».

« Art. R. 112-2 : La surface de plancher de la construction est égale à la somme des surfaces de planchers de chaque niveau clos et couvert, calculée à partir du nu intérieur des façades après déduction :

- 1° Des surfaces correspondant à l'épaisseur des murs entourant les embrasures des portes et fenêtres donnant sur l'extérieur ;
- 2° Des vides et des trémies afférentes aux escaliers et ascenseurs ;
- 3° Des surfaces de plancher d'une hauteur sous plafond inférieure ou égale à 1,80 mètre ;
- 4° Des surfaces de plancher aménagées en vue du stationnement des véhicules motorisés ou non, y compris les rampes d'accès et les aires de manœuvres ;
- 5° Des surfaces de plancher des combles non aménageables pour l'habitation ou pour des activités à caractère professionnel, artisanal, industriel ou commercial ;
- 6° Des surfaces de plancher des locaux techniques nécessaires au fonctionnement d'un groupe de bâtiments ou d'un immeuble autre qu'une maison individuelle au sens de l'article L. 231-1 du code de la construction et de l'habitation, y compris les locaux de stockage des déchets ;
- 7° Des surfaces de plancher des caves ou des celliers, annexes à des logements, dès lors que ces locaux sont desservis uniquement par une partie commune ;
- 8° D'une surface égale à 10% des surfaces de plancher affectées à l'habitation telles qu'elles résultent le cas échéant de l'application des alinéas précédents, dès lors que les logements sont desservis par des parties communes intérieures. ».

Annexe 5

Carte de chaleur des écarts entre une maquette et le nuage de points correspondant.



Annexe 6

Visualisation de la maquette au format IFC dont des éléments manquent.



Établissement de la maquette numérique d'un immeuble ancien et complexe dans le cadre d'un processus BIM.

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., ESGT Le Mans, 2018

RÉSUMÉ

La mise en place d'un processus BIM pour un projet de réhabilitation implique de modéliser un ouvrage déjà existant en tenant compte de ses spécificités. Dans le cas d'un immeuble ancien à l'architecture complexe, la modélisation peut soulever un certain nombre de problématiques. Pour garantir l'exactitude des informations qu'elle représente et en permettre une bonne exploitation, notamment pour en extraire des données juridiques, la maquette numérique de l'ouvrage peut être soumise à un haut niveau de précision. Cependant, modéliser un bâtiment complexe de manière précise peut, paradoxalement, faire obstacle à l'utilisabilité du modèle numérique. Le travail du modélisateur s'en trouve alors modifié et des interrogations peuvent être émises quant aux limites qui doivent être fixées entre haute précision et bon utilisabilité de la maquette.

Mots clés : BIM, maquette numérique, Revit, réhabilitation.

SUMMARY

The implementation of a process BIM for a project of rehabilitation implies to model an already existing building by taking into account its specificities. In the case of an old building with a complex architecture, the modeling can raise a number of problems. To guarantee the accuracy of the information that it represents and to allow a good exploitation, in particular to extract from it legal data, the digital model of the building can be submitted to a high level of precision. However, modeling a complex building in a precise way can, paradoxically, put obstacle to the usability of the digital model. The work of the modeler is then modified and questioning can be emitted about the limits which must be fixed between the digital model high precision and its good usability.

Key words : BIM, digital model, Revit, rehabilitation.