



HAL
open science

Contribution à une démarche numérique intégrée pour la préservation des patrimoines bâtis

Raphaël Rolin

► **To cite this version:**

Raphaël Rolin. Contribution à une démarche numérique intégrée pour la préservation des patrimoines bâtis. Matériaux composites et construction. Université de Technologie de Compiègne, 2018. Français. NNT : 2018COMP2450 . tel-04758900

HAL Id: tel-04758900

<https://theses.hal.science/tel-04758900v1>

Submitted on 29 Oct 2024

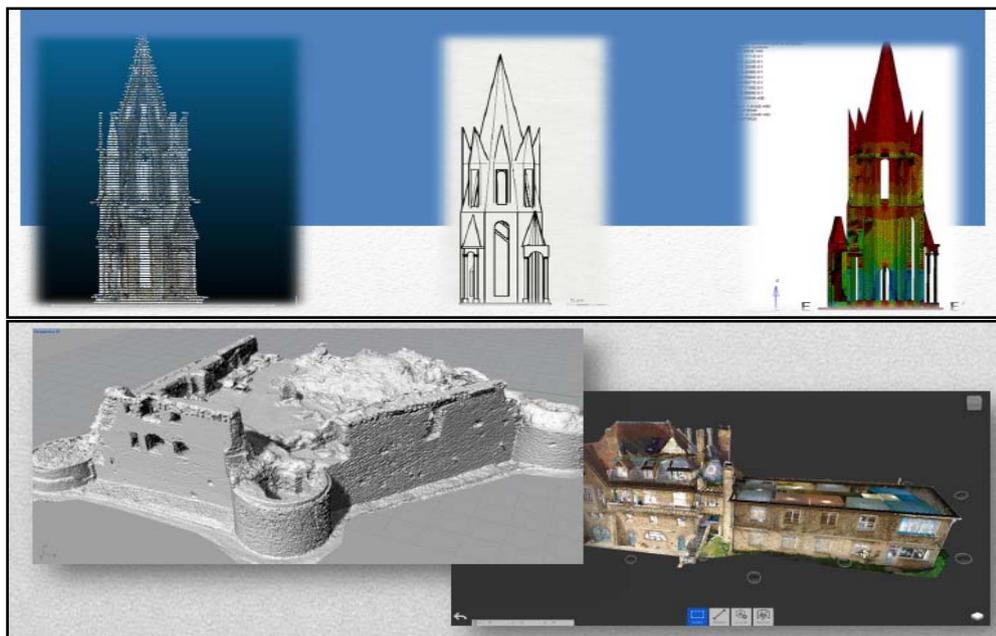
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

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

Par Raphaël ROLIN

*Contribution à une démarche numérique intégrée
pour la préservation des patrimoines bâtis*

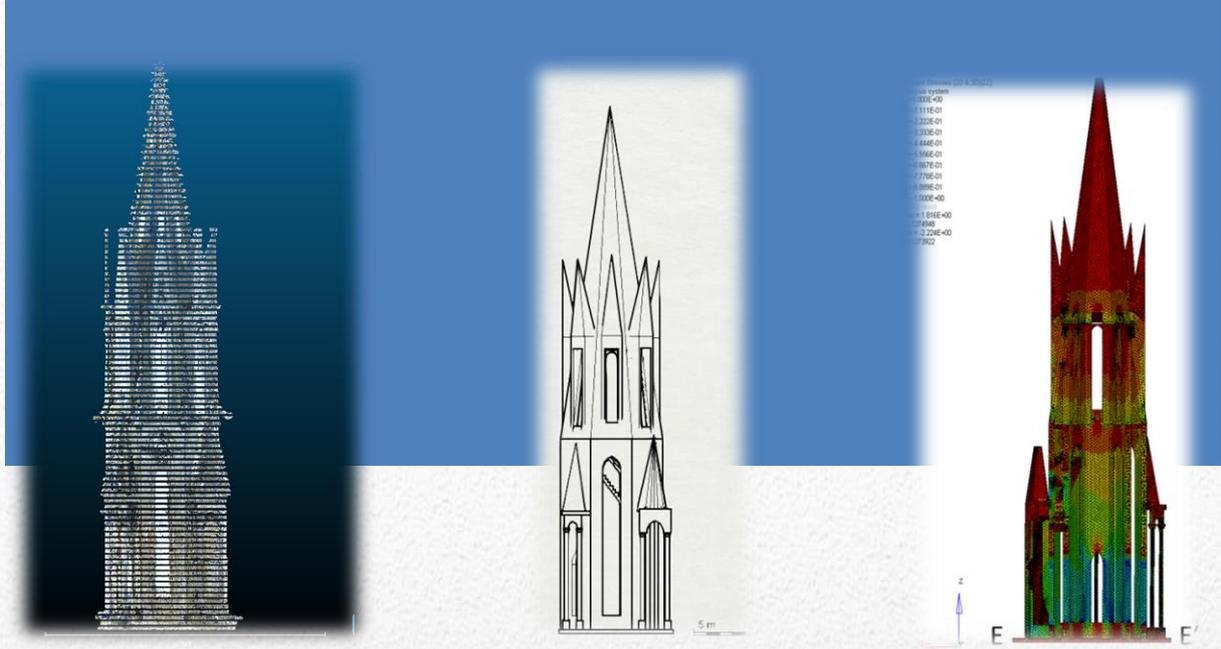
Thèse présentée
pour l'obtention du grade
de Docteur de l'UTC



Soutenue le 7 décembre 2018

Spécialité : Sciences de la construction : Laboratoire
Avenues - GSU (EA-7284)

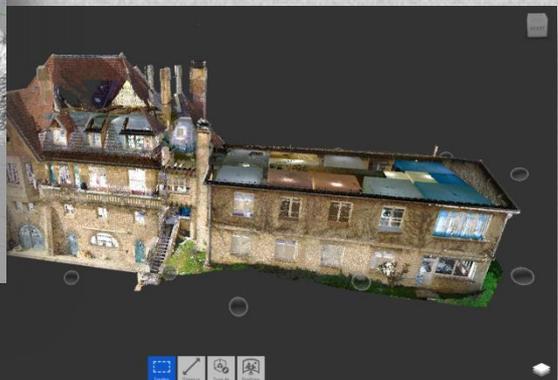
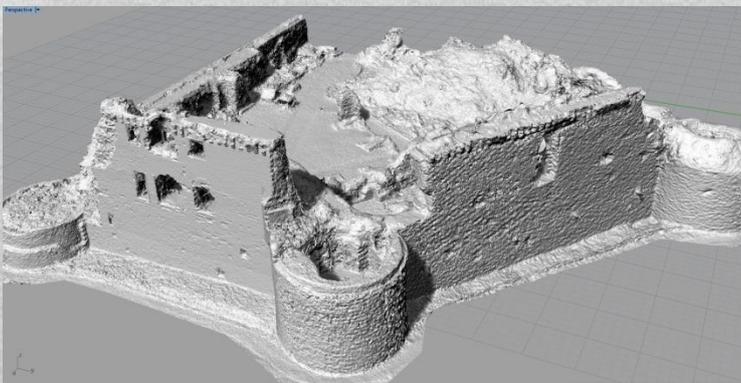
D2450



Contribution à une démarche numérique intégrée pour la préservation des patrimoines bâtis

Thèse présentée pour l'obtention du titre de Docteur de l'UTC

Par Raphael ROLIN



Thèse soutenue le 07 décembre 2018

THESE DE DOCTORAT

Intitulée

Contribution à une démarche numérique intégrée pour la
préservation des patrimoines bâtis

Présentée par

Raphaël ROLIN

Pour l'obtention du grade de

Docteur de l'Université de Technologie de Compiègne

Spécialité : Sciences de la construction

Soutenue le 7 décembre 2018 devant le jury composé par

Rapporteur Prof. Alaa Chateauneuf, CIDECO, Polytech Clermont-Ferrand, Aubière

Rapporteur Prof. Arnaud Delamézière, Institut Mines Télécom, Institut Supérieur d'Ingénierie de la Conception, St-Dié-des-Vosges

Examinateur Prof. Alain Rassineux, Laboratoire Roberval, Université de Technologie de Compiègne

Examinateur Indira Mouttapa Thouvenin, Enseignant Chercheur, HDR, Laboratoire Heudiasyc, Université de Technologie de Compiègne

Examinateur Prof. Dany Sandron, Sorbonne Université, Centre André Chastel, Paris

Examinateur Dr. Salim Bouabdallah, ALTAIR Engineering, Anthony

Examinateur (directeur de thèse) Dr. Eduard ANTALUCA, Laboratoire Avenues, Université de Technologie de Compiègne

Examinateur (directeur de thèse) Prof. Émérite Jean-Louis BATOZ, Laboratoires Avenues – Roberval, Université de Technologie de Compiègne

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier Eduard Antaluca et Jean-Louis Batoz grâce à qui il a été possible, durant ces trois années, de travailler et me former sur un sujet et une thématique émergente et particulièrement intéressante, tout en nécessitant de nombreuses heures d'études, de formation et d'acquisition de compétences. L'encadrement et la liberté d'organisation dans ces conditions se sont avérés très appréciables afin de pouvoir exploiter au mieux l'ensemble des compétences acquises et des améliorations proposées au cours de ces longues heures de travail acharné en solitaire où la persévérance et la curiosité étaient primordiales.

Je remercie messieurs Chateauneuf et Delamézière, rapporteurs de ma thèse, pour leur analyse de mes travaux, leurs remarques pertinentes et leur contribution au bon déroulement de leur restitution finale, ainsi que l'ensemble des membres du jury (M. Rassineux, président du jury, Mme Thouvenin, M. Sandron, M. Bouabdallah et M. Lamarque) pour leur participation ayant permis de rendre constructives l'ensemble des discussions issues de la soutenance.

J'adresse également des sincères salutations aux collègues doctorants du laboratoire, sans qui ces trois années de travail « en solitaire » n'auraient pas été aussi aisées ni probablement aussi agréables. Hongwei, Changjie, Amine, Whalid, merci à vous pour les moments passés ensemble et toutes les discussions constructives sur des sujets divers et variés ! De même, mes remerciements vont à l'ensemble des membres de l'équipe de recherches Avenues et du département GSU pour l'atmosphère, l'organisation et la convivialité au sein des locaux, permettant de se concentrer au mieux sur nos travaux respectifs et de surmonter ensemble les épreuves et difficultés rencontrées.

Enfin, un grand merci à mes parents, qui m'ont soutenu durant l'ensemble de mes études, encouragé à poursuivre ma voie, et aidé à surmonter les hauts et les bas inhérents à la recherche et la condition de doctorant. Merci de même à Mathieu pour ses connaissances, ses apports et son intérêt envers l'histoire et l'architecture des monuments historiques et religieux. Merci à toi aussi Romain pour tes conseils et ton soutien indéfectible !

Table des matières

Remerciements	3
Liste des figures	6
Glossaire et abréviations	9
1. Introduction	10
1.1. Contexte dans la recherche : des progrès considérables pour la numérisation	10
1.2. Modélisation géométrique, BIM et maquette numérique : une implantation rapide et importante.....	11
1.3. Méthodes et processus de modélisation géométrique et paramétrique : adaptation selon les contextes et besoins	13
1.4. Organisation et structuration des travaux de thèse.....	17
2. Etat de l'art et analyse bibliographique : un domaine aux nombreux angles d'approche et potentialités.....	20
2.1. Articles de type review : perspectives et enjeux liés aux numérisations et modélisations de type BIM.....	20
2.2. Techniques et outils pour l'acquisition, la numérisation et leur intérêt pour la restitution et la modélisation géométrique	23
2.3. Traitement des données issues des numérisations pour la modélisation géométrique.....	27
2.4. Utilisation des modèles géométriques ou paramétriques pour la simulation	35
2.4.1. Etudes structurales aux éléments finis	35
2.4.2. Utilisation des modèles et des géométries pour études thermiques	39
2.5. Bilan de l'analyse de la littérature	40
3. Numérisation et traitement des données pour exploitation	42
3.1. Numérisation et lasergrammétrie.....	42
3.1.1. Principes généraux	42
3.1.2. Fonctionnement et technologies.....	42
3.1.3. Avantages et limites inhérents à la lasergrammétrie.....	44
3.2. Numérisation et photogrammétrie	45
3.2.1. Avantages et limites inhérents à la photogrammétrie	46
3.3. Nuages de points et traitement des données.....	49
3.3.1. Fusion de données hétérogènes	49
3.3.2. Opérations de filtrage et améliorations des nuages de points.....	51
3.3.3. Cas d'études et supports de numérisation.....	52
3.4. Bilan du chapitre	65
4. Exploitation des nuages de points pour la construction de modèles géométriques 3D ..66	

4.1.	Modélisation surfacique.....	66
4.1.1.	Nuages de points et maillages polygonaux	66
4.1.2.	Modélisation géométrique par surfaces de type NURBS	68
4.2.	Modélisation paramétrique de type BIM/hBIM	69
4.3.	Modélisation par voxels	70
4.4.	Outils pour la modélisation géométrique.....	71
4.4.1.	Approche méthodologique pour la modélisation surfacique.....	71
4.4.2.	Approche méthodologique pour la modélisation en voxels	75
4.5.	Approche méthodologique pour la modélisation paramétrique	80
4.5.1.	Flèche de la cathédrale de Senlis.....	80
4.5.2.	Site de l'Hermitage	90
4.6.	Bilan et analyse méthodologique des processus de modélisation géométrique et paramétrique.....	91
4.7.	Construction de géométries 3D et modèles paramétriques pour études thermiques	93
4.8.	Utilisation des nuages de points pour la détection d'éléments géométriques.....	97
4.8.1.	Segmentation automatisée.....	99
4.8.2.	Segmentation semi-automatisée	106
4.9.	Bilan et perspectives pour la modélisation géométrique par extraction et détection	108
4.10.	Bilan du chapitre.....	109
5.	Modèles 3D et maillages éléments finis pour les analyses structurales	110
5.1.	Analyse numérique par éléments finis	110
5.1.1.	Cas du château de Coucy	111
5.1.2.	Cas de la flèche de la cathédrale de Senlis.....	116
5.2.	Bilan du chapitre et perspectives pour la simulation numérique et l'analyse structurale.....	132
6.	Conclusion et perspectives.....	134
6.1.	Conclusion générale des travaux	134
6.2.	Perspectives.....	138
7.	Bibliographie et références	140
Annexes	147
	Formats de fichiers utilisés et caractéristiques	147
	Nuages de points	147
	Modélisation géométrique	147
	Modélisation par éléments finis et analyses numériques	147

Liste des figures

Figure 1 : Modélisation géométrique par surfaces NURBS d'un mur du château de Coucy (02).....	13
Figure 2 : Modélisation paramétrique orientée BIM de la flèche de la cathédrale de Senlis (60).....	14
Figure 3 : Modélisation géométrique en voxels d'un mur du château de Coucy.....	14
Figure 4 : Maquette numérique architecturale du centre Blaise Pascal de l'UTC.....	16
Figure 5 : Schémas de fonctionnement des technologies de scanners laser [63].....	43
Figure 6: Schéma d'acquisition par photogrammétrie le long de façades d'un bâtiment [63].....	47
Figure 7 : Schéma d'acquisition par photogrammétrie aérienne et principe d'appariement des images [63].....	47
Figure 8 : Vue aérienne de la cathédrale, façade principale et détails sur la flèche.....	54
Figure 9 : Nuage de points complet de la cathédrale.....	55
Figure 10 : Nuage de points de la flèche avant traitement, et détail en pied de colonne.....	56
Figure 11 : Nuage de points final après traitements, nettoyage et filtrage, et détail en pied de colonne.....	57
Figure 12 : Nuage de points issu de la lasergrammétrie et cheminement des stations de scans effectuées.....	59
Figure 13 : Nuage de points issu de la photogrammétrie.....	60
Figure 14 : Nuage de points final après fusion et nettoyage.....	60
Figure 15 : Nuage de point d'un chalet (à gauche) et localisation des positions de scans (à droite).....	62
Figure 16 : Nuage de points de la maison du plateau après assemblage et filtrage des points (à gauche) et affichage des intensités des points selon les positions de scans (à droite).....	62
Figure 17 : Nuage de points de la grande bâtisse (façade Sud-Est) après assemblage des espaces intérieurs et des extérieurs.....	63
Figure 18 : Nuage de points de la grande bâtisse – affichage des intensités de points et des positions de scans (extérieurs et intérieurs).....	64
Figure 19 : Nuage de points de la grande bâtisse après filtrage et réduction du nombre de points.....	65
Figure 20 : Maillage polygonal du site du château de Coucy construit en deux étapes par interpolation et lissage à partir du nuage de points (rendu via le logiciel Rhinoceros5).....	68
Figure 21 : Protocole d'édition semi-automatisée des surfaces NURBS.....	72
Figure 22 : Géométrie NURBS des murs du Logis comportant environ 20 000 faces.....	74
Figure 23 : Géométrie NURBS du mur du Logis et de la Salle des Preux comportant environ 50 000 faces.....	75
Figure 24 : Géométrie en voxels du mur du Logis avec des éléments de 40cm (150 430 éléments).....	77
Figure 25 : Géométrie en voxels du mur du Logis avec des éléments de 20cm (284 496 éléments).....	77
Figure 26 : Fonctionnement du script employé pour la voxellisation basée sur les points.....	79
Figure 27 : Géométrie en voxels du mur du Logis avec des éléments de 30cm et intégration de voxels complémentaires.....	79
Figure 28 : Organigramme du processus de chaîne de numérisation appliquée.....	81

Figure 29 : Extraction de sections et de contours dans le nuage de points avec les outils correspondants.....	82
Figure 30 : Sections (à gauche) et contours (à droite) après extraction verticale tous les 20cm	83
Figure 31 : Exemple de modélisation d'un mur paramétrique sur l'octogone externe.....	84
Figure 32 : Modèle géométrique hBIM de la flèche de la cathédrale (vues en perspective et vue de face)	86
Figure 33 : Modèle géométrique hBIM de la flèche de la cathédrale (vues en perspective diagonales selon les sections EE' et FF')	87
Figure 34 : Coupes dans la géométrie (sections A-A à D-D).....	88
Figure 35 : Comparaison entre le nuage de point (en couleurs) et la géométrie hBIM construite (en noir) par calcul de distance <i>cloud-to-mesh</i> . Résultats en vue de face et section selon l'axe Y	89
Figure 36 : Modèle BIM d'un chalet	91
Figure 37 : Modèle BIM de la maison du plateau.....	91
Figure 38 : Maquette numérique de la maison du plateau avec modèle énergétique activé .	94
Figure 39 : Maquette importée au format gbXML dans le logiciel Pleiades	94
Figure 40 : Liste de paramètres et composants traités pour analyse thermique.....	95
Figure 41 : Exemple de propriétés thermiques contenues dans un fichier au format gbXML	96
Figure 42 : Exemple de propriétés thermiques et coordonnées contenues dans un fichier au format IFC	97
Figure 43 : Nuage de points du local à vélos	100
Figure 44 : Paramètres d'extraction de l'algorithme RANSAC avec l'outil dédié	100
Figure 45 : Extraction de plans sur le local à vélos après application de l'algorithme RANSAC	101
Figure 46 : Nuage de points extérieur (filtré et nettoyé) de la Ferme de l'Hermitage.....	102
Figure 47 : Extraction de plans verticaux depuis le nuage de points (résultats bruts après extraction)	102
Figure 48 : Plans extraits conservés après nettoyage.....	103
Figure 49 : Géométries brutes et nuage correspondant du local à vélos importés au format .dxf dans le logiciel Rhinoceros5 (avant traitement).....	104
Figure 50 : Modèle géométrique de type BIM du local à vélos construit avec Rhinoceros5 et son extension VisualARQ.....	104
Figure 51 : Géométries brutes et nuage correspondant de la Ferme de l'Hermitage importés au format .dxf dans le logiciel Rhinoceros5 (avant traitement).....	105
Figure 52 : Modèle géométrique BIM de la Ferme de l'Hermitage construit avec Revit	105
Figure 53 : Extraction de plans semi-automatisée sur les principaux éléments structuraux de la Ferme.....	107
Figure 54 : Géométrie brute de la Ferme importée dans le logiciel Rhinoceros5 (avant traitement).....	107
Figure 55 : Maillage tétraédrique du mur du Logis (taille moyenne des mailles de 40cm)...	112
Figure 56 : Maillage tétraédrique du mur de la salle des Preux (taille moyenne des mailles de 40cm)	112
Figure 57 : Résultats sur le mur du Logis – déplacements verticaux selon l'axe Z (en mm, cas du poids propre).....	113
Figure 58 : Résultats sur le mur de la salle des preux – déplacements verticaux selon l'axe Z (en mm, cas du poids propre).....	114

Figure 59 : Contraintes de compression s_{zz} (MPa) dans le mur du Logis (cas du poids propre)	114
Figure 60 : Contraintes de compression s_{zz} (MPa) dans le mur de la salle des Preux (cas du poids propre)	115
Figure 61 : Maillage tétraédrique complet de la flèche.....	118
Figure 62 : Comparaison entre le nuage de point (en couleurs) et la géométrie du modèle aux éléments finis (en noir) par calcul de distance <i>cloud-to-mesh</i> . Résultats en vue de face et section selon l'axe Y. Distances en m	119
Figure 63 : Comparaison entre le nuage de point (en couleurs) et la géométrie du modèle aux éléments finis (en noir) par calcul de distance <i>cloud-to-mesh</i> . Résultats en section selon l'axe Z, distances en m.....	120
Figure 64 : Distribution gaussienne des distances entre le nuage de points et la surface du maillage aux éléments finis.....	120
Figure 65 : Déplacements verticaux (selon l'axe Z) sur la structure (mm) en vue Nord-Est et vue Sud-Est.....	121
Figure 66 : Déplacements verticaux (selon l'axe Z, en mm) dans les sections E-E' (à gauche) et F-F' (à droite).....	122
Figure 67 : Contraintes de compression s_{zz} (MPa) à l'intérieur de la structure (coupe et section E-E').....	123
Figure 68 : Contraintes de compression s_{zz} , (MPa) raffinée entre -0.5 et -1.4 MPa	124
Figure 69 : Evolution de la contrainte verticale s_{zz} en fonction de l'altitude des nœuds (m)	125
Figure 70 : Contraintes de compression s_{zz} (MPa) dans les sections A-A à D-D	127
Figure 71 : Contraintes de traction significatives dans la structure (coupes en perspective dans le plan XZ)	127
Figure 72 : Application des charges de vent de Nord-Ouest (direction X+) – vue de dessus	129
Figure 73 : Application des charges de vent de Nord-Ouest (direction X+) – vue en élévation	129
Figure 74 : Déplacements latéraux (en mm) dus à l'action du vent selon la direction Nord-Ouest – élévation et section	130
Figure 75 : Contraintes s_{xx} et s_{zz} (MPa) dues au vent selon la direction Nord-Ouest – détail entre -1 et 1 MPa.....	131

Glossaire et abréviations

BIM : *Building Information Model*

CAO : *Conception Assistée par Ordinateur*

DAO : *Dessin Assisté par Ordinateur*

EF : *Eléments Finis*

gbXML : *green building EXtensible Markup Language*

hBIM : *historical BIM*

IFC : *Industry Foundation Classes*

LCM : *Life Cycle Management (Gestion du Cycle de Vie)*

LoD : *Level of Detail (Niveau de Détail)*

MNT : *Modèle Numérique de Terrain*

NURBS : *B-Splines Rationnelles Non-Uniformes*

1. Introduction

Dans les domaines du bâtiment, de l'architecture et du patrimoine, les problématiques et enjeux liés aux relevés architecturaux, archéologiques ou structuraux, à la réhabilitation de l'existant ou encore à la maintenance préventive ont pris une importance grandissante au cours des dernières décennies. En effet, les données et productions issues de la construction de bâtiments peuvent être perdues pour diverses raisons au cours du temps et ne s'avèrent plus systématiquement accessibles ou existantes dans le cas du patrimoine bâti : absence ou perte des plans d'époque, bâtiments endommagés ou ruinés lors d'évènements exceptionnels (séisme, conflit, etc), reconstructions ou réaménagements successifs à diverses périodes ayant profondément modifié leur structure, etc.

Pour ces raisons, la récupération d'informations au travers des différentes techniques de numérisation existantes (*lasergrammétrie et photogrammétrie*), en complément ou remplacement des méthodes de levés topographiques traditionnels, permet de combler ces potentielles lacunes, grâce notamment aux différentes méthodologies de traitement des données, de restitution et de modélisation 2D ou géométrique 3D servant de base à d'autres études et analyses avancées.

1.1. Contexte dans la recherche : des progrès considérables pour la numérisation

La technique de numérisation par scanner laser est relativement récente, notamment comparée à l'ancienneté des méthodes de prises de vues photogrammétriques terrestres ou aériennes. En effet, depuis plusieurs années, le recours aux appareils de numérisation tels que les scanners lasers devient de plus en plus fréquent pour l'acquisition, la numérisation détaillée et la restitution de l'existant. En conséquence, les professionnels de différents secteurs (*bâtiment, archéologie, géologie*, ainsi que moult autres domaines tels que *la police scientifique, l'accidentologie routière*, etc) peuvent dorénavant employer de nouvelles techniques et méthodes de capture, restitution et analyse en 3D, en ne se limitant plus à des restitutions 2D schématisées ou par de simples plans. L'apport volumique de la 3D offre ainsi une aide indéniable à l'analyse, en mettant en évidence la spatialité et l'ensemble des éléments constitutifs d'une scène, permettant donc à l'utilisateur de développer une *vision fidèle de l'espace environnant* et donc appréhender au mieux sa restitution.

La lasergrammétrie s'est ainsi imposée comme un **outil efficace et adapté à la restitution 3D d'environnements**, en particulier dans le cas des bâtiments historiques et architecturaux, puisque ce type de bâtiments présente un intérêt tel que les solutions de modélisation 3D classiques existantes ne suffisent généralement pas à en rendre toute la complexité et la richesse. En outre, la technique d'acquisition et relevé par lasergrammétrie possède des *atouts indiscutables pour le relevé précis d'éléments structuraux ou architecturaux*, ainsi que l'acquisition rapide de zones étendues ou en conditions difficiles

(mines, carrières, grottes, etc). En quelques minutes, il est ainsi possible d'acquérir plusieurs millions de points présentant une densité élevée et une précision de l'ordre millimétrique, accélérant considérablement les relevés et périodes d'acquisition, par comparaison aux techniques traditionnelles utilisées en topographie notamment.

Les scanners lasers permettent notamment de réduire considérablement la charge de travail lors des opérations de relevé et de post-traitement. Les données numérisées peuvent être ensuite importées dans différents logiciels utilisés pour l'architecture, le génie civil, la construction, l'industrie ou les relevés topographiques, mais aussi, pour sortir du cadre, la reconstitution d'accidents ou les enquêtes médico-légales. A partir de telles informations, les calculs de distances, de surfaces et de volumes, les tâches d'analyse, d'inspection et de documentation peuvent ainsi être effectués rapidement, avec une précision et des paramètres de fiabilité de très bon niveau. La récupération d'informations par lasergrammétrie et photogrammétrie permet maintenant d'envisager de nouvelles applications, grâce à l'acquisition en temps réel de millions de points pour des distances et des portées pouvant être très étendues, de l'ordre du mètre à plusieurs centaines de mètres. Cependant, ces avantages évidents peuvent en contrepartie nécessiter une phase d'assemblage et de post-traitement exigeante, en raison de la grande quantité de données issues de scans ou de photographies en très haute résolution, et donc des volumes à traiter.

Conséquence logique de ces nouvelles avancées techniques et technologiques, de nombreux **algorithmes, méthodologies et logiciels dédiés au traitement des données issues de la photogrammétrie et de la lasergrammétrie** occupent dorénavant une place prépondérante dans le monde professionnel et scientifique. Ainsi, quel que soit le projet et la méthode d'acquisition envisagée, des étapes de traitement, nettoyage, assemblage des données, génération de nuages de points et transfert des modèles permettent de gérer la finalité et les différents rendus envisagés. En premier lieu, les données telles que les nuages de points s'avèrent particulièrement utiles pour la réalisation de géométries 3D détaillées et documentées. C'est notamment le cas des modèles dédiés aux restitutions historiques, aux analyses structurales ou encore le cas des maquettes numériques de bâtiments.

1.2. Modélisation géométrique, BIM et maquette numérique : une implantation rapide et importante

La **maquette numérique du bâtiment** constitue un outil nouveau et en plein essor dans les secteurs de la construction, la réhabilitation, la rénovation, la restitution historique ou architecturale, etc. Ce type de modèle particulier, davantage détaillé que les modèles construits à l'aide d'outils et logiciels de dessin et modélisation traditionnels, centralise toutes les informations relatives à la construction et à la modélisation, facilitant de cette façon la communication entre les acteurs impliqués : aide à l'évaluation des coûts, transfert pour des simulations physiques, restitutions virtuelles sous forme de rendus en haute qualité (voire photoréalistes), réalisation de visites virtuelles, aide au suivi de travaux lors des phases de chantier, etc.

Dès lors, si les maquettes numériques de bâtiments sont désormais conçues et utilisées dans la plupart des chantiers de bâtiments nouveaux, celles-ci sont quasi-inexistantes en

revanche pour la très grande majorité des bâtiments déjà construits, tout particulièrement dans le cas des constructions les plus anciennes, et bien évidemment concernant les bâtiments remarquables tels que les édifices religieux. Or, en raison du vieillissement du parc immobilier et le développement du marché de la rénovation, la maquette numérique constitue maintenant une aide considérable pour des bâtiments anciens, essentiellement lorsque les plans et informations relatives à la construction ont été perdues ou ne sont plus que partielles. C'est pourquoi des techniques de reconstruction et modélisation ont été développées ces dernières années, à base de mesures et données issues de la lasergrammétrie ou de la photogrammétrie. Cependant, la plupart des approches proposées jusqu'à présent se focalisent plutôt **sur l'identification de plans, l'extraction et la segmentation d'éléments géométriques spécifiques, la reconstruction de surfaces**, sans nécessairement produire de modèles géométriques complets ou de maquettes numériques exploitables directement par la suite.

L'ensemble des étapes abordées dans les diverses méthodologies permet ainsi de se focaliser sur des travaux d'ordre automatique ou semi-automatique, en limitant au maximum les phases de traitement manuels requérant un utilisateur expérimenté. En conséquence, de nombreuses possibilités existent dorénavant en fonction des besoins, des circonstances et des modes de restitution ou de production envisagés.

Tous ces nouveaux outils, sous forme de matériels, d'algorithmes et de logiciels spécifiquement développés et implantés pour ces nouveaux usages, permettent, dès lors, l'amélioration significative des phases de numérisation, les processus de traitement des données, la génération de nuages de points, la modélisation géométrique, ainsi que les études avancées (*analyse structurales, études thermiques, études architecturales, etc*) effectuées à partir des modèles ainsi construits. L'enjeu pour ces outils dédiés est donc de permettre la simplification de l'acquisition, l'aide à l'extraction de données et la modélisation, ainsi que la synthèse et la compréhension des connaissances du passé et du présent. Les enjeux sont conséquents pour l'ensemble des acteurs du secteur, et doivent permettre de correctement prévoir et optimiser les opérations futures à entreprendre pour la restauration et la gestion du patrimoine bâti.

L'utilisation des nuages de points générés par ces techniques de relevés est ainsi très utile pour procéder à la **reconstruction de plans 2D ou de modèles 3D**, et améliorer de façon sensible la reconstruction et les comparaisons de modèles. La thématique de la **fusion de données hétérogènes** est également un aspect rendu possible en combinant des données issues de scans laser et de photographies, et constitue un des points émergents dans le secteur du bâti. Rappelons également que la plupart de ces applications et principes tirent leurs origines de l'industrie et de procédés déjà utilisés et éprouvés dans ce milieu.

Or, grâce à l'émergence de nouveaux outils et algorithmes de traitement et aide à la modélisation la construction de modèles 3D paramétriques contenant différentes informations sémantiques (*murs, ouvertures, poteaux, poutres, planchers, fondations, etc*) décrivant ainsi les propriétés et éléments constitutifs des structures, devient grandement facilitée. De tels modèles restaient auparavant longs et fastidieux à construire et exploiter dans le cas des bâtiments historiques, en raison notamment de leur très grande complexité géométrique ainsi que l'intégration correcte des paramètres géométriques de ces modèles dans les logiciels d'analyse structurale ou thermique, par exemple. C'est beaucoup moins le cas maintenant, grâce aux progrès effectués et mentionnés précédemment.

Les enjeux sont donc posés : comment peut-on gérer la difficulté de numérisation et de modélisation de bâtiments pouvant s'avérer très complexes et proposer des représentations se montrant fidèles à la fois sur les plans historiques, architecturaux et structuraux, tout en comportant de nouvelles informations sur les structures, les matériaux, etc ? Parmi les réponses possibles à une telle problématique, les nuages de points constituent dorénavant une source essentielle et indispensable de données utiles pour la modélisation et les études qui en découlent.

1.3. Méthodes et processus de modélisation géométrique et paramétrique : adaptation selon les contextes et besoins

A partir des nuages de points, différentes méthodes de modélisation, de type *manuelle*, *automatisée* ou *semi-automatisée*, sont dorénavant appliquées dans le cadre du bâti :

- a. la **modélisation géométrique**, basée sur des surfaces et/ou des volumes, dont le but est de détecter et reconstituer les arêtes, les surfaces et les volumes élémentaires (cf figure 1);

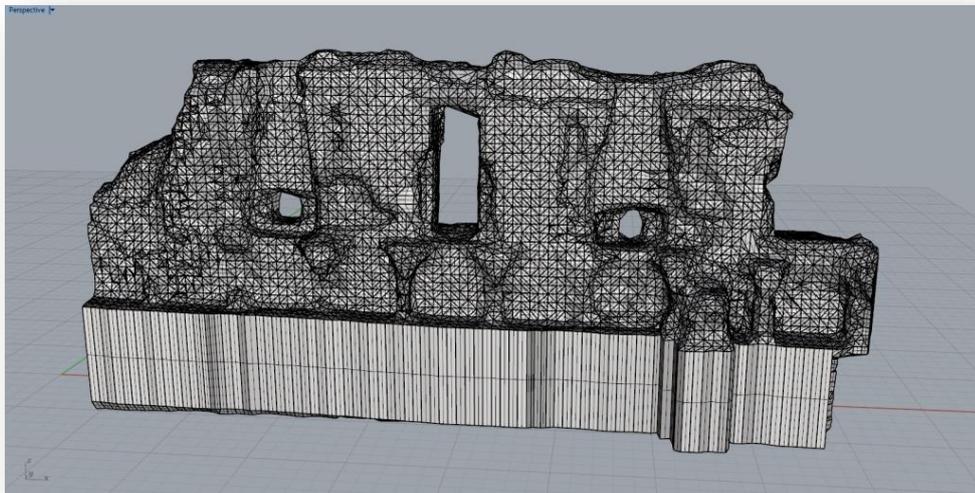


Figure 1 : Modélisation géométrique par surfaces NURBS d'un mur du château de Coucy (02)

- b. la **modélisation paramétrique de type BIM/hBIM**, où sont intégrés, en plus d'informations géométriques, des composants spécifiques comportant des informations paramétriques sur leur type et leur fonction (murs, planchers, ouvertures...), et enrichissant ainsi les données complémentaires intégrées en complément des géométries. L'ensemble des informations relatives aux géométries sont répertoriées à partir d'une base de données existante pour créer un modèle contenant des informations plus complètes que des descriptions géométriques (cf figure 2) ;

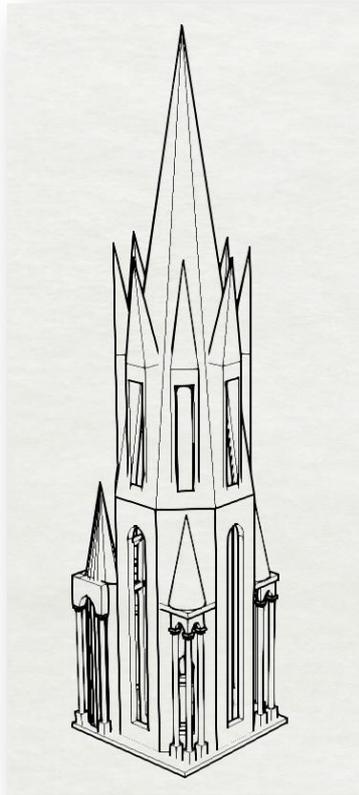


Figure 2 : Modélisation paramétrique orientée BIM de la flèche de la cathédrale de Senlis (60)

- c. la **modélisation géométrique par voxels**, qui reste moins utilisée mais qui présente un potentiel intéressant dans certains cas (restitution, modélisation selon différentes échelles ou niveaux de détails, études structurales, etc), comme illustré par la figure 3.



Figure 3 : Modélisation géométrique en voxels d'un mur du château de Coucy

Par ailleurs, les techniques informatiques actuelles ont permis, depuis plusieurs années, le développement **d'outils émergents d'aide à la décision pour les démarches de modélisation de type Building Information Model (BIM)**, à destination à la fois des maîtres d'ouvrage, des maîtres d'œuvre, des gestionnaires du patrimoine, mais aussi bien évidemment pour l'ensemble des acteurs du secteur de la construction. Le *Building Information Model (BIM)*, soit *Maquette Numérique du Bâtiment (MNB)*, est un concept numérique représentant tout type de bâtiment, quel qu'il soit. Le principe consiste donc à concentrer un maximum d'informations sur le bâtiment à l'intérieur d'un unique document, allant des composants formant la structure (*fondations, poutres, murs...*) jusqu'aux réseaux (*électriques, canalisations, etc*).

Le but de ces démarches vise à améliorer de façon significative l'organisation et le suivi des différentes étapes d'un projet, depuis la programmation jusqu'aux opérations de construction, d'entretien et maintenance, mais concerne également l'ensemble des études et opérations de restauration du patrimoine bâti, qui tendent à occuper une place prépondérante.

Ce processus désigne de fait l'ensemble des technologies et des processus mis en place et utilisés pour produire, communiquer et analyser des modèles de construction concentrés autour d'une représentation en 3D. Le terme *bâtiment* reste dans ce cas générique et recoupe aussi bien les constructions modernes, le patrimoine bâti (dans ce cas, le terme de hBIM pour *Historical BIM* se trouve employé), voire les infrastructures urbaines. Le BIM représente ainsi le partage d'informations fiables tout au long de la durée de vie d'un bâtiment ou d'une infrastructure, de sa conception jusqu'à sa démolition ou déconstruction. La maquette numérique, quant à elle, consiste en une représentation digitale des caractéristiques sémantiques, physiques et fonctionnelles de ce bâtiment ou de ces infrastructures. Le BIM comprend ainsi toute une suite de processus ou méthodes utilisés tout au long de la conception, de la construction et de l'utilisation d'un bâtiment. Autrement dit, le BIM permet de définir à tout moment qui fait quoi, comment, et à quelle étape du processus. La maquette numérique structurée permet une collaboration entre tous les intervenants d'un projet, soit par des échanges de données, soit en permettant une intervention sur un seul et même modèle.

En effet, **toute la maquette 3D et ses informations sont contenues dans un seul fichier**, lequel comprend toute l'information technique nécessaire à sa construction, les propriétés des composants, les programmes visant à son entretien et ses préconisations de maintenance, ainsi que d'éventuelles informations pour des modifications ou agrandissements ultérieurs, et enfin sa déconstruction.

De plus, le terme BIM désigne également tout l'aspect logiciel, parce que sa base repose sur une série de logiciels permettant la conception technique et architecturale, le suivi de construction, les informations historiques et patrimoniales, les agencements et étapes de planification, etc. A l'heure actuelle, **les démarches numériques complètes et intégrées à différentes solutions logicielles et programmes dédiés restent moins accessibles et nécessitent des connaissances spécifiques et avancées des utilisateurs**, nécessitant donc le recours à différents logiciels et matériels selon les étapes, le type de projet, les contraintes de la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre, et ainsi de suite, en coordonnant le tout.

Cependant, il faut bien comprendre que le BIM vise entre autres à faciliter la faisabilité de projets de bâtiments, puisqu'il permet ainsi une conception de meilleure qualité et la détection des problèmes avant la mise en chantier. De plus, grâce à la maquette numérique qui doit être mise à jour constamment, les coûts de construction sont bien mieux gérés et permettent d'éviter une explosion non maîtrisée de l'enveloppe budgétaire. A ce titre, le BIM est en train de s'imposer progressivement sur les différents marchés en devenant une composante obligatoire dorénavant dans les appels d'offres de marchés publics, mais il ne vise pas à remplacer directement la conception architecturale, environnementale, économique et urbaine dans des phases en amont des projets (ce que l'on appelle les phases d'avant-projet et de programmation). Il est évident qu'avec le développement rapide de la maquette numérique, des visites virtuelles, voire même de la réalité virtuelle, communiquer autour d'un projet de construction neuve, de rénovation, de reconstruction de ruines historiques, etc, devient de plus en plus aisé vis-à-vis du grand public, en étant à même de proposer une visualisation en 3D complète avant même d'entreprendre des travaux (cf figure 4).



Figure 4 : Maquette numérique architecturale du centre Blaise Pascal de l'UTC

Par ailleurs, le BIM est fortement associé au concept de *Building Lifecycle Management* (BLM), puisqu'il comporte nécessairement dans ses données associées l'intégralité des étapes liées au cycle de vie du bâtiment, allant de la construction (dans le cas d'un bâtiment neuf) jusqu'à la déconstruction/réhabilitation lourde (en cas de changement d'usage). C'est d'ailleurs pour ces raisons que le BIM puise ses origines de l'industrie, puisque les différentes méthodes et techniques de conception, numérisation, modélisation, sans oublier les principes de rétro-ingénierie dans le cas de bâtiments historiques, sont employées et adaptées selon le contexte et les besoins de la maîtrise d'ouvrage.

Cependant, un problème persiste néanmoins : si, dans le cas des nouveaux bâtiments, l'utilisation du BIM peut se faire depuis la phase de conception jusqu'à la construction et l'exploitation, la grande majorité des bâtiments existants, et tout particulièrement les monuments historiques et édifices remarquables, ne disposent pas d'une maquette numérique, et les seules données disponibles restent alors les éventuels plans de construction et le bâtiment en lui-même. La construction d'une maquette à partir de l'existant

se repose donc exclusivement sur des acquisitions et numérisation à partir de l'existant, le traitement des données et la modélisation par rétro-ingénierie directement à partir des informations récupérés sur le terrain, le tout permettant d'aboutir à des modèles géométriques de type hBIM, en y intégrant toutes les informations disponibles.

Dès lors, parmi les objectifs identifiés et à étudier pour la réalisation de ces travaux de thèse, l'un des principaux enjeux consiste à développer, analyser et mettre au point une chaîne de traitements numériques permettant d'exploiter de façon la plus efficace, la plus rapide possible et de façon semi-automatisée des nuages de points de bâtiments de toutes époques et de tout type (bâtiments modernes, historiques, ruines). Le but est donc de proposer différents types de processus permettant d'aboutir à des modélisations géométriques 3D plus ou moins détaillées servant de base pour la simulation (restitutions architecturales détaillées en réalité augmentée, visites virtuelles, études structurales, analyse thermique, aide à la compréhension historique et archéologique, etc).

En conséquence, les travaux présentés dans le cadre de cette thèse se focalisent sur les apports et contributions apportées par les techniques d'acquisition et numérisation émergentes (par exemple concernant les matériels et techniques utilisés tels que la photogrammétrie et la lasergrammétrie), ainsi qu'une contribution liée à *l'utilisation des différentes solutions et passerelles logicielles existantes et en développement*, car nombre de ces logiciels accompagnent de façon logique le développement de ces nouvelles techniques, afin de permettre une utilisation par de nombreux acteurs du secteur. Une contribution à une meilleure compréhension, exploitation et des différentes possibilités est donc proposée dans les présents travaux, ainsi que l'analyse des axes de développement informatique et algorithmique en cours et à venir.

1.4. Organisation et structuration des travaux de thèse

Dès lors, afin de répondre à l'ensemble des problématiques énoncées et apporter une contribution s'étalant sur plusieurs aspects et points d'intérêt, ce manuscrit est décomposé en **cinq grandes parties** formant **un fil conducteur explicite** entre les étapes du **processus de chaîne de numérisation et d'exploitation** mis en place au cours de ces trois années de travaux et de réflexion.

Un état de l'art comportant une **analyse bibliographique détaillée** de la situation actuelle est présenté en premier lieu. En effet, de nombreuses publications, réparties en différentes catégories et secteurs, permettent dorénavant de correctement appréhender les enjeux et perspectives auxquelles on se retrouve confronté (articles de type *review*, techniques et outils pour l'acquisition et la numérisation, traitements des données issues des numérisations et algorithmes exploités, utilisation des nuages de points pour de nouvelles méthodes de reconstruction, et enfin les articles dédiés à des analyses de modèles géométriques et physiques: études structurales aux éléments finis à partir de modèles géométriques/paramétriques, constitution de carnets de santé, planification d'opérations de maintenance préventive ou de restauration, ainsi que l'analyse thermique du bâti pour la rénovation et l'intégration de données thermiques dans les modèles géométriques de types BIM).

Une seconde partie aborde les **techniques de numérisation et les traitements nécessaires des données** pour leur exploitation avancée. Sont ainsi principalement abordés les techniques d'acquisition et numérisation par lasergrammétrie et photogrammétrie, les enjeux de l'assemblage de données hétérogènes (échelle des nuages de points issus de la photogrammétrie, fusion de nuages de points, intégration d'informations historiques), de même que les problématiques à traiter concernant le traitement et l'exploitation des nuages de points (nettoyage des nuages de points, sensibilité des options pour les opérations de filtrage et post-traitement, gestion des occlusions et des régions manquantes pour les phases de modélisation géométrique...). L'ensemble des travaux se base donc sur un large panel d'outils et solutions logicielles dédiés pour les différentes phases de numérisation, de traitement des scans et des photographies, les opérations de filtrage et nettoyage sur les nuages de points pour optimisation et utilisation ultérieure, et bien évidemment l'utilisation avancée des nuages de points pour la modélisation 3D géométrique via le recours à différentes méthodologies.

Les **contributions proposés pour les différentes méthodes de modélisation géométriques et paramétriques à partir des nuages de points**, employées et mises en application durant ces travaux, sont ensuite abordées en troisième partie, tout d'abord au travers d'une approche surfacique (maillages surfaciques de type TIN et modèles surfaciques de type NURBS) ; puis par la construction de modèles géométriques de type volumique et paramétriques orientés BIM. En complément, la modélisation typée voxels par conversion à partir des nuages de points via différentes méthodes a également fait l'objet d'investigations pour juger de sa pertinence dans certaines situations spécifiques. La mise en application de ces méthodes de modélisation est systématiquement illustrée par différentes cas d'étude, dont l'ensemble des travaux relatifs ont été effectués dans le cadre de cette thèse, afin de démontrer l'intérêt et la pertinence de ces méthodes en fonction du contexte, des besoins et des études envisagées : le site du château de Coucy (Aisne), la flèche de la cathédrale de Senlis (Oise) et le site de l'Hermitage (Oise).

Enfin, dans le but de compléter le processus de démarche numérique et de chaîne de numérisation développé au cours de cette thèse, les aspects liés au **transfert des modèles géométriques et paramétriques vers des logiciels de simulations permettant des analyses structurales ou thermiques, pour l'analyse de l'existant et la maintenance préventive**, ainsi que les résultats et conclusions en découlant sont présentés. La prise en compte d'éléments spécifiques issus des résultats peut, par exemple, permettre un retour d'informations vers les modèles de type BIM, et par conséquent des améliorations pour l'optimisation et la meilleure gestion des maquettes numériques, le tout dans une optique de maintenance préventive et d'optimisation des solutions techniques envisagées.

Au travers de l'ensemble de ces travaux, l'objectif principal consiste à **valider la pertinence de la construction et de l'utilisation de modèles 3D géométriques ou paramétriques orientés BIM ou hBIM pour des applications concrètes** telles que des études structurales dans le cas de bâtiments historiques ainsi que la planification potentielle de travaux de restauration, rénovation énergétique et réhabilitation. Des travaux d'exploitation complémentaires des données et des nuages de points, telles que les méthodes de détection, segmentation et extraction d'entités géométriques ont également été mis en place et intégrés dans les processus de traitement des données, modélisation et exploitation, afin d'améliorer et mieux comprendre les contraintes et enjeux des différentes configurations et

conditions liées aux cas d'études et aux contraintes spécifiques propres aux types de construction.

2. Etat de l'art et analyse bibliographique : un domaine aux nombreux angles d'approche et potentialités

La modélisation de bâtiments, structures et environnements n'est pas chose récente. Depuis l'émergence des premiers logiciels de *Dessins Assisté par Ordinateur* (DAO), **les techniques, outils et méthodes de dessin et modélisation n'ont eu de cesse d'évoluer**, permettant par exemple l'incorporation progressive de nouvelles fonctionnalités, l'amélioration des méthodes de modélisation et des rendus, l'apparition des possibilités d'interopérabilité des formats, l'utilisation et l'insertion de nuages de points pour la modélisation, etc.

Dès lors, dans la littérature, et ce de façon logique, **l'ensemble des aspects** (*numérisation, traitement des données, génération de nuages de points, procédures de filtrage, nettoyage, segmentation, détection d'éléments, modélisation, transfert de modèles, études structurales statiques ou dynamiques, etc*), **sont abordés et présentés au travers de nombreux processus et cas d'étude concrets**. Par ailleurs, les différents processus et méthodologies partielles ou complètes, dédiés à la numérisation de bâtiments et structures (modernes ou historiques), la modélisation géométrique et l'exploitation physique pour des analyses numériques structurales ou thermiques sont en pleine recrudescence depuis ces dernières années. Les raisons sont notamment les avancées technologiques significatives dans les domaines de la lasergrammétrie et de la photogrammétrie, à la fois sur les plans matériels (meilleure qualité et résolution des numérisations, amélioration des formats d'images, baisse significative des coûts matériels, etc) et logiciels (algorithmes de traitement correctement implantés et bien plus efficaces dans les logiciels, hausse significative des capacités de traitement des ordinateurs, de la puissance des processeurs physiques et graphiques, etc). En conséquence, plusieurs catégories et types de démarches peuvent être répertoriées en fonction du type de travaux et études menés. Il s'agit de cette façon des différents points abordés dans cette analyse (souhaitée suffisamment exhaustive) des principales thématiques et des avancements significatifs proposés et réalisés au cours des dernières années.

2.1. Articles de type review : perspectives et enjeux liés aux numérisations et modélisations de type BIM

En premier lieu, Hichri et al. [1] présentent une revue générale de l'état actuel du secteur du BIM et de ses différentes composantes, structurée en 3 grandes parties : méthodes d'acquisition (topographie, photogrammétrie, lasergrammétrie), méthodes de traitement des

nuages de points (automatiques, manuelles ou semi-automatiques), et méthodes de modélisation 3D et de création de modèle BIM. Cependant, dans le cadre du patrimoine historique, certains aspects s'avèrent plus difficiles à traiter (notamment la modélisation géométrique et le traitement automatisé des données), en particulier à cause du fait qu'il n'existe toujours pas, à l'heure actuelle, de logiciel unique permettant le traitement de l'intégralité des données.

Volk et al. expliquent [2] que les articles traitant du BIM pour la construction neuve sont fréquents, de même que les techniques qui y sont consacrées, tandis que beaucoup moins d'articles abordent le cas du patrimoine historique et architectural, et, de la même façon, le développement des techniques de modélisation et traitement des données les concernant est bien moins important. Les articles abordant des méthodes de traitement des données se concentrent principalement sur des méthodes manuelles ou semi-automatisées, et abordent moins les méthodes automatisées complètes. Les auteurs expliquent également que les articles traitent généralement de la construction, de la modélisation, mais beaucoup moins de la gestion de la documentation, de la maintenance et du suivi ultérieur, y compris dans le cas des constructions neuves.

Ding et al [3] proposent une revue des procédés du BIM, focalisée sur l'élaboration d'une trame concernant les secteurs de la qualité, la sécurité et la gestion environnementale des projets. Un des constats est que la majorité des articles traitent essentiellement de la conception et du design, et beaucoup moins des aspects constructifs et de gestion ultérieure. C'est sur ce dernier point que les auteurs expliquent qu'il existe encore à l'heure actuelle, un fossé à combler concernant la qualité, la sécurité et l'environnement, en particulier parce que ces secteurs sont plus difficiles à évaluer, mais, selon les auteurs, ces aspects doivent maintenant être pris en compte de façon sérieuse afin de pouvoir disposer d'un BIM vraiment complet, et surtout qui puisse être mis à jour au cours du cycle de vie d'un ouvrage quel qu'il soit. Les auteurs veulent parvenir à un modèle 4D, comportant ainsi l'ensemble des informations issues du modèle 3D, plus les composantes de planification et gestion à long terme, cela dans le but de conserver une qualité de gestion et d'informations sur toute la durée de vie de l'ouvrage. Certains outils pourront ainsi être ajoutés, comme les évaluations en temps réel des méthodes de construction, des émissions de carbone, et leur ajustement en cas de problème, afin de pouvoir proposer des alternatives le cas échéant.

Miettinen et Paavola [4] présentent une analyse de l'émergence du BIM et de son intégration progressive dans le secteur de la construction. Les auteurs soulèvent ainsi quelques problématiques que son adoption peut engendrer : problèmes d'implémentation, d'installation, de coûts logiciels et matériels pour certains, problèmes informatiques, la nécessaire implication de l'ensemble des acteurs concernés ainsi que les besoins en formation et réorganisation des services et activités, etc. De plus, les auteurs présentent trois principales évolutions que le BIM engendre : le fait que ce soit un processus expansif, comportant et comprenant de multiples acteurs et logiciels, les multiples solutions que l'émergence des modèles numériques permettent, notamment concernant les combinaisons matériels/logiciels utilisés, et le besoin de conserver et développer les formats de standardisation (IFC) afin d'éviter les formats propriétaires trop restrictifs, pouvant restreindre l'innovation, et enfin le rôle que devront jouer l'ensemble des acteurs, aussi bien pour leur formation que pour leur expérimentation des processus et l'amélioration continue des applications, dans l'optique d'une adoption universelle du BIM.

Dans un article traitant de l'importance du BIM dans l'industrie, Farr et al [5] développent le concept qu'ils appellent la « personnalisation de masse ». Il est rappelé le retard pris par l'industrie du bâtiment dans les secteurs de la fabrication en série et de la préfabrication concernant les aspects évolutifs et personnalisables des éléments décoratifs (exemple des fenêtres pris par les auteurs). En proposant cet article, les auteurs veulent aider à faire évoluer cet aspect du BIM, qui apporte des possibilités très importantes pour l'avenir du secteur, dont notamment l'amélioration de la gestion de projet, la communication, la gestion des plannings, la limitation des coûts, etc.

Chen et al. [6] se focalisent sur une analyse des publications consacrées aux liens entre le BIM et les aspects physiques réels, et pas seulement de la création d'un modèle « déconnecté de la réalité ». Soixante-quinze publications écrites au cours des dix dernières années ont été analysées. De la même façon que pour des articles précédents, la grande majorité des publications étudiées sont plus focalisées sur la création des modèles BIM pour la construction, et le traitement des données acquises en fonction des appareils de mesure. Comme le remarquent les auteurs, très peu de publications se sont penchées sur le cas de l'intégration des modèles virtuels (que ce soit le modèle 3D simple ou le BIM complet) aux données réelles, comme par exemple le suivi des étapes de construction, d'entretien et de maintenance, tout au long du cycle de vie du projet. Ainsi, tel que le présentent les auteurs, il manque encore des études concernant l'interopérabilité et les protocoles d'échanges entre les différents logiciels dédiés au BIM, à cause notamment des formats propriétaires spécifiques à chacun, et les procédés et techniques d'acquisition utilisés, qui peuvent engendrer des traitements de données différents et donc une absence de passerelle permettant d'établir des liens directs entre tous les acteurs du projet. Les auteurs proposent, suite à leurs études, une structure conceptuelle permettant de faire le lien entre le BIM et le bâtiment réel. Cette structure repose sur 3 couches : la couche physique (comprenant toutes les activités d'acquisition, traitement, conception, construction, etc), la base de données (rassemblant toutes les informations collectées), et la couche BIM, qui contient le modèle développé, et donc toutes les informations nécessaires à la prise de décision). Les auteurs concluent à juste titre sur le fait que cet aspect structural est encore en plein développement, et que les études futures doivent donc se concentrer sur cet aspect, afin de renforcer l'intérêt et l'utilité du BIM.

Wong et Zhou [7] présentent quant à eux un article de revue sur le BIM, abordant cette fois-ci l'aspect environnemental, la gestion énergétique et les concepts du développement durable pour la conception, la construction, la gestion et l'entretien des bâtiments. Les auteurs proposent une revue de quatre-vingt-quatre articles publiés sur le sujet, et constatent que dans ce domaine, les articles se focalisent essentiellement sur la conception et la construction, mais ont tendance à négliger les aspects ultérieurs, dont la déconstruction et le recyclage, qui font pourtant partie des phases du cycle de vie d'un bâtiment. Le « *BIM vert* » est une notion en pleine expansion, apparue au cours des dernières années, et intégrant donc en plus les notions de gestion des ressources, d'efficacité énergétique, d'optimisation des consommations et utilisations, etc. Cependant, comme l'expliquent les auteurs, le BIM vert n'en est qu'à ses débuts, puisque beaucoup de travaux de recherches doivent encore être menés, aussi bien par les universités que les entreprises, afin d'aider à développer de nouveaux outils efficaces et son intégration complète dans l'ensemble des processus déjà mis en place. Des pistes de travail sont données par les auteurs afin d'aider à cibler les enjeux ultérieurs : intégrer les notions de 3R au BIM (réduction, réutilisation, recyclage),

mieux documenter et prendre en compte les phases d'utilisation du bâtiment, et l'ensemble du cycle post-construction, améliorer les outils de BIM pour aider aux certifications et labels d'écoconstruction, améliorer la compatibilité et l'interopérabilité des outils et logiciels BIM, ainsi que l'accès aux utilisateurs, et enfin mener des recherches conjointes de la part des universités et entreprises.

Enfin, en ce qui concerne les techniques et méthodes actuellement utilisées en levés, Patraucean et al [8] effectuent une revue présentant les différentes méthodes existantes pour la génération de modèles «*tels que construits*», obtenus à partir de scans de bâtiments existants, ainsi que les principaux travaux de recherche dans ce domaine. Les auteurs soulignent le problème du besoin de précision des données durant les acquisitions et les phases de traitement, ainsi que les limitations de ces modèles dues au fait qu'ils ne pourront pas être aussi précis (au moins sur le plan sémantique) que les modèles «*tels que conçus*», créés en phase de conception. Une comparaison est menée entre les différences existant entre la modélisation avec ou sans modèle BIM «*tel que conçu*». Pour ce qui concerne la représentation sans BIM «*tel que conçu*», les auteurs considèrent qu'il est encourageant que beaucoup de travaux permettent d'obtenir des résultats assez précis, mais qu'il manque encore un chaînon (la modélisation des matériaux) pour compléter toutes les procédures. En revanche, concernant la modélisation avec un modèle BIM, les auteurs reviennent sur une méthode qui est fréquemment utilisée et qui a fait ses preuves : l'emploi de l'algorithme ICP (Iterative Closest Points) pour l'alignement et la corrélation des nuages de points. Enfin, les auteurs abordent aussi la modélisation de composants spécifiques, à savoir les réseaux, avec les techniques d'acquisition et de reconnaissance existantes.

En conséquence, les enjeux liés à la numérisation, à l'exploitation des données pour la construction de modèles 3D ainsi que le potentiel lié à la restitution et la présentation de tels modèles permettent donc de mettre clairement en évidence les nouveaux enjeux apportés par l'ensemble des méthodes employées dorénavant.

2.2. Techniques et outils pour l'acquisition, la numérisation et leur intérêt pour la restitution et la modélisation géométrique

La **numérisation complète et détaillée** d'un édifice remarquable ou d'un site historique doit permettre de répondre à des **objectifs précis** : inventaire, travaux de restauration, réalisation et suivi de fouilles archéologiques, restitution au grand public d'un site à l'aide d'une maquette numérique ou sous forme de visite virtuelle, etc. Les besoins peuvent ainsi être définis par le contenu envisagé, la résolution des rendus et des modèles, la précision souhaitée, et d'autres paramètres plus spécifiques et dépendants principalement du contexte propre à chaque cas.

Dans un premier temps, les principaux aspects de la photogrammétrie et de la lasergrammétrie appliqués à un édifice remarquable, ainsi que les différentes étapes nécessaires à l'établissement du carnet de santé numérique d'un monument (en

l'occurrence, le château de Chambord) sont abordés et mis à contribution par Brunetaud et al [9]. L'une des problématiques soulevée par les auteurs concerne d'ailleurs pour le stockage en ligne et le référencement des données issues des modélisations. En complément, et dans un cadre d'application plus pratique, Brunetaud et al [10] présentent plus en détails les mêmes méthodes de lasergrammétrie et photogrammétrie appliquées à la constitution du carnet de santé numérique de ce même château. Les deux méthodes d'acquisition ont été appliquées et le traitement des données effectué dans chaque cas. Les auteurs montrent de cette façon que la photogrammétrie s'avère plus accessible, grâce à des coûts logiciels et matériels moindres, mais le temps de construction des modèles s'avère plus long et reste dépendant du volume de données à traiter. A l'inverse, la lasergrammétrie est plus coûteuse, mais les temps de traitement des données et de construction des nuages de points s'avèrent plus rapides, permettant ainsi de visualiser l'information plus rapidement. Un mix des deux méthodes est par ailleurs présenté comme un très bon compromis, afin de récupérer différents niveaux d'informations et de détails (comme l'application de textures) et donc pouvoir compléter au mieux les modèles obtenus.

Fassi et al [11] présentent les différentes étapes de la modélisation 3D de la flèche de la cathédrale de Milan, et les contraintes rencontrées lors des phases d'acquisition par scanning laser et photogrammétrie : étroitesse de l'édifice, difficultés d'accès en raison de travaux et d'échafaudages, problèmes de réflexion causé par le marbre des constructions (réfléchissant). L'objectif initial des travaux effectués consistait à réaliser un modèle 3D complet, comportant toutes les informations architecturales et structurales, mais qui soit suffisamment simple pour pouvoir être exploité par d'autres corps de métiers ultérieurement (études structurales, planification de travaux de restauration...) L'ensemble de la flèche a été modélisé par scanning laser pour les volumes généraux, mais pour les parties difficiles d'accès ou masquées, des acquisitions photos ont été nécessaires, d'où une longueur des travaux menés, afin de fusionner les différents procédés pour obtenir un modèle complet le plus précis possible. La modélisation de la structure s'est effectuée en la découpant en différentes parties et sous-parties, de façon à pouvoir modéliser de façon plus ou moins détaillée les éléments souhaités, en fonction de leur complexité et des données fournies par les nuages de points. L'ensemble des modélisations s'est effectuée par représentations surfaciques de type NURBS, avec cependant des modèles fins et très détaillés, ce qui a d'ailleurs posé aux auteurs des problèmes de lourdeur lors des assemblages des différentes parties. De plus, afin de vérifier la cohérence et le respect des dimensions du modèle 3D, les auteurs ont effectué des comparaisons avec les nuages de points afin de vérifier les tolérances et améliorations apportées par le modèle 3D, notamment dans les zones endommagées ou peu précises à cause des conditions particulières rencontrées lors des phases d'acquisition.

Barki et al [12] abordent les avantages et inconvénients des méthodes de lasergrammétrie et photogrammétrie, utilisées aussi bien dans le cadre de la préservation du patrimoine bâti que pour les constructions neuves et les autres secteurs d'application. Les auteurs insistent naturellement sur les grandes évolutions rapides qu'a connues le domaine de l'acquisition 3D dans le cadre des démarches de BIM et de l'émergence des processus de *Life Cycle Management* (LCM), très importantes dans les démarches d'études préalables, conception, construction, conservation, référencement, aide au respect des normes, etc. On retrouve ensuite les mêmes arguments en faveur des deux techniques, et leurs inconvénients respectifs (rapidité d'exécution, coûts en matériel et logiciel, formation à l'utilisation, temps

de traitement, etc), et là aussi, les auteurs parviennent à la conclusion que la lasergrammétrie est dans l'ensemble la méthode la plus efficace et la plus fiable, bien que la combinaison avec la photogrammétrie reste l'une des meilleures options dans le cadre du patrimoine bâti.

Marko Pejic [13] présente une méthodologie pour l'optimisation d'enregistrement et d'acquisition par scanner laser dans le cas de tunnels ferroviaires. L'auteur explique que l'utilisation des scanners lasers terrestres fixes est maintenant un procédé efficace pour acquérir, modéliser et analyser la structure de tunnels, mais que la précision, la qualité et la pertinence des modèles obtenus peuvent encore varier de façon significative selon le modèle d'appareil utilisé, ses paramètres d'acquisition, les caractéristiques de l'édifice étudié, les conditions atmosphériques, etc. En conséquence, outre une revue générale des différentes méthodes disponibles et des paramètres les plus importants à considérer selon le matériel utilisé, les références, les caractéristiques du tunnel, l'auteur présente des résultats expérimentaux obtenus sur douze tunnels d'une ligne ferroviaire au Monténégro. Ses conclusions sont notamment que la distance maximale, les intervalles entre stations et les angles maximaux d'incidence doivent toujours être optimisés afin de garantir une continuité et une homogénéité du nuage de points, et donc une limitation des erreurs résiduelles pouvant entraîner des décalages dans le géo-référencement. Cependant, l'auteur insiste également sur le fait que chaque modèle de scanner laser, à cause de ses caractéristiques spécifiques, doit systématiquement être adapté aux besoins des acquisitions, et que les évolutions matérielles et logicielles ne pourront qu'améliorer les manipulations et exploitations des données.

Riveiro et al [14] présentent quant à eux l'utilisation conjointe de la lasergrammétrie et de la photogrammétrie dans le but d'effectuer l'acquisition et l'étude structurale d'un pont en béton précontraint, pour étudier le gabarit, la géométrie et le comportement sous chargement des poutres. Les auteurs rappellent que l'acquisition par photogrammétrie reste encore sensible aux conditions climatiques, mais que, dans le cas d'acquisitions simples, il est plus rentable de l'utiliser, en raison des différences de coûts encore significatives par rapport aux scanners laser. Mais dans l'absolu, l'acquisition par scanner laser reste la plus efficace selon les auteurs de par la quantité d'informations qui peut être obtenue.

De leur côté, Wang et al [15] s'intéressent à l'emploi des différentes techniques d'acquisition de données par scanner laser dans des tunnels. Les auteurs présentent les différents aspects importants nécessaires dans le cas de tels relevés (contraintes d'espace, de longueur, de luminosité, etc), qui justifient maintenant l'emploi de scanners laser en lieu et place de théodolites ou stations totales utilisées auparavant. Différents exemples et cas d'études concrets d'acquisitions sont présentés, avec à chaque fois les avantages concédés par l'utilisation d'un scanner, et les améliorations de performances permises notamment pour les analyses structurales (suivi des fissures, déformations, etc). Suite à cette revue, les auteurs concluent en insistant à juste titre sur le fait que le potentiel des scanners laser concernant ce type d'acquisition est élevé, notamment grâce aux grandes capacités d'acquisition et de stockage, et les améliorations à venir concernant les matériels et logiciels (baisse des coûts, améliorations des capteurs pour la précision...) vont permettre d'améliorer encore davantage les usages dans ce domaine.

Un autre cas d'étude appliqué au patrimoine historique est présenté par Achille et al [16], où les auteurs abordent les différentes étapes d'acquisition, de traitement et de modélisation 3D

du clocher de l'église Santa Barbara à Mantoue, en Italie, après son endommagement suite à deux séismes survenus dans la région en 2012. Les auteurs ont été confrontés à certaines problématiques pour l'acquisition des données, à savoir un environnement urbain dense aux alentours, des échafaudages installés en urgence suite aux séismes, des zones d'accès restreint, empêchant des prises de vues et des scans corrects, des angles de vue mal adaptés, etc. Pour ces raisons, les auteurs ont procédé à la combinaison des différentes techniques existantes pour mener à bien leur étude : photogrammétrie pour les façades, lasergrammétrie pour l'intérieur et les parties basses extérieures, et photographies par drone pour les parties hautes, inaccessibles autrement. Leur objectif était de combiner toutes les données obtenues afin de vérifier d'une part, leur compatibilité effective (résolution, qualité, précision, exposition), et les possibilités d'assemblage et d'extraction permises par les logiciels. Les résultats obtenus ont été très encourageants puisqu'ils ont effectivement permis de modéliser complètement le clocher sans pertes d'informations ou de précision. Les modèles 3D ont été créés de façon surfacique et volumique, à partir de l'importation des nuages de points dans un logiciel de CAO.

Dans un tout autre registre, Acierno et al [17] détaillent une méthodologie ainsi qu'une structure dédiée à l'intégration, le classement et la gestion de l'ensemble de données concernant la conservation, le référencement la préservation de bâtiments patrimoniaux. Les auteurs appliquent l'intégralité du processus développé dans le cadre d'un cas d'étude (un oratoire à Rome, en Italie). En plus d'un modèle géométrique BIM réalisé avec le logiciel Revit, l'ensemble des informations historiques, architecturales et physiques ont également été intégrées dans une base de données commune, permettant ainsi de répertorier l'ensemble des connaissances disponibles, et représenter ce volume d'informations sous forme de tableau d'ontologies. Cette approche se focalise donc particulièrement sur la transcription d'informations variées sous formes de données informatiques.

Enfin, Shen et al [18] présentent un processus de comparaison développé et mis au point par leurs soins, consistant en la superposition de scans issus de numérisation par lasergrammétrie, sans avoir recours aux fonctions d'assemblage et recalage proposées par les différents logiciels dédiés. Les auteurs justifient leur démarche par le fait que des erreurs systématiques surviennent lors de ces étapes d'assemblage et recalage, pouvant ainsi limiter les analyses comparatives de différentes versions d'un nuage de points. L'application de la méthode proposée par les auteurs consiste à numériser un mur en briques dans un laboratoire, avant et après des essais sismiques provoquant des désordres dans la structure. Avec les algorithmes de recalage et comparaison développés et se basant sur les centres des briques et les lignes de mortier, les scans ont été référencés dans les mêmes systèmes de coordonnées, permettant ainsi la comparaison des écarts et désordres survenus dans la structure. La même procédure a été effectuée à l'aide du logiciel Cyclone de Leica pour l'assemblage et le recalage, et le logiciel Cloud Compare pour la superposition des scans et leur comparaison. Cela a ainsi permis de montrer que le processus proposé améliore la qualité de la superposition, mais le problème de la généralisation de ce processus à d'autres structures et configurations se pose ensuite.

Dès lors, les **avantages considérables apportés par la lasergrammétrie et la photogrammétrie** permettent de montrer que **la numérisation pour la restitution, la visualisation et conception de modèles 3D n'a de sens que si les besoins qui l'ont**

motivée peuvent par la suite être satisfaits, sans que de nouveaux problèmes ne surviennent lors des phases de traitement des données et d'assemblage, puisque ces phases représentent véritablement le cœur de l'ensemble des processus de traitement ultérieurs.

2.3. Traitement des données issues des numérisations pour la modélisation géométrique

Durant les dernières années, les algorithmes dédiés aux traitements des données, aux différents processus de nettoyage, filtrage et ré-échantillonnage de nuages de points (issus de scans et de photographies en l'occurrence) ont beaucoup évolué. De cette façon, Kedzierski et al [19] présentent des méthodes automatisées pour la génération de modèles 3D à partir de données issues de scanners laser. Cependant, il est expliqué que les procédures de traitement automatisées restent encore, à l'heure actuelle, surtout adaptées dans le cas de structures et d'édifices simples, et que des pertes d'informations et de précision surviennent rapidement dès lors que les nuages de points se complexifient, empêchant une automatisation complète des étapes de modélisation.

Dans un article complet relatant les différentes étapes de réalisation d'une modélisation 3D d'un bâtiment historique (le château de Masegra, en Italie), Barazzetti et al [20] développent leur méthodologie pour aboutir à un modèle BIM paramétré et le convertir en éléments finis, dans le but de mener des études structurales. Les difficultés présentées ont concerné la réalisation du modèle 3D (acquisition par scanner laser, utilisation du logiciel Revit pour les formes simples et une modélisation en NURBS pour les objets complexes). Une fois le modèle 3D établi, la conversion vers le maillage s'est avérée longue et fastidieuse aux dires des auteurs car il n'existait pas d'algorithme ou de logiciel permettant de le rendre directement opérationnel, et de nombreuses corrections manuelles ont été nécessaires. Une fois le maillage terminé sur l'ensemble du modèle 3D, des études et simulations structurales ont été menées.

De la même façon, Castellazzi et al [21] présentent une méthode semi-automatisée, intitulée CLOUD2FEM, de création d'un modèle aux éléments finis à partir d'un nuage de points issu de la numérisation de la tour principale de la forteresse de San Felice sul Panaro (Italie). Cette méthode emploie différents algorithmes pour le traitement des données, couplés à des étapes manuelles ou semi-automatisées, et permet d'aboutir à l'obtention d'un modèle en voxels à partir du nuage de points. Les auteurs soulignent également le fait que cette méthode permet un gain de temps lors du traitement des données, et la construction de modèles géométriques fiables et exploitables, même si des corrections manuelles sont toujours possibles ultérieurement pour affiner le maillage et les volumes. Le modèle géométrique crée a ensuite été exporté sur le logiciel Abaqus pour analyser la structure. L'utilisation de modèles ainsi générés ou reconstruits à partir de nuages de points pour des applications d'études structurales constitue une avancée remarquable pour la compréhension et la gestion du patrimoine historique et architectural.

Jung et al [22] détaillent une méthode semi-automatique de modélisation 3D d'environnements intérieurs complexes, qui était, à l'époque de la publication de l'article, un

problème encore non résolu par les scanners laser, à cause des obstructions et obstacles pouvant perturber les acquisitions. La méthode présentée se base sur une extraction automatique des contours géométriques en utilisant l'algorithme de RANSAC, puis un traitement manuel des volumes géométriques obtenus (définitions des contours, nettoyage des bruits, et la paramétrisation des composants sémantiques, etc). Le bilan présenté de cette méthode, appliquée directement au centre de recherches de l'Université de Yonsei (Corée du Sud) montre que la modélisation des intérieurs est tout à fait convenable et représente donc un bon compromis. De plus, les opérations de nettoyage ont permis de réduire considérablement la taille du nuage de points (4% de la taille originale), sans perdre d'informations, facilitant donc considérablement les calculs et diminuant les temps de traitement.

Walsh et Borello [23] proposent une méthodologie plutôt complète concernant l'extraction de données structurales importantes, pour identifier notamment des désordres et des structures endommagées. Une méthodologie de traitement des données est présentée, avec des étapes fondamentales : enregistrement des données, sélection des voisinages géométriques, détection des points aberrants, triangulation, assemblage de carte de Gauss, détection des angles et plans, segmentation, ajustement des surfaces, modélisation de l'objet. Des algorithmes spécifiques sont utilisés dans certaines étapes, mais ils ne sont pas mentionnés explicitement, ce qui est fort dommageable, car les descriptions des différentes étapes sont suffisamment claires et détaillées. Enfin, un exemple d'application de cette méthodologie est présenté sur un cas concret, un pont en béton précontraint dont une pile s'est partiellement effondrée, entraînant une rupture du tablier. L'application de la méthodologie, à partir de données obtenues par un scanner laser, a permis de modéliser la structure de façon synthétique car les formes géométriques créées par les algorithmes restent simples mais suffisamment détaillées.

Frédéric Bosché [24] présente, pour sa part, deux méthodes de modélisation 3D à partir de données issues de nuages de points : une méthode complètement automatisée, basée sur l'utilisation de l'algorithme RANSAC, puis une méthode semi-automatisée (dite « en un-clic »), elle aussi basée sur cet algorithme. L'intérêt de l'article réside dans le fait que les différentes procédures détaillent précisément différentes versions et évolutions de l'algorithme ainsi que des propriétés mathématiques à utiliser, et surtout que leur pertinence est testée au travers d'un cas concret. Les avantages et inconvénients de chaque méthode sont ainsi mis en évidence, à savoir que la méthode automatisée fonctionne très bien dans le cas de structures considérées comme simples, mais dès que la structure se densifie ou que des éléments complexes apparaissent, la méthode semi-automatisée s'avère bien plus adaptée et surtout plus rapide, son intérêt étant le fait que l'utilisateur n'a qu'à sélectionner des éléments ou des plans dans le nuage de points pour engendrer une construction progressive du modèle.

Une autre approche est appliquée par Xiong et al [25], qui présentent une méthode de traitement et de conversion automatique des données de nuages de points en éléments sémantiques (murs, plafonds, portes, fenêtres, etc) détaillés. La décomposition de l'algorithme est présentée en 4 phases : voxellisation, détection des surfaces, classification, intersection et nettoyage des bruits. Le fonctionnement de la procédure utilise notamment les algorithmes croissance de région, Total Least Squares (TLS), ainsi qu'un modèle de *stacked-learning*, algorithme basé sur l'apprentissage, pour l'affinage de la détection et du traitement des surfaces. L'intérêt de la méthode présentée se justifie cependant dans le cas

de modèles relativement simples, car des problèmes subsistent encore dans le cas d'espaces intérieurs occupés, diminuant l'efficacité de l'algorithme à cause des occlusions et ombres.

En complément, Kim et al [26] appliquent une technique d'extraction et d'analyse automatisée de données issues d'un scanner laser pour l'évaluation de la progression de la construction d'un bâtiment (soit un modèle de type BIM 4D), par comparaison avec les données du même modèle 3D du BIM prévisionnel. L'intérêt de cette technique est de pouvoir surveiller l'avancement d'un chantier quasiment en temps réel (après le traitement des données), et donc de vérifier le respect des délais, des procédés constructifs, gérer les éventuels retards ou problèmes, afin de pouvoir adapter régulièrement le planning prévisionnel. Cet article se démarque de la majorité des publications car il explore un aspect peu abordé dans la littérature traitant du BIM, et la méthode proposée (reposant entre autres, sur l'algorithme ICP pour la comparaison des points dans les fichiers de données) est mise en pratique pour la construction d'un immeuble. Les résultats obtenus sont assez fiables, même s'il reste des points à améliorer, notamment concernant la limitation des étapes de révision pour la génération du modèle en cours, et les quelques erreurs qui subsistent à cause d'erreurs d'interprétation de l'algorithme ou du logiciel dans l'état de certains composants et matériaux.

De plus, dans un article complémentaire, [27], publié peu de temps après, un procédé automatique d'enregistrement combiné de données 3D issues de scanner laser ou de photogrammétrie ainsi que d'un modèle 3D créé par un logiciel de CAO, est présenté par les mêmes auteurs. Un workflow montre ainsi de façon précise l'ensemble parallèle des phases de traitement des deux modèles, qui emploient notamment des algorithmes pour le nettoyage des bruits (*tensor-voting*), le ré-échantillonnage (*octree-based data re-sampling*), le référencement général (*PCA-based registration*), le référencement local (*ICP et Levenberg-Marquardt*). La méthode proposée a été testée sur un immeuble de dix-sept étages en phase de construction au moment de l'étude, ce qui a permis d'appliquer chaque étape spécifique pour créer un modèle de comparaison entre bâtiment modélisé et bâtiment construit ou en cours de construction, afin d'aider à la gestion et la prise de décision en suivi de chantier.

Macher et al [28] explicitent un processus de segmentation d'un nuage de points en différentes étapes. L'approche envisagée consiste d'abord à modéliser la géométrie du bâtiment. Le nuage de points est segmenté successivement en étages, en pièces, puis en primitives géométriques. Sur la base de ces primitives, les points de contours sont extraits afin de détecter les ouvertures. L'objectif final de cette approche est d'intégrer des informations sémantiques, en cherchant à déterminer la catégorie d'objet et les propriétés matérielles des éléments du bâtiment. Parmi les différentes étapes de segmentation, la première étape est intitulée « segmentation en étages » et consiste à segmenter le nuage de points selon les différents étages du bâtiment étudié, via un histogramme de répartition des points selon leur coordonnée Z. La deuxième étape est la « segmentation en pièces » : pour chaque étage, une coupe du nuage de points est réalisée au niveau du plafond. Une image 2D est créée à partir de cette coupe puis l'algorithme croissance de région est appliqué. Les régions déterminées correspondent aux différentes pièces. Pour passer de la 2D à la 3D, il suffit de faire calculer, pour chaque point, la distance par rapport au niveau du plancher de l'étage. Enfin, la dernière étape présentée est la « segmentation en plans et primitives géométriques ». A partir de l'algorithme RANSAC, des primitives géométriques sont extraites

des nuages des différentes pièces. Le nuage et les paramètres (position, orientation et taille) de chaque primitive sont enregistrés. Deux segmentations sont effectuées, afin de pouvoir reconstruire les murs et surfaces planes, puis les petits détails (ouvertures, mobilier, etc), afin de les implanter ultérieurement et en extraire leurs descriptions et propriétés sémantiques et techniques.

Wang et al proposent un processus d'extraction automatique des géométries à partir de nuages de points [29], en passant par différentes étapes : réduction de la taille des données, nettoyage des bruits, détection des contours, classement des composants, modélisation polygonale. Les auteurs insistent sur l'intérêt de développer des méthodes automatisées de création de contours et de modélisation 3D à partir d'un nuage de points (organisé ou non), car à l'heure actuelle, les différents logiciels existants et les possibilités concernent uniquement des techniques manuelles ou semi-automatisées. Différents algorithmes ont été utilisés pour le traitement des données et les différentes étapes d'avancement : *tensor-voting*, *region-growing plane segmentation*, *edge boundary and detection*, *building component classification*. Les auteurs ont utilisé leur méthode sur trois bâtiments (deux maisons et un immeuble de bureaux), et les résultats obtenus sont satisfaisants, particulièrement pour les ouvertures (portes, fenêtres), mais que des erreurs plus ou moins importantes persistent pour les toitures et les murs extérieurs (notamment à cause d'occlusions ou d'un manque de données). Les auteurs reconnaissent ainsi que le processus de réduction des données peut engendrer des erreurs à cause du remplacement de certains points du nuage. Cependant, l'un des usages envisagés pour cette méthode ne concerne pas directement la construction d'un modèle 3D, mais plutôt des études énergétiques.

Erdos et al [30] développent de leur côté, une méthodologie de segmentation et reconnaissance d'objets complexes à partir de nuages de points. Après l'assemblage du nuage de points et les premiers traitements (nettoyage, réduction de la taille...), une agrégation est employée pour transformer les points du nuage en voxels. Ces derniers subissent ensuite une opération de filtrage. Le modèle est après cela décomposé en régions de tailles variables, et le processus de reconnaissance peut s'effectuer simultanément dans l'ensemble de ces régions. Un recouvrement des voxels est nécessaire pour chaque région afin d'aider à la reconnaissance et la délimitation des contours. Les voxels sont ensuite connectés à l'aide d'un graphe de connectivité. Ce processus est répété de façon itérative, afin d'homogénéiser le nombre de voxels dans chaque région. Les régions sont ensuite assemblées pour former des branches, et ainsi créer un graphe de connectivité des branches, dont chaque composant (région) correspond à un élément identifié ou non dans le modèle 3D. La reconnaissance des objets types est ensuite effectuée en déterminant les plans de contour de chaque ensemble, et en extrudant de façon itérative selon des axes afin de reconstruire les formes globales des objets concernés. Enfin, les objets ainsi reconnus sont reliés aux nœuds du graphe de connectivité, afin de détailler au maximum le contenu de la structure.

Dimitrov et Golparvar-Fard proposent une nouvelle méthode de segmentation et reconstruction, basée sur l'algorithme croissance de régions, à partir de nuage de points non structurés [31]. Les auteurs expliquent que leur méthode est plus avancée que celle proposée par la *Point Cloud Library*. Leur algorithme de croissance de région a été réalisé entièrement avec le logiciel Matlab, et les auteurs en présentent les étapes importantes : le prétraitement (sous-échantillonnage du nuage de points), une détection multi-échelle des composants, puis une détection des formes et une croissance de régions pour segmenter

l'ensemble des points. Le reste de l'article se consacre à la description mathématique et informatique des améliorations apportées aux algorithmes. Les auteurs présentent finalement différents tests à partir de modèles de bâtiments scannés, et leur méthode de segmentation s'avère assez performante. Par ailleurs, l'un de ses avantages est que selon les auteurs, l'utilisateur n'a qu'un seul paramètre à fournir en entrée, concernant le niveau d'abstraction qu'il souhaite pour la représentation, ce qui a un impact sur les itérations et la précision des traitements pour le rendu à obtenir.

Ochmann et al [32] tentent une approche automatisée pour la reconstruction paramétrique de bâtiments en 3D à partir de nuages de points en intérieur. Les auteurs montrent que leur méthode est suffisamment optimisée afin de permettre la reconstruction de murs intérieurs partagés entre différentes salles, tout en gardant une bonne connectivité. Ce modèle est ensuite enrichi en détectant les portes et les fenêtres. A partir d'un nuage de points constitué de scans intérieurs assemblés, une étape de filtrage et nettoyage est effectuée afin d'éliminer les points situés dans les zones de recouvrement ainsi que tous les points extérieurs. Les points verticaux sont ensuite arrangés en plans par détection en utilisant l'algorithme RANSAC, et leurs intersections avec les plans horizontaux sont déterminées. L'intérêt de l'amélioration apportée par les auteurs à cette technique (qui existait déjà avant) est que tous les scans peuvent être traités de façon séparée. Les aspects mathématiques sont également abordés, notamment concernant l'ajustement des murs et la détection des ouvertures. Cette méthode s'avère restreinte parce qu'elle ne fonctionne que pour des éléments intérieurs, limitant pour l'instant son utilisation.

Bosché et al [33] proposent une méthode de comparaison de modèles 3D en phase de construction pour l'étude de canalisations et autres éléments mécaniques, à partir d'un modèle obtenu par laser scanner sur le site, et le modèle BIM prévisionnel créé lors de la phase conception. Les auteurs confrontent pour cela deux méthodes, la technique dite de « Scan to BIM », déjà utilisée, et celle qu'ils proposent, combinant transformation de Hough et la technique de « Scan vs BIM », afin de voir si les résultats obtenus pour une application réelle sont plus précis avec cette dernière. Le procédé comprend 5 étapes : enregistrement du nuage de point représentant la structure tel que construit, génération d'un nuage de points à partir du BIM planifié et intégration des deux nuages, extraction de sections particulières pour comparaison, reconnaissance des objets concernés avec le BIM « officiel ». L'application sur un bâtiment en construction a permis aux auteurs d'obtenir des résultats prometteurs, permettant d'obtenir des raccords plus précis dans certains cas, mais engendrant des pertes à d'autres endroits. Les auteurs veulent continuer à développer leur méthode en raison de limitations encore existantes, notamment concernant les détections de points et des erreurs à considérer comme des faux positifs et faux négatifs.

Une version améliorée de l'algorithme de croissance de région est proposée par Vo et al [34], permettant notamment d'effectuer de la segmentation de nuages de points. Leur méthode se décompose en deux grandes étapes de traitement, une première phase dans laquelle une voxellisation du nuage de points est effectuée, puis une segmentation grossière, afin de grouper les voxels adjacents possédant des caractéristiques similaires. Cette phase est rapide en temps de calcul et peu gourmande en ressources, mais ne permet que de créer un maillage de voxels incomplet puisque tous les points ne sont pas assemblés. La deuxième étape vise en conséquence à raffiner et assembler l'intégralité des points considérés pour le modèle, en se focalisant sur les points non assemblés précédemment. L'un des principaux intérêts de cette méthode est que, grâce au recours à une structure de

type *octree*, la transformation des points en voxels peut être effectuée avec une adaptation efficace des dimensions des voxels générés, en fonction de leur position : voxels plus gros dans les régions douces comme les murs, et voxels plus petits au niveau des régions présentant par exemple des intersections (ouvertures, coins, etc). Les modèles obtenus présentent donc un aspect déjà bien adapté pour des traitements ultérieurs. Cela montre que le traitement de nuages de points par la création de maillage en voxels peut s'avérer robuste et pertinent, notamment pour simplifier et alléger les modèles, mais aussi pour faciliter l'intégration ultérieure de données sémantiques.

Biagini et al [35] abordent la création d'une procédure BIM pour un cas d'étude appliqué à un bâtiment historique, l'église Nome di Maria, dans la province de Mantoue, en Italie, qui a été endommagée par le tremblement de terre survenu en 2012. Le but de la démarche présentée ici était d'effectuer une acquisition complète de l'édifice, à l'aide d'une station totale, un scanner laser et par photogrammétrie, afin de créer un nuage de points de l'ensemble et l'exploiter via des logiciels de CAO et modélisation de type BIM. Pour construire le modèle 3D, les auteurs ont utilisé le logiciel Revit, en y important directement le nuage de points, et ont eu recours à d'autres procédures complémentaires, en créant des familles directement dans le modèle ou dans la base de données du logiciel (procédure de création par surfaces NURBS), ou même en créant certaines formes spécifiques (pour les voûtes notamment dans le logiciel AutoCad). Le modèle complet a ainsi été réalisé avec différents niveaux de détails selon les éléments et la précision voulue. Des composantes pour créer un modèle BIM 4D ont ensuite été implantées, et cette maquette numérique a été utilisée pour la planification des travaux de restauration. Cet article est donc très intéressant car il montre que le potentiel des logiciels comme Revit est donc bien présent et peut donc constituer une issue possible pour une modélisation semi-automatisée. En revanche, les auteurs ne font pas de commentaires ou remarque concernant le temps passé sur les modélisations et préparation des modèles pour la planification des travaux.

Luigi Barazzetti [36] présente pour sa part une méthodologie semi-automatisée de modélisation 3D paramétrique de type BIM *tel que construit* de bâtiments plus ou moins complexes, en utilisant le logiciel Revit, à partir de nuages de points issus de photogrammétrie et lasergrammétrie. Le point particulier de l'article réside dans le fait que les éléments complexes sont dans ce cas modélisés en ayant recours à une procédure de courbes NURBS, implantée dans Revit. D'autres éléments ont été modélisés en utilisant les familles proposées par le logiciel, ou en créant de nouvelles familles spécifiques. L'auteur explique que l'implantation de la procédure NURBS est rendue possible en adaptant correctement les paramètres mathématiques des géométries. Cette méthode hybride permet ainsi, selon l'auteur, de compenser l'absence d'algorithmes de détection et reconnaissance d'objets, et donc de pouvoir modéliser assez rapidement à partir du nuage de points sans subir les contraintes liées à une modélisation exclusivement manuelle.

Une méthode de détection et segmentation automatisée de poteaux et piliers dans des nuages de points en intérieur est proposée par Díaz-Vilariño et al [37]. La méthode est basée sur une vectorisation et conversion en image des nuages de points, puis une application de la transformée de Hough : la transformée circulaire pour détecter les piliers et colonnes de forme circulaire, et la transformée généralisée pour la détection de piliers de forme rectangulaire. Les auteurs précisent également que les temps de traitement et de calcul nécessaires pour les algorithmes sont très réduits car les images et coupes extraites des nuages de points ne nécessitent pas une résolution très élevée. Cette méthode apparaît

donc assez robuste pour la détection des piliers, et n'est pas trop sensible aux occlusions et autres éléments dans les nuages de points, même si des erreurs à considérer comme des faux positifs sont obtenus.

Hong et al présentent une approche semi-automatisée d'extraction de contours à partir de nuages de points représentant des intérieurs de bâtiments [38]. Leur approche est constituée de quatre étapes : traitements du nuage de points, modélisation verticale, modélisation des contours des niveaux, modélisation 3D « tel que construit ». Avec cette méthode, les auteurs veulent définir les contours d'un intérieur, en utilisant des opérations d'extraction de contours et de raffinement de ces contours en utilisant l'algorithme de RANSAC. A partir des contours extraits et traités, une importation est faite dans le logiciel Revit et une modélisation 3D de type « tel que construit » est réalisée, puisque, comme l'expliquent les auteurs, certains composants comme les ouvertures, ne peuvent pas encore être implantés de façon automatique. La précision des modèles 3D obtenus est ainsi très correcte.

Hinks et al ont travaillé sur l'amélioration des procédés de conversion et représentation en voxels [39]. Les auteurs y présentent une méthode de conversion de nuages de points en modèles solides grâce à un processus de voxellisation effectué à partir des points (*point-based voxelization*). Des nuages de points acquis à l'aide de scanners lasers aériens et terrestres sont ainsi convertis en modèles de type voxels, dans le but d'obtenir des modèles prêts pour des analyses aux éléments finis. Les auteurs expliquent ainsi que les modèles les plus optimaux obtenus ont été générés en adaptant systématiquement la taille des voxels en fonction des dimensions des ouvertures présentes dans les façades étudiées. Ils insistent d'ailleurs sur le fait qu'une taille de voxels inadaptée (trop petits ou trop grands) menait systématiquement à des trous dans les parties pleines, ou au contraire à une mauvaise détection et implantation des ouvertures. Enfin, l'un des intérêts d'une telle méthode est que les modèles obtenus sont ensuite exportables dans des logiciels commerciaux de calculs et d'analyse structurale, comme ANSYS dans le cas de cet article. Cet article a permis ainsi de poser certaines bases dans les représentations en voxels basées sur les nuages de points, bien que des améliorations aient été apportées depuis car ce mode de conversion et représentation s'avère extrêmement utile dans le cas d'une chaîne de numérisation. De même, les étapes de traitement des données se voient simplifiées puisque seules des opérations de traitement des nuages de points sont effectuées avant conversion et représentation en voxels.

Truong-Hong et al ont réalisé une combinaison de méthodes permettant la représentation et la modélisation en voxels de surfaces en 2D, en l'occurrence des façades de bâtiments acquises par des scanners laser de type LiDAR [40]. Une méthode de critère d'angle est utilisée à l'aide d'un algorithme de recherche des plus proches voisins, et est combinée à la méthode du « voxel volant » développée auparavant par les auteurs. Il s'agit dans ce cas d'un processus de voxellisation basé sur des points. Cette méthode a été employée sur différents exemples de façades et a permis aux auteurs d'obtenir des résultats convaincants concernant la représentation finale des modèles, comparativement à leurs équivalents modélisés à l'aide de logiciels de CAO standards. Cependant, cette méthode présente des limitations puisqu'elle ne considère que la reconstitution de façades, et des problèmes persistent pour la détection des ouvertures et leur représentation correcte dans les géométries en voxels.

Tonini et al [41] présentent une méthodologie de modélisation 3D de terrains, dans le but d'effectuer des analyses géologiques des sols et des différentes couches qui les composent. A partir de photographies aériennes, une carte topographique de la région est constituée, et les courbes de niveaux et points d'altitude connue sont extraits par l'intermédiaire d'un logiciel de SIG. Ensuite, des coupes sont réalisées dans la carte des profils topographiques ainsi générés, ce qui permet aux auteurs de reconstruire les différentes courbes géologiques par interpolation des différents points et altitudes. Une fois les courbes géologiques reconstituées, une procédure de modélisation des différentes couches est effectuée par l'intermédiaire de courbes NURBS dans le logiciel Rhinoceros, ce qui permet aux auteurs de reconstituer des modèles surfaciques de l'ensemble des couches géologiques, puis enfin de reconstruire les volumes géologiques des formations rocheuses correspondantes par jonction des surfaces, en ayant recours à la modélisation basée sur les frontières (*BREP*).

Vanneschi et al [42] ont recours à la lasergrammétrie pour numériser et créer un nuage de points complet de l'intérieur du réseau d'une carrière souterraine, dans le but de reconstruire un modèle 3D de haute précision. Pour cela, une fois le nuage de points assemblé, les auteurs ont eu recours à une modélisation 3D basé sur les surfaces NURBS, en important le nuage de points dans le logiciel Rhinoceros et en modélisant directement à partir de celui-ci. Les auteurs expliquent notamment ne pas avoir voulu passer par l'étape de création de maillages surfaciques à partir du nuage de points avant la modélisation surfacique, afin de simplifier la procédure de modélisation en réduisant les étapes, et surtout limiter au maximum les pertes d'informations et conserver la meilleure précision possible. Les auteurs expliquent ainsi être parvenus à un bon compromis entre qualité et précision dans le modèle 3D final. Par la suite, un modèle 3D géologique du terrain a également été réalisé, en ayant là aussi recours à la modélisation par surfaces de type NURBS, par interpolation des courbes de niveaux et des coupes géologiques réalisées.

Barazzetti et al [43] présentent une méthodologie permettant de construire un modèle de type BIM à partir d'acquisitions par lasergrammétrie, dans le but de produire ensuite une analyse aux éléments finis fiable et réaliste. Différents aspects de modélisation ont été exploités pour la création du modèle BIM sous le logiciel Revit, en ayant recours à une décomposition du bâtiment : la modélisation des formes simples s'est effectuée directement avec les outils standards, tandis que les formes complexes ont été modélisées via une procédure par surfaces NURBS. L'ensemble des éléments a ensuite été rassemblé pour constituer le modèle BIM final, avant de passer à l'étape d'analyse aux éléments finis, en générant des maillages tétraédriques de façon à respecter au mieux les dimensions et la précision du modèle initial. Les auteurs insistent cependant sur plusieurs points : à l'heure actuelle, il reste difficile et long de réaliser des modèles de type BIM consacrés au bâti historique et architectural (hBIM) car les logiciels et méthodes dédiées sont encore trop tournés vers le bâti moderne et les formes géométriques simples. De plus, le maillage aux éléments finis de structures complexes peut également poser problème, notamment lors du transfert de données car les formats IFC utilisés engendrent également des pertes de données. Des phases de contrôle et édition manuelle des modèles restent systématiquement nécessaires afin de vérifier le respect des dimensions et la qualité des modèles aux éléments finis générés à partir des modèles de type BIM.

Zhong et al [44] présentent leur méthodologie de modélisation géologique 3D d'une région, appliquée à un cas d'étude d'ingénierie en vue de la construction d'un barrage hydroélectrique. Pour cela, les auteurs ont eu recours à la création de coupes, interpolées

directement à partir du Modèle Numérique de Terrain construit à partir d'une analyse géologique et cartographique de la région. Les courbes ont ensuite été raccordées en créant un maillage surfacique triangulaire (TIN), avant une extraction de points de contrôle spécifiques servant ensuite à générer ce même terrain sous forme de surfaces NURBS. Le terrain modélisé est ainsi plus précis et détaillé. Une fois l'ensemble des couches modélisées de la sorte, un modèle solide a été généré en ayant recours à la représentation basée sur les frontières (*BREP*).

Dans un article de type review, Berger et al [45] présentent les différentes méthodes existantes et utilisées pour la reconstruction de modèles 3D à partir de nuages de points. L'algorithme RANSAC est notamment mis en évidence pour la détection de primitives géométriques et la reconstruction géométrique surfacique de bâtiments à partir des nuages de points. Certaines similitudes se retrouvent donc logiquement avec d'autres publications abordant les thématiques similaires.

En pratique, **le cas des édifices complexes doit permettre de représenter les structures telles quelles, en limitant au minimum les simplifications et ainsi représenter assez fidèlement à partir des nuages de points.** Disposer d'un nuage de points d'une densité adaptée en fonction des besoins s'avère essentiel, afin notamment de pouvoir pallier aux potentielles erreurs commises par les algorithmes de recalage. **Des approches combinant diverses méthodes de reconstruction aident ainsi à répondre aux cas complexes,** en s'adaptant aux variations et caractéristiques des édifices.

2.4. Utilisation des modèles géométriques ou paramétriques pour la simulation

2.4.1. Etudes structurales aux éléments finis

A partir de modèles géométriques 3D construits selon différents processus, et notamment en utilisant des nuages de points issus de numérisations, des auteurs se sont penchés sur **la problématique de l'interopérabilité et l'exploitation de tels modèles** pour mener notamment des études structurales avancées. Les objectifs dans de tels cas étaient notamment de **comprendre en détail le comportement structural** et certains aspects liés à la **durabilité et la maintenance des structures étudiées.**

Cin et Russo [46] étudient de façon détaillée le comportement des différentes parties architecturales d'une église soumise à des sollicitations sismiques. Un modèle aux éléments finis de l'église a été créé, et les auteurs ont ensuite étudié le comportement dynamique et statique de l'édifice. L'analyse dynamique a servi à caractériser les principaux modes propres agissant sur la structure, avec les déformations et déplacement engendrés, tandis que l'analyse statique a servi à simuler le comportement de la structure sous l'influence de son poids propre. Une analyse de l'application de charges en poussée progressive a servi à simuler le comportement de la structure soumise à des ondes sismiques. Cette étude est complète, mais les auteurs ne donnent quasiment pas d'information quant au processus d'acquisition et modélisation de l'église.

Ascione et al [47] étudient un palace italien sur deux aspects : le comportement en analyse dynamique à partir d'un modèle aux éléments finis, ainsi que des études thermiques concernant les performances énergétiques du bâtiment. Les auteurs veulent ainsi vérifier si des éléments de conception thermique aident ou desservent la structure du bâtiment en cas de séisme. Il s'avère que les performances mesurées du bâtiment sont médiocres et devraient être améliorées, afin d'aider à conserver une cohérence pour la structure et ses performances.

Betti et al [48] analysent le comportement statique et dynamique de la basilique de Santa Maria all'Impruneta, située près de la ville de Florence. A partir d'un modèle 3D aux éléments finis, des analyses du comportement statique sous les différents cas de chargement (structure et exploitation) et des analyses dynamiques du comportement sous des sollicitations d'ordre sismique ont été effectuées. Cela a notamment permis aux auteurs d'identifier les points faibles de la structure qui pourront être renforcés ou protégés afin d'aider à sa préservation.

De même, Betti et Vignoli [49] présentent une analyse menée sur une église romane, dans le but de déterminer son comportement structural actuel et ses conséquences sur son état de conservation. Les auteurs proposent ainsi une méthodologie d'analyse numérique aux éléments finis leur permettant d'effectuer des analyses statiques ainsi que des analyses de vulnérabilité sismique en ayant recours à la méthode quasi-statique. Dans un premier temps, les analyses statiques réalisées (poids propre et charges de toiture) ont permis aux auteurs d'étudier les déplacements et contraintes engendrés, ce qui a notamment prouvé que les fissures et déformations constatées sont bien dues à un problème de tassement de sol et de mouvement de la structure, ce qui nécessite des travaux de consolidation et réparation. Ensuite, les analyses sismiques menées (en simulant des charges horizontales résultantes des efforts) ont permis aux auteurs d'identifier les points faibles de la structure au niveau des raccords de maçonnerie de certains murs. Suite à l'ensemble des analyses menées, les auteurs proposent enfin différentes solutions de renforcement et réparation afin de pallier aux faiblesses de l'édifice et ainsi contribuer à sa stabilité et sa préservation.

Betti et al [50] étudient également le comportement structural d'un château médiéval italien à l'aide d'une méthodologie d'analyse numérique par éléments finis 3D. Les charges structurales ont été prises en compte pour l'ensemble des éléments constitutifs de la structure afin de vérifier si les contraintes et déplacements actuels sont liés aux fissures et désordres constatés dans la structure, et si les travaux de renforcement et restauration effectués dans les années 1980 ont eu un impact positif sur le comportement global de la structure. Cela a ainsi permis aux auteurs de compléter le diagnostic de conservation de l'édifice, et de montrer que des problèmes persistaient encore. En conséquence, ils proposent différentes solutions de renforcement et réparations dans les parties endommagées ou soumises à des contraintes anormales.

Dans le même domaine, Betti et al [51] présentent une méthode d'analyse complète d'un palace italien construit à l'époque de la Renaissance, et qui a subi des dégâts structuraux significatifs durant les années 1980, qui ont conduit à l'émergence de fissures profondes sur plusieurs façades. A partir d'une étude topographique complète, les auteurs ont construit un modèle 3D du bâtiment aux éléments finis, afin d'étudier le comportement statique du bâtiment sous différents cas de chargements. Plusieurs situations ont été analysées, en ne considérant que le poids propre du bâtiment et les charges d'exploitation, en intégrant les

résistances et interactions avec le sol, puis en modélisant des propriétés du sol. Les résultats des analyses statiques ont permis aux auteurs de conclure que les graves dommages subis par la structure ne sont pas dus aux chargements structuraux ni à des problèmes de cohésion ou tassement du sol, mais à une brusque variation de résistance du sol, localisée sous l'une des façades, en raison d'un effondrement probable d'une cavité souterraine. Par ailleurs, l'analyse des données sismiques historiques a permis de montrer que le bâtiment n'a pas été endommagé par un ou plusieurs séismes, et que les travaux de renforcement entrepris à la suite des désordres constatés permettent à priori de stabiliser la structure et lui confèrent une résistance adaptée.

Saloustros et al [52] effectuent une analyse numérique aux éléments finis à partir d'un modèle 3D de l'église du monastère de Poblet. A partir de numérisations effectuées à l'aide d'un scanner laser, un modèle 3D a été construit puis intégré vers un solveur de calcul aux éléments finis. Les objectifs des auteurs pour cette étude étaient notamment de vérifier les causes probables des dégradations constatées sur la structure de l'édifice. Pour cela, des analyses statiques sous l'influence du poids propre et des charges structurales ont été effectuées, en prenant en compte les interactions et les propriétés du sol de différentes façons, et il s'est avéré que ces charges ne suffisaient pas à expliquer les dommages constatés. En conséquence, différents scénarios de séismes ont également été incorporés aux analyses, en ayant recours à une analyse statique non linéaire (à l'aide des forces statiques équivalentes). Les résultats ont montré que ces effets sismiques pouvaient effectivement mener aux dommages constatés, en combinaison avec les charges structurales. De plus, après analyse de documents et archives historiques, les auteurs émettent l'hypothèse que les dégradations actuelles constatées sont dues à la conjonction de plusieurs facteurs : l'influence possible d'un séisme ancien, des incendies ayant fragilisé certaines zones, mais également la démolition et la reconstruction de l'aile sud (au XIV^e siècle), qui a également contribué à déstabiliser la structure.

Valente et Milani [53] analysent huit différentes tours et clochers situés dans la région autour de Mantoue, en Italie. A partir de plans et données historiques, des modèles aux éléments finis ont été réalisés, et des analyses mécaniques linéaires et non-linéaires ont été réalisées sur chaque structure. Les analyses linéaires visaient à déterminer les fréquences et modes propres de chaque structure, tandis que les analyses statiques non-linéaires ont consisté en l'application de la méthode de calcul en poussée progressive (*pushover*), afin de déterminer le comportement théorique des structures sous différents cas sismiques. Les résultats obtenus ont permis aux auteurs de montrer qu'il existe des risques dans certains cas, pouvant amener à des dégâts significatifs.

Casolo et Sanjust [54] proposent une analyse, via l'intermédiaire de différents modèles 3D aux éléments finis, d'un château situé à Syracuse, en Sicile. Deux modèles ont été réalisés : un modèle global permettant d'étudier le comportement de la structure sous des sollicitations d'ordre sismique, et un modèle détaillé, afin d'étudier plus précisément le comportement des parties qui subissent le plus de contraintes en analyse statique. La méthode de calcul en poussée progressive a été utilisée dans ce dernier cas. Cette étude a donc permis aux auteurs de déterminer les parties les plus sollicitées, et de proposer une stratégie de renforcement et consolidation afin d'aider à la protection de la structure et améliorer ses résistances mécaniques face à d'éventuelles sollicitations sismiques.

Une méthodologie complète pour la numérisation, la modélisation 3D et l'étude structurale d'une église située au Portugal est également proposée par Sánchez-Aparicio et al [55]. Différentes techniques d'acquisition ont été utilisées : lasergrammétrie avec deux modèles de scanner laser différents et photogrammétrie à l'aide d'un drone. A partir des traitements et opérations de nettoyage, filtration et assemblage des nuages de points, les auteurs ont construit un modèle 3D en combinant une CAO classique pour les formes simples et des modélisations par surfaces NURBS pour les éléments complexes (voûtes, arches etc). Cela a ainsi permis la réalisation d'un modèle hybride dans lequel la représentation des fissures en façade de l'édifice était également incluse. A partir du modèle finalisé, des modèles aux éléments finis ont été générés pour mener des études structurales statiques et dynamiques. Il est cependant dommage que les auteurs ne détaillent pas davantage la partie de construction et modélisation géométrique.

De la même façon, les mêmes auteurs [56] appliquent une méthodologie numérique intégrée destinée à l'étude historique et structurale d'une église en Espagne. A partir d'acquisitions par scanner laser et photogrammétrie, un nuage de points a été assemblé, nettoyé et analysé, afin de construire des maillages surfaciques, puis de les interpoler afin de construire un modèle CAO de type NURBS. Enfin, à partir de la géométrie complète, des maillages aux éléments finis ont été générés, en y intégrant l'ensemble des informations structurales récupérées lors de la phase de numérisation (matériaux, fissures, conditions initiales, etc). L'ensemble de cette méthodologie appliquée sur un cas d'étude concret a ainsi permis aux auteurs d'étudier plus en détails le comportement statique du dôme de l'église sous l'ensemble des charges structurales appliquées.

Fortunato et al [57] mènent une étude complète de numérisation, modélisation et analyse aux éléments finis sur un baptistère situé en Italie. A partir d'acquisitions par scanner laser et photogrammétrie, un nuage de points a été assemblé, nettoyé et analysé, afin de construire des maillages surfaciques, puis de les interpoler afin de construire un modèle géométrique de type NURBS. Cette procédure s'avère très similaire à celle proposée par Sánchez-Aparicio et al. L'utilisation du modèle CAO pour construire un maillage aux éléments finis a ensuite servi aux auteurs pour mener des analyses statiques non-linéaires par l'intermédiaire de calculs en poussée progressive (de type *pushover*).

Fanti et al [58] ont recours à une campagne de numérisation, relevés géologiques et topographiques et modélisation 3D d'un site historique à Pitigliano, en Italie, afin d'étudier l'influence des cavités (caves et tunnels) ainsi que le comportement des falaises entourant le site. La combinaison des nuages de points avec les informations topographiques et géologiques relevées a ainsi permis aux auteurs d'analyser les contraintes présentes dans certaines zones ainsi que les déplacements engendrés par l'érosion et l'usure des sols. Cette approche illustre notamment l'utilisation émergente des appareils de numérisation tels que les scanners laser terrestres et leur grande variété d'utilisation.

Ainsi, l'étude de publications récentes dans les domaines de la numérisation, de la modélisation et des analyses structurales permet de mieux appréhender et réaliser **l'importance croissante liée à l'utilisation des modèles 3D paramétriques et sémantiques de type BIM ou hBIM**, et de leur **utilisation de plus en plus fréquente pour des travaux de restitution historique** au travers d'une maquette numérique, mais

également pour des **analyses statiques et/ou dynamiques aux éléments finis**. Les nouveaux enjeux concernent dorénavant l'**amélioration des processus de traitement des données issues des numérisations et les méthodes de modélisation les plus adaptées en fonction des circonstances**, afin de proposer les meilleurs compromis entre qualité architecturale des modèles, précision et quantité d'informations utiles pour les analyses structurales. De même, l'utilisation des nuages de points et des modèles géométriques et paramétriques comme outil d'aide à la décision et à la modélisation pour la rénovation et la reconstruction peut encore être développée, afin de s'affranchir notamment de l'aspect logiciel et permettre une construction de géométries 3D variées et adaptées aux besoins et contextes d'études.

2.4.2. Utilisation des modèles et des géométries pour études thermiques

L'intérêt des modèles 3D paramétriques de type BIM/hBIM concerne également leur **utilisation de plus en plus adaptée et pertinente dans un cadre de gestion thermique et énergétique du bâti**, aussi bien concernant la construction neuve que le patrimoine existant. Pour ces raisons, certains auteurs se sont penchés sur les **problématiques liées à l'incorporation de données et d'informations thermiques pour l'enrichissement des maquettes numériques** et la constitution de modèles BIM davantage évolués et plus à même d'être utilisés par les différentes solutions logicielles dédiées à l'analyse et la performance énergétique des bâtiments. Dans cette optique, **le terme BEM (pour Building Energy Modeling) émerge et désigne des modèles BIM enrichis en données thermiques et utilisés dans des logiciels d'analyse thermique**. Ce processus reste cependant encore perfectible et de nombreux problèmes existent, liés notamment au transfert des données et modèles, comme l'illustrent les quelques exemples tirés de la littérature récente.

Par exemple, Kim et al. [59] utilisent une librairie de paramètres intitulée *ModelicaBIM* afin de transmettre, au travers d'une interface utilisateur développée et programmée, des informations issues de modèles BIM afin de construire des modèles comportant des informations thermiques et énergétiques. Cette librairie sert d'intermédiaire entre les logiciels BIM et les logiciels d'analyse thermique, les attributs sémantiques pouvant être convertis en paramètres énergétiques. Cependant, comme l'expliquent les auteurs, l'interopérabilité directe entre les solutions BIM et les logiciels dédiés à l'analyse thermique du bâti n'est pas encore assurée et correctement intégrée, et le développement d'interfaces spécialement conçues nécessite des compétences avancées en programmation logicielle, tout en restant à chaque fois restreinte à un type particulier de logiciel ou de méthode.

Ham et Golparvar-Fard [60] abordent quant à eux les problèmes de fiabilité et écarts rencontrés entre des résultats d'analyses thermiques effectuées à partir de matériaux contenus dans les bibliothèques de composants des modèles BIM, et les écarts constatés lors de mesures in-situ sur les matériaux réels, en raison notamment des différences de paramètres des matériaux selon les sites d'implantation, leur dégradation et l'altération de leur résistance thermique avec le temps ou les éventuels problèmes de mise en œuvre. Ainsi, les auteurs proposent une méthode permettant une mise à jour des propriétés thermiques des matériaux obtenues lors de mesures sur site, à l'aide de relevés par caméra

thermique ou imagerie aérienne, par comparaison avec les propriétés des matériaux issus des modèles BIM via le format interopérable gbXML. Cependant, une telle méthode a recours là aussi à une programmation spécifiquement dédiée permettant de compléter les modèles BIM au format gbXML, ce qui ne rend pas le processus directement accessible, et reste par ailleurs dédié à l'analyse de bâtiments en cours de construction et non pas à des bâtiments déjà construits et occupés (à cause des potentielles occlusions), ainsi que les formes et structures plus complexes.

Lagüela et al. [61] proposent de leur côté une méthodologie permettant la construction et la mise au point d'un modèle BIM « tel que construit » à partir de relevés par lasergrammétrie pour des bâtiments existants, en y incorporant des données thermiques issues de relevés effectués sur site à l'aide de caméras thermiques. Ces données thermographiques sont extraites et insérées en parallèle à la construction du modèle BIM, par l'intermédiaire d'équations intégrées dans le fichier exporté au format gbXML. Cependant, certains éléments tels que les ponts thermiques ou d'autres défauts ne peuvent pas être intégrés directement en tant qu'informations à moins de modifier les données.

Un cas d'étude adapté à la problématique des bâtiments industriels est proposé par Gourlis et Kovacic [62], qui proposent une méthodologie adaptée à la construction de modèles BIM (à partir de plans et documentation connus) pour les transférer vers un logiciel d'analyse thermique permettant de passer à un modèle de type BEM. L'utilisation du format gbXML pour exportation pose néanmoins des problèmes importants, à savoir que les caractéristiques des matériaux et toutes les informations thermiques liées sont perdues lors du transfert et doivent être réintégrées manuellement dans le logiciel d'analyse thermique ou via l'utilisation de plugin dédiés (en l'occurrence, le plugin Openstudio et le logiciel Sketchup) afin de pouvoir bénéficier d'un modèle de type BEM complet et cohérent, bien que des corrections et vérifications doivent toujours être menées sur le modèle final.

En conséquence, il apparaît que la thématique consacrée à **l'intégration de données thermique pour l'enrichissement des modèles BIM présente encore des limites**, bien qu'un potentiel soit présent et que de nombreuses méthodes soient effectives. Le problème de **l'interopérabilité et de la conservation des données lors des exportations** et des différents formats de fichiers utilisés (particulièrement les formats gbXML et IFC) limite donc la rapidité des transferts et des phases d'édition avant calculs et analyses dans les logiciels d'études thermiques dédiés. Cependant, tous ces paramètres ne peuvent qu'évoluer et s'améliorer davantage au cours des prochaines années et des évolutions informatiques (amélioration des formats de fichiers interopérables, meilleure compatibilité des logiciels, etc) à venir.

2.5. Bilan de l'analyse de la littérature

Cet état de l'art des techniques et travaux récents concernant les problématiques de numérisation, modélisation géométrique 3D et exploitation de ces modèles, nous a permis de tirer de nombreux enseignements des travaux et publications récentes consacrées aux thématiques et champs d'étude du secteur : par exemple, l'étude de publications récentes dans les domaines de la numérisation, de la modélisation et des analyses structurales

montre **l'importance croissante de l'utilisation des modèles 3D paramétriques et sémantiques de type BIM**, et de leur utilisation de plus en plus fréquente pour des travaux de restitution historique au travers d'une maquette numérique, mais également pour des analyses statiques et/ou dynamiques aux éléments finis. Les nouveaux enjeux concernent dorénavant **l'amélioration des processus de traitement des données issues des numérisations et les méthode de modélisation** géométriques les plus adaptées en fonction des circonstances, afin de proposer les meilleurs compromis entre qualité architecturale des modèles, précision et quantité d'informations utiles pour les analyses structurales. De même, l'utilisation des nuages de points et des modèles géométriques et paramétriques comme outil d'aide à la décision et à la modélisation pour la rénovation et la reconstruction doivent davantage être développés et utilisés afin de s'affranchir d'un simple aspect logiciel et de la constitution de modèles orientés explicitement.

De plus, la thématique consacrée à **l'intégration de données thermiques pour l'enrichissement des modèles BIM présente encore des limites**, bien qu'un potentiel soit présent. Le problème de l'interopérabilité et de la conservation des données lors des exportations et des différents formats de fichiers utilisés (particulièrement les formats gbXML et IFC) limite donc la rapidité des transferts et des phases d'édition avant calculs et analyses dans les logiciels d'études thermiques dédiés. Cependant, tous ces paramètres ne peuvent qu'évoluer et s'améliorer davantage au cours des prochaines évolutions informatiques. En effet, des améliorations des contenus et des formats de fichiers permettant une meilleure compatibilité de ces formats entre les différentes solutions logicielles ne manqueront pas de se produire au cours des prochaines années, grâce aux progrès constants des techniques informatiques.

3. Numérisation et traitement des données pour exploitation

3.1. Numérisation et lasergrammétrie

3.1.1. Principes généraux

La technique de numérisation par scanner laser est beaucoup plus récente que les méthodes de prise de vue photographiques et photogrammétriques, ainsi que les méthodes topographiques traditionnelles. Bien que le principe de l'émission laser ne soit pas nouveau, de même que les techniques de mesures à distance par télédétection et l'utilisation des télémètres laser (ou lasermètre), des progrès considérables ont été réalisés sur les plans techniques et informatiques durant les dernières décennies (depuis 1990 environ). De cette façon, la lasergrammétrie s'est très rapidement imposée comme un nouvel outil efficace et particulièrement adapté à la restitution d'environnements en 3D, ce qui est notamment le cas pour les édifices remarquables et le patrimoine bâti.

Dans le cas des **scanners laser terrestres (TLS)**, les premiers appareils proposés à l'utilisation sont apparus dès la fin des années 1990, mais leurs capacités restaient encore limitées, avec des fréquences d'acquisition de plusieurs milliers de points par seconde seulement. Cependant, **leur émergence a permis le développement d'applications nouvelles dans les domaines de la topographie, la numérisation des bâtiments et des ouvrages d'art**. La technologie des capteurs et appareils n'a eu de cesse d'évoluer depuis lors, aboutissant à des modèles de plus en plus légers et compacts, capables dorénavant d'acquérir des scènes et structures entières avec des fréquences allant jusqu'au million de points par seconde, avec toujours plus d'efficacité, de précision et de qualité.

L'efficacité des scanners laser modernes n'étant donc plus à prouver, ces derniers constituent donc maintenant des **outils incontournables**, en permettant de numériser sans difficulté des bâtiments, structures et scènes de très grande taille, là où des acquisitions par des méthodes classiques s'avèrent souvent fastidieuses. De cette façon, les scanners laser tendent à présent à supplanter et remplacer les outils traditionnels utilisés par les géomètres (stations totales et théodolites essentiellement), et forment également des alternatives redoutables à la photogrammétrie architecturale.

3.1.2. Fonctionnement et technologies

Un scanner laser terrestre permet la **numérisation d'une scène et d'un environnement en 3D, en effectuant un balayage laser à 360°**. Depuis une position définie où l'appareil est stationné, l'acquisition se fait par un balayage laser terrestre, qui permet l'obtention rapide,

sans contact et automatique de coordonnées 3D de points surfaciques visibles. A l'issue de la numérisation, les données contenues dans chaque scan forment un **ensemble de points 3D dans un système de coordonnées locales**, propre à l'appareil et fonction de ses spécifications techniques. Il s'agit en général de coordonnées sphériques, converties ensuite en coordonnées cartésiennes. De plus, des valeurs d'intensité sont acquises et retournées par le signal laser lors de l'acquisition. Les scans réalisés présentent ainsi une restitution initiale en noir et blanc, mais si une caméra ou un appareil photo est intégré au système, il est également possible d'acquérir l'ensemble des informations colorimétriques constituant la scène, stockées sous formes de nuances de rouge, vert et bleu (RGB).

Dans le cadre de travaux de numérisation de bâtiments, d'environnements ou de scènes urbaines, deux technologies de scanning par balayage laser sont employées : la **mesure par temps de vol** et la **mesure par décalage de phase**, comme illustré dans la figure 5.

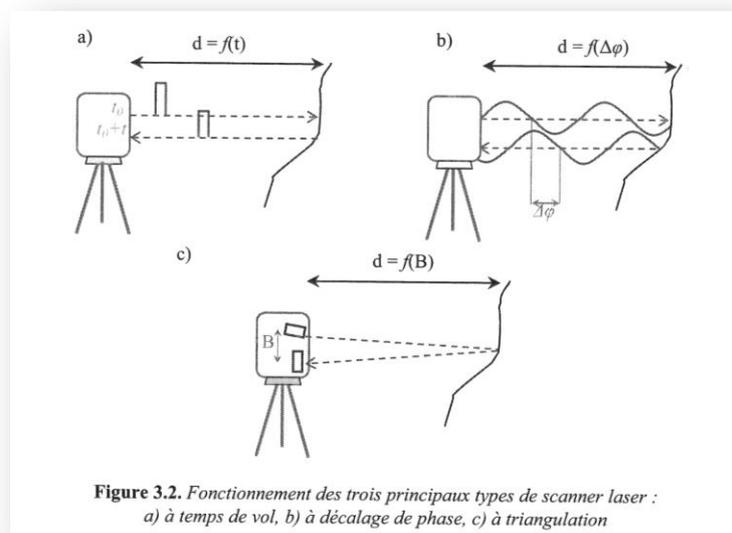


Figure 5 : Schémas de fonctionnement des technologies de scanners laser [63]

3.1.2.1. Mesure par temps de vol

Le principe de fonctionnement de cette technologie consiste à mesurer le temps de parcours du rayon laser entre son émission et la réception de l'onde réfléchi par l'objet ou l'élément de structure touché (cf figure 5a). De cette façon la distance entre le laser et la scène en est ainsi déduite par calcul instantané. Les scanners laser équipés de cette technologie sont principalement utilisés pour la **numérisation de grandes scènes sur de longues distances** telles que des carrières, des mines, des tunnels, etc. Leur portée permet également de viser des parties de bâtiments plus éloignées depuis un point de vue terrestre, notamment lorsqu'un recul important est rendu nécessaire.

Une faiblesse récurrente concernant les scanners à mesure par temps de vol reste leur imprécision potentielle. En effet, en raison du principe d'émission, la mesure du signal par les capteurs reste difficile, et la précision est donc relativement faible, de l'ordre de plusieurs millimètres. Par exemple, la précision des mesures peut être perdue quand le rayon frappe le bord d'un objet, et l'information renvoyée à l'appareil provient alors de deux endroits

différents pour une seule émission. Dans un tel cas, les coordonnées relatives à la position du scanner d'un point ayant frappé un bord seront calculées d'après une moyenne et sa localisation sera erronée.

3.1.2.2. Mesure par décalage de phase

Dans cette configuration, l'émission laser se fait en continu, à forte intensité, en ayant recours à une modulation sinusoïdale du signal en amplitude. De cette façon, la distance entre le point d'émission laser et la scène est déterminée par la comparaison des phases de l'onde émise et de l'onde retournée (cf figure 5b). Les scanners laser équipés de cette technologie sont principalement utilisés pour **la numérisation d'intérieurs de bâtiments, de façades, ainsi que de nombreux éléments structuraux ou architecturaux**. Cette méthode d'acquisition s'avère par ailleurs la plus rapide, et la précision des mesures est meilleure que celle obtenue par la méthode du temps de vol dans le cas de distances réduites. C'est pourquoi les scanners laser à décalage de phase sont les plus répandus et les plus utilisés dans les circonstances actuelles, de par leur grande polyvalence.

Les scanners à décalage de phase présentent donc des durées d'acquisition plus rapides et plus précises que les scanners laser à mesure par temps de vol, mais leur inconvénient reste la limitation de leur portée. Les erreurs de mesures, pertes de points lors du scan et écarts de coordonnées et localisation augmentent dans ce cas beaucoup plus rapidement.

D'autres technologies de mesure existent, telles que la mesure par triangulation optique, mais ne sont pas abordées ici car elles sont essentiellement destinées à la numérisation d'objets et éléments de taille réduite, avec des portées bien plus faibles. De même, les scanners mobiles (LiDar) ne sont pas non plus présentés car leurs usages ne correspondent pas aux mêmes besoins et critères.

3.1.3. Avantages et limites inhérents à la lasergrammétrie

Comme expliqué précédemment, les scanners laser terrestres sont devenus très performants et polyvalents, et permettent **d'obtenir directement des nuages de points précis et fiables**, même si ces paramètres sont influencés par les **caractéristiques de l'appareil utilisé et des paramètres intrinsèques aux scans** (résolution et qualité notamment). Les scanners laser constituent à présent des instruments relativement simples à mettre en œuvre, et les compétences nécessaires à leur bonne utilisation peuvent être acquises très rapidement, contrairement aux méthodes topographiques traditionnelles. Cela permet ainsi de se focaliser plus efficacement sur la phase de numérisation, et donc d'éviter et anticiper d'éventuelles erreurs avant la phase de traitement des données. Cela s'avère d'autant plus sensible dans le cas de structures complexes et des bâtiments patrimoniaux, où les sources d'erreurs sont potentiellement plus nombreuses.

De plus, contrairement à la prise de vue photographique, **la numérisation par scanner laser ne nécessite pas de conditions d'éclairage particulières**, puisqu'il est tout à fait possible d'effectuer des numérisations dans des environnements très sombres ou

poussiéreux tels que des caves, des grottes, des mines ou des tunnels, sans aucune perte de précision, mais sans informations de couleurs. Les scans obtenus par acquisition laser et les nuages de points générés par leur assemblage sont structurés, c'est-à dire que l'ensemble des points et leurs coordonnées respectives sont enregistrés à l'échelle réelle, et l'ensemble des informations obtenues lors des scans peuvent être intégrées dans les nuages de points résultants.

Des limites persistent cependant et ne peuvent pas encore être contournées : **le coût des appareils reste encore élevé**, malgré leur baisse régulière à chaque nouvelle génération d'appareils. Le poids et l'encombrement de certains appareils représente également un frein à leur utilisation, particulièrement dans le cas d'espaces intérieurs réduits ou de zones difficiles d'accès. **Les appareils les plus récents proposent cependant des améliorations en termes de compacité et de mise en station**, ce qui améliore nettement les possibilités d'utilisation et de transport. De plus, étant donné qu'il ne s'agit que d'appareils terrestres, certaines zones telles que des toitures, des détails architecturaux situés en hauteur, des murailles, etc, sont parfois impossibles à scanner correctement, ce qui engendre des occlusions, des trous ou des pertes de précision non négligeables sur les nuages de points.

L'une des solutions permettant de pallier à ce type de problème consiste à **combinaison des levés terrestres avec des acquisitions par photogrammétrie aérienne**. En effet, il n'existe pas à l'heure actuelle d'équivalent au scanner laser terrestre pouvant être directement monté et utilisé avec un drone, par exemple. De même, certains décors, objets ou éléments particuliers peuvent être scannés avec d'autres appareils dédiés tels que les scanners portatifs afin de compléter les nuages de points, ce qui engendre néanmoins des variations en termes de précision et de qualité dans de tels cas.

L'utilisation de différentes sources pour la numérisation et l'acquisition engendre néanmoins d'autres contraintes, avec la fusion des données et l'intégration complète ou partielle de l'ensemble des informations dans un même nuage de points (*assemblage de plusieurs nuages indépendants, récupération de meilleures informations colorimétriques, application de textures en haute qualité, etc*). L'utilisation conjointe de la lasergrammétrie sous différentes formes, ou avec des acquisitions par photogrammétrie doit donc toujours se montrer la plus rigoureuse afin d'éviter certains problèmes pouvant survenir en cas d'assemblage et fusion des données. Ces aspects seront abordés ultérieurement.

3.2. Numérisation et photogrammétrie

La photogrammétrie est une **technique relativement ancienne**, qui consiste à effectuer des mesures dans une scène, en utilisant la parallaxe obtenue entre des images acquises selon des points de vue différents. La technique a **considérablement évolué au fil du temps**, avec l'émergence de l'informatique, l'amélioration régulière des appareils ainsi que des processus de traitement des images. **La photogrammétrie a rapidement montré son potentiel pour la documentation architecturale**, en aidant notamment à la restitution datée des formes de structures, objets et bâtiments, à l'établissement de plans, la production de documents d'étude, etc. De nombreux travaux de documentation du patrimoine architectural ont ainsi pu être entrepris depuis de nombreuses années

C'est depuis les années 1990 et l'arrivée sur le marché des **appareils photos numériques** que la photogrammétrie a réellement pris son essor. Actuellement, la photogrammétrie exploite de plus en plus les **calculs de corrélation entre des images désormais numériques**. Cette technique repose entièrement sur une modélisation rigoureuse de la géométrie des images et de leur acquisition afin de reconstituer une copie 3D exacte de la réalité.

La photogrammétrie terrestre représente spécifiquement l'application des méthodes photogrammétriques à divers types de relevés : les **monuments et travaux d'architecture, la métrologie de pièces industrielles, ou encore la restitution d'objets archéologiques**, le tout uniquement à partir de prises de vues terrestres. Ces prises de vues sont désormais systématiquement numériques. De plus, la tendance récente à **l'utilisation croissante de logiciels libres**, combinée à **l'implantation et l'utilisation d'algorithmes et fonctions de traitement automatisées**, a particulièrement contribué à la démocratisation de la photogrammétrie, qui restait auparavant surtout utilisée par les spécialistes du domaine, notamment à cause de l'absence de logiciel de traitement dédié ou de méthode facilement accessible.

Ainsi, grâce aux progrès récents de l'informatique grand public, des logiciels de plus en plus accessibles et performants ont été développés, avec lesquels on parvient à effectuer la plupart des traitements photogrammétriques classiques à partir des images numériques obtenues. De cette façon, **les logiciels de traitement photogrammétriques actuels permettent de tenir compte des caractéristiques géométriques des appareils** (type d'objectif, distance focale...) pour le traitement des images, l'alignement et la génération de nuages de points. Tous les appareils photos permettent dorénavant de recourir à la photogrammétrie, y compris les caméras intégrées dans les smartphones, mais bien évidemment, toutes les caméras ne garantissent pas la même qualité d'image, ni même le stockage et la compression des informations obtenues.

3.2.1. Avantages et limites inhérents à la photogrammétrie

La calibration et la connaissance des paramètres internes des appareils et caméras ne représentent pas la finalité des travaux de photogrammétrie. Ces éléments permettent d'améliorer les rendus et les textures, mais la correspondance entre une image et son objet en 3D peut toujours être améliorée grâce aux rectifications géométriques apportées par les distorsions. La mise en relation de plusieurs images correctement orientées l'une par rapport à l'autre ainsi que l'identification d'éléments communs entre chaque image fournissent suffisamment d'équations pour créer des points en 3 dimensions, permettant dès lors la génération de nuages de points.

La photogrammétrie permet dès lors de **générer de façon quasiment automatique des nuages de points 3D en couleurs, mais non structurés** (contrairement à ceux générés par assemblage de scans terrestres). Cette technique s'avère donc tout à fait pertinente dans le contexte du relevé d'édifices remarquables, de structures et d'objets, et présente plusieurs avantages par rapport à la lasergrammétrie.

Tout d'abord, le **coût bien plus modéré du matériel** (*appareils photos et équipements complémentaires*) la rend beaucoup plus accessible, de même que la **simplification et l'automatisation des processus d'assemblage** et traitement dans les logiciels. De plus, étant donné la grande variété et la flexibilité du matériel photographique disponible ainsi que leur précision adaptable en fonction du contexte (*objectifs grand angle, téléobjectifs, drones, mâts, trépieds...*), **certaines situations se montrent plus favorables à l'utilisation de la photogrammétrie** en lieu et place de la lasergrammétrie (cf figures 6 et 7). Les phases d'acquisition s'avèrent également beaucoup plus rapides et les volumes de données à traiter (quantité d'images et taille des nuages de points) sont en général moins importants.



Figure 6: Schéma d'acquisition par photogrammétrie le long de façades d'un bâtiment [63]

L'utilisation de drones permet donc de constituer un **bon compromis** dans ces situations, particulièrement si les structures ou bâtiments à modéliser ne comportent que des parties extérieures, et où les acquisitions peuvent être réalisées en un ou plusieurs passages (cf figure 7). Dans le cas contraire, et à cause notamment des besoins en recouvrement et transitions entre intérieur et extérieur, la lasergrammétrie s'avère plus intéressante, mais nécessitera une rigueur accrue afin d'optimiser les stations et les recouvrements, limiter au maximum les occlusions, ce qui augmentera potentiellement les temps d'acquisition.

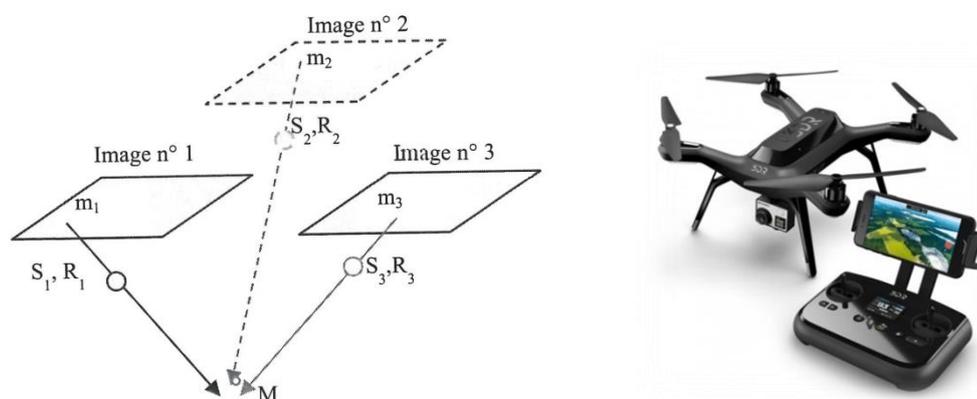


Figure 7 : Schéma d'acquisition par photogrammétrie aérienne et principe d'appariement des images [63]

Par ailleurs, il reste également possible de choisir les points que l'on souhaite mesurer dans les images avant traitement et génération du nuage de points. En effet, les points remarquables (angles, arrêtes, cible,...) peuvent être sélectionnés visuellement sur une image, permettant de définir des références, là où les points mesurés et acquis par un scanner laser sont systématiquement échantillonnés selon un pas régulier. De cette façon, la précision des assemblages peut être améliorée, notamment dans le cas d'objets de taille réduite ou de détails architecturaux particuliers.

En complément, dans le cas des édifices remarquables et du patrimoine historique, **la complexité des édifices rend parfois impossible, ou du moins difficile, une numérisation intégrale suffisamment exhaustive de l'ensemble des parties intérieures ou extérieures par lasergrammétrie**, et des compléments, voire une acquisition complète par photogrammétrie, s'avèrent alors indispensables si le but est de restituer l'ensemble des détails et éléments structurels et architecturaux. Dans de telles situations, **des compléments par photogrammétrie se montrent souvent les plus adaptés** car simples à mettre en œuvre et à intégrer avec les données déjà récoltées auparavant.

Cependant, certains éléments limitent là aussi les intérêts de la photogrammétrie : tout d'abord, **certaines surfaces et matériaux s'avèrent encore difficiles à traiter par les algorithmes** (*vitrages, surfaces blanches ou lisses...*), ce qui peut nuire fortement à la qualité des nuages de points. Les conditions environnementales revêtent également une grande importance, puisqu'un ensoleillement trop élevé, la pluie, ou des variations de contraste trop importantes peuvent affecter grandement la qualité des images et perturber les opérations de traitement, voire provoquer la génération de textures de mauvaise qualité. De plus, le temps de calcul requis pour le traitement des données, en particulier lors de la recherche de points homologues et l'appariement entre différentes images, peut requérir un certain temps et constituer un frein supplémentaire, surtout lorsque celles-ci s'avèrent nombreuses, contrairement à la détection de références (*naturelles ou artificielles*) entre différents scans. De plus, **les nuages de points résultants sont de type non-structuré et comportent moins d'informations que leurs équivalents issus de la lasergrammétrie** (*coordonnées complètes des points, distances et échelle réelle, etc*) ce qui nuit à leur utilisation dans certains cas.

La photogrammétrie requiert également un **mode opératoire très rigoureux**, et demande une meilleure expérience du terrain et des techniques de prise de vue à employer selon les circonstances, afin d'éviter tout manque de références ou recouvrement entre les images. C'est notamment en raison de limitation de ce type que cette technique est moins utilisée aujourd'hui pour des levés topographiques complets, qui ont surtout recours à la lasergrammétrie. Dans les milieux historiques et archéologiques, les deux techniques cohabitent en revanche puisqu'elles permettent de répondre à différents besoins selon les contextes.

3.3. Nuages de points et traitement des données

Les techniques de levés par lasergrammétrie et photogrammétrie permettent donc, une fois les données (scans ou images) récupérées et transférées vers des logiciels de traitement dédiés, la **génération de nuages de points intégralement en 3D**, pouvant se montrer **extrêmement précis et détaillés** si les circonstances l'exigent, et en fonction des besoins pour la restitution et le post-traitement. Dans notre cas, les logiciels *SCENE* [64], *ReCap Pro* [65] et *Photoscan* [66] ont servi de base de travail.

Cependant, bien que les nuages de points proposent des restitutions sous forme de visualisations parfois spectaculaires et très complètes de bâtiments et structures, ils s'avèrent en contrepartie **lourds et volumineux en termes de taille et de quantité de données**, en particulier dans le cas du patrimoine architectural, restreignant alors les possibilités ultérieures d'utilisation telles que la modélisation géométrique 3D, y compris si l'utilisateur dispose de machines puissantes et performantes. **Des opérations complémentaires se montrent quasi-systématiquement nécessaires** afin d'exploiter efficacement toutes les informations contenues dans les nuages de points.

Dans tous les cas, les nuages de points bruts ne présentent pas d'intérêt réel sans phase de post-traitement des données, afin de diminuer le nombre de points les constituant, isoler ou segmenter des éléments précis, réduire leur taille, filtrer des points aberrants et autres artefacts résiduels, modifier l'équilibrage des couleurs, etc. Dans l'optique de la construction de géométries à partir des nuages de points, les nuages sources doivent contenir les informations nécessaires (nombre de points, précision, densité, etc) pour les travaux et méthodes de modélisation appliquées. Par exemple, la construction de géométries destinées à la simulation et l'analyse structurale ne requiert pas autant d'informations et de précisions à partir du nuage de points que dans le cas de géométries destinées à une restitution historique ou architecturale détaillée, où la densité, le nombre et la qualité des détails sera nécessairement plus élevé, afin de garantir une rigueur et précision la plus exacte possible.

3.3.1. Fusion de données hétérogènes

Les acquisitions et numérisations réalisées par lasergrammétrie ou photogrammétrie fournissent tout un ensemble de données qui, une fois assemblées correctement en ayant recours aux différentes méthodes algorithmiques proposées par les différents logiciels, permettent d'obtenir des représentations plus ou moins complètes des structures ou scènes étudiées. Cependant, comme évoqué précédemment, **des disparités au niveau des assemblages et des variations de densité des points peuvent survenir** dans le cas de nuages de points générés à partir de la lasergrammétrie. Ces problèmes peuvent survenir notamment en cas de **variation des paramètres utilisés** entre chaque station de scan. Les transitions entre intérieurs et extérieurs, voire entre des espaces intérieurs présentant des variations significatives (dimensions, accessibilité, etc) sont particulièrement susceptibles d'engendrer de tels effets pouvant devenir des défauts gênants.

De plus, dans le cas où plusieurs nuages de points différents décrivant la même scène (l'un issu de la lasergrammétrie, l'autre de la photogrammétrie, par exemple) doivent être assemblés, le problème de l'écart entre l'origine différente des données ainsi que la nécessité d'adaptation de l'échelle des nuages de points issus de la photogrammétrie survient également. Dans de telles situations, la fusion des données peut créer de nouveaux problèmes qu'il devient dès lors nécessaire d'anticiper en amont.

Une solution alternative pour améliorer et optimiser le processus de fusion de données consiste notamment à faire preuve de la plus grande rigueur lors de l'acquisition, en ayant préalablement identifié les principales sources d'erreurs et de limitation potentielles. Ainsi **la photogrammétrie se montre mieux adaptée dans le cas d'extérieurs de bâtiments et monuments**. En effet, il est dans cette configuration tout à fait possible de **combinaison judicieusement des images issues d'une acquisition terrestre et celles obtenues à l'aide d'un drone**, surtout s'il n'y a pas de modification de paramètres ou de qualité (avec des paramètres identiques pour la prise de vues) puisque la retranscription de la grande majorité des détails est plus aisée à intégrer par rapport aux modèles issus de la lasergrammétrie. Les nuages de points issus de la lasergrammétrie se montrent plus lourds en termes de volumes et de données, et nécessitent un temps d'acquisition plus important puisqu'un grand nombre de station est requis pour être le plus exhaustif possible. Le problème des parties hautes de bâtiments, inaccessibles ou masquées depuis le sol (clochers, toitures, etc) persiste également, mais une fusion avec des nuages de points obtenus par acquisition aérienne permet dans la majeure partie des cas de compléter efficacement les nuages de points finaux et ainsi remédier à la situation.

La problématique de la fusion de données 3D est connue et a déjà été beaucoup traitée dans le cas d'objets et de structures simples, mais constitue toujours un verrou scientifique dans le cas de structures complexes formées de nuages de points assez volumineux. L'application d'algorithmes spécifiques plus complexes (*Iterative Closest Points, méthode des moindres carrés...*) permet parfois de remédier à cette problématique, mais nécessite alors une grande rigueur et contrôle des résultats de fusion, en raison notamment des variations de résolution entre les nuages de points. De plus, tous les outils et options ne sont pas systématiquement disponibles ou implémentés dans les différentes solutions logicielles existantes (*libres ou propriétaires*).

Dans certains cas, des assemblages manuels progressifs peuvent suffire, si les densités des nuages sont similaires ou si des points de contrôle se montrent aisément identifiables. Dans le cas des **nuages de points issus de la photogrammétrie, le problème de la mise à l'échelle** peut également survenir si des informations de distances ou angles ne sont pas intégrées lors de la génération de ces nuages de points. Une fusion n'est alors pas possible tant que les nuages concernés n'ont pas été correctement redimensionnés ou recréés.

La fusion de données devrait ainsi être réservée de préférence à certains cas particuliers, par exemple si les nuages de points à fusionner ne comportent que peu de parties communes, permettant ainsi de limiter les erreurs de recouvrement et de bruitage des zones concernées. Il est également possible de gérer les écarts entre les différents nuages en traitant les variations de densités dans les zones de recouvrement par des procédés de ré-échantillonnage régulier. Cependant, l'apparition de nouveaux matériels tels que des scanners lasers portatifs dédiés spécialement aux numérisations et acquisition en intérieur permet de remédier davantage à la technique de la lasergrammétrie et ainsi limiter

les usages de la photogrammétrie pour la fusion de données dans le cadre de travaux aériens.

Dès lors, les raisons menant à retravailler les nuages de points sont variées : on peut citer notamment les **irrégularités et variations de densité des points** dans certaines zones, une **mauvaise adéquation entre la densité des points et la géométrie des objets**, ou encore la **nécessité de disposer**, dans certaines situations, **de données allégées** (*simplification des visualisations, extraction d'éléments spécifiques, aides pour la modélisation...*).

Plusieurs types d'opérations peuvent être effectuées selon les besoins requis : le **sous-échantillonnage** permettant d'extraire un sous-ensemble de points depuis un nuage initial, le **ré-échantillonnage** permettant de créer de nouveaux points à partir des points du nuage initial, ou encore la **compression**, visant à diminuer le volume des données tout en gérant les pertes d'informations. Bien évidemment, le cas des patrimoines bâtis nécessite de façon quasi-obligatoire le recours à de telles phases de traitement afin d'améliorer la gestion des données, puisque les volumes de données peuvent rapidement devenir très élevés et ralentir considérablement leur exploitation.

Dans le cadre de nos travaux et de la chaîne de numérisation mise en place et proposée, le logiciel utilisé pour le post-traitement de nuages de points a été le logiciel *3DReshaper* [70], permettant dans notre cas de répondre à de nombreux besoins en détection d'éléments, nettoyage, filtrage, modélisation 3D et exportation des données.

Parmi ses nombreuses fonctions, ce logiciel permet d'effectuer des traitements complémentaires sur les nuages de points, construire des maillages surfaciques par interpolation de points, appliquer des textures (si celles-ci sont présentes) depuis les nuages de points vers les maillages, traiter et gérer des éléments de surfaces pour la modélisation, ou encore calculer des volumes 3D, etc

Dans le cadre des études effectuées, l'une des étapes essentielles du post-traitement des nuages de points restait **l'application systématique de filtres de traitement et de réduction par sous-échantillonnage des nuages de points**, en particulier en vue de leur exploitation pour diverses modélisations 3D, quel que soit leur type.

De plus, les nuages de points issus de la lasergrammétrie comportant moult informations, l'application de filtres permettant de réduire le nombre de points s'avère nécessaire afin d'obtenir différentes versions des nuages pouvant être exploitées correctement, selon les besoins et les circonstances. Dans tous les cas, le choix du ou des filtre(s) à appliquer s'avère important, car les résultats obtenus en sortie engendrent des variations significatives dans les nuages filtrés, que ce soit en terme de qualité globale ou du nombre de points restants.

3.3.2. Opérations de filtrage et améliorations des nuages de points

Le nettoyage des nuages de points doit être effectué de façon à **supprimer les points pollués et aberrants**, et limiter l'influence du bruitage des mesures [67]. En effet, lors de la phase de numérisation, certaines surfaces comme les vitrages ou des murs de couleur très

claire peuvent influencer sur la réflectance et la précision des points [11]. Dans de tels cas, l'erreur de mesure est augmentée car la qualité du signal retourné à l'appareil est faible, et les points mesurés sont alors incertains et moins précis. De plus, en raison du diamètre du rayon laser, la présence de faux signal reste toujours possible, notamment au niveau du recouvrement de surfaces distinctes. Ce bruit inhérent aux mesures peut ajouter des fausses couches d'épaisseur là où il n'y en a pas, et qu'il faut donc éliminer au moyen de différents filtres. Par ailleurs, le bruit dû à des perturbations externes comme le passage de personnes, de véhicules, ou tout autre élément, engendre des artefacts polluant les nuages de points et doit également être filtré et nettoyé, de façon manuelle ou automatique.

Différents filtres présentant un intérêt particulier pour le post-traitement des nuages de points permettent d'aboutir à différents types de résultats et ainsi alléger le nuage de point sans perdre d'informations utiles :

- **Réduction du bruit** : L'objectif ici est de supprimer les points disparates du nuage (points trop éloignés, artefacts résiduels, erreurs de mesures, points mal disposés, etc) [68]. Les points concernés sont affichés en surbrillance dans une couleur différente. Ce filtre n'est cependant efficace que dans le cas où les points du nuage présentent une densité régulière.
- **Explosion avec un critère de distance** : Le nuage de points principal est séparé en nuages plus petits et isolés par rapport au nuage principal. La distance fixée correspond à la distance minimale entre les sous-nuages [69]. Ce filtre peut être utilisé de façon itérative pour séparer davantage les sous-nuages restants. L'ensemble des sous-nuages générés sont intégrés pour former le nuage de points réduit.
- **Garder un certain nombre de points** : Le nombre de points compris dans le nuage est réduit selon une valeur fixe ou un pourcentage défini par l'utilisateur. Les points détruits sont ceux situés dans les zones où la densité est élevée. Plus de points sont donc retirés dans les zones où leur concentration est forte, et peu de points sont retirés dans les zones où ceux-ci sont peu nombreux et disparates [70].
- **Garder des points uniformément espacés** : L'objectif est de conserver des meilleurs points régulièrement espacés. La distance moyenne entre les points (fixée et définie en entrée) donne la taille de la grille qui est projetée sur le nuage de points [69]. Un meilleur point est ensuite qualifié ou calculé dans chaque cellule de la grille, en prenant en compte tous les points situés dans cette cellule. Si la densité des points est trop faible, la taille des cellules est automatiquement accrue (le maximum étant fixé selon une valeur d'espacement définie également en entrée)

3.3.3. Cas d'études et supports de numérisation

Comme abordé en introduction, plusieurs cas d'étude ont été traités pour l'application de la chaîne de numérisation proposée et mise en place dans le cadre de nos travaux. Ces cas d'étude ayant servi de support sont la *flèche de la cathédrale de Senlis* (Oise), le *château de Coucy* (Aisne) et le *site de l'Hermitage* (Oise).

3.3.3.1. *La cathédrale de Senlis*

La cathédrale de Senlis, située dans le sud-est du département de l'Oise (60), est une cathédrale gothique classée au titre des monuments historiques depuis 1840, et constitue l'un des principaux symboles de la ville. Sa construction a débuté au XII^{ème} siècle, en 1151. Sa flèche, culminant à 78 m de hauteur et située sur la tour sud, a été érigée au cours du XIII^{ème} siècle, vers 1240. D'autres travaux de construction et de réaménagement ont également eu lieu durant les XIV^{ème} et XV^{ème} siècles. Cette structure s'avère ainsi remarquable à plus d'un titre : il s'agit d'abord d'un chef d'œuvre d'architecture gothique et de conception structurale. La flèche de cette cathédrale est l'une des rares de cette époque ayant traversé les siècles en restant à peu près intacte (cf figure 8).

Construit sur la base carrée de la tour, le clocher présente deux niveaux visibles de l'extérieur, un premier niveau octogonal de 14 m de hauteur surmonté d'un second niveau de forme pyramidale de 26 m supportant la charpente et la toiture. Cette conception lui confère ainsi une allure élancée et esthétique et est aussi, de façon probable, à l'origine de sa solidité. Néanmoins, la conservation de la flèche résulte aussi de nombreuses campagnes de restaurations importantes ou ponctuelles au cours des siècles, qui ont permis sa consolidation et sa préservation.

En effet, très sollicitée par l'action du vent en raison de sa hauteur, par la foudre, ou encore les infiltrations d'eau, la flèche a en outre subi de graves dommages lors d'un incendie survenu en 1504 et lors de conflits comme en 1914, affectant l'intégrité du monument, et nécessitant alors des restaurations d'envergure. Ainsi, les derniers grands travaux de restauration ont eu lieu en 1986 pour le chœur et la nef de la cathédrale, et en 1993 pour la flèche.

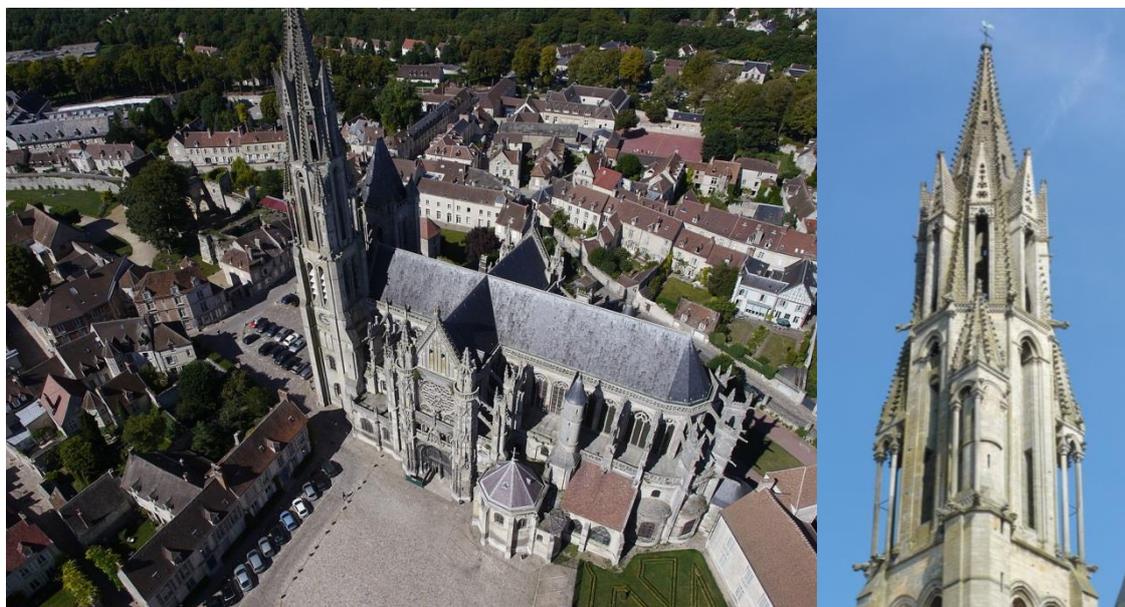




Figure 8 : Vue aérienne de la cathédrale, façade principale et détails sur la flèche

Dans le cadre du projet *Modélisation de Senlis* [71], une **campagne de numérisation de la flèche** de la cathédrale de Senlis a été effectuée au printemps 2015 à l'aide d'un **scanner laser terrestre** FARO Focus X330. 25 stations ont été requises pour scanner les parties extérieures sud et ouest de la flèche, ainsi que 28 stations pour les parties extérieures nord et est de la flèche, ainsi que la partie intérieure.

Une fois l'assemblage de l'ensemble des scans effectués à l'aide du logiciel *SCENE* [64], différentes étapes de traitement ont été appliquées sur l'ensemble des scans :

- **opérations de pré-traitement** (colorisation, détection de références naturelles ou artificielles entre autres) ;
- **nettoyage automatisé** pour suppression de points et artefacts aberrants ;
- **assemblage des scans** par recalage utilisant l'algorithme ICP (*Iterative Closest Points*).

Un nuage de points complet de la flèche de la cathédrale représentant l'ensemble des détails structuraux et architecturaux de l'édifice a de cette façon été généré (cf figures 9 et 10). Des sphères ont été utilisées lors de l'acquisition afin d'améliorer la qualité et la précision des enregistrements. Certains détails n'ont cependant pas pu être numérisés correctement en raison des occlusions et masques dus à l'acquisition terrestre, plus particulièrement au niveau des toitures. D'autres campagnes de numérisations ont par la suite été menées en 2016 et 2017 afin de numériser la structure interne et externe de la cathédrale (chœur, nef, étages sous clocher, travées, etc) et compléter certaines zones et détails structuraux et architecturaux manquants. Un nuage de points complet de la cathédrale a ainsi été généré avec des objectifs divers : la restitution détaillée de certains éléments architecturaux ainsi que la création d'orthophotos, coupes et élévations les plus complètes possibles.

Après une inspection rigoureuse et une comparaison avec les plans et dessins architecturaux existants, la qualité et l'exactitude du nuage de points ont été validées. Les erreurs d'enregistrement du nuage de points sont inférieures à 4 mm, en fonction des paramètres d'enregistrement et des conditions de validation imposées.



Figure 9 : Nuage de points complet de la cathédrale

Ce nuage de points a ensuite été exporté dans des formats interopérables (de type .e57 ou ascii). Cependant, ce nuage de points se montrait trop lourd et gourmand en ressources pour être exploité correctement, car le nombre de points initial s'élevait à 839 millions avant des opérations de nettoyage et traitements complémentaires. En conséquence, une première étape des travaux a consisté, par l'intermédiaire du logiciel *3D Reshaper* [72], à **appliquer des filtres de post-traitement visant à réduire le nombre de points du nuage**. Après application de la procédure de filtrage par **conservation de points uniformément espacés**, différentes versions du nuage de points pouvant être exploitées indépendamment, selon les besoins et les circonstances ont pu être proposées pour leur exploitation.

Dans le cas du nuage de points filtré et conservé pour les travaux ultérieurs de modélisation 3D, le filtrage de points uniformément espacés a ainsi servi à **conserver des points uniformément espacés tous les 2 cm** (la distance maximale entre les points étant fixée à 4 cm). Le processus d'échantillonnage des données sélectionné et appliqué utilise une approche de décimation basée sur le processus du *voxel clustering*. Ce type d'approche nécessite un paramétrage rigoureux des critères appliqués pour le filtrage. En effet, des paramètres mal adaptés (comme par exemple, un espacement des points trop élevé) pourraient éliminer des détails importants du nuage de points car le filtrage est basé sur un sous-échantillonnage régulier des points plutôt que sur une décimation adaptative basée sur les formes antérieures. Le nombre de points du nuage après filtrage et réduction s'élevait alors à 9 248 000 points, fournissant donc un nuage pleinement exploitable dans la perspective de construction d'un modèle géométrique 3D, présentant un bon compromis entre qualité et précision de la représentation, nombre de points et taille de fichier (voir tableau 1).



Figure 10 : Nuage de points de la flèche avant traitement, et détail en pied de colonne

Paramètres de filtrage	Distance maximale entre les points	Nombre de points final
Points uniformément espacés (20 cm)	40 cm	93 000
Points uniformément espacés (10 cm)	20 cm	385 000
Points uniformément espacés (5 cm)	10 cm	1 568 000
Points uniformément espacés (2 cm)	4 cm	9 248 000
Points uniformément espacés (1cm)	3 cm	30 813 000
Points uniformément espacés (0.8cm)	2 cm	44 144 000

Tableau 1: Nuages de points résultants après opérations de filtrage

D'autres opérations complémentaires ont été requises pour améliorer davantage l'exploitation du nuage de points retenu. Un nettoyage des points, par suppression manuelle des artefacts et points aberrants résiduels a ensuite été effectué, permettant d'améliorer la qualité et la consistance globale du nuage. Le nombre de points après nettoyage utilisé pour les applications de modélisation 3D ultérieures s'élevait ainsi à 9 197 000 points soit 1% de la taille totale du nuage initial (cf figure 11). Les données restantes sont plus que suffisantes pour l'extraction de données et la modélisation géométrique 3D, puisque tous les éléments structuraux restent entièrement utilisables dans le nuage de points.



Figure 11 : Nuage de points final après traitements, nettoyage et filtrage, et détail en pied de colonne

Le château de Coucy est un ancien château fort, principalement construit à partir du XIII^{ème} siècle, dont les vestiges se dressent sur la commune de Coucy-le-Château-Auffrique, au nord de Soissons, dans le département de l'Aisne (02). Le site reste célèbre dans l'histoire de France car il représente un symbole des destructions et des conséquences de la Première guerre Mondiale en Picardie.

Un premier château a été construit vers 920 par ordre d'Hervé, archevêque de Reims. L'objectif initial de cet endroit, occupant une position stratégique au sommet d'une colline, était la protection du territoire de Coucy contre les invasions. Une forteresse a ensuite été aménagée et organisée au cours du XIII^{ème} siècle par Enguerrand III, Seigneur de Coucy, afin de devenir un château médiéval complet. Le site forme un trapèze irrégulier de 92x35x50x80m et domine la vallée de la rivière Ailette. À chacun des quatre coins de la cour supérieure, des tours cylindriques d'un diamètre de 20m chacune ont été construites. Située à proximité de l'entrée de la cour principale, le donjon était le plus grand et le plus haut

d'Europe, mesurant 35m de large et 55m de haut. Le reste du site est couvert par la basse-cour du château et la ville haute.

Le château a connu une histoire difficile au cours des siècles, alternant des périodes de constructions, de destructions et de restauration, jusqu'à son état actuel. Vers 1540, lors d'une nouvelle période de construction, les fortifications ont été modernisées pour les adapter à l'artillerie et une nouvelle demeure de la Renaissance a été construite dans le château par le roi François Ier. En 1652, pendant la période de trouble politique connue sous le nom de Fronde, le gouverneur du duc d'Orléans refusait de donner le château aux troupes royales. L'endroit s'est rendu après un siège de trois mois. À ce stade, le cardinal Mazarin a décidé le démantèlement de la forteresse, puisqu'elle était devenue une menace pour le pouvoir du roi. En conséquence, les principales structures du site ont été détruites sous la supervision de l'ingénieur Métezeau, rendant le château militairement inutilisable.

Après cet épisode, le château a été laissé à l'abandon. Il est même devenu une prison en 1789, pendant la Révolution française, et a finalement été converti en une carrière de pierre jusqu'en 1829, date à laquelle le roi Louis-Philippe l'a fait racheter, en le préservant ainsi de la destruction totale. Jusqu'au début du XX^{ème} siècle, plusieurs architectes sont intervenus pour restaurer les ruines. En 1856, le château est devenu définitivement propriété du gouvernement, et le donjon, endommagé par un tremblement de terre en 1692, a connu des renforcements dirigés par l'architecte Viollet-le-Duc. Malheureusement, au contraire d'autres villes ou châteaux français célèbres, il n'y avait pas de projet pour reconstruire le château de Coucy et restaurer sa grandeur passée. Cependant, les ruines, et surtout le donjon, sont devenus un site touristique très populaire à la fin du XIX^{ème} siècle.

Le dernier événement majeur qui s'est produit dans l'histoire du site de Coucy a eu lieu pendant la Première Guerre mondiale. En raison de sa position stratégique, le château a été occupé en septembre 1914 par des troupes allemandes et est devenu un avant-poste militaire. En mars 1917, en raison de la retraite de l'armée allemande, le donjon et les quatre tours ont été détruits par vingt-huit tonnes d'explosifs, en particulier pour empêcher leur utilisation par des observateurs d'artillerie ennemis. La destruction a causé tant d'indignation publique qu'en avril 1917, les ruines ont été déclarées « mémorial à la barbarie ». Les réparations de guerre ont été utilisées pour nettoyer les tours et pour consolider les murs, mais les ruines du donjon ont été laissées en place. Depuis, des travaux ont été réalisés afin de protéger et de sécuriser les ruines, créer des expositions spécifiques à destination du grand public et surtout, rassembler les ruines du donjon, même si aucun projet de reconstruction n'est à l'ordre du jour.

Dans le cadre de nos travaux et du projet *IDEM3D* (Intégration de Données hétérogènes pour la Modélisation et la restitution 3D de l'inexistant), une campagne de numérisation du site a été réalisée au printemps 2016 [73]. **L'intégralité de la zone de la haute cour a ainsi été scannée à l'aide d'un scanner laser terrestre FARO Focus X330**, grâce à un total de 115 scans réalisés, englobant les parties intérieures et extérieures du site. Tous les scans ont été réalisés avec des paramètres variables selon les circonstances et les zones d'acquisition (espaces intérieurs des ruines, intérieur de la cour, extérieur des murailles, etc). Comme dans le cas d'étude précédent, **différentes étapes de traitement ont été appliquées sur l'ensemble des scans** (opérations de pré-traitement, nettoyage automatisé pour suppression de points et artefacts aberrants, assemblage des scans par recalage utilisant

l'algorithme ICP), ce qui a permis d'aboutir à la génération d'un nuage de points complet du site comportant pas moins de 900 millions de points avant post-traitement (cf figure 12).

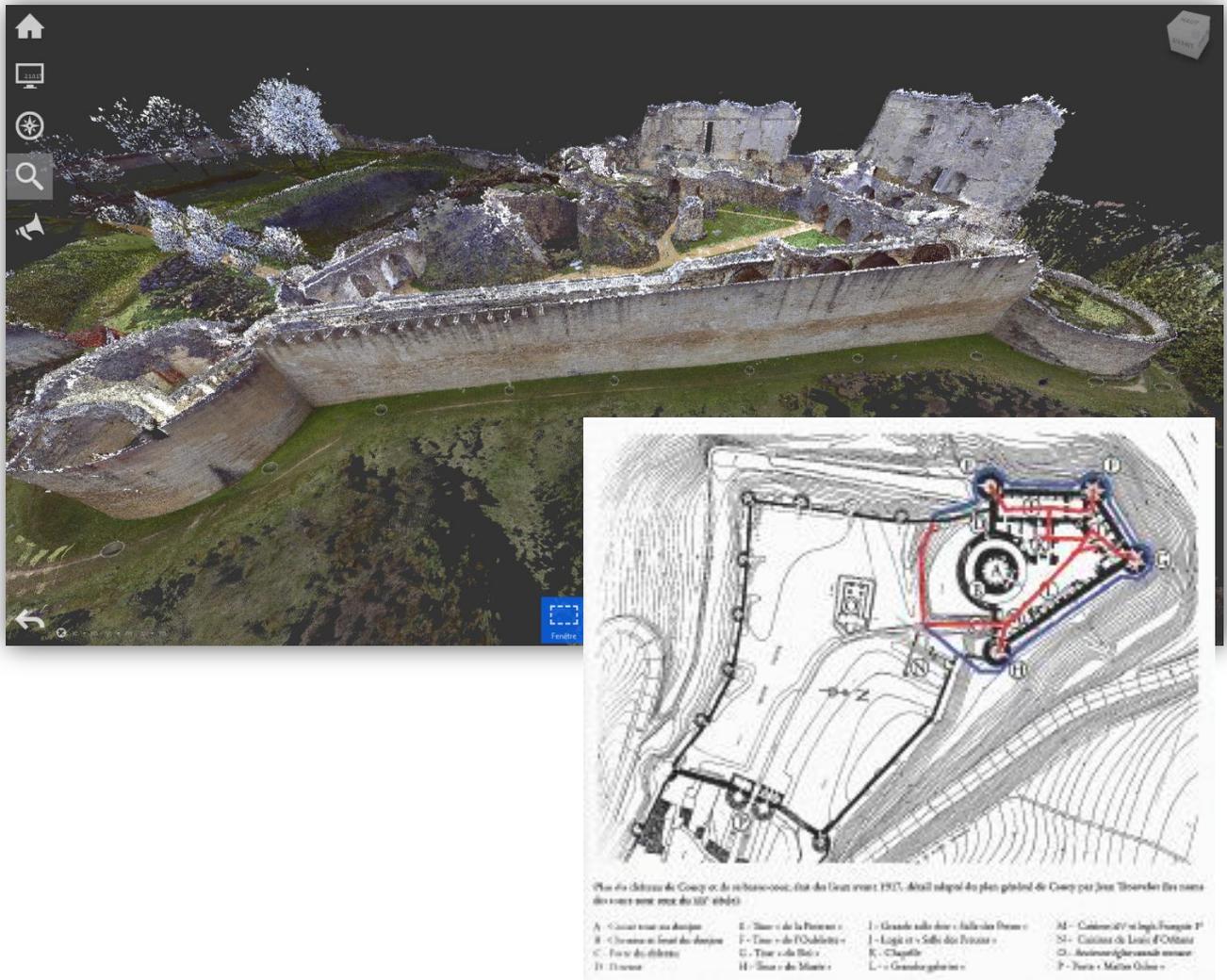


Figure 12 : Nuage de points issu de la lasergrammétrie et cheminement des stations de scans effectuées

Par ailleurs, un second nuage de points du site a été construit à partir **d'images issues d'une campagne d'acquisition par photogrammétrie aérienne**, réalisée à l'aide d'un drone. Ces photographies ont été prises initialement dans le cadre d'une analyse préventive de l'état des arases supérieures des murailles, inaccessibles depuis un point de vue terrestre, pour une étude sur leur conservation. Au total, pas moins de 271 images ont été utilisées dans le logiciel *Photoscan* afin de construire un nuage de points du site ne comportant cette fois-ci que 60 millions de points (cf figure 13).



Figure 13 : Nuage de points issu de la photogrammétrie

Les deux nuages de points obtenus par lasergrammétrie et photogrammétrie ont ensuite été importés sur le logiciel *CloudCompare* [74], afin de recaler à bonne échelle le nuage de points issu de la photogrammétrie car ce dernier n'était pas géoréférencé ni structuré, et sa qualité ni sa précision ne pouvaient pas être déterminés correctement. Le nuage de points issu de la lasergrammétrie a servi de référence pour la mise à l'échelle et les différents tests de fusion de données effectués (cf figure 14).



Figure 14 : Nuage de points final après fusion et nettoyage

Ce travail de fusion de données présente une grande utilité, notamment pour la combinaison et l'assemblage du nuage de points obtenu par photogrammétrie. En effet, lors de la campagne de lasergrammétrie terrestre effectuée, de nombreuses données n'ont pas pu être acquises par le scanner laser, principalement au niveau des parties supérieures des murailles et des tours, et ce pour la simple raison qu'aucune station n'a pu être implantée en hauteur à cause des trop fortes contraintes d'accessibilité. Cependant, les photos prises depuis le drone ayant permis la génération d'un nuage de points comportant ces données manquantes ont fourni ces informations. Ainsi, la fusion des nuages engendre la restitution

d'un nuage de points quasiment complet du château de Coucy, améliorant sensiblement son intérêt pour l'ensemble des opérations ultérieures. Ces opérations de fusion de données ont été réalisées dans le cadre du projet IDEM3D.

3.3.3.3. Le site de l'Hermitage

L'Hermitage est une propriété de 30 hectares, située sur les hauteurs de la commune d'Autrêches, dans l'Oise (60), à mi-chemin entre Compiègne et Soissons. De la même façon que le site de Coucy, le terrain aux alentours de la commune a été le théâtre de combats, car situé en plein sur la ligne de front, durant la Première Guerre mondiale. Le terrain actuel et la topographie des alentours sont d'ailleurs encore ponctués de trous et marques laissés par les chutes d'obus, et strié des galeries souterraines utilisées par les soldats allemands. Durant les années 1940, un poulailler industriel s'est installé sur le site, puis les bâtiments furent rachetés dans les années 1950 par une association de traitement de lépreux, qui souhaitaient alors y vivre en autonomie. L'Hermitage fut aussi, jusqu'à récemment, le siège d'une ONG, le Centre International de Développement et de Recherche (CIDR). Plusieurs ensembles composent ce site : la «grande bâtisse», ses dépendances formés de bureaux, une écurie, des chalets, mais également des terres cultivables et une parcelle forestière.

Dans le cadre de nos travaux, **plusieurs campagnes de numérisation par lasergrammétrie** ont été effectuées en 2017 et au printemps 2018. Ces différentes sessions d'acquisition ont permis d'acquérir par lasergrammétrie, l'ensemble des façades extérieures et les espaces intérieurs des bâtiments concernés (grande bâtisse, maison du plateau, chalets et bureaux). Les formes géométriques globalement simples des bâtiments numérisés dans ce contexte ont par ailleurs contribué à la **simplification des étapes de numérisation, puis de traitement et assemblage des scans** via le logiciel *ReCap*, la génération des nuages de points correspondants ainsi que les **opérations de filtrage en post-traitement** avec le logiciel *3DReshaper* (nettoyage de points manuellement ou automatisée, conservation de points uniformément espacés, etc, afin de réduire la taille des nuages de points et optimiser ainsi les quantités de points) telles que décrites précédemment. (cf figures 15 à 19).

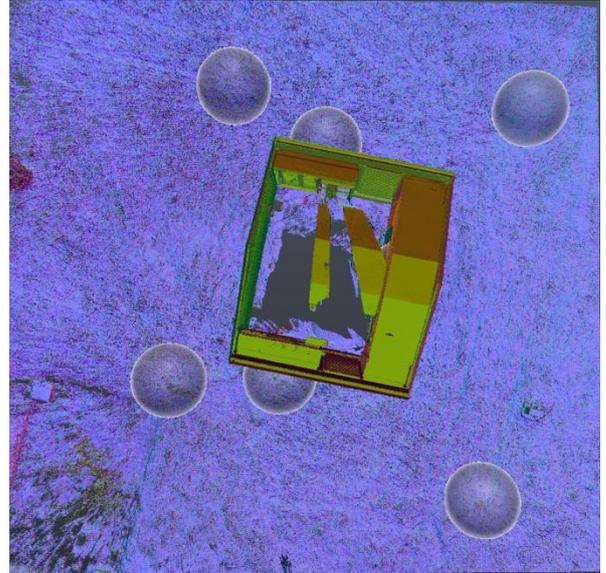
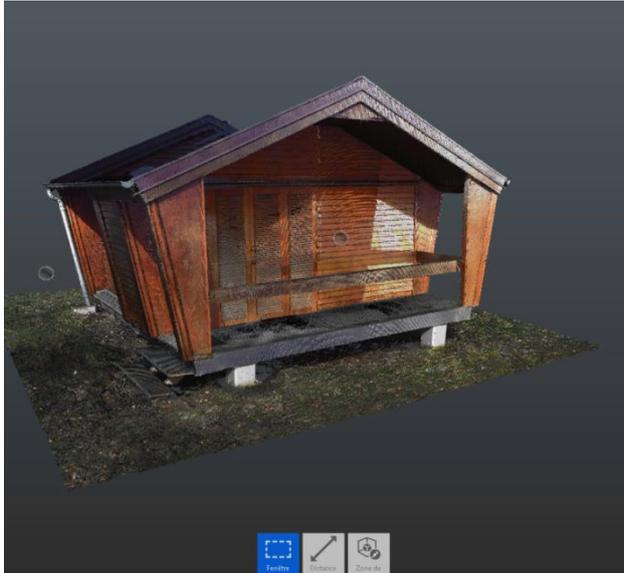


Figure 15 : Nuage de point d'un chalet (à gauche) et localisation des positions de scans (à droite)

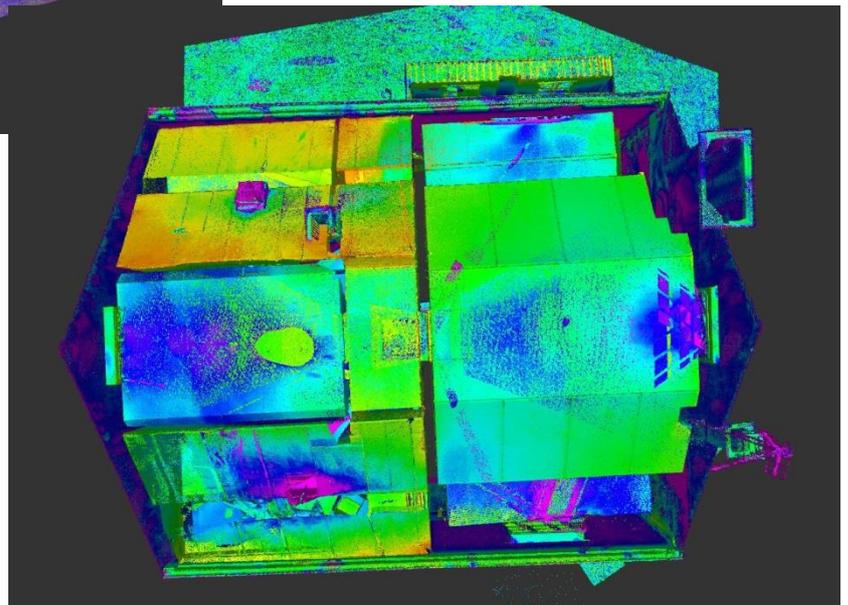
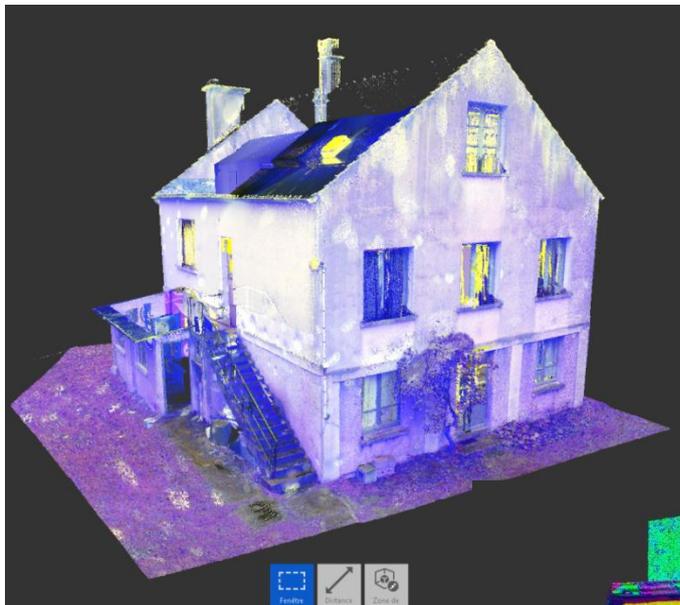


Figure 16 : Nuage de points de la maison du plateau après assemblage et filtrage des points (à gauche) et affichage des intensités des points selon les positions de scans (à droite)

Certains bâtiments tels que la grande bâtisse se sont avérés particulièrement longs à scanner et numériser en raison du nombre élevé de pièces et d'espaces intérieurs, nécessitant de nombreuses stations. Ainsi, pas moins de 190 scans ont été nécessaires afin de numériser l'ensemble des espaces intérieurs et extérieurs, aboutissant à un nuage de points très dense et complet. Seules les toitures étaient ainsi manquantes en raison de l'impossibilité de les numériser depuis un point de vue terrestre. Après assemblage des espaces intérieurs et des façades extérieures, réalisés à l'aide du logiciel *ReCap*, les nuages de points ont dû subir différentes étapes de nettoyage manuel ou automatisé ainsi que des opérations de filtrage des points afin de diminuer le nombre de points et réduire la taille des nuages de points finaux servant de base pour exploitation, analyse et modélisation géométrique 3D. (cf figures 17 à 19).

En appliquant un filtrage de points uniformément espacés avec des points tous les 2 cm, le nuage de points final de la grande bâtisse comporte ainsi 23,8 millions de points. La densité de points homogène représente dans ce cas un avantage particulier pour l'exploitation et la modélisation puisque tous les détails sont représentés dans le nuage de points, sans avoir besoin de recourir à des changements dans la qualité des scans et de la hausse des paramètres de qualité ou résolution.

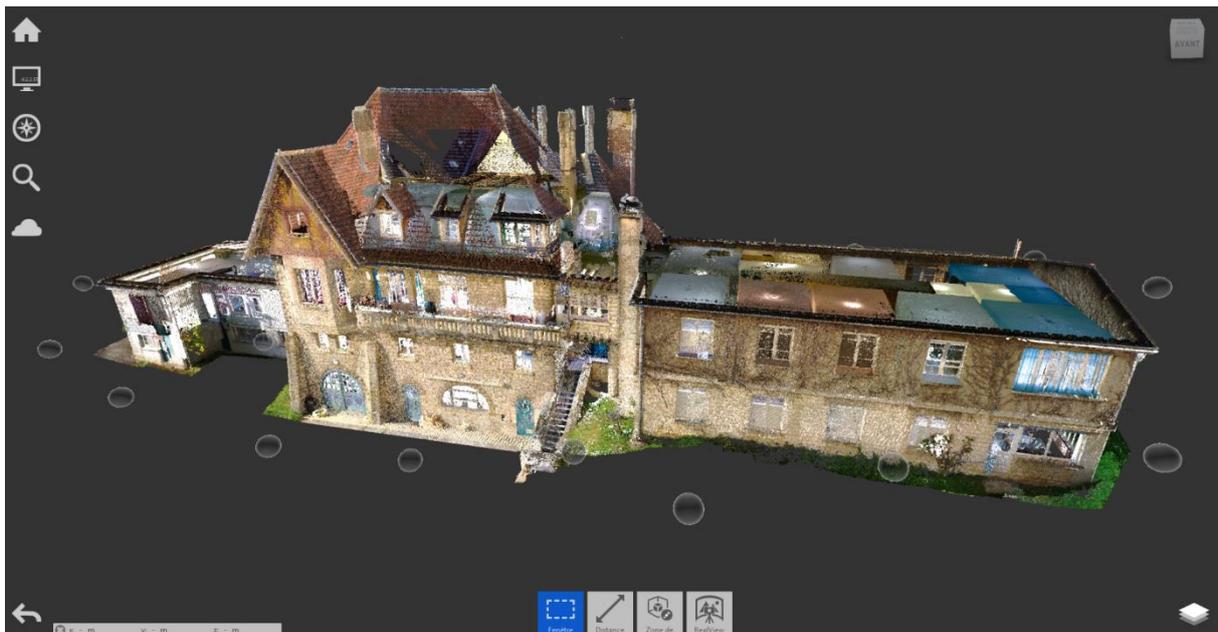


Figure 17 : Nuage de points de la grande bâtisse (façade Sud-Est) après assemblage des espaces intérieurs et des extérieurs

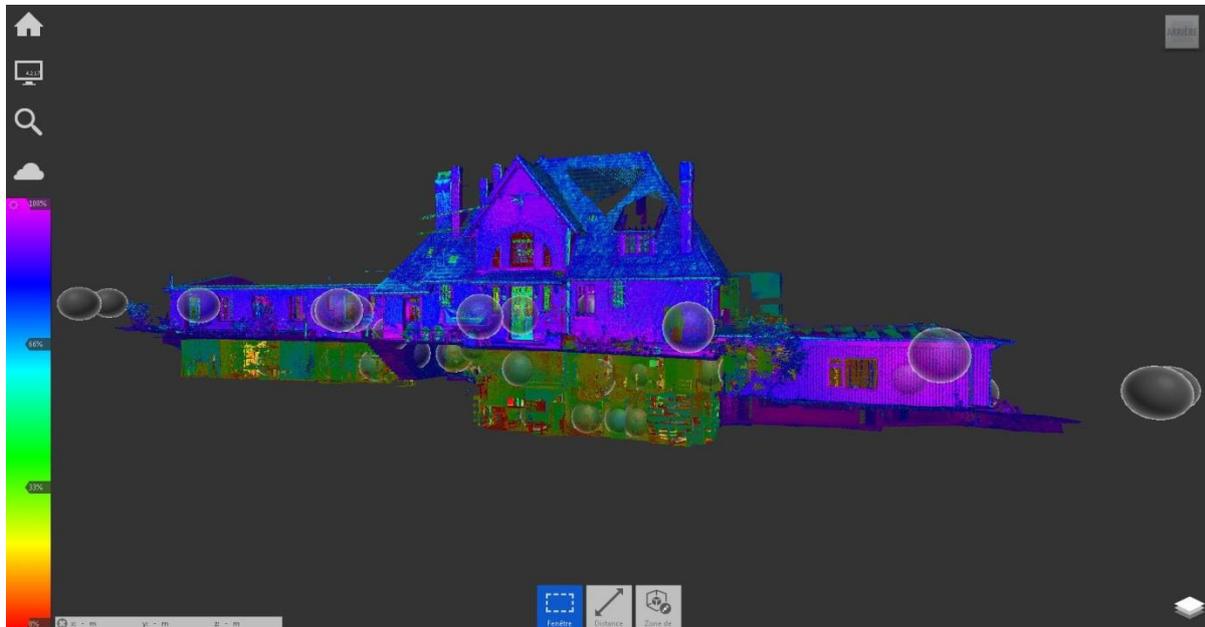
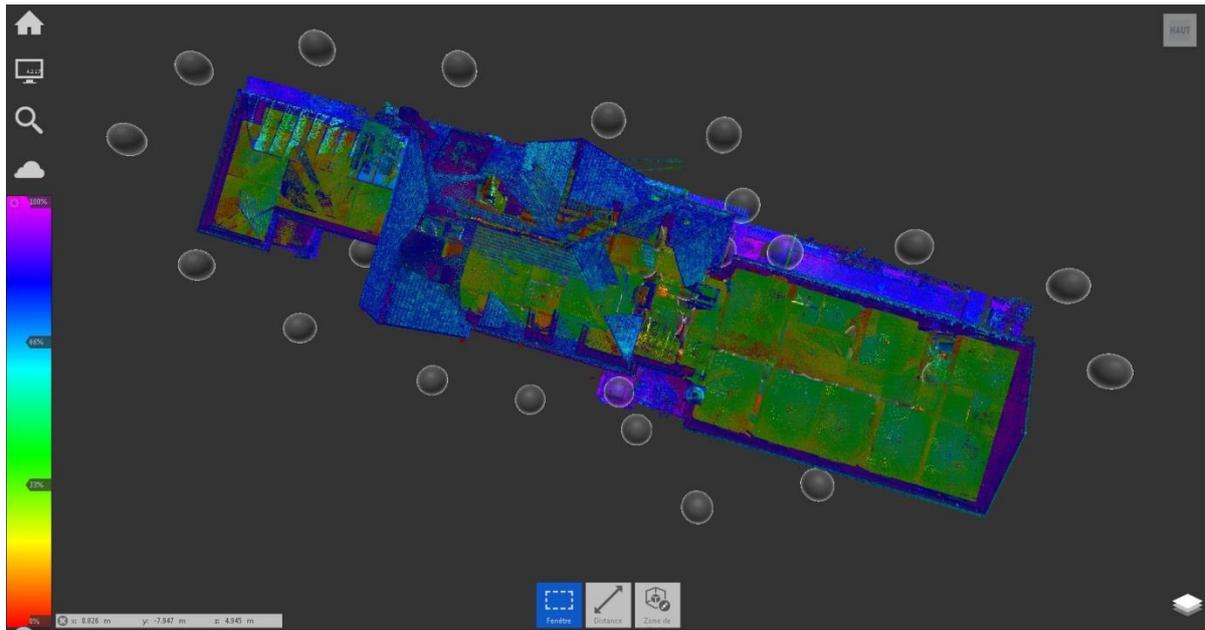


Figure 18 : Nuage de points de la grande bâtisse – affichage des intensités de points et des positions de scans (extérieurs et intérieurs)

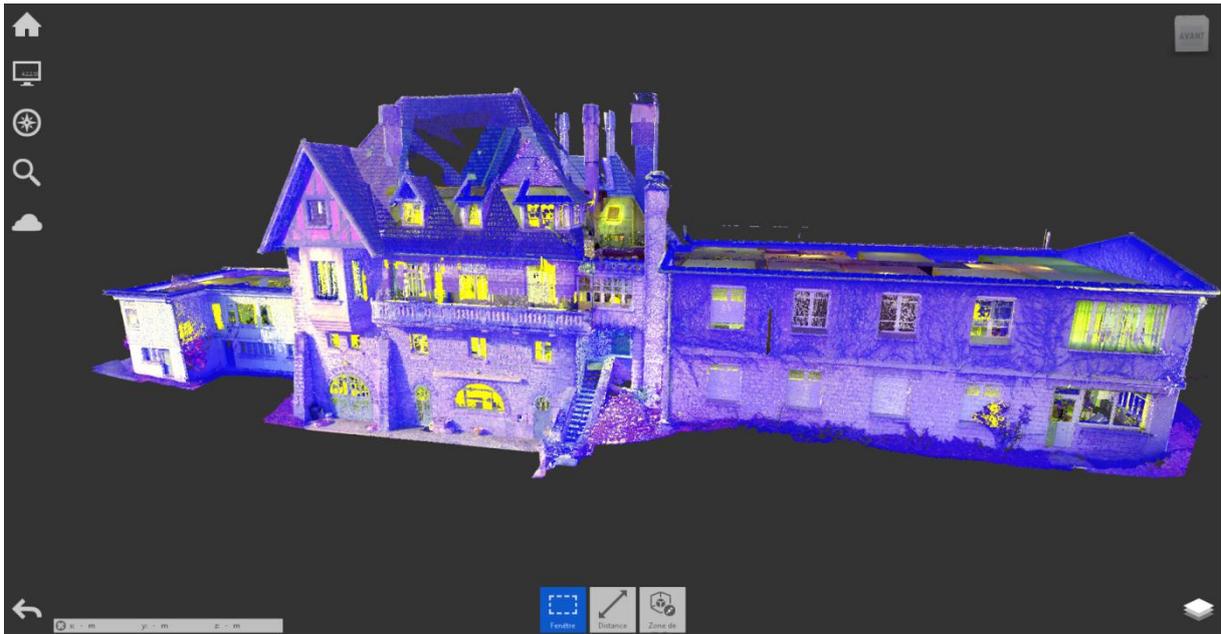


Figure 19 : Nuage de points de la grande bâtisse après filtrage et réduction du nombre de points

3.4. Bilan du chapitre

Les nuages de points issus de relevés par lasergrammétrie constituent d'excellents supports pour la restitution intégrale de scènes et environnements en 3D, ainsi qu'un outil efficace pour la modélisation 3D géométrique ou paramétrique. Les nuages de points issus de la photogrammétrie sont plus intéressants pour la restitution d'extérieurs et la fusion de données pour le cas de zones inaccessibles d'un point de vue terrestre, par exemple. Dès lors, une fois les nuages de points optimisés pour une exploitation avancée, différentes options possibles pour la modélisation se présentent.

L'un des enjeux consacrés à l'utilisation des données issues de la numérisation pour la génération de nuages de points, et les opérations de traitement nécessaires à leur exploitation, a consisté à optimiser l'utilisation des filtres de traitement selon la qualité des nuages de points initiaux et les besoins pour la modélisation géométrique. Le but est de permettre une facilitation et une amélioration de la rapidité des méthodes de modélisation géométrique basées sur ces nuages de points. L'étape de traitement et application de filtres sur les nuages de points est primordiale puisqu'elle conditionne notamment la quantité d'informations résultantes, la compréhension des structures, et donc la qualité des géométries pouvant être construites, de façon manuelle, automatisée ou semi-automatisée, à partir des nuages de points résultants.

4. Exploitation des nuages de points pour la construction de modèles géométriques 3D

4.1. Modélisation surfacique

4.1.1. Nuages de points et maillages polygonaux

Les **maillages polygonaux** correspondent à une **discrétisation de l'espace sous forme d'ensembles de facettes**, principalement des triangles ou des polygones possédant au moins une arête en commun. Ce type de modèle permet donc de **représenter les bâtiments, structures et scènes d'intérêt sans interruption ni rupture de continuité**, et aussi sans une connaissance complète nécessaire de la structure. Cela est donc tout particulièrement intéressant dans le cas de bâtiments historiques et de structures complexes, où il est rare que tous les éléments structuraux et détails architecturaux soient connus, à moins de disposer de connaissances précises et détaillées. Peu de risques subsistent également concernant l'interprétation des formes.

Les **maillages polygonaux** sont particulièrement bien adaptés au traitement des nuages de points puisque les sommets des facettes peuvent être directement pris parmi les points du nuage, et donc conserver les liens et mesures d'origine. Le calcul de maillage et la reconstruction de surfaces à partir de points sont des sujets de fort intérêt dans le domaine de la géométrie algorithmique.

Différentes méthodes de triangulation en 2D existent, et l'une des plus courantes est la **triangulation de Delaunay** [75]. Les méthodes de maillages en 3D permettent de considérer toutes les données acquises simultanément. Les attentes par rapport aux reconstructions surfaciques portent sur leur robustesse et leur capacité à traiter des cas de figure très variés, la prise en compte de trous ou de contraintes géométriques spécifiques. Cependant, il reste encore difficile d'obtenir des triangulations parfaites quel que soit l'algorithme initial choisi, et il s'avère donc très souvent nécessaire de procéder à des corrections manuelles afin d'aboutir à des modèles géométriques 3D propres, sans erreurs notables. Parmi celles-ci, la **reconstruction de maillages surfaciques de type TIN (Triangular Irregular Network)** s'avère particulièrement intéressante [76].

Cependant, si les données sont bruitées ou comportent des erreurs (trous, recalages défectueux, etc) en dépit de prétraitements effectués, d'autres méthodes plus implicites approximant les surfaces à reconstruire peuvent être préférées. Les surfaces sont approchées par une fonction, puis les maillages sont générés. Ces méthodes utilisent des algorithmes spécifiques tels que les *marching cubes* [77], les *moving least squares* [78], les *radial basis function* [79] ou encore la reconstruction de Poisson [80].

A partir des nuages de points, la construction de maillages surfaciques de type TIN peut s'effectuer de différentes façons. Dans le cas du logiciel *3DReshaper* utilisé pour nos travaux, deux méthodes permettent de générer ces maillages : la *construction par échantillonnage régulier*, et le *maillage en deux étapes*.

La **méthode d'échantillonnage régulier** projette une grille sur le nuage de points, et sélectionne le point le plus représentatif dans chaque case de la grille. La taille de la grille est ainsi définie par l'utilisateur et permet la génération automatisée des maillages, avec des paramètres de qualité variables en fonction des entrées indiquées. Le maillage 3D est généré à partir de tous les points ainsi sélectionnés. Cependant, **la génération de maillages par échantillonnage régulier ne représente pas forcément le meilleur choix**, et tout particulièrement dans le cas des bâtiments historiques ou scènes présentant des formes complexes, car **le niveau de détails n'est pas le même sur l'ensemble du maillage**, par exemple à cause des potentiels bruits de mesures ou si la distance moyenne entre les points demandés est trop faible. Trouver un bon compromis entre le nombre de points utilisés et la qualité des faces du maillage peut s'avérer difficile.

La **méthode de maillage en deux étapes** permet de remédier en grande partie aux potentielles contraintes de la méthode par échantillonnage régulier. Avec l'utilisation de ce procédé, **un maillage grossier est généré en premier lieu**, permettant d'obtenir la forme globale de l'objet, de la structure ou de l'environnement sans trou ni erreur notable. La distance moyenne entre les points peut être définie par l'utilisateur, en fonction de la précision souhaitée. En seconde étape, **le maillage grossier est déformé et réadapté selon les caractéristiques initiales des nuages de points**, afin d'y ajouter tous les détails nécessaires et compléter les zones les plus sensibles. Plusieurs options existent pour le raffinement des points, mais la plus efficace est sans conteste **l'interpolation de nouveaux points**, combinée aux options d'utilisation de points uniformément espacés et le raffinement des bords.

Par ailleurs, **différentes options sont applicables quant à la gestion des trous** pouvant survenir dans les maillages ainsi construits, notamment si certaines zones dans les nuages de points initiaux s'avèrent manquantes en raison d'occlusions, de bruits ou autre lors de la numérisation, ou si des variations de la densité des points existent. Trois options permettent donc **d'adapter le rendu et la qualité des maillages générés**, en fonction des besoins : la **détection de trous** (si des trous, existants ou non, doivent être conservés dans le maillage final et retouchés par la suite), la **conservation du bord extérieur** (où les trous existants dans le maillage sont bouchés, sauf au niveau du bord extérieur), et la **création d'un maillage clos** (où le résultat est dans ce cas un maillage clos sans aucun trou). Cette dernière option reste la plus intéressante pour l'exploitation ultérieure des maillages, car elle permet en outre d'éviter de potentiels travaux d'édition manuelle parfois fastidieux et chronophages. Cependant, les zones vides présentes dans les nuages de points initiaux - et ne comportant donc pas de points - doivent subir des travaux d'édition complémentaire.

En post-traitement, des *outils de lissage et d'application de textures sur les maillages* permettent d'améliorer les rendus et la qualité potentielle, toujours en fonction des besoins de restitution ou modélisation 3D. Des travaux d'édition sur les maillages peuvent ainsi être effectués afin de les améliorer, avec notamment les outils de suppression de faces inutiles, la fusion de bords, le bouchage de trous, la colorisation des maillages à partir des nuages de points, ou encore un outil de lissage global.

Dans le cas de la commande de lissage, une option à utiliser est le *lissage du bruit*, couplée si besoin au *contrôle de déviation*, qui permet de gérer la valeur de l'intensité de lissage. Cela permet de régler l'écart et le décalage maximal entre le maillage avant et après lissage. Cette option présente un intérêt non négligeable puisqu'elle améliore donc la forme globale du maillage et préserve les angles vifs. En conséquence, avec des données d'entrée suffisamment précises et détaillées, ces géométries représentent l'ensemble de la structure et s'avèrent très utiles pour la description et la restitution historique. Afin de tester les différentes configurations, il reste néanmoins pertinent de construire différents maillages surfaciques, en adaptant spécifiquement les paramètres dans chaque cas, ce qui permet de vérifier les meilleurs compromis entre nombre de faces et qualité des maillages (cf figure 20). Cet aspect s'avère d'ailleurs important pour la modélisation 3D par surfaces de type NURBS.

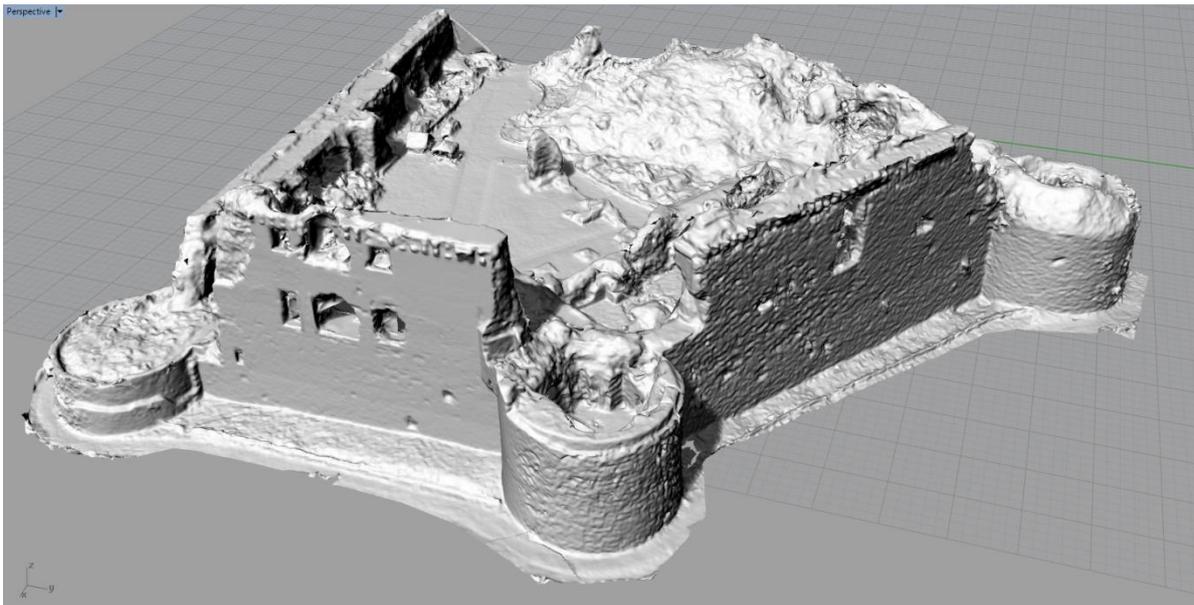


Figure 20 : Maillage polygonal du site du château de Coucy construit en deux étapes par interpolation et lissage à partir du nuage de points (rendu via le logiciel Rhinoceros5)

4.1.2. Modélisation géométrique par surfaces de type NURBS

Les **B-Splines Rationnelles Non Uniformes**, ou **NURBS**, sont utilisées pour **représenter mathématiquement des objets géométriques**, et correspondent à une généralisation des B-splines pour la représentation de surfaces 3D, puisque ces fonctions sont définies avec des points en *coordonnées homogènes*. Le principal intérêt des NURBS pour la représentation surfacique et la modélisation 3D est qu'elles permettent **d'ajuster de façon précise des courbes et des surfaces qui ne peuvent pas être représentées par des B-splines uniformes**. En effet, ces dernières ne peuvent représenter précisément que des segments de droite et certaines courbes et surfaces, quel que soit leur degré, le nombre de points de contrôle ou les coordonnées des sommets des arcs. Du fait qu'elles présentent de nombreux avantages (facilité et précision d'évaluation des formes, bonne capacité d'approximation des formes complexes, simplicité de construction et d'implémentation, faible complexité des algorithmes), leur utilisation est grandissante.

De plus, les NURBS permettent également de **définir des courbes ou surfaces d'ordre supérieur** (par exemple les *courbes ou surfaces polynomiales du troisième degré ou plus*), selon le nombre de points de contrôle définis entre les sommets d'un même arc. L'utilisation des NURBS pour la modélisation surfacique permet ainsi de réduire le nombre de sommets et de points de contrôle dans l'approximation précise d'un arc ou d'une facette courbe quelconque, tout en améliorant la précision de cette approximation et en permettant donc une meilleure rapidité pour la gestion des rendus.

Les NURBS constituent en conséquence une **méthode de représentation intéressante pour réduire la complexité de modélisation d'objets et de scènes complexes**. C'est donc notamment le cas pour la modélisation 3D de bâtiments historiques comportant de nombreux détails structuraux ou architecturaux (lieux de cultes, châteaux, ruines, etc) ou de scènes complexes (*tunnels, grottes, etc*) [81].

La modélisation par surfaces NURBS est également employée pour des applications cartographiques et géologiques requérant une très grande précision des coordonnées calculées [44], puisque les NURBS sont compatibles avec la majorité des projections les plus utilisées dans ce domaine et permettent des interpolations précises (*distances, périmètres, angles et aires calculés, etc*).

En conséquence, les NURBS sont devenues très pertinentes dans les logiciels de CAO les plus avancés, et permettent des optimisations de modélisation et représentation graphique particulièrement intéressantes. Les matériels graphiques actuels supportent sans aucun problème l'ensemble des modélisations en NURBS, ce qui représente un avantage non négligeable dans certains cas.

4.2. Modélisation paramétrique de type BIM/hBIM

Dans la pratique, les relevés, numérisations et modèles 3D d'édifices remarquables, de scènes et d'éléments architecturaux sont essentiellement composés d'éléments géométriques : *points, lignes, surfaces ou maillages* parfois texturés par des images, etc. Cependant, dans certains cas, il s'avère pertinent d'enrichir les modèles et les contenus par des *attributs sémantiques* et des *propriétés paramétriques* sur les différents composants formant les modèles (*murs, ouvertures, toitures, escaliers, etc*).

De plus, le relevé et la numérisation de structures et édifices remarquables ne consiste pas simplement à effectuer une simple collection d'images puis la génération de nuages de points. Il s'agit également d'un ensemble ordonné et structuré de composants devant être conservé comme tel, tout en restant interprétable, compréhensible par l'utilisateur et les logiciels d'exploitation, et surtout conserver systématiquement une interopérabilité en fonction des solutions logicielles utilisées pour le rendu, la modélisation et la gestion des données.

La **construction de modèles paramétriques de type BIM/hBIM**, et donc de maquettes numériques, devient de plus en plus pertinente et utilisée dans le cas des bâtiments modernes, mais est bien évidemment également valable concernant les bâtiments historiques, avec l'émergence de processus dédiés (*le hBIM*) bien que les contextes,

problématiques et conditions de modélisation soient différentes. En conséquence, dans une optique de construction de modèles 3D typés BIM, **les nuages de points constituent un excellent support pour l'extraction de données, l'aide à la modélisation et l'intégration d'informations concernant les matériaux, l'état de l'existant, etc**, le tout dans un seul et même fichier. Chaque maquette numérique devenant ensuite une entité propre à une construction particulière, elle contient les données de l'ouvrage en question, à l'état existant (tel que construit) ou projeté (tel que conçu).

La construction de modèles 3D de type BIM/hBM permet de **faciliter les démarches pour la modélisation, la restitution et la compréhension des caractéristiques principales des bâtiments** tant que les éléments à modéliser restent cohérents. Ainsi, la *construction d'un modèle complexe par accumulation et assemblage de composants simples* décrivant correctement la géométrie est rendue possible. L'objectif de ce type de processus est de **proposer une phase de modélisation rapide, améliorée et fiable de la structure étudiée, ne nécessitant pas (ou peu) de phase d'édition complémentaire**. Les modèles géométriques ainsi construits doivent pouvoir être par la suite exportés vers d'autres solutions logicielles dédiées à des analyses précises : analyse structurales, analyse thermique, opérations de phasages et planning de travaux, etc.

4.3. Modélisation par voxels

La **modélisation géométrique par voxels** (contraction des termes **volume et pixel**), consiste en la **transformation de pixels (éléments en 2D) en éléments volumétriques en 3D**. Un volume est approximé par un assemblage de blocs cubiques, en général de taille constante, définie en entrée par l'utilisateur. La construction géométrique s'effectue par échantillonnage d'une fonction, où une valeur est attribuée à chaque voxel, avant lancement du processus d'échantillonnage et reconstruction géométrique. En fonction de la taille des éléments, cela permet de constituer des modèles 3D de qualité et de précision adaptable en fonction des besoins [21, 34].

Différents processus peuvent être appliqués pour la modélisation géométrique par la construction de voxels : la reconstruction par évaluation discrète d'une fonction mathématique (fonction implicite définie en paramètres, extraction de fonction issue de simulation numérique, etc), la reconstruction tomographique (utilisée fréquemment en imagerie médicale), ou la reconstruction à partir de surfaces ou nuages de points. Il s'agit là des principales méthodes employées à la fois pour la modélisation géométrique et l'utilisation des géométries en voxels pour l'analyse et la simulation numérique.

Les avantages de la modélisation géométrique par voxels sont notamment une facilitation de l'affichage des géométries grâce à des limitations en coûts de mémoire graphique, une intégration des éléments surfaciques et volumiques constituant les géométries au sein d'un même modèle, une utilisation plus pratique pour effectuer des calculs discrets et simulations numériques (filtrage et lissage des surfaces, reconstruction d'os, de squelettes, etc). De plus, une des optimisations importantes permise par la modélisation par voxels apparaît lorsque l'on passe de l'utilisation d'une matrice de voxels à l'utilisation d'un arbre de données (une structure de type *octree*) ayant comme racine chaque voxel, et dont chaque nœud père est un voxel faisant la moyenne de ses fils (informations de couleur et de texture) [27]. Dès lors, si un nœud contient plusieurs fils possédant des caractéristiques similaires (couleur, texture),

alors il est possible de les supprimer sans perdre en détail. De plus, **le niveau de détail peut être géré facilement en parcourant en profondeur l'arbre et en s'arrêtant dès que la taille du voxel devient inférieure à la taille d'un pixel.**

Cependant, la représentation de volumes à l'aide de voxels n'est pas exempte de défauts : les environnements et objets réels n'étant pas constitués d'un assemblage de petits cubes, il peut s'avérer **difficile d'obtenir une représentation suffisamment exacte de la plupart des volumes à l'aide de voxels, ou alors en optant pour des résolutions élevées comportant un très grand nombre d'éléments**, requérant des ressources matérielles plus conséquentes. Les modèles construits de la sorte étant du type géométrique et ne comportant pas d'informations paramétriques, des travaux d'édition géométrique de tels modèles se montrent souvent nécessaires pour une utilisation plus avancée, afin de vérifier notamment la cohérence des liaisons entre les composants.

La modélisation géométrique par voxels peut donc permettre de construire des géométries correctement adaptées pour la restitution et la modélisation, puisque les résultats obtenus s'avèrent cohérents et suffisamment détaillés, sous réserve que les paramètres de base des modèles soient correctement définis. Cependant, des verrous scientifiques persistent dans certains cas quant à l'utilisation directe des géométries issues de ce type de modélisation pour des travaux de simulation plus avancés. En effet, les géométries ne sont pas toujours suffisamment précises ou complètes pour les exploiter en analyse numérique structurale, et requièrent un approfondissement de ce champ d'étude.

4.4. Outils pour la modélisation géométrique

4.4.1. Approche méthodologique pour la modélisation surfacique

Afin de pouvoir proposer différents types de modèles 3D géométriques surfaciques proposant des **niveaux de détails spécifiques en fonction des besoins et des circonstances**, une décomposition des différents niveaux de représentations en catégories détaillées, servant chacune des intérêts précis, permet dans un premier temps de bien appréhender les niveaux de représentation et modélisation géométrique.

La **modélisation surfacique de type NURBS** a été employée dans le **cas d'étude du château de Coucy**, la géométrie des ruines se montrant particulièrement adaptée à des modèles 3D géométriques construits via ce procédé. Une **méthodologie de construction semi-automatisée de surfaces à partir des nuages de points** a été implémentée et utilisée dans le logiciel *Rhinoceros5* [82] afin de **reconstituer des surfaces dans les parties de murs non scannées ou obstruées**, et où les points et maillages étaient inexistantes dans les nuages de points résultants.

Le principe de l'algorithme proposé et implanté via l'application de programmation visuelle *Grasshopper* [83] pour *Rhinoceros5* consiste à **sélectionner les contours de surfaces existantes** aux endroits où l'on souhaite créer des surfaces dans le modèle, dans les zones non numérisées et présentant donc des vides et empêchant la construction initiale de géométries closes. A partir des contours sélectionnés, la **construction de nouvelles**

surfaces par extrusion est rendue possible à partir de paramètres définis en entrée tels que la hauteur, la profondeur et la direction d'extrusion. Le processus de l'algorithme est présenté dans la figure 21.

L'application de paramètres correctement adaptés lors de la phase de construction de surfaces permet ensuite de **vérifier la cohérence géométrique du modèle ainsi complété**. Cette phase de vérification s'effectue de façon automatisée via une commande indiquant l'emplacement de trous ou bords libres non comblés dans les géométries, qui doivent ensuite **être corrigés par une nouvelle application de l'algorithme dans les zones concernées, ou par un processus d'édition géométrique manuel permettant de clore les géométries**, si le nombre et la complexité des surfaces le permettent.

Dans ce dernier cas, les **surfaces NURBS, ainsi générées de façon semi-automatique**, sont donc **raccordées partiellement** à la géométrie existante. Des **opérations simplifiées de raccordement manuel restent ainsi à effectuer**. Cela permet dès lors **d'accélérer significativement la création de surfaces dans des zones vides ou incomplètes**, et ainsi clore les modèles pour les rendre complets et étanches.

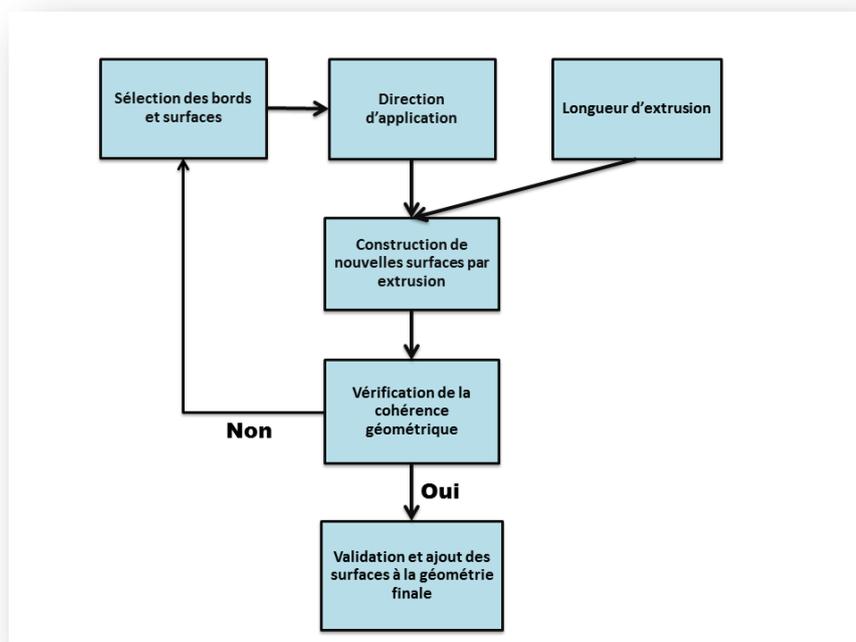


Figure 21 : Protocole d'édition semi-automatisée des surfaces NURBS

Il s'agit dans ce cas d'une amélioration pertinente pour la modélisation et l'édition de géométries surfaciques 3D. Il reste ensuite à vérifier et inspecter les dimensions des surfaces, l'objectif étant d'éviter les surfaces trop petites ou trop étirées constituant les modèles. **La conservation d'une bonne homogénéité des surfaces permet entre autres d'éviter toute incohérence lors du rendu et en cas d'une utilisation ultérieure**. De plus, les modèles doivent être complets et clos sur le plan géométrique, sans bords libres ou de type *non-manifold* (bords raccordés à plus de deux autres bords ou surfaces).

Cette méthode a ainsi été implémentée pour la **construction des modèles géométriques 3D des murs du Logis et de la salle des preux du château de Coucy**, d'abord pour des modèles simplifiés comportant moins de 20 000 faces, puis en augmentant progressivement leur complexité, leur précision et leur fiabilité, permettant de mieux représenter la géométrie et l'état actuel de la structure. Les résultats de modélisation obtenus se sont avérés satisfaisants, tant en termes de modélisation que de temps de traitement et édition, en grande partie réduit en ce qui concerne la création de surfaces dans les zones où elles sont inexistantes initialement.

La première itération d'un modèle géométrique affiné permet d'obtenir des premières représentations qui restent encore très basiques (nombre de faces inférieur à 5 000). Les formes modélisées restent encore très approximatives à ce niveau de détail. Les maillages surfaciques sont générés à partir des nuages de points (eux-mêmes filtrés et simplifiés pour diminuer le nombre de points), puis exportés pour gestion et édition manuelle via des opérations de correction de surfaces, bouchage de trous, lissage de bords, etc. La précision et la qualité des modèles restent encore trop aléatoire puisque les détails structuraux importants (ouvertures, trous, éléments en ruines...) restent mal modélisés ou sont encore absents. Cependant, la durée de modélisation reste réduite car les modèles sont simples à éditer en raison du nombre très faible de surfaces.

Une seconde itération d'un modèle davantage détaillé, permet d'aboutir à une première forme de représentation intermédiaire allant vers une géométrie plus correcte (nombre de faces inférieur à 20 000). Les détails géométriques tels que des éléments en ruines, des détails d'ouvertures, des trous, etc, sont représentés et pris en compte dans la géométrie (cf figure 22). Les formes sont mieux gérées et ne sont plus approximatives.

En revanche, de nombreuses surfaces sont lissées (notamment les bords) afin de limiter le nombre de surfaces de faibles dimensions et garder un modèle de taille homogène. Il reste cependant intéressant de vérifier et inspecter les dimensions des surfaces (éviter les surfaces trop petites ou trop allongées/étirées notamment) constituant les modèles, afin d'éviter d'éventuels conflits ou problèmes lors de la création des maillages aux éléments finis. De plus, les modèles doivent être complets et clos sur le plan géométrique, sans bords libres ou de type *non-manifold*. Il est également nécessaire, dans le cas des murs du château de Coucy, de recréer des surfaces non existantes initialement (car se trouvant dans des zones enterrées masquées pour les appareils de relevé) afin de compléter le modèle (en émettant des hypothèses sur les dimensions et placement des parties enterrées). Les géométries construites dans cette phase sont déjà bien plus cohérentes et utilisables pour des travaux de simulation numérique, au contraire des géométries plus grossières et moins détaillées.

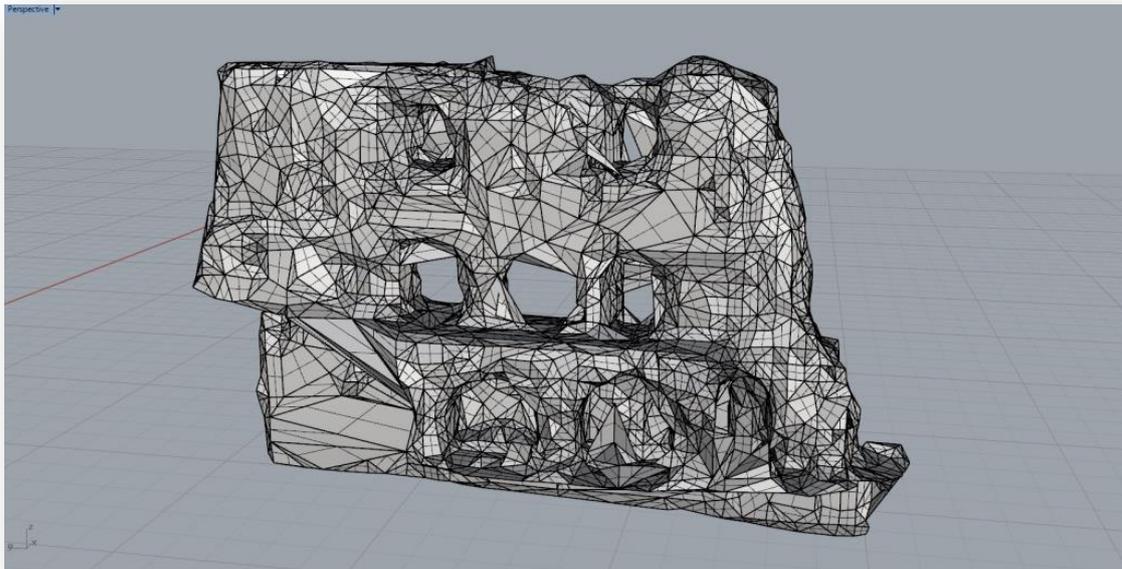
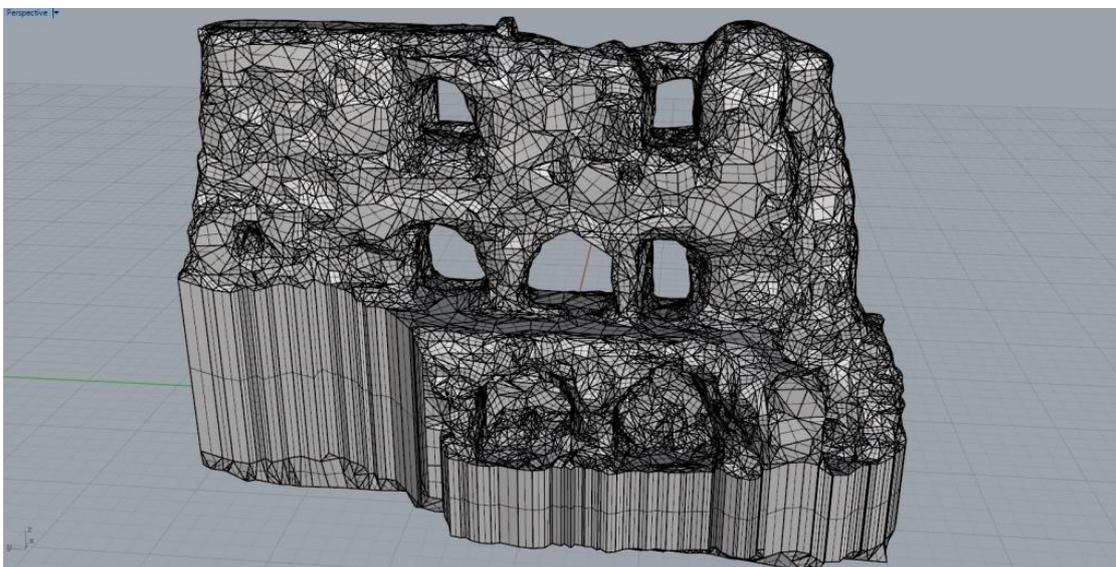


Figure 22 : Géométrie NURBS des murs du Logis comportant environ 20 000 faces

Une utilisation de ce type de modèle peut également être envisagée pour des restitutions ou visualisations simples, voire même des premières intégrations dans des moteurs 3D pour des visites virtuelles. Cependant, de nombreux détails restent améliorables et adaptables.

La troisième itération permet d'aboutir à un modèle encore plus détaillé, avec une représentation avancée permettant la restitution de modèles géométriques présentant des formes réalistes et de nombreux détails correctement intégrés (nombre de faces inférieur à 50 000). Ce type de modèle 3D est davantage adapté aux représentations et visualisations, en particulier pour l'incorporation dans des moteurs 3D (*Unity*, *Unreal Engine*) et des applications de réalité virtuelle. Les détails sont nombreux et davantage affinés, et présentent ainsi un bon compromis entre qualité globale du modèle, nombre de faces, taille des éléments et précision (cf figure 23).



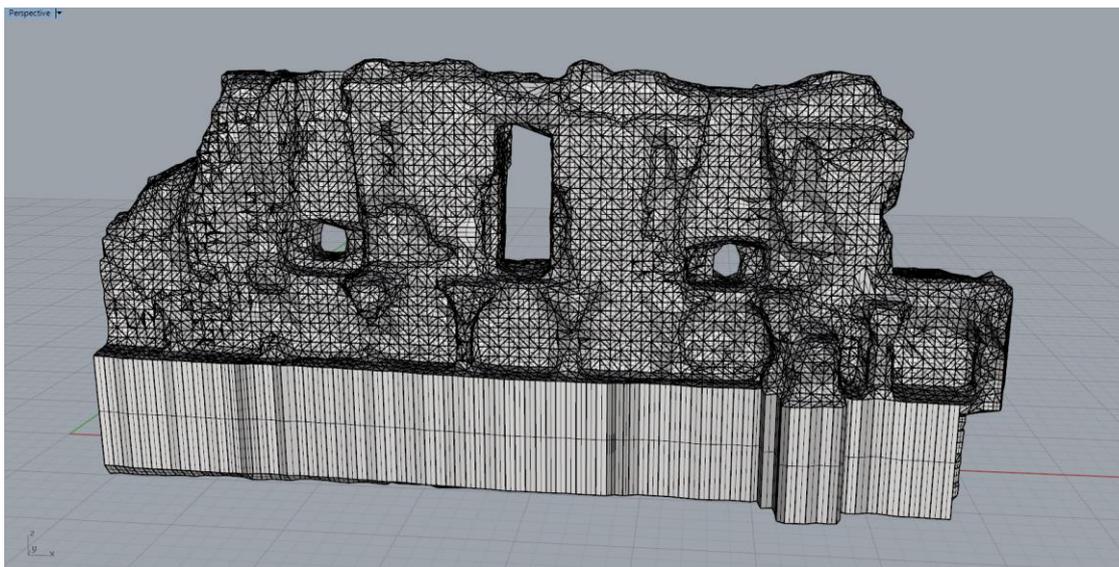


Figure 23 : Géométrie NURBS du mur du Logis et de la Salle des Preux comportant environ 50 000 faces

L'augmentation significative du nombre de faces constituant les géométries peut cependant engendrer des premières difficultés pour l'exploitation de ces modèles pour des travaux de simulation numérique, en raison notamment de potentiels travaux d'inspection et d'édition lourds (chronophages et fastidieux) requis dans ce cas, surtout si ces tâches doivent être accomplies de façon manuelle. Si les géométries sont correctes et les travaux d'édition et de vérification de cohérence permettent d'aboutir à des modèles finalisés, ceux-ci présentent alors un intérêt tout particulier pour la simulation numérique.

Des modèles géométriques très fins, davantage détaillés, contenant moult détails et éléments de surfaces peuvent aussi être générés (dans le cas où le nombre de faces devient supérieur à 250 000). Dans ces conditions, les modèles sont extrêmement détaillés et représentent fidèlement la géométrie réelle, y compris l'ensemble des détails architecturaux. Cela les rend pertinents pour des restitutions 3D en haute qualité, en y intégrant par exemple des textures et autres informations complémentaires, mais la géométrie globale du modèle devient alors très lourde, ce qui ne présente plus guère d'intérêt pour des analyses structurales, les tailles des faces et le nombre d'éléments étant de fait bien trop élevés. De plus, dès lors que de nombreux détails sont présents, les enjeux liés à la médiation historique et architecturale présentent des aspects prépondérants.

4.4.2. Approche méthodologique pour la modélisation en voxels

Une **méthode de conversion et modélisation géométrique 3D en voxels** a été mise en place en utilisant le logiciel *Rhino*5 et son extension de programmation visuelle, *Grasshopper*. Cette méthodologie peut être utilisée pour tous types de bâtiments et de nuages de points, quelle que soit la complexité initiale de la géométrie et de l'architecture. L'objectif dans ce contexte était de mettre au point et de **proposer une solution fiable, simple et accessible au plus grand nombre d'utilisateurs**, permettant d'intégrer ces processus de traitement dans les logiciels de modélisation géométrique dédiés.

A l'aide de **scripts programmés pour l'application Grasshopper, et exécutés de façon semi-automatisée, les nuages de points peuvent être convertis directement en voxels, et des modèles 3D géométriques** représentant les murs étudiés ont ainsi pu être générés dans le logiciel *Rhinoceros5*. Les scripts de voxellisation employés ont recours à une **technique de voxellisation dite basée sur les points**, permettant de passer directement d'un nuage de points à un modèle géométrique en voxels par conversion de l'ensemble des points constituant les nuages en géométrie 3D de type voxels. L'application de ces scripts a été rendue possible par l'implémentation du plugin *Volvox*, issu du projet européen *DURAARK (Durable Architecture)* [85].

L'un des intérêts de cette méthode réside notamment dans le fait que **la taille des voxels est définie en entrée par l'utilisateur**, ce qui permet **d'obtenir des modèles de taille et de qualité variable selon leur taille et la précision géométrique voulue**. De cette façon, pour le cas d'étude du château de Coucy, différents modèles en voxels construits via cette procédure ont permis de représenter correctement les géométries des murs, avec différentes tailles d'éléments en fonction des besoins et de la qualité de restitution et modélisation voulue. Par exemple, pour une **taille d'éléments supérieure à 50cm**, les **modèles se montrent assez grossiers**, avec une qualité réduite et une absence significative de détails. A l'inverse, pour une **taille d'éléments inférieure à 20cm**, les **modèles deviennent très détaillés mais comportent alors un grand nombre d'éléments**, d'où un nécessaire compromis à trouver dans chaque situation, afin d'adapter la qualité et la précision, ou à l'inverse la rapidité de traitement et d'édition (cf figures 24 et 25).

Une fois l'étape de conversion et modélisation terminée, les modèles en voxels subissent une **étape manuelle d'inspection, nettoyage et optimisation** (toujours dans le logiciel *Rhinoceros5*) visant à raccorder certaines surfaces, supprimer d'éventuels voxels isolés, compléter des zones afin de simplifier les connexions géométriques, etc. La rapidité d'exécution, la fiabilité et la stabilité du script permettent **d'aboutir systématiquement à des modèles de qualité correcte, sans défaut ni incohérence particulière**, sous réserve cependant de disposer en entrée d'un nuage de points cohérent, filtré et nettoyé préalablement, et dont le nombre total de points correspond aux paramètres de précision et qualité des géométries en voxels envisagées. Si le nuage de points ne comporte pas suffisamment d'éléments ou si l'intensité des points n'est pas assez élevée, la taille des éléments en voxels devra être augmentée en conséquence, puisqu'autrement des incohérences et des trous dans les géométries risquent d'apparaître.

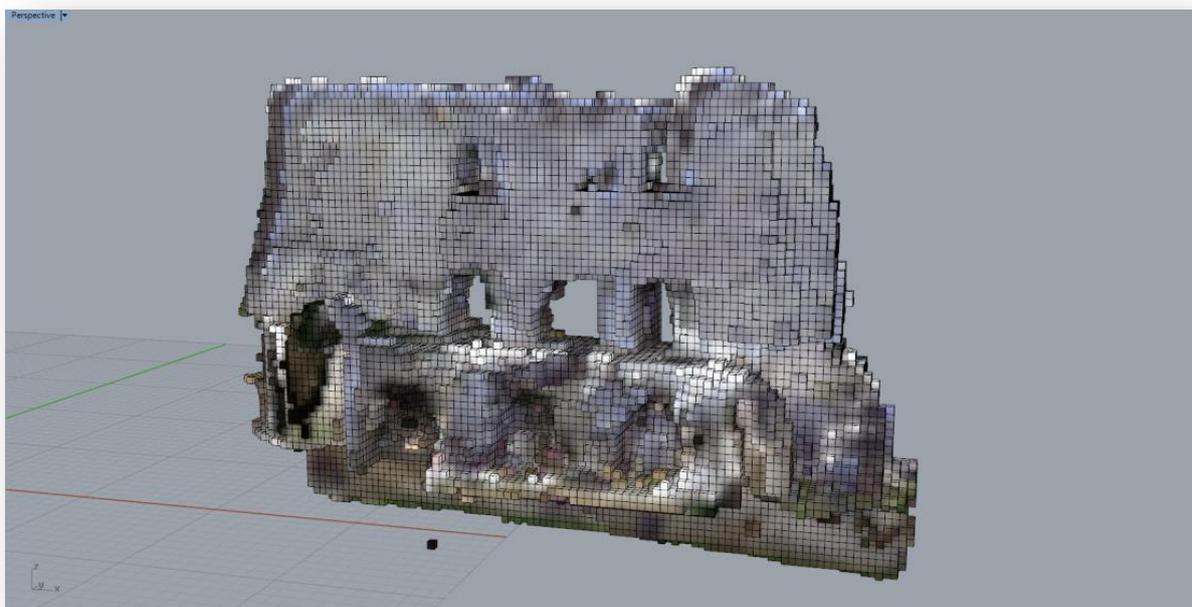


Figure 24 : Géométrie en voxels du mur du Logis avec des éléments de 40cm (150 430 éléments)

Ce type de représentation et modélisation s'avère donc **très utile pour une visualisation et restitution rapide**, puisque selon la qualité et la taille initiale du nuage de points, l'ensemble des points du nuage peuvent être transformés en voxels plus ou moins rapidement, et ce de façon cohérente, sans intersections ni recouvrement des éléments ainsi créés. En fonction de la qualité du nuage de points utilisé, il est donc possible **de construire des modèles particulièrement détaillés, nécessitant néanmoins une augmentation des temps de calcul et conversion nécessaires**, mais qui restent bien moindres que les temps requis pour tout autre type de modélisation cependant (on parle de plusieurs minutes de conversion et traitement « seulement »). La durée de cette étape varie selon la taille des voxels composant les modèles : plus leur taille est réduite, plus le nombre d'éléments est élevé, et plus de temps est donc requis pour les éventuelles phases d'inspection et d'édition.



Figure 25 : Géométrie en voxels du mur du Logis avec des éléments de 20cm (284 496 éléments)

Cependant, l'un des problèmes rencontrés avec cette méthode de modélisation vient du fait que **le script se base sur les points existants dans le nuage initial**, et tient donc compte de **l'absence de points dans les parties masquées ou inaccessibles lors de la numérisation**. En conséquence, les régions vides dans les nuages de points ne peuvent pas être comblées ou remplies initialement, ce qui génère des modèles en voxels corrects géométriquement mais non fermés ni hermétiques, et nécessitant des phases d'édition et modélisation complémentaires pour une utilisation plus avancée, telles que des analyses structurales ou des exportations vers des moteurs 3D pour restitutions et visites virtuelles. En revanche, l'utilité de tels modèles pour une utilisation plus avancée telle que des études structurales peut ne pas s'avérer correcte sans édition ou modifications sur la géométrie.

D'autres travaux peuvent être effectués en complément par post-traitement, comme le lissage des bords ou le remplissage de trous dans des régions vides ou incomplètes. En effet, le script initial permet une transformation des points rapidement et efficacement, mais uniquement dans les parties où des points sont présents. Les limitations liées aux occlusions, erreurs d'interprétation de la part du script de conversion, et zones difficiles d'accès représentent un frein, cet aspect étant renforcé dans le cas d'un édifice très complexe où les moindres erreurs et données manquantes lors de l'acquisition peuvent ensuite perturber la modélisation finale de façon significative.

Afin d'améliorer la procédure, **le script initial a été modifié afin d'y intégrer la construction de voxels dans des zones vides des nuages de points et ainsi compléter le modèle final obtenu**, de façon à présenter une cohérence globale (cf figure 26). Un nuage de points est construit selon une grille de taille définie en entrée par l'utilisateur, puis ce nuage de points est converti en voxels via le processus de conversion basé sur les points et des paramètres indiqués par l'utilisateur. Si la cohérence géométrique entre les différentes géométries en voxels ainsi générées est avérée, les géométries sont intégrées au modèle final afin de le compléter et le rendre cohérent et clos.

Les résultats obtenus suite à l'utilisation de ce script sont très encourageants, et nécessitent des travaux ultérieurs afin de pouvoir les utiliser pleinement et approfondir l'application des scripts, notamment à cause de l'absence récurrente de cohésion entre les voxels générés via les deux processus exécutés en parallèle. Cela ne permettait pas d'obtenir un modèle global complet pouvant être assemblé et utilisable pleinement pour des analyses ultérieures, à moins d'effectuer des opérations manuelles d'ajustage et d'assemblage complémentaires sur les différents blocs de voxels construits, limitant donc tout l'intérêt d'une méthode se voulant à la base semi-automatisée et donc relativement rapide (cf figure 27).

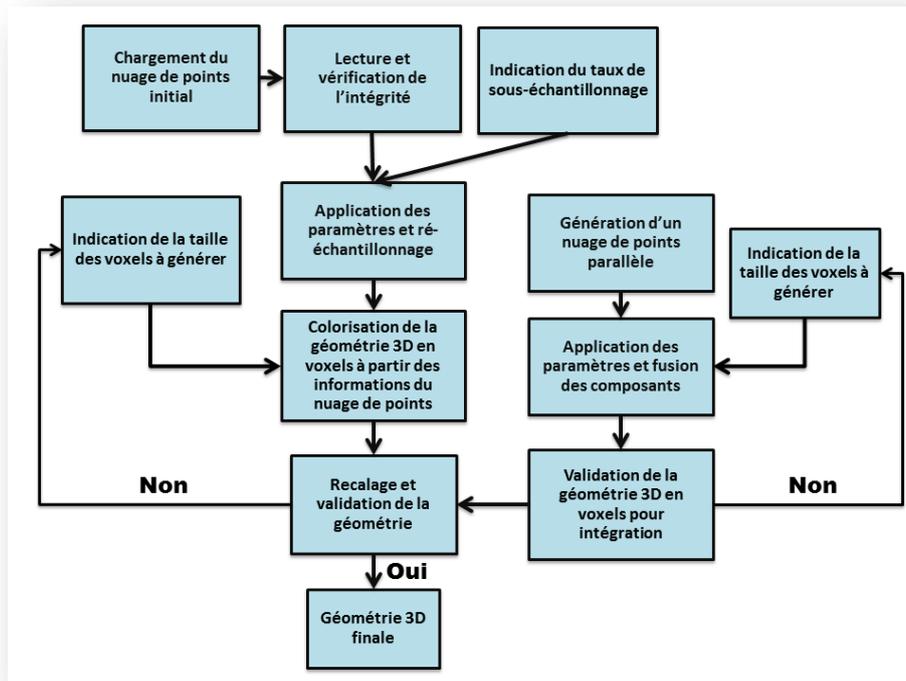


Figure 26 : Fonctionnement du script employé pour la voxelisation basée sur les points

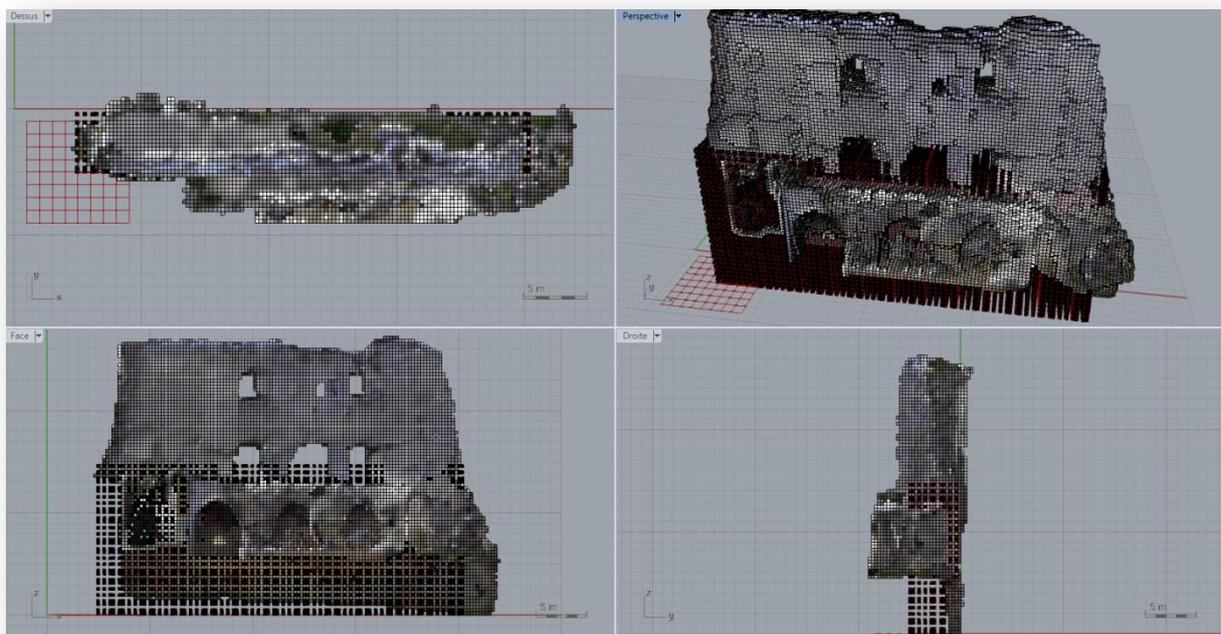


Figure 27 : Géométrie en voxels du mur du Logis avec des éléments de 30cm et intégration de voxels complémentaires

En conséquence, ce type de méthode de modélisation semi-automatisée par conversion des points en voxels se montre **adapté pour des problématiques de restitution 3D plus ou moins détaillée de structures** ainsi que la construction de géométries 3D cohérentes, mais présente des **limites quant à son emploi pour la simulation**, par exemple pour effectuer

des analyses structurales, en raison des problèmes de traitement additionnel requis. La modélisation géométrique par voxels fonctionne donc correctement pour la restitution détaillée et la construction de géométries complètes, mais il ne s'agit là que d'un début en ce qui concerne la simulation numérique, cet aspect devant encore être approfondi et faire l'objet d'études et de travaux dédiés. En effet, puisqu'il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode permettant un travail rapide sur des modélisations géométriques en voxels, l'intégration de scripts programmés dans différents langages informatiques devient dès lors nécessaire. De tels développements requièrent des compétences en programmation informatique qui ne sont pas à la portée de tous les utilisateurs, ce qui ne permet que de rendre les géométries en voxels partiellement compatibles avec les méthodes d'analyses avancées telles que des analyses structurales ou thermiques. Il est cependant probable que de tels développements se montrent mieux intégrés dans les principaux logiciels de CAO et modélisation géométrique, en raison notamment des nouvelles perspectives d'utilisation des processeurs et cartes graphiques (GPU) pour des calculs et procédures de rendus visuels.

4.5. Approche méthodologique pour la modélisation paramétrique

4.5.1. Flèche de la cathédrale de Senlis

Le cas d'étude de la flèche de la cathédrale de Senlis a fourni une base de travail pertinente pour la construction de **modèles 3D paramétriques orientés hBIM**. Etant donné la grande complexité géométrique de la structure, et afin d'éviter de recourir à un travail uniquement manuel de modélisation géométrique et d'édition, forcément long et fastidieux, le processus mis en place consiste à **construire rapidement, de façon semi-automatisée et à partir d'un ou plusieurs nuages de points, des modèles constitués intégralement d'éléments paramétriques ou hybrides**, comportant à la fois des composants paramétriques et géométriques. L'un des objectifs est également d'éviter des travaux d'édition et construction trop lourds auxquels on se retrouverait confronté dans le cas d'une modélisation manuelle classique, à partir de plans par exemple.

L'organigramme présenté en figure 28 résume ainsi **l'ensemble du processus implanté et appliqué pour la numérisation, le traitement des données, l'extraction d'éléments, la modélisation géométrique orientée hBIM et l'analyse structurale aux éléments finis**. Ces deux derniers points sont abordés dans les parties 4.4 et 5.1.

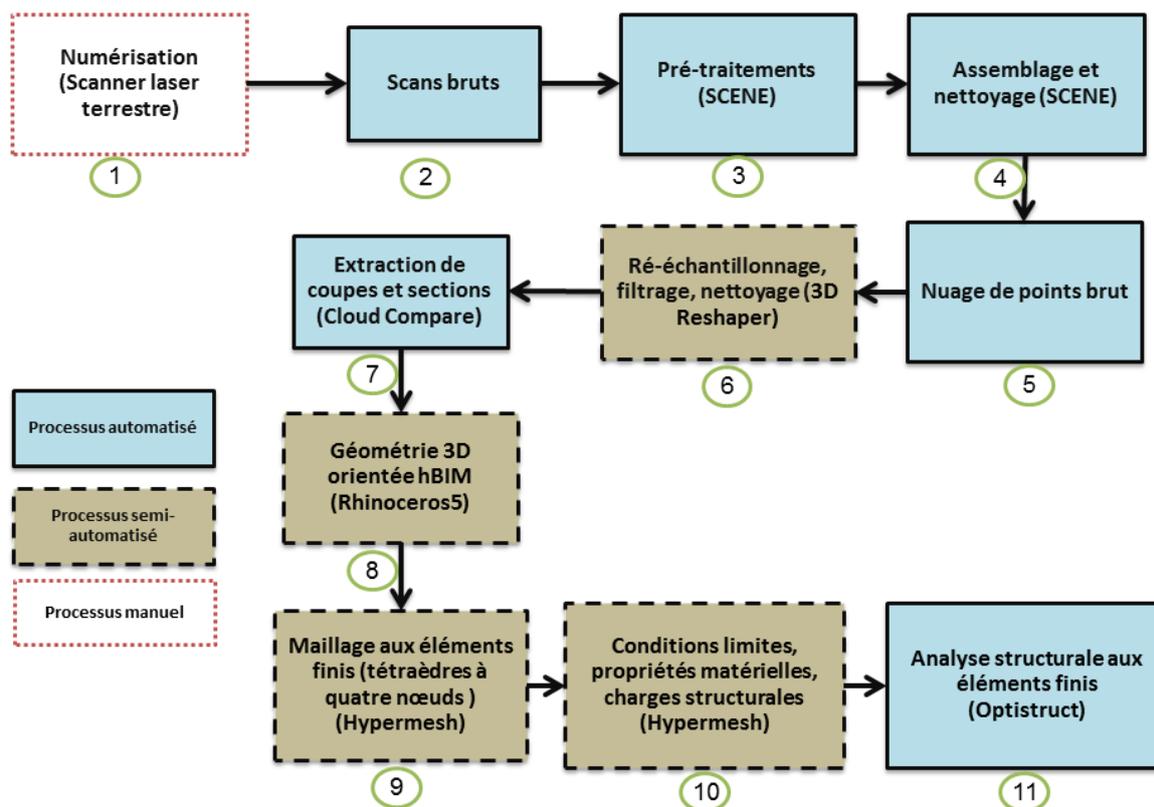


Figure 28 : Organigramme du processus de chaîne de numérisation appliquée

En conséquence, le processus de modélisation proposé dans le cadre de nos travaux consiste à **générer automatiquement des plans de coupe et des sections à partir d'un nuage de points filtré et nettoyé**, à l'aide du logiciel libre *CloudCompare*. Des **sections et contours** peuvent de cette façon être extraits à partir du nuage de points selon un espacement régulier défini en paramètre initial, afin de faciliter les démarches pour la modélisation, tant que les éléments à modéliser restent cohérents. Ainsi, la **construction d'un modèle complexe par accumulation et assemblage de composants simples décrivant correctement la géométrie** est rendue possible. L'objectif principal était dans notre cas de proposer une modélisation géométrique rapide, simple et fiable de la structure étudiée, ne nécessitant pas de phase d'édition complémentaire.

Dans la méthodologie proposée, une étape automatisée d'extraction de sections et de bords a été réalisée à l'aide du logiciel libre *CloudCompare* et de son outil intégré d'extraction de sections. Les paramètres initiaux définis en entrée étaient la direction d'extraction (le long de l'axe Z dans notre cas) et l'espacement entre chaque section, par exemple tous les 20cm ou 40cm. (cf figure 29) L'extraction de sections est inspirée du processus de tomographie et permet d'extraire des tranches en 2D détaillées dans le nuage de points, ce qui s'avère particulièrement utile pour l'aide à la compréhension des structures complexes et leur modélisation géométrique.



Figure 29 : Extraction de sections et de contours dans le nuage de points avec les outils correspondants

Les sections et les contours peuvent être exportés partiellement ou totalement pour d'autres utilisations à travers différents formats de fichiers, et en particulier le format d'échange .dxf. (cf figure 30) Chacun de ces éléments peut être exporté séparément, pour obtenir uniquement des détails et des zones particuliers ou pour inspecter et valider la géométrie finale.

La construction d'un modèle orienté hBIM par rétro-ingénierie à partir du nuage de points est effectuée en important dans un même fichier le nuage de points et les sections extraites. La flèche de la cathédrale a donc été modélisée de façon semi-automatisée dans *Rhinoceros5* et une extension complémentaire dédiée au BIM (*VisualArq*) [85].

Le nuage de points complet n'était pas nécessaire pour la première étape de la modélisation géométrique et paramétrique. En utilisant principalement les tranches extraites (qui représentent donc des parties spécifiques et des détails du nuage de points), les murs, ouvertures et autres éléments composant la structure principale ont été construits et assemblés par sélection directe dans les sections extraites, depuis lesquels l'ensemble des informations et détails utiles pouvaient être récupérés. **La géométrie a ensuite été complétée par l'ajout de composants surfaciques et volumiques pour les formes plus complexes, aboutissant à un modèle géométrique hybride orienté hBIM complet.**

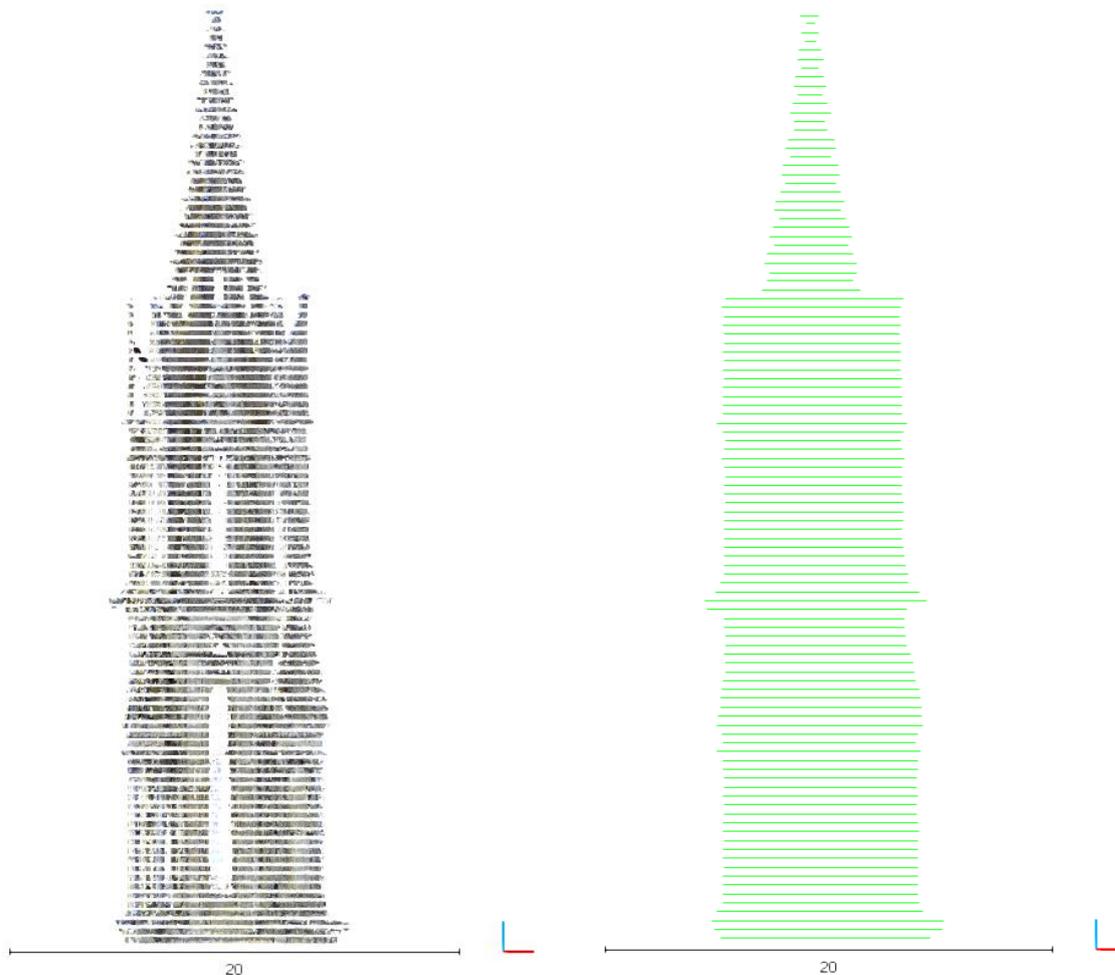


Figure 30 : Sections (à gauche) et contours (à droite) après extraction verticale tous les 20cm

Tous les principaux éléments structuraux ont été conservés parmi les données extraites, ce qui a contribué à simplifier le processus de modélisation et à le rendre plus rapide. Le nuage de points complet devenait ensuite utile pour l'étape de contrôle et d'inspection, une fois la géométrie partiellement ou totalement terminée. Aucune utilisation de données complémentaires ou de références externes (*dessins, relevés topographiques, etc.*) ne se montre nécessaire pour compléter la géométrie finale, et le nuage de points complet s'avère suffisant dans ce cas.

L'un des avantages d'une telle méthode de modélisation concerne la **rapidité de modélisation permise par l'emploi de composants paramétriques** (cf figure 31), la possibilité de focalisation sur les détails internes ou externes de la structure, et **l'adaptation permanente du niveau de détail**, permettant de compléter et améliorer progressivement le modèle ainsi construit.

Les modèles construits en ayant recours à la procédure employée dans ce contexte particulier s'avèrent donc **relativement simples à modéliser intégralement, de façon semi-automatisée**, particulièrement si l'on souhaite construire un modèle global plus général, sans y intégrer l'ensemble des détails architecturaux complexes existants. Le temps

de construction reste limité grâce à l'utilisation des composants paramétriques (environ 2 journées de travail) et ne nécessite que peu de travaux d'édition manuelle. Les phases d'analyse des résultats ne sont pas comptées dans cette durée et restent indépendantes du processus.

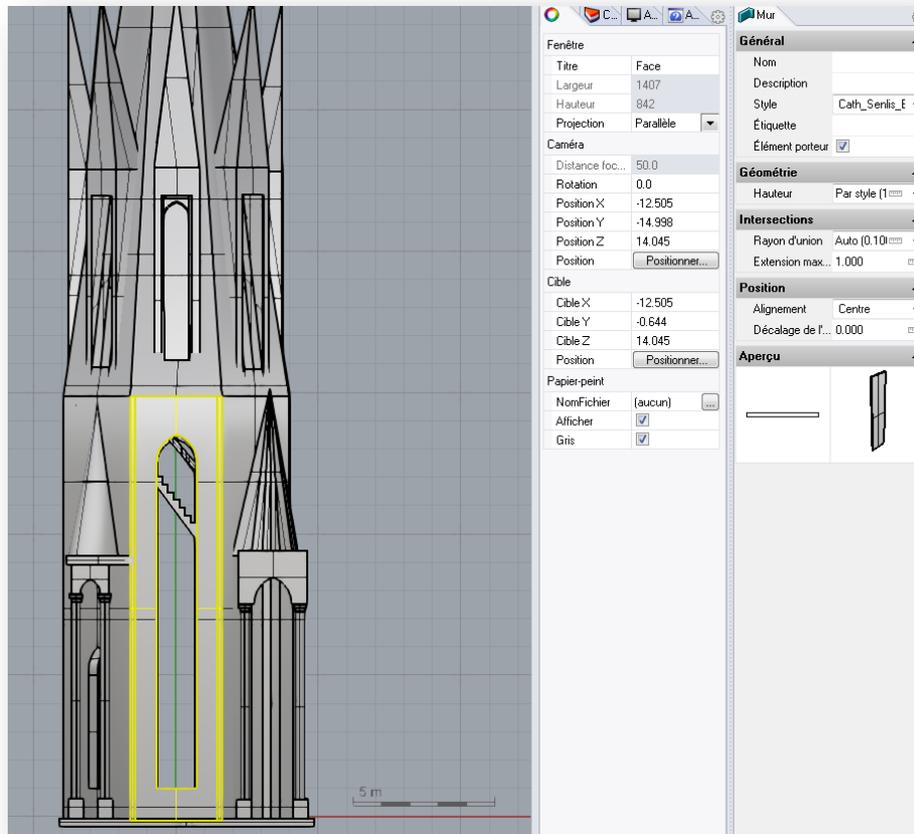


Figure 31 : Exemple de modélisation d'un mur paramétrique sur l'octogone externe

Aucune mesure supplémentaire n'est requise pour la phase de modélisation géométrique car toutes les données nécessaires sont stockées dans le nuage de points. L'utilisation de composants BIM évite les mesures externes par la possibilité de les adapter facilement aux dimensions des nuages de points et ainsi de conserver une bonne précision de la géométrie du modèle « *tel que construit* ».

La construction d'un modèle géométrique (de type *hybride* ou *intégralement paramétrique*) plus abouti comportant davantage de détails présente dans ce cas un intérêt moindre car le temps d'édition augmente alors significativement, et ne permet pas forcément d'aboutir à une qualité ou une précision identique à celles d'un modèle géométrique construit classiquement à partir de plans.

Il s'agit là d'une limitation encore difficile à surmonter dans le cas de bâtiments historiques complexes, et les temps consacrés à la modélisation sont rarement abordés explicitement dans la littérature. De plus, la construction de modèles typés hBIM très détaillés et complets

s'avère également un exercice difficile dans le contexte de bâtiments historiques complexes, notamment en raison de la grande complexité de la structure, mais aussi par la nécessité de disposer de l'ensemble des informations historiques, structurales et architecturales afin d'intégrer correctement l'ensemble des paramètres. Dès lors, l'emploi d'une telle méthode de modélisation géométrique reste pertinent, mais il convient de clairement définir les enjeux initiaux, et choisir entre rapidité pour l'obtention d'un modèle global, ou une édition beaucoup plus longue, mais permettant l'obtention de modèles plus détaillés.

Ce travail d'exploitation des données pour la modélisation a permis la construction d'un modèle hybride, comportant l'ensemble des éléments structuraux principaux sous forme de composants paramétriques et des compléments sous forme de composants mais sans les éléments architecturaux non pertinents comme les ornements, gargouilles, petites ouvertures, etc (cf figures 32 à 34). L'un des intérêts notables d'une telle méthode réside dans le fait qu'il est ainsi possible d'adapter le niveau de détails, mais également en raison de la rapidité de modélisation des éléments principaux. Dès lors, **l'utilisation de ces modèles 3D dans la perspective de construction de maillages aux éléments finis** est envisageable, bien que les volumes proposés restent globaux dans un but de compromis entre qualité et précision. De même, la constitution de modèles typés hBIM permet de faciliter les démarches pour la modélisation, au moins tant que les éléments à modéliser et les détails restent limités et cohérents.

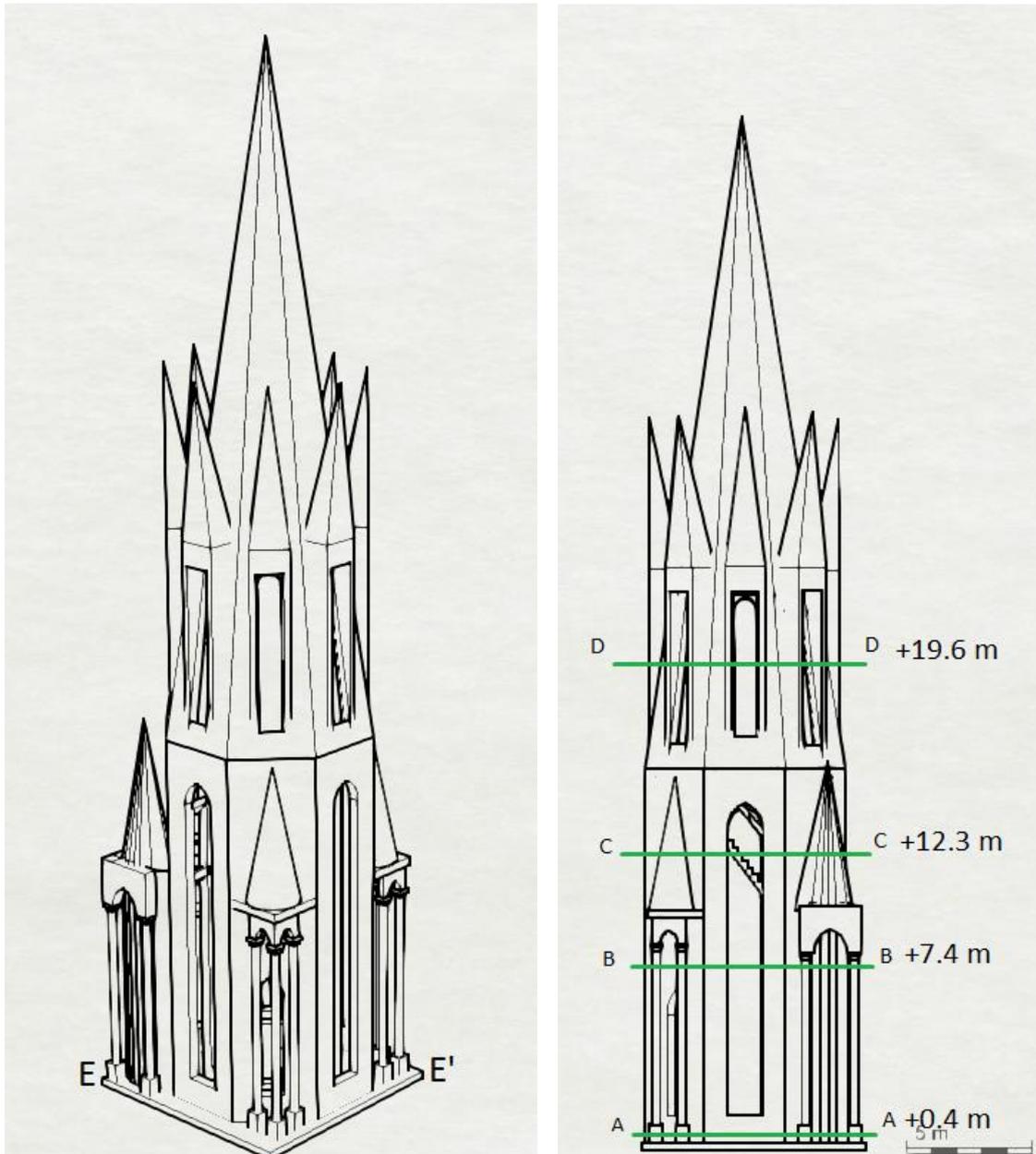


Figure 32 : Modèle géométrique hBIM de la flèche de la cathédrale (vues en perspective et vue de face)

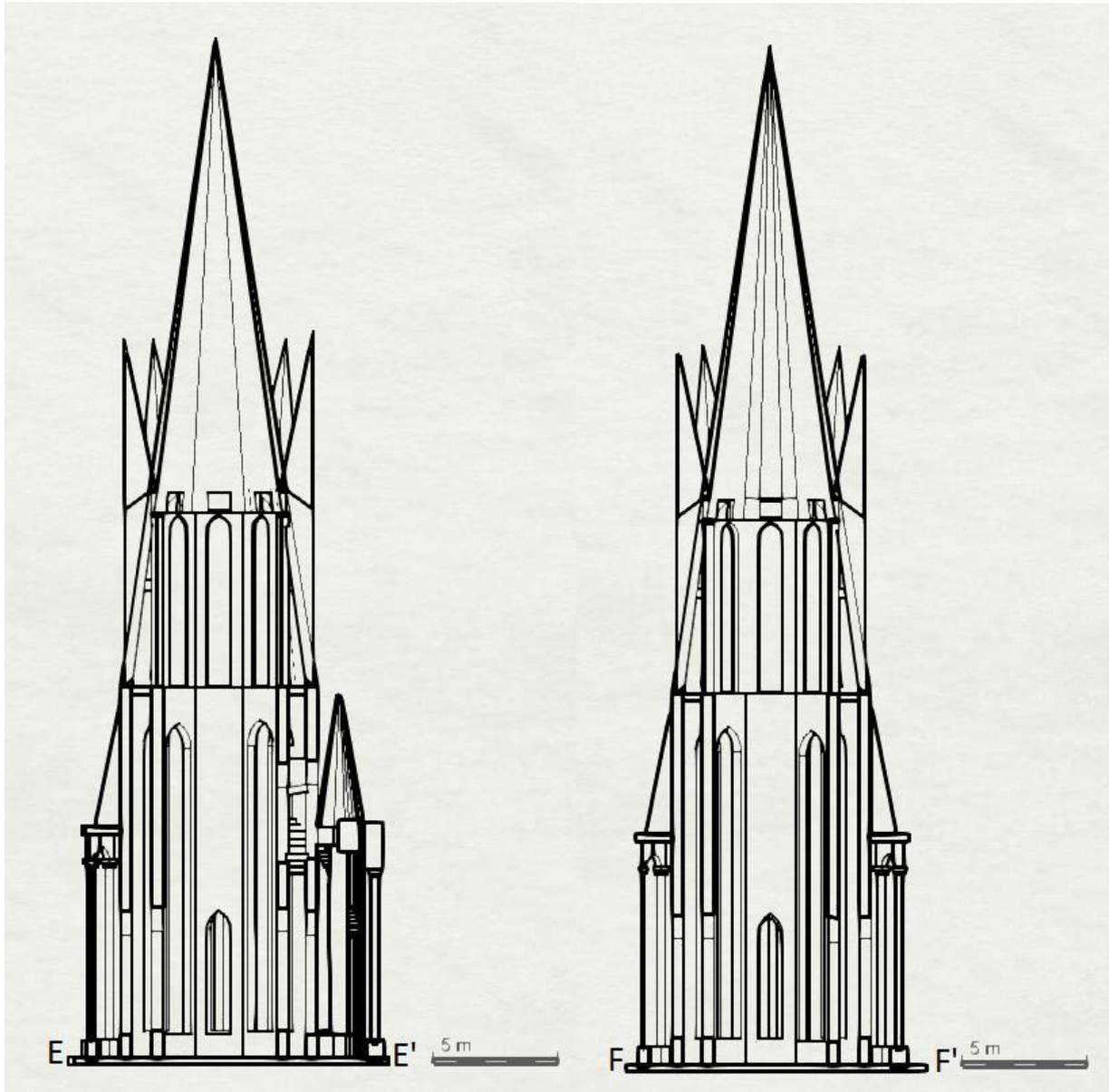


Figure 33 : Modèle géométrique hBIM de la flèche de la cathédrale (vues en perspective diagonales selon les sections EE' et FF')

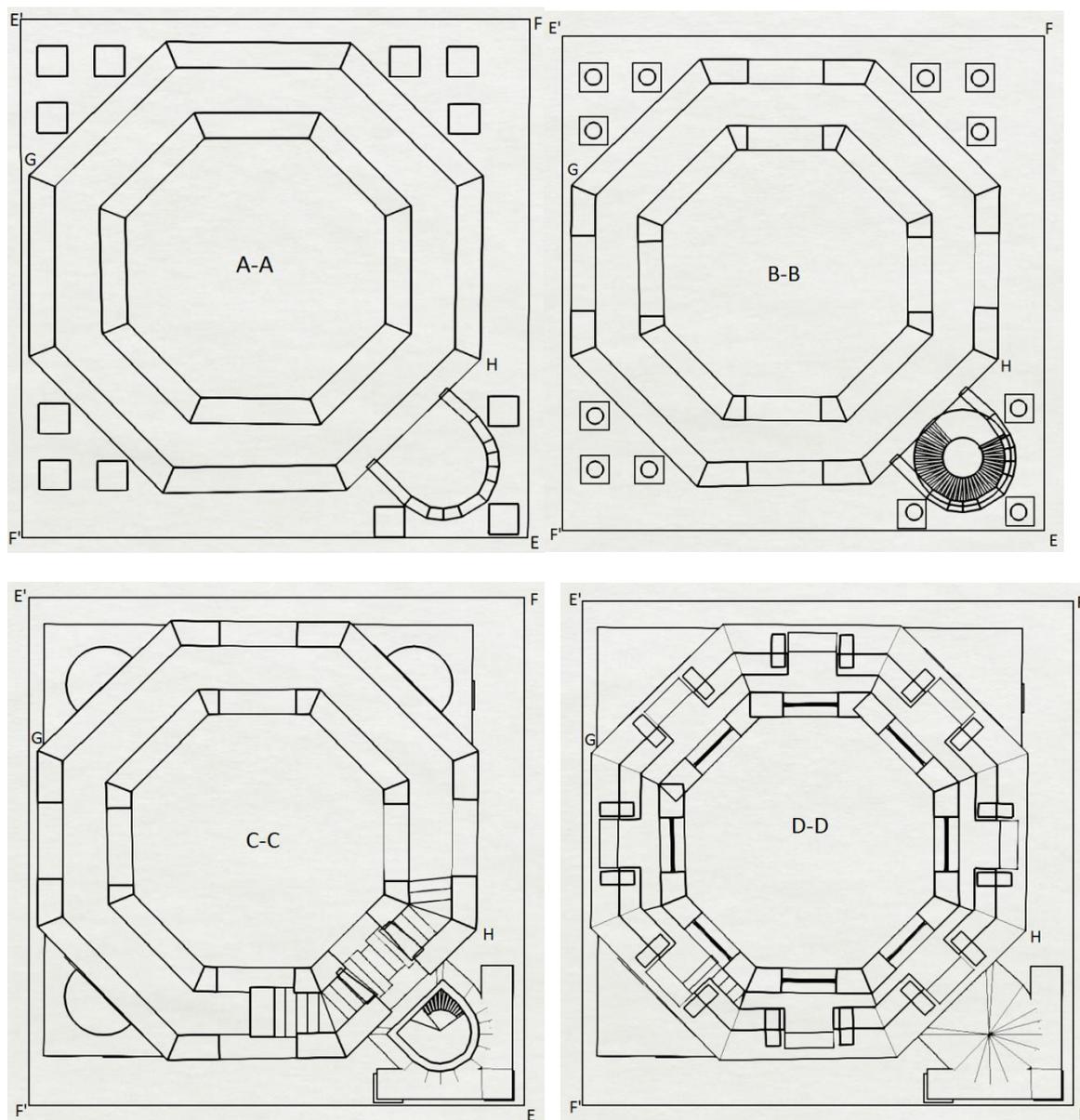


Figure 34 : Coupes dans la géométrie (sections A-A à D-D)

Une étape de **vérification de la qualité, de l'exactitude et de la cohérence de la géométrie** construite a été effectuée en exportant la géométrie hBIM et une version ré-échantillonnée du nuage de points (contenant 30 721 038 points) vers le logiciel *CloudCompare*, et en les référençant dans un même système de coordonnées local. La **distance entre le nuage de points et la géométrie (Cloud to Mesh)** a été calculée via un outil dédié, comme l'illustre la figure 35. Cette analyse montre ainsi qu'aucune différence particulière ni perte de précision n'a été trouvée entre le modèle hBIM (en noir) et le nuage de points (colorisé). Le chevauchement des éléments structuraux et architecturaux est correct et les principales variations de distance visible sont observées sur les parties supérieures des pinacles et au niveau de la dalle de support.

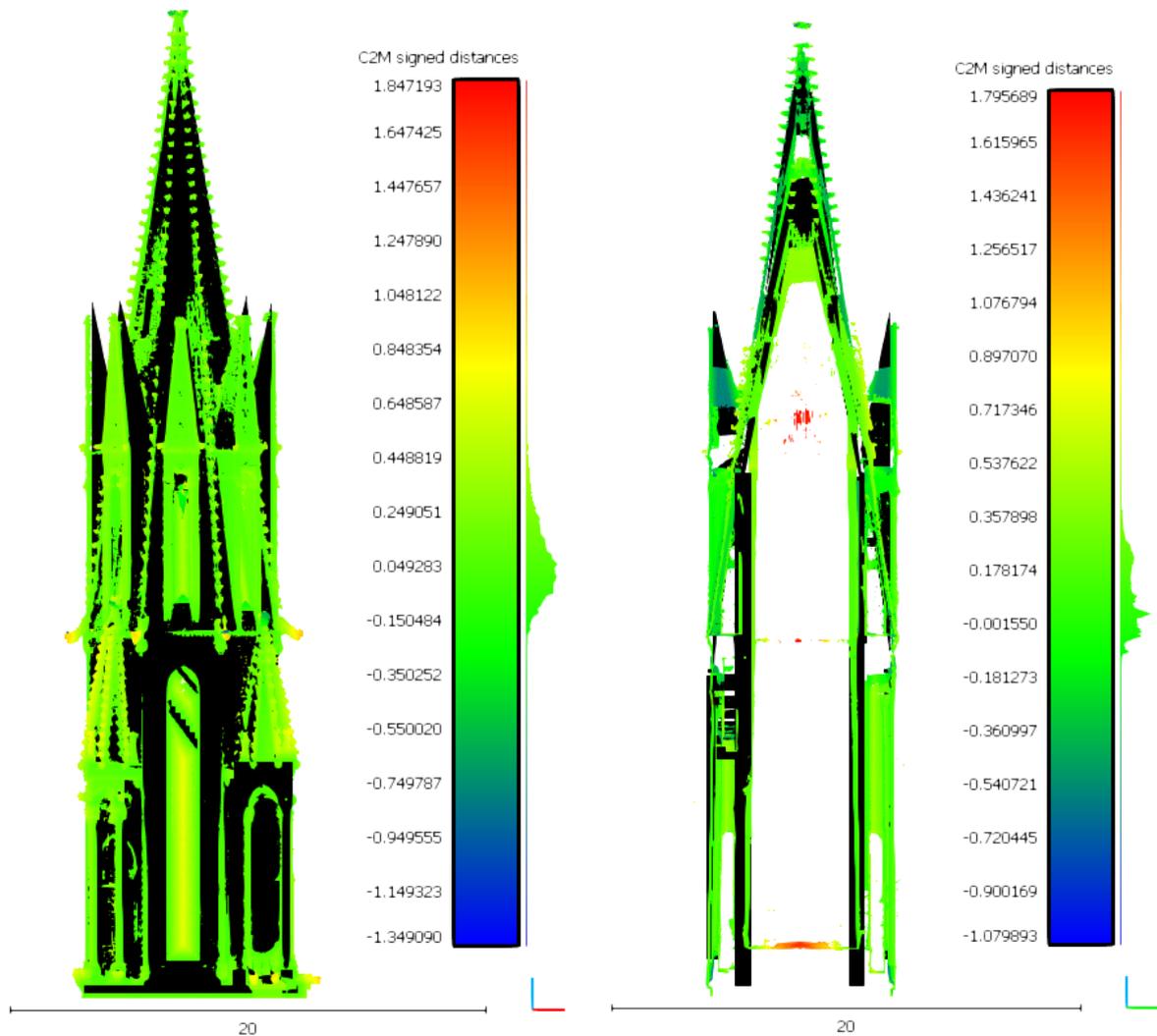


Figure 35 : Comparaison entre le nuage de point (en couleurs) et la géométrie hBIM construite (en noir) par calcul de distance *cloud-to-mesh*. Résultats en vue de face et section selon l'axe Y

La qualité et la précision restant similaires, cela nous a permis de valider la méthodologie de construction directement à partir des nuages de points. Cependant, des éléments architecturaux ont délibérément été omis parce qu'ils n'ont pas un rôle structural particulier (par exemple, des ornements sur le toit et des pinacles, des gargouilles ou de petites ouvertures dans la partie supérieure du toit), ce qui explique les variations entre la géométrie et le nuage de points constatées en certains endroits précis ainsi que des valeurs de distances ponctuellement élevées sur l'échelle de légende (voir figure 35). Rappelons également que l'intention n'était pas de produire un modèle hBIM architectural complet et détaillé car cela aurait inutilement compliqué le résultat final, sans correspondre à l'objectif initial.

En conséquence, l'évaluation de la qualité et de la précision des modèles équivaut dans ce cas à une comparaison entre la structure *telle que construite* (le nuage de points), et la structure *telle que conçue*, représentée par notre modèle 3D hBIM. **Le processus de rétro-ingénierie utilisé dans notre méthodologie révèle son potentiel et son efficacité dans ce contexte, le rendant utilisable pour d'autres situations et types de structures.** La

reproductibilité est possible pour différents types de structures et de bâtiments, et l'utilisateur se voit en mesure d'adapter la méthodologie à chaque étude de cas.

La surface de matériau (calcaire) sur la section A-A est de 16,80 m² pour les deux octogones seulement et de 20,98 m² pour la surface en contact avec la dalle de support, section B-B 18,27 m², section C-C 17,10 m² et section D-D 10,07 m².

4.5.2. Site de l'Hermitage

Le dernier cas d'étude pertinent pour la modélisation paramétrique de type BIM à partir de nuages de points a concerné différents bâtiments du site de l'Hermitage, situé à Autrêches, dans l'Oise.

Suite aux différentes campagnes de numérisation par lasergrammétrie effectuées en 2017 et 2018, des nuages de points issus de scanning laser en extérieur et en intérieur ont servi de base directe pour effectuer des **modélisations paramétriques de type BIM par rétro-ingénierie**, permettant de cette façon de modéliser l'état actuel des bâtiments par importation des nuages de points dans le logiciel *Revit 2016/2018* [86].

La géométrie des bâtiments numérisée étant dans ce cas simple, une **procédure de modélisation paramétrique semi-automatisée** similaire à celle utilisée dans le cas précédent (flèche de la cathédrale de Senlis) a été **déployée et adaptée selon les différentes configurations des bâtiments à modéliser**. La procédure employée dans ce cas consiste en une décomposition du nuage de points selon les différents niveaux des bâtiments (équivalent à la procédure de coupes et sections précédentes), permettant une modélisation par niveaux et par l'intermédiaire des différentes vues en plans ainsi créées. L'ensemble des nuages de points traités et exploités dans chacune des configurations spécifiques a permis la construction de différents maquettes numériques de type BIM, comportant l'ensemble des informations nécessaires pour des travaux d'exploitation ultérieurs tels que des analyses thermiques et la planification de travaux de réhabilitation énergétique notamment (cf figures 36 et 37).

Dans ce cas d'étude, l'objectif consistait à pouvoir mener, à partir des données numérisées, des travaux de modélisation géométrique rapide, en lieu et place d'une modélisation architecturale détaillée, non nécessaire pour le transfert et l'intégration des données issues des nuages de points et des modèles BIM vers des logiciels ou outils d'analyse thermique. En conséquence, seuls les composants structuraux et architecturaux principaux tels que les murs (porteurs ou non), les sols et planchers, les ouvertures et menuiseries, ou encore les éléments de toiture et couverture restent importants pour la modélisation 3D et l'exportation des données. La dernière étape après modélisation paramétrique concerne la décomposition des maquettes selon les différentes pièces et espaces intérieurs dans les bâtiments, éléments nécessaire pour l'importation des maquettes numériques sous des formats interopérables (de type IFC ou gbXML), comportant l'ensemble des informations surfaciques, spatiales et thermiques, vers des logiciels dédiés à l'étude et l'analyse des performances thermiques.



Figure 36 : Modèle BIM d'un chalet



Figure 37 : Modèle BIM de la maison du plateau

4.6. Bilan et analyse méthodologique des processus de modélisation géométrique et paramétrique

Au terme de ces différents travaux et des résultats obtenus au travers des différentes procédures mises en place, une réflexion méthodologique peut dorénavant être proposée, dans le but d'améliorer et optimiser les étapes de modélisation géométrique à partir de

nuages de points et autres données hétérogènes. En effet, comme nous avons pu le voir, **la grande complexité des bâtiments du patrimoine architectural et autres structures remarquables rend en général difficile l'emploi d'une seule méthode de modélisation géométrique ou paramétrique**, à l'image de la flèche de la cathédrale de Senlis. De plus, la diversité des types de bâti et des constructions, fonction notamment des régions et sites d'implantation, des périodes de constructions ainsi que des techniques et matériaux employés rendent chaque cas particulier, avec bien souvent des variations et adaptations nécessaires pour chaque type de modélisation envisagé selon les besoins. Cependant, des orientations et méthodes principales à privilégier peuvent être proposées selon les configurations des structures existantes.

Les réflexions proposées pour l'optimisation des processus de modélisation sont donc les suivantes :

- Dans le cas de structures présentant des **disparités ou discontinuités importantes**, des parties endommagées ou escarpées telles que des ruines, des cavernes ou des surfaces topographiques, la **modélisation géométrique par surfaces de type NURBS représente un choix judicieux** puisque l'ensemble des détails, imperfections, trous et dégâts apparents, peuvent être correctement intégrés aux modèles géométriques et représentés selon la précision et la qualité souhaitée. **La phase d'édition est rendue plus simple par la conversion des maillages surfaciques**, générés eux-mêmes à partir des nuages de points, en géométries de type NURBS, mais **l'un des inconvénients de cette méthode reste l'augmentation potentiellement significative du temps d'édition si le nombre de surfaces devient très élevé**, au bénéfice certes de l'amélioration significative de la précision ainsi que de la qualité des géométries et des détails, mais au détriment du temps d'édition et de la quantité de données. En revanche, les modèles géométriques complets et correctement édités (sans erreurs de raccordement, bords libres ou surfaces dupliquées notamment) s'avèrent très pertinents pour une restitution architecturale ou topographique détaillée suivie d'une intégration dans des moteurs 3D variés. Cette méthode de modélisation géométrique se montre dès lors très adaptée pour des restitutions au grand public et la meilleure compréhension des détails et de l'architecture de bâtiments et structures dont l'accessibilité n'est pas forcément permise, comme dans l'exemple du château de Coucy ou toutes les parties du site ne sont pas accessibles depuis un point de vue terrestre. Par l'intermédiaire des modèles 3D en réalité virtuelle, des possibilités d'annotation, indications et intégrations d'informations issues de relevés sur site deviennent possibles, permettant dès lors de documenter et compléter les modèles et ainsi les utiliser comme base pour des études ultérieures.
- Pour des **structures relativement simples**, présentant des **formes homogènes** et ne comprenant pas une multitude de détails ou discontinuités particulières, des **modèles 3D paramétriques de type BIM ou hBIM** s'avèrent particulièrement bien adaptés, comme dans le cas du site de l'Hermitage. En effet, **les procédures de modélisation semi-automatisée à partir des nuages de points et les données qui en sont extraites facilitent le processus de modélisation**, tout en permettant de conserver une très bonne précision ainsi qu'une bonne qualité des modèles. L'intégration de données complémentaires éventuellement disponibles telles que des

plans, levés topographiques ou autres relevés permettent d'enrichir les modèles 3D et de faciliter leur construction en disposant d'informations supplémentaires. **Les modèles géométriques 3D de type BIM ou hBIM se montrent ainsi pertinents pour des utilisations avancées telles que des analyses structurales ou thermiques**, en effectuant un transfert des modèles via des formats de fichiers compatibles. Le cas de structures et bâtiments plus complexes nécessite des traitements au cas par cas, en fonction des besoins, afin de déterminer au préalable si la construction de modèles 3D de type BIM s'avère la plus intéressante ou non.

- Dans le cas de **structures très complexes**, où de nombreux détails doivent être construits et intégrés aux modèles, la **modélisation par éléments paramétriques a énormément progressé, mais montre encore des limites**. Les modèles 3D et maquettes numériques de type BIM ou hBIM construits peuvent nécessiter un temps de modélisation et édition conséquent requérant des connaissances plus avancées et de meilleures compétences concernant l'utilisation des logiciels et leurs outils spécifiques. **L'incorporation de surfaces ou volumes géométriques en plus des composants paramétriques, permettant une meilleure restitution et description des géométries, représente dans ce cas un compromis particulièrement intéressant**, comme dans le cas de la flèche de la cathédrale de Senlis. De tels modèles deviennent donc *hybrides*, en comportant à la fois des éléments géométriques et d'autres éléments paramétriques. Cela permet de **contourner efficacement certaines limites inhérentes à la complexité des structures** et les potentielles difficultés liées à l'incorporation de composants paramétriques dans le cas où les détails et éléments à modéliser s'avèrent difficiles ou requièrent une précision particulière nécessitant des travaux d'édition manuelle.

4.7. Construction de géométries 3D et modèles paramétriques pour études thermiques

En parallèle, la construction de modèles 3D géométriques indépendants, peut aussi être effectuée si d'autres types d'études telles que des études thermiques, sont envisagées.

Ainsi, à partir de maquettes numériques conçues et modélisées dans une logique BIM via le logiciel *Revit*, **une exportation des modèles 3D et géométries BIM peut être exportée vers des logiciels dédiés à l'analyse thermique du bâtiment** (cf figure 38) en ayant recours à des **formats de fichiers interopérables de type IFC ou gbXML**, qui permettent une exportation complète des données géométriques et thermiques des composants, sans perte ni incohérence.

Les fichiers de type .gbXML s'avèrent pertinents pour un usage avancé en étude thermiques, d'une part grâce au fait que **l'ensemble des informations spatiales, surfaciques et les propriétés thermiques des matériaux sont correctement exportées et intégrées dans les fichiers résultants**, mais aussi parce que ces fichiers présentent une structure simple et sont donc faciles à éditer, dans le cas où l'on souhaite modifier leurs données ou éditer leurs contenus. L'importation des maquettes par l'intermédiaire du format gbXML dans le logiciel

Pleiades [87] permet la récupération des données citées précédemment, et leur utilisation directe pour la constitution d'études thermiques et d'analyse énergétique des structures bâties (cf figures 39 et 40).

Dans le cas des bâtiments du site de l'Hermitage, des analyses thermiques sur le bâti existant ont permis de déterminer les performances énergétiques du bâti existant et de comparer les résultats ainsi obtenus entre les simulations théoriques (basées sur les valeurs théoriques des propriétés thermiques des matériaux) et les simulations réalistes, prenant en compte les propriétés thermiques des matériaux obtenues par mesures et relevés effectués in situ. Les études détaillées et résultats ne sont néanmoins pas présentés ici car ne relevant pas directement de nos travaux, mais illustrent l'application et la validation de la méthodologie mise en place pour ce type de configuration.

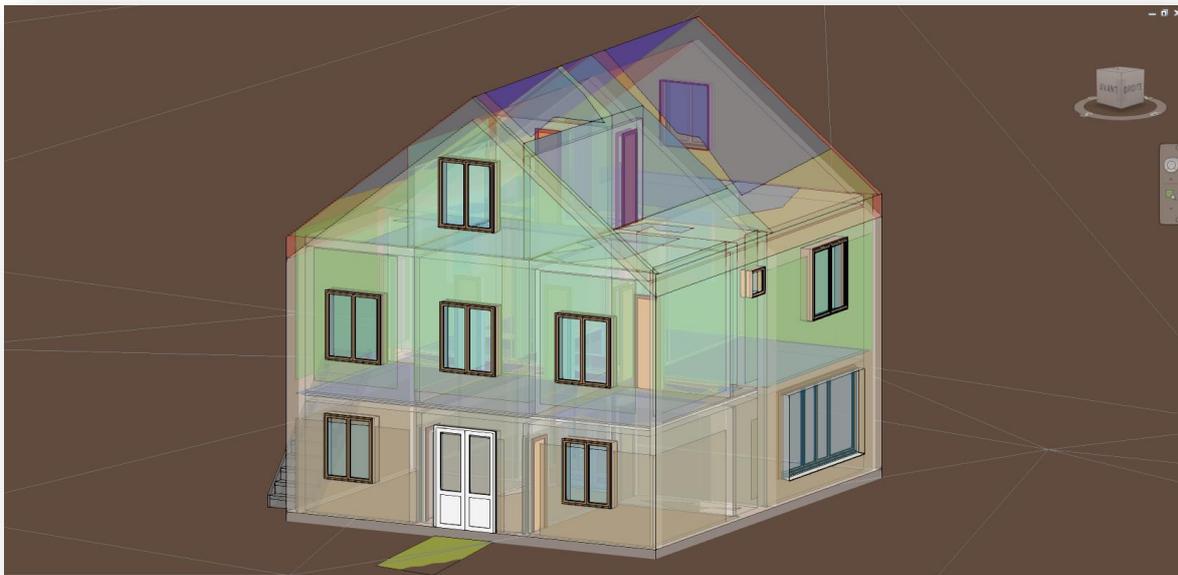


Figure 38 : Maquette numérique de la maison du plateau avec modèle énergétique activé

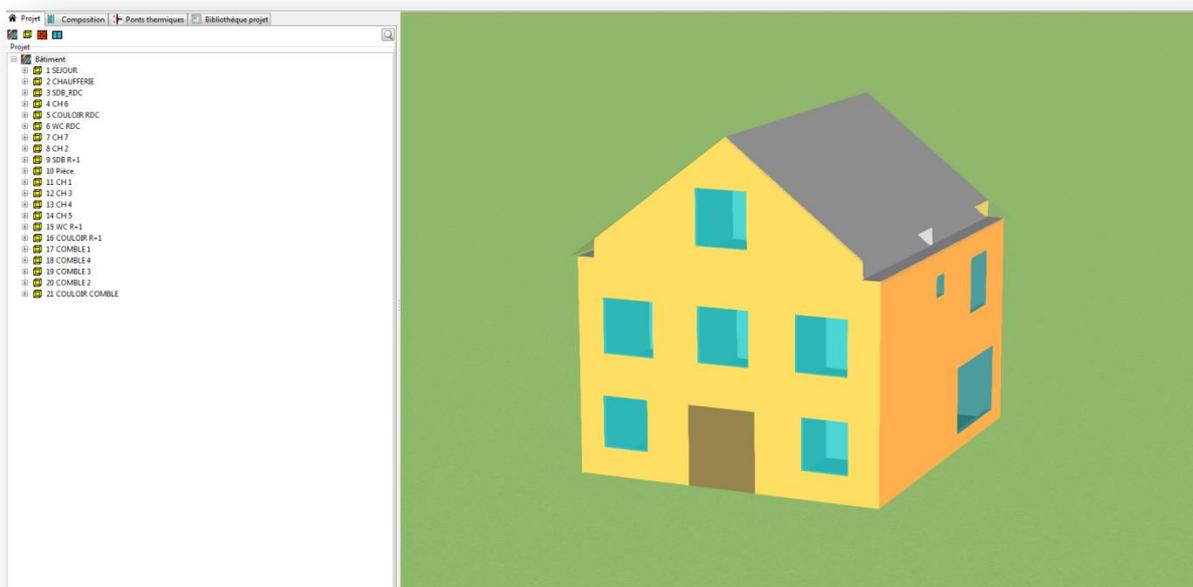


Figure 39 : Maquette importée au format gbXML dans le logiciel Pleiades

Nom de la pièce	Nom de la paroi	Contact	Surface	Orient.	Incl.	Ouv.	Esurf.	Esurf.	Composition
1 SEJOUR	Mur extérieur 1/1	Extérieur	17,26	-165		90	0		Mur extérieur_NORD_maison plateau
1 SEJOUR	Mur extérieur 1/2	Extérieur	0,42	-105		90	0		Mur extérieur_maison plateau
1 SEJOUR	Mur extérieur 1/3	Extérieur	12,83	-105		90	1		Mur extérieur_maison plateau
1 SEJOUR	Plancher bas 1/4	Moyen identique	39,99		180		180	0	Plafond/Plancher BETON RDC_maison plateau
1 SEJOUR	Mur intérieur 1/5	2 CHAUFFERIE / Mur intérieur 2/1	7,43	75		90	1		Cloison_maison plateau
1 SEJOUR	Mur intérieur 1/6	3 SDB_RDC / Mur intérieur 3/1	5,51	-105		90	0		Cloison_maison plateau
1 SEJOUR	Mur intérieur 1/7	4 CH6 / Mur intérieur 4/1	1,34	-14		90	0		Mur porteur_maison plateau
1 SEJOUR	Mur intérieur 1/8	5 COULOIR RDC / Mur intérieur 5/1	7,21	166		90	1		Mur porteur_maison plateau
1 SEJOUR	Mur intérieur 1/9	6 WC RDC / Mur intérieur 6/1	8,71	-14		90	0		Mur porteur_maison plateau
1 SEJOUR	Plafond 1/10	8 CH 2 / Plancher Int. 8/1	15,76	0		0	0	0	Plafond/Plancher BETON RDC_maison plateau
1 SEJOUR	Plafond 1/11	9 SDB R-1 / Plancher Int. 9/1	10,75	0		0	0	0	Plafond/Plancher BETON RDC_maison plateau
1 SEJOUR	Plafond 1/12	10 Pièce / Plancher Int. 10/1	4,48	0		0	0	0	Plafond/Plancher BETON RDC_maison plateau
1 SEJOUR	Mur intérieur 1/13	15 WC R-1 / Mur intérieur 15/1	0,01	166		90	0		Mur porteur_maison plateau
2 CHAUFFERIE	Mur intérieur 2/1	1 SEJOUR / Mur intérieur 1/5	7,43	-105		90	1		Cloison_maison plateau
2 CHAUFFERIE	Mur extérieur 2/2	Extérieur	6,77	165		90	1		Mur extérieur_NORD_maison plateau
2 CHAUFFERIE	Mur extérieur 2/3	Extérieur	7,31	75		90	0		Mur extérieur_maison plateau
2 CHAUFFERIE	Plancher bas 2/4	Moyen identique	6,84		180		180	0	Plafond/Plancher BETON RDC_maison plateau
2 CHAUFFERIE	Mur intérieur 2/5	3 SDB_RDC / Mur intérieur 3/2	6,77	-14		90	1		Mur porteur_maison plateau
2 CHAUFFERIE	Plafond 2/6	9 SDB R-1 / Plancher Int. 9/2	0,12	0		0	0	0	Plafond/Plancher BETON RDC_maison plateau
2 CHAUFFERIE	Plafond 2/7	11 CH 1 / Plancher Int. 11/1	6,72	0		0	0	0	Plafond/Plancher BETON RDC_maison plateau
3 SDB_RDC	Mur intérieur 3/1	1 SEJOUR / Mur intérieur 1/6	5,51	75		90	0		Cloison_maison plateau
3 SDB_RDC	Mur intérieur 3/2	2 CHAUFFERIE / Mur intérieur 2/5	6,77	166		90	1		Mur porteur_maison plateau
3 SDB_RDC	Mur extérieur 3/3	Extérieur	5,10	75		90	0		Mur extérieur_maison plateau
3 SDB_RDC	Mur extérieur 3/4	Extérieur	0,41	75		90	0		Mur extérieur_maison plateau
3 SDB_RDC	Plancher bas 3/5	Moyen identique	5,11		180		180	0	Plafond/Plancher BETON RDC_maison plateau
3 SDB_RDC	Mur intérieur 3/6	4 CH6 / Mur intérieur 4/2	6,77	-14		90	0		Mur porteur_maison plateau
3 SDB_RDC	Plafond 3/7	9 SDB R-1 / Plancher Int. 9/3	0,03	0		0	0	0	Plafond/Plancher BETON RDC_maison plateau
3 SDB_RDC	Plafond 3/8	10 Pièce / Plancher Int. 10/2	0,06	0		0	0	0	Plafond/Plancher BETON RDC_maison plateau
3 SDB_RDC	Plafond 3/9	11 CH 1 / Plancher Int. 11/2	5,02	180		180	0		Plafond/Plancher BETON RDC_maison plateau
4 CH6	Mur intérieur 4/1	1 SEJOUR / Mur intérieur 1/7	1,34	166		90	0		Mur porteur_maison plateau
4 CH6	Mur intérieur 4/2	3 SDB_RDC / Mur intérieur 3/6	6,77	166		90	0		Mur porteur_maison plateau
4 CH6	Mur extérieur 4/3	Extérieur	8,10	-15		90	1		Mur extérieur_maison plateau
4 CH6	Mur extérieur 4/4	Extérieur	14,72	75		90	0		Mur extérieur_maison plateau
4 CH6	Plancher bas 4/5	Moyen identique	16,28		180		180	0	Plafond/Plancher BETON RDC_maison plateau
4 CH6	Mur intérieur 4/6	5 COULOIR RDC / Mur intérieur 5/2	14,41	-105		90	1		Cloison_maison plateau
4 CH6	Plafond 4/7	12 CH 3 / Plancher Int. 12/1	11,94	0		0	0	0	Plafond/Plancher BETON RDC_maison plateau
4 CH6	Mur intérieur 4/8	13 CH 4 / Mur intérieur 13/1	0,17	75		90	0		Cloison_maison plateau
4 CH6	Plafond 4/9	13 CH 4 / Plancher Int. 13/2	0,20	0		0	0	0	Plafond/Plancher BETON RDC_maison plateau

Figure 40 : Liste de paramètres et composants traités pour analyse thermique

L'un des points particuliers dans ce type d'usage consiste à **vérifier et éditer les informations thermiques contenues dans les fichiers .gbXML** afin de pouvoir récupérer et utiliser les données correctes et les plus fiables possibles dans les études thermiques.

Plusieurs méthodes sont possibles pour l'amélioration des données et informations contenues dans les fichiers : une **édition des maquettes numériques par la modification des propriétés des familles de composants** ou la **création de nouvelles familles**, la **modification manuelle des fichiers .gbXML** après leur génération afin de remplacer ou compléter les propriétés voulues, ou bien **l'application de scripts permettant de rechercher les informations à éditer et les corriger directement**.

Une phase de **modification et d'édition manuelle des fichiers** se montre tout à fait **cohérente et efficace** dans le cas où **peu de composants sont à éditer**, par exemple avec un nombre de matériaux ou d'ouvertures assez faible. C'est le cas notamment pour les constructions plus récentes ou ne présentant pas de grande complexité géométrique, comme dans le cas des bâtiments du site de l'Hermitage. Les propriétés théoriques des matériaux de construction peuvent ainsi être directement remplacées par des valeurs plus réalistes obtenues par des mesures sur site et ainsi améliorer la qualité et la précision des résultats des études thermiques ultérieures. Ce point se montre particulièrement important dans la mesure où des travaux de rénovation énergétique sont envisagés et où l'établissement de bilans thermiques et analyses des consommations sont nécessaires.

Les fichiers de type IFC ou gbXML peuvent être édités, enregistrés et exploités directement par les logiciels d'analyse thermique, mais **les fichiers de type gbXML s'avèrent plus simples à éditer et modifier car leur structure et organisation est plus cohérente et accessible**. Les paramètres et propriétés thermiques des matériaux et éléments sont ainsi mieux organisés et simples d'accès, et les fichiers sont beaucoup plus lisibles. (cf figures 41 et 42)

```

<Material id="aim0026">
  <Name>Rendu, beige, Lisse: 0.03 [m]</Name>
  <R-value unit="SquareMeterKPerW">0.03472222</R-value>
  <Thickness unit="Meters">0.025</Thickness>
  <Conductivity unit="WPerMeterK">0.72</Conductivity>
  <Density unit="KgPerCubicM">1860</Density>
  <SpecificHeat unit="JPerKgK">840</SpecificHeat>
</Material>
<Material id="aim0033">
  <Name>Brique, commune: 0.1 [m]</Name>
  <R-value unit="SquareMeterKPerW">0.1888889</R-value>
  <Thickness unit="Meters">0.102</Thickness>
  <Conductivity unit="WPerMeterK">0.54</Conductivity>
  <Density unit="KgPerCubicM">1550</Density>
  <SpecificHeat unit="JPerKgK">840</SpecificHeat>
</Material>
<Material id="aim0040">
  <Name>Air: 0.05 [m]</Name>
  <R-value unit="SquareMeterKPerW">2</R-value>
  <Thickness unit="Meters">0.05</Thickness>
  <Conductivity unit="WPerMeterK">0.025</Conductivity>
  <Density unit="KgPerCubicM">1.2</Density>
  <SpecificHeat unit="JPerKgK">1003.5</SpecificHeat>

```

Figure 41 : Exemple de propriétés thermiques contenues dans un fichier au format gbXML

```

#1288= IFCPRODUCTDEFINITIONSHAPE($,$,#1284));
#1291= IFCCARTESIANPOINT((8.06076532453415,4.05881665862333,2.925));
#1293= IFCAxis2Placement3D(#1291,$,$);
#1294= IFCLOCALPLACEMENT(#1098,#1293);
#1295= IFCOPENINGELEMENT('1_1nouten23QxnhUZuYIBr',#42,'Mur de base:Ext\X2\00E9\X0\rieur -
Rendu sur brique sur bloc:126839',$,'Opening',#1294,#1288,$,..OPENING.);
#1298= IFCRELVOIDSELEMENT('3skkapxkXCgefeyb1okoJr',#42,$,$,#1129,#1295);
#1301= IFCAxis2Placement3D(#1454,$,$);
#11070= IFCSHAPEREPRESENTATION(#104,'Body','AdvancedBrep',(#11069));
#1303= IFCCARTESIANPOINT((-8.41487441572715,-3.91931665862333,0.07500000000000003));
#1305= IFCVERTEXPOINT(#1303);
#1306= IFCCARTESIANPOINT((-8.57271057451814,-3.81681665862333,0.07500000000000003));
#1308= IFCVERTEXPOINT(#1306);
#1309= IFCDIRECTION((-0.838670567945425,0.544639035015025,0.));
#1311= IFCVECTOR(#1309,0.3048);
#1312= IFCLINE(#1303,#1311);
#1313= IFCEGEDCURVE(#1305,#1308,#1312,.T.);
#1314= IFCCARTESIANPOINT((-8.57271057451814,-3.81681665862333,0.));
#1316= IFCVERTEXPOINT(#1314);

```

```

#1317= IFCVECTOR(#22,0.3048);
#1318= IFCLINE(#1306,#1317);
#1319= IFCEGECURVE(#1308,#1316,#1318,.T.);
#1320= IFCCARTESIANPOINT((-8.41487441572715,-3.91931665862333,0.));
#1322= IFCVERTEXPOINT(#1320);
#1323= IFCDIRECTION((0.838670567945425,-0.544639035015025,0.));
#1325= IFCVECTOR(#1323,0.3048);
#1326= IFCLINE(#1314,#1325);
#1327= IFCEGECURVE(#1316,#1322,#1326,.T.);
#1328= IFCVECTOR(#20,0.3048);
#1329= IFCLINE(#1320,#1328);
#1330= IFCEGECURVE(#1322,#1305,#1329,.T.);
#1331= IFCCARTESIANPOINT((1.63279198467985,-3.91931665862333,0.0750000000000003));
#1333= IFCVERTEXPOINT(#1331);

```

Figure 42 : Exemple de propriétés thermiques et coordonnées contenues dans un fichier au format IFC

En revanche, si les structures se complexifient et que de nombreux matériaux ou composants divers sont présents, une modification automatisée peut s'avérer plus rapide et efficace afin d'éviter toute erreur durant l'édition, à condition que l'ensemble des familles et composants soient intégrés dans les scripts, ce qui peut devenir fastidieux.

Les travaux présentés dans cette partie n'ont cependant pas fait l'objet d'études et analyses plus poussées, en raison notamment de leur éloignement quant au sujet de travail principal. Néanmoins, il s'agit là d'un axe de travail et de développement présentant un potentiel considérable, pouvant faire l'objet d'une thèse complète dédiée à ce champ d'étude et investigations.

4.8. Utilisation des nuages de points pour la détection d'éléments géométriques

Dans le cas où l'on souhaite éviter de recourir à la construction de modèles 3D de type BIM, soit en l'absence de nécessité ou du manque d'outils ou logiciels nécessaires, des procédures de **détection de primitives géométriques, de segmentation et de construction de composants géométriques** à partir des nuages de points peuvent être envisagées. En effet, lorsque des modèles géométriques 3D sont construits à partir des nuages de points et de primitives géométriques, les éléments constitutifs des nuages de points sont approchés par des formes géométriques spécifiques (plans, cylindres, sphères, etc).

Un premier **processus de segmentation automatisée dans les nuages de points** afin de **détecter des primitives géométriques, les extraire et les transformer en géométries concrètes**, exploitables dans des logiciels de CAO et via le recours à des formats de fichier compatibles avec des logiciels d'analyses thermiques, a été étudié et appliqué en recourant à une suite logicielle (basée de préférence sur des logiciels libres) permettant une adaptation

en fonction des besoins et des circonstances. Le logiciel *CloudCompare*, déjà employé auparavant grâce à sa polyvalence très intéressante, se montre efficace pour l'application de la procédure appliquée ici. En effet, outre l'utilisation de différents outils permettant le nettoyage et le filtrage des nuages de points ou l'extraction de sections, différents algorithmes permettant des traitements complémentaires sont applicables, et notamment **l'algorithme RANSAC**, permettant l'extraction de plans, cylindres, sphères et autres composants géométriques depuis des entités telles que des nuages de points.

Dans les faits, le terme RANSAC est une abréviation de la formule « *RANdom SAMple Consensus* », et constitue **une méthode permettant d'estimer les paramètres de certains modèles mathématiques**. Il s'agit d'une méthode itérative, utilisée lorsque l'ensemble de données observées peut contenir des valeurs aberrantes. L'application de l'algorithme permet d'obtenir un résultat correct avec une certaine probabilité seulement, celle-ci augmentant à mesure que le nombre d'itérations est grand. Cet algorithme a été publié pour la première fois par Fischler et Bolles en 1981 [88]. L'hypothèse servant de base lors de l'exécution de l'algorithme réside dans le fait que les éléments à traiter sont constituées de données d'entrée indiquées comme cohérentes. En l'occurrence, il est nécessaire que les données principales décrivent correctement les géométries dans le cas des nuages de points, et d'autres données plus aberrantes, qui ne correspondent pas forcément au modèle choisi, peuvent également être présentes, par exemple en raison de bruit de mesure et de perturbations engendrées par l'acquisition par lasergrammétrie, ou d'autres artefacts résiduels dans les nuages de points à analyser.

L'algorithme RANSAC s'exécute en sélectionnant itérativement un sous-ensemble aléatoire à partir des données d'entrées (considérées comme *hypothétiques pertinentes*), sélectionnées dans le nuage de point et évaluées selon le processus suivant :

1. Un modèle est ajusté aux données hypothétiques pertinentes, c'est-à-dire que tous les paramètres libres du modèle sont estimés à partir de ce sous-ensemble de données ;
2. Toutes les autres données sont ensuite testées sur le modèle précédemment estimé. Si un point correspond bien au modèle estimé, alors il est considéré comme une donnée pertinente candidate ;
3. Le modèle estimé est considéré comme correct si suffisamment de points ont été classés comme données pertinentes candidates ;
4. Le modèle est ré-estimé à partir de ce sous-ensemble des données pertinentes candidates ;
5. Finalement, le modèle est évalué par une estimation de l'erreur des données pertinentes par rapport au modèle.

Cette procédure est répétée selon un **nombre d'itérations fixé**, défini en entrée par l'utilisateur, chaque itération produisant soit un modèle rejeté si trop peu de points sont classés comme données pertinentes, soit un modèle réajusté et amélioré, avec une mesure d'erreur correspondante. Dans ce dernier cas, le modèle réévalué est conservé et amélioré si son erreur est plus faible que dans le cas du modèle généré par un passage précédent. Le principe d'exécution de l'algorithme est présenté ci-après [32, 89].

Algorithm 1 RANSAC algorithm

```
MinP ← Minimum points to estimate the parameters of the mathematical model
IT ← Calculate the minimum number of iterations. Equation 1
CurIT ← 0
BestSolutionSet ← ∅ CandidatesToSet ← ∅ P ← Points sample
while CurIT < IT do
  ConsensusSet ← "MinP" random points of P and estimate the model parameters
  CandidatesToSet ← P - ConsensusSet
  while size(CandidatesToSet) > 0 do
    rPoint ← random point from CandidatesToSet
    if |distance(rPoint, model parameters)| ≤ THRESHOLD then
      ConsensusSet = ConsensusSet + rPoint
    end if
    CandidatesToSet = CandidatesToSet - rPoint
  end while
  if size(ConsensusSet) > size(BestSolutionSet) then
    BestSolutionSet ← ConsensusSet
  end if
  CurIT ← CurIT + 1
end while
Adjust parameters to BestSolutionSet if possible
RETURN parameter
```

Alg. 1. Processus d'exécution de l'algorithme RANSAC [88]

4.8.1. Segmentation automatisée

L'application de l'algorithme RANSAC sur des exemples de nuages de points différents, de qualité et de complexité variables, permet dans un premier temps **d'analyser les fonctionnalités, les avantages et les limites inhérentes à l'application de l'algorithme et aux résultats obtenus**. Précisons cependant que les nuages de points utilisés dans le cadre de cette procédure ont préalablement subi des étapes de filtrage et nettoyage afin de réduire le nombre de points, supprimer les obstacles et éléments internes pour limiter les aberrations et artefacts, et ne conserver ainsi que la structure principale des bâtiments, le but étant ici d'employer l'algorithme de façon efficace. Un premier exemple de bâtiment concerne le nuage de point d'un local à vélos situé sur le campus de l'UTC, numérisé intégralement par lasergrammétrie et comportant deux pièces intérieures (cf figure 43). Ce bâtiment présente des dimensions réduites et des formes géométriques très simples. En conséquence, **l'application de l'algorithme RANSAC, avec des paramètres correctement définis en entrée** (cf figure 44), **se montre rapide et fournit de nombreux plans issus de la segmentation et l'extraction** (cf figure 45). Parmi les options d'entrée à fournir pour l'exécution de l'algorithme, seule la détection de plans a été activée, puisque l'algorithme peut également détecter des sphères, des cylindres, etc, mais de tels éléments ne se montrent pas nécessaires dans les cas étudiés.

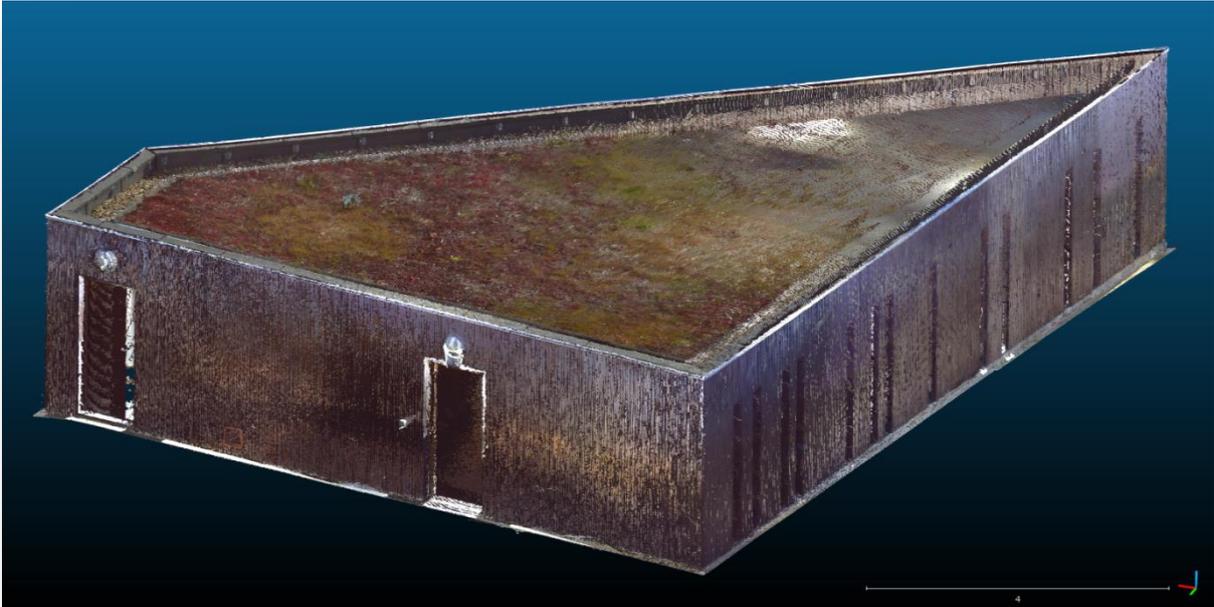


Figure 43 : Nuage de points du local à vélos

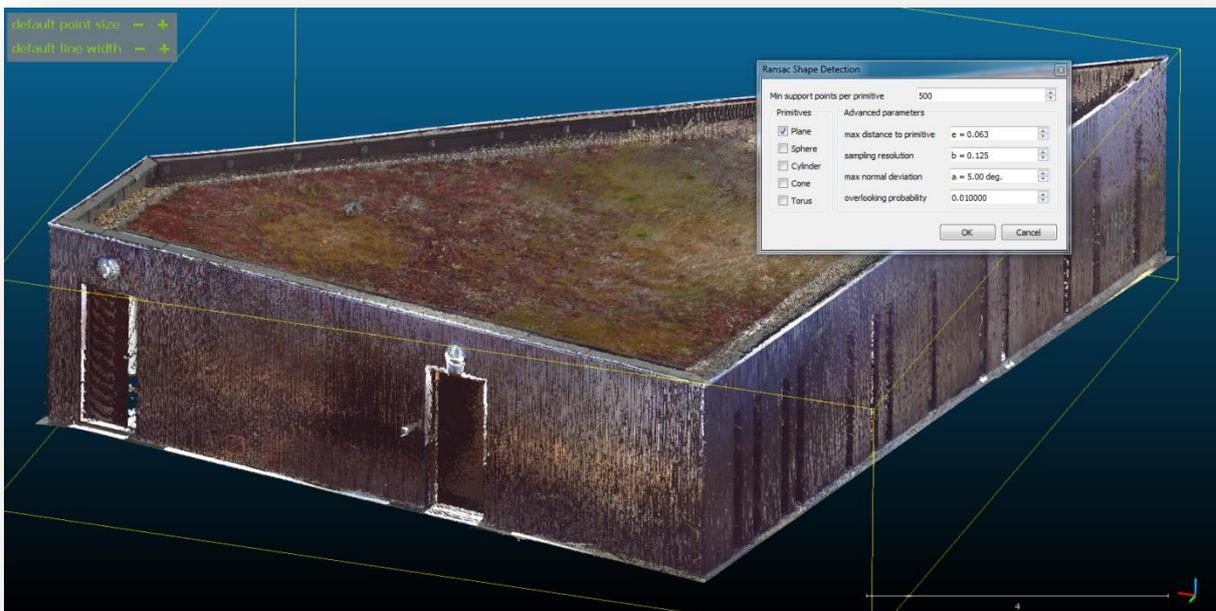


Figure 44 : Paramètres d'extraction de l'algorithme RANSAC avec l'outil dédié

Les résultats obtenus à l'issue de la détection et de l'extraction mettent en évidence le fait que l'application de l'algorithme RANSAC peut s'avérer pertinente et fournit des **extractions correctement reliées à la géométrie réelle existante** dans les nuages de points, mais **beaucoup d'éléments redondants peu utiles ou encombrants sont également présents** à l'issue de la première restitution et doivent ensuite être éliminés manuellement ou en affinant les paramètres d'application de l'algorithme. De tels éléments encombrant donc inutilement les rendus et ne se montrent pas pertinents ni utiles pour des travaux de modélisation et exploitation ultérieurs. De plus, les ouvertures ne sont pas détectées ni extraites dans les plans créés, ce qui implique nécessairement une édition complémentaire afin de les intégrer correctement dans les géométries finales.

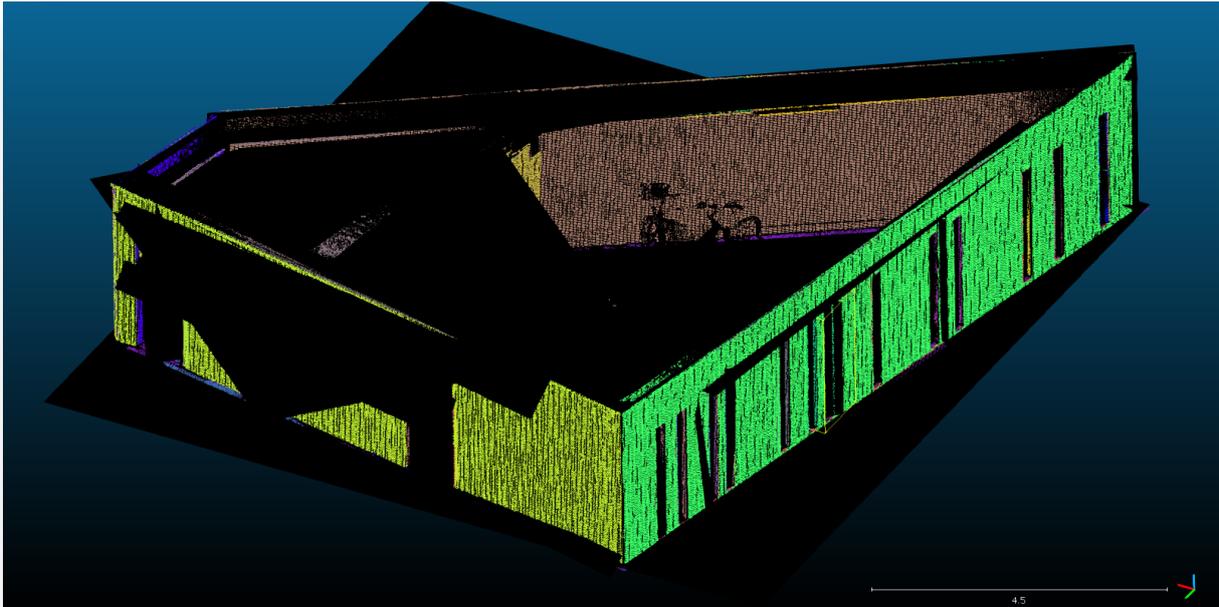


Figure 45 : Extraction de plans sur le local à vélos après application de l'algorithme RANSAC

Par ailleurs, une autre limitation d'usage apparaît, à savoir la **nécessité d'optimiser au préalable le nuage de points**, en effaçant ou supprimant tous les éléments et points inutiles pour la détection et la segmentation, comme les sols, éléments de mobilier, décors intérieurs, obstacles ponctuels etc. Cette phase de nettoyage devient nécessaire afin de **limiter le nombre de plans et surfaces détectés** et ainsi **améliorer la rapidité et la qualité des segmentations**, mais requiert donc une étape supplémentaire de contrôle et édition préalable. Une telle étape ne présente pas de difficulté dans le cas où les géométries restent simples et les nuages de points légers, mais dès que la complexité des géométries ou la taille des nuages de points augmente, ce temps d'édition augmente en conséquence.

Un second exemple de bâtiment concerne le site de l'Hermitage présenté auparavant, et plus particulièrement le bâtiment désigné comme « la Ferme ». L'ensemble de la structure extérieure du bâtiment a été entièrement numérisé par lasergrammétrie (cf figure 46). Les dimensions extérieures du bâtiment sont assez importantes mais les formes géométriques globales restent simples.

Après une phase de préparation et optimisation du nuage de points (nettoyage et filtrage complémentaire), **l'application de l'algorithme RANSAC permet d'obtenir toute une série de plans reliés de façon plus ou moins cohérente à la géométrie réelle**. Nombre d'entre eux s'avèrent inutiles car recouvrant des plans déjà existants, ou incorrects car présentant des déviations d'angle trop importantes ne correspondant pas à des plans réels. Ceux-ci doivent être systématiquement supprimés manuellement afin d'éviter un encombrement inutile des géométries rendant illisible les résultats (cf figure 47). En effet, seuls les plans principaux restent importants pour des travaux ultérieurs, et tout particulièrement la transformation et la restitution géométrique (cf figure 48).

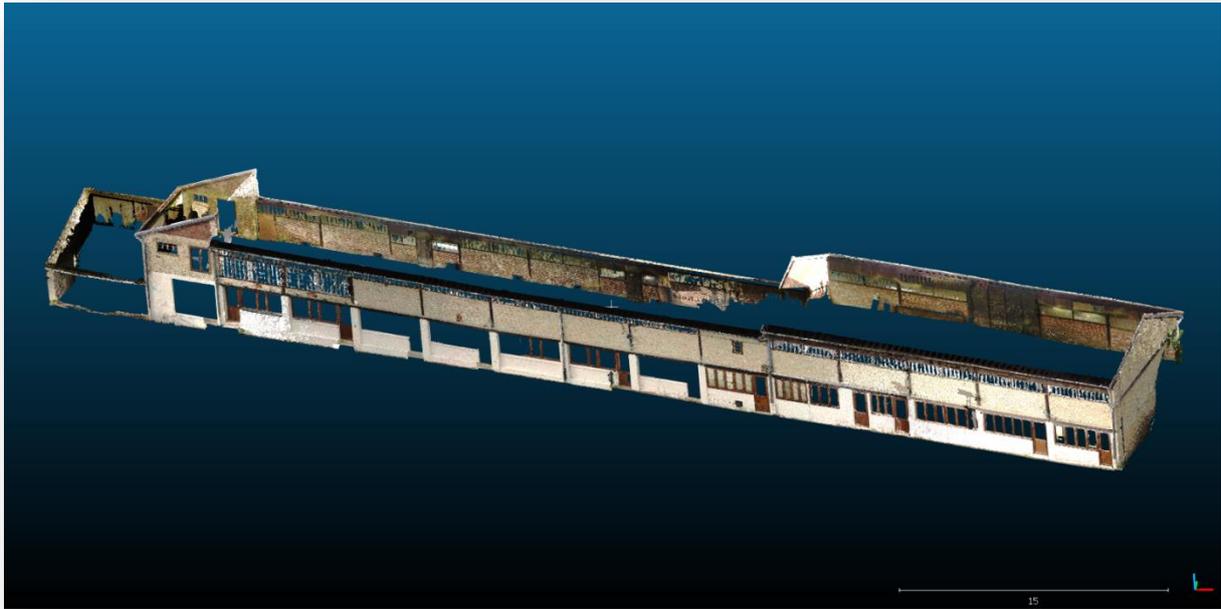


Figure 46 : Nuage de points extérieur (filtré et nettoyé) de la Ferme de l'Hermitage

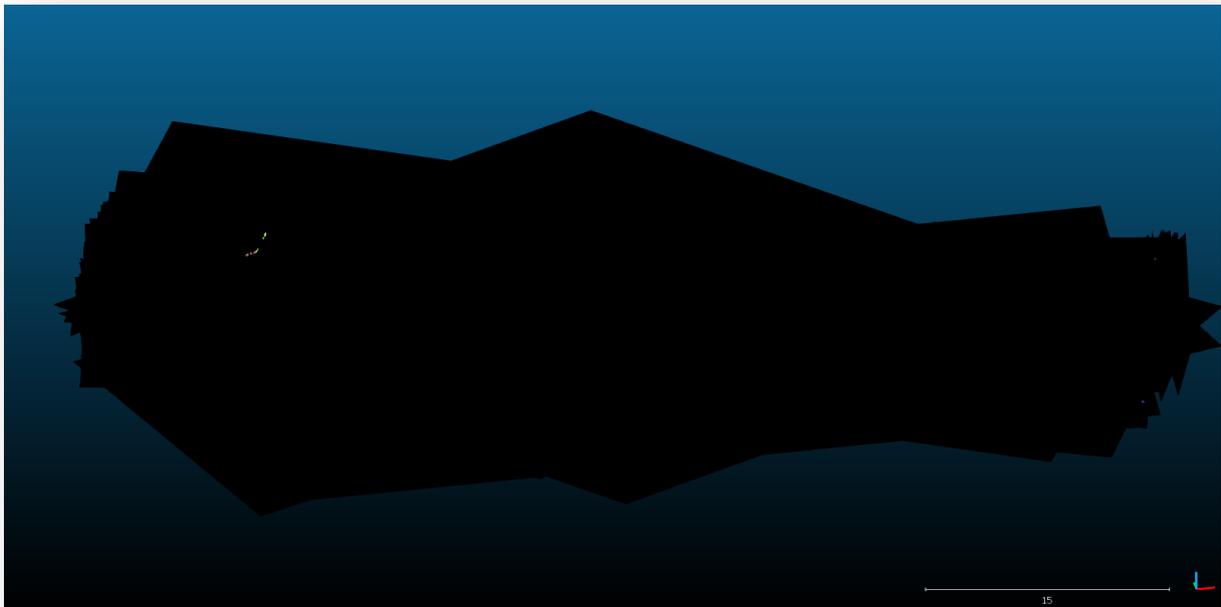


Figure 47 : Extraction de plans verticaux depuis le nuage de points (résultats bruts après extraction)

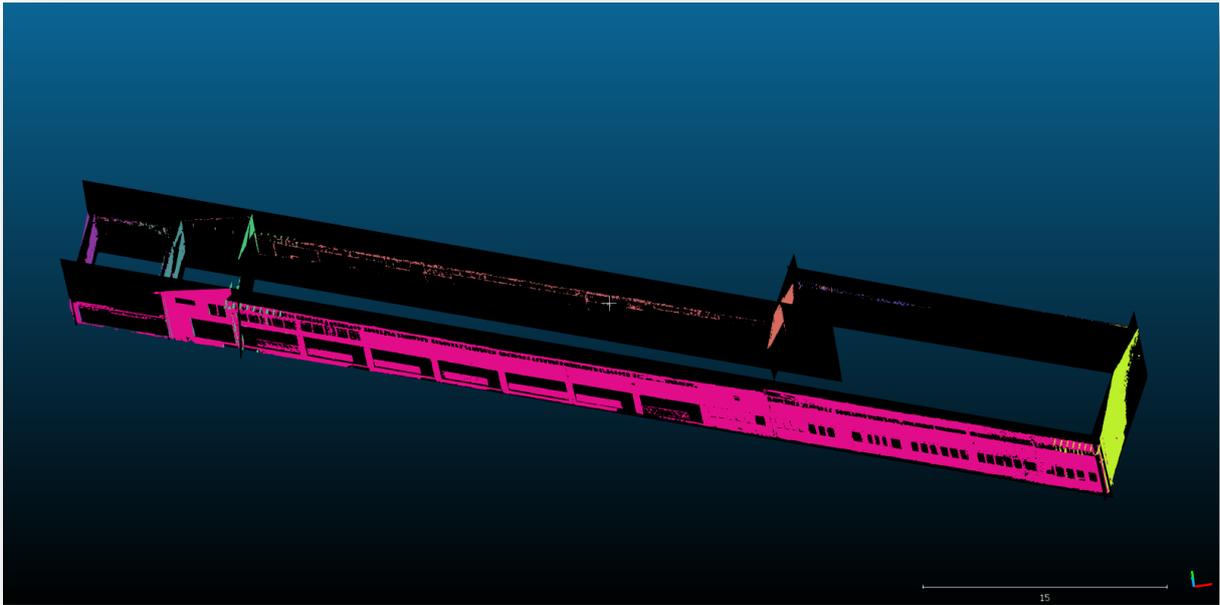


Figure 48 : Plans extraits conservés après nettoyage

Par ailleurs, le temps de traitement et d'application de l'algorithme RANSAC se montre sensible à la qualité des nuages initiaux : leur taille totale, le nombre de points, mais également la complexité des surfaces et des géométries, l'encombrement des pièces ou des espaces, etc. L'utilisation de nuages filtrés (par conservation de points uniformément espacés notamment) et nettoyés permet de limiter et améliorer nettement les temps de traitement, et ce quelle que soit la configuration des nuages de points (bâtiments simples ou complexes).

Cependant, comme constaté précédemment, **des limites quant à l'application de l'algorithme surviennent rapidement dès lors que les structures de données à analyser se complexifient** et que le nombre de détails et d'éléments dans les nuages de points augmente, comme dans le cas du bâtiment de la Ferme, qui ne présente pourtant pas de complexité géométrique particulièrement élevée. **De nombreux éléments considérés comme des « faux positifs »** apparaissent (en l'occurrence des plans), ainsi que des **redondances entre plans et autres éléments extraits**, voire des éléments aberrants inutiles pour la modélisation ou l'exportation, ce qui nécessite ensuite tout un ensemble de corrections manuelles et un filtrage des géométries créés afin d'effectuer un tri entre celles à conserver et celles à supprimer ou ignorer.

Il s'agit là de **limites de traitement initiales non négligeables**, qui doivent être contournées, par exemple en améliorant la qualité des données d'entrée et les détails dans les nuages de points. L'affinage des paramètres pour l'extraction et la détection doit cependant être effectué de façon empirique car **chaque nuage de point présente ses propres caractéristiques intrinsèques**, et les paramètres attribués en entrée pour l'exécution de l'algorithme RANSAC se montrent sensibles à de telles caractéristiques. De plus, une autre limitation réside dans le fait qu'aucune ouverture ou menuiserie ne sont détectées par l'application de l'algorithme, et ce quel que soit le niveau de détail initial dans le nuage de points, ce qui nécessite donc un travail d'édition manuelle pour les intégrer ensuite aux géométries 3D finalisées et assemblées.

Quel que soit le résultat obtenu en sortie de l'algorithme, les **géométries segmentées et extraites doivent ensuite être transférés vers des logiciels de modélisation géométrique 3D** (*Revit, Rhinoceros, Sketchup, FreeCad, etc*) afin de finaliser manuellement les assemblages des géométries, l'attribution de propriétés (composants, matériaux, données thermiques, etc), ou encore la création des pièces, espaces ou volumes (cf figures 49 à 52). La finalisation et l'assemblage des géométries pour construire des modèles géométriques 3D complets et cohérents restent évidemment des étapes indispensables afin de les exploiter ultérieurement et leur affecter les propriétés matérielles, mécaniques ou thermiques.

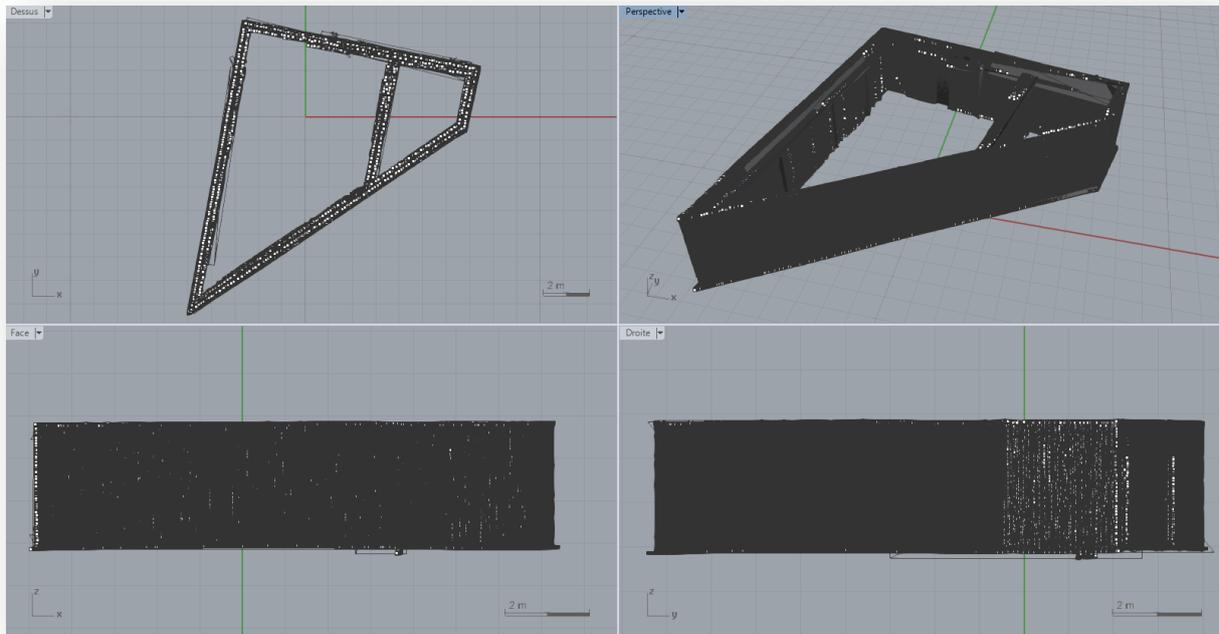


Figure 49 : Géométries brutes et nuage correspondant du local à vélos importés au format .dxf dans le logiciel Rhinoceros5 (avant traitement)

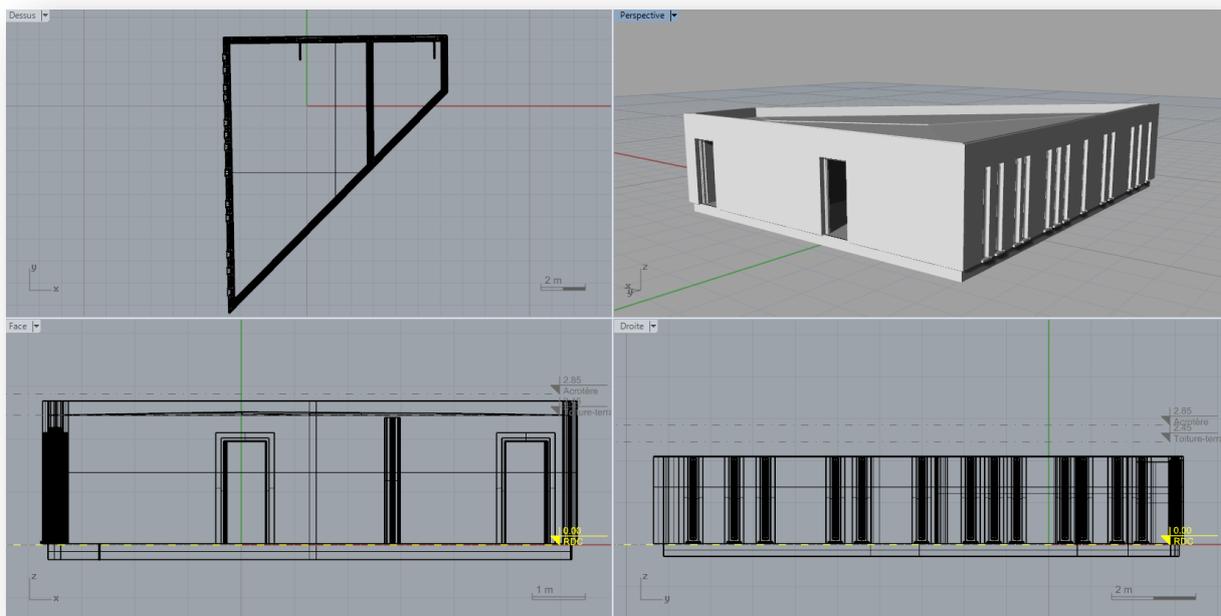


Figure 50 : Modèle géométrique de type BIM du local à vélos construit avec Rhinoceros5 et son extension VisualARQ

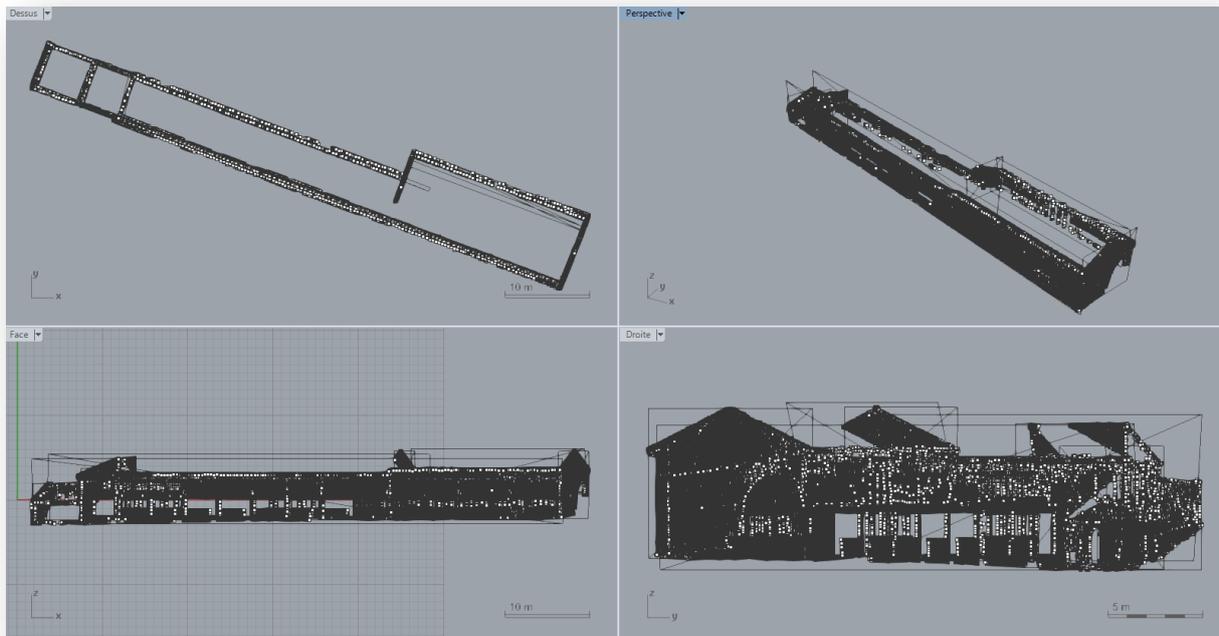


Figure 51 : Géométries brutes et nuage correspondant de la Ferme de l'Hermitage importés au format .dxf dans le logiciel Rhinoceros5 (avant traitement)



Figure 52 : Modèle géométrique BIM de la Ferme de l'Hermitage construit avec Revit

Ces paramètres se montrent très importants si l'on souhaite récupérer l'ensemble de ces informations pour ensuite générer des fichiers de type .gbXML ou IFC, destinés par exemple à des analyses thermiques. En effet, il n'est pas possible d'utiliser directement des géométries car elles ne comportent aucune information particulière et les formats d'exportation compatibles ne permettent pas de récupérer simplement les géométries. Une autre limitation apparaît ainsi, puisque l'affectation de propriétés de matériaux (structurales ou thermiques, par exemple) se fait de façon manuelle si les propriétés ne sont pas présentes en tant que paramètres de base. Dès lors, un tel processus ne présente pas nécessairement d'avantages particuliers, puisque nécessitant un temps de traitement,

édition et modélisation géométrique/paramétrique, avec le risque lié de perte de précision engendré par la segmentation et l'extraction de plans, en lieu et place d'une utilisation directe des nuages de points pour la modélisation géométrique.

Pour aller plus loin, des perspectives d'amélioration et d'expansion résident dorénavant dans l'application et le développement des outils liés à l'intelligence artificielle et aux algorithmes d'apprentissage du type *deep-learning*, qui devrait permettre des progrès significatifs dans ce champ d'étude.

4.8.2. Segmentation semi-automatisée

Afin d'étudier et appliquer une autre piste d'amélioration et d'optimisation de la procédure d'extraction et de segmentation pour la modélisation géométrique, une seconde méthode de **segmentation, extraction de plans et construction semi-automatisée d'éléments surfaciques et géométriques** a été mise en place en utilisant le logiciel 3DReshaper. Dans ce cas, le processus de détection de plans et de segmentation est semi-automatisé et repose en partie sur des actions de l'utilisateur permettant la construction progressive de géométries depuis les nuages de points.

Les **fonctions de création d'éléments tels que des plans, des cylindres ou des sphères, sont appliquées en sélectionnant directement des coordonnées ou des éléments dans les nuages de points**. Des plans peuvent ainsi être construits par sélection d'au moins trois points directement dans le nuage de points correspondant. L'intérêt d'un tel processus repose sur le fait que tous les éléments construits de la sorte restent cohérents (puisque préparés par l'utilisateur), et **aucun plan ou autre composant aberrant ne vient dégrader le résultat final** ou alourdir les géométries construites par des redondances géométriques. L'utilisateur contrôle le processus en permanence et choisit ainsi les éléments à construire et exporter. Une telle méthode s'avère accessible dans le cas où la géométrie des bâtiments reste simple ou ne présente que peu d'intersections et plans internes, par exemple. Cependant, l'application d'une telle méthode reste optimisée en se basant sur des nuages de points préalablement nettoyés et filtrés, l'objectif restant là aussi d'améliorer leur lisibilité, limiter les détails présents et donc conserver une rapidité d'exécution et d'extraction.

Une **extraction et création de plans** a été réalisée de la sorte sur le bâtiment de la ferme, à partir du même nuage de point initial que celui utilisé précédemment (cf figure 53). L'un des intérêts dans ce cas concerne le fait que les composants et entités segmentés et construits sont choisis en entrée par l'utilisateur, ce qui n'engendre pas la présence de « faux positifs » ou de plans redondants, par exemple. Le résultat est ainsi un fichier et un **ensemble de géométries moins lourd à exporter et à traiter par la suite, mais ne comportant là aussi que des plans et surfaces « basiques »**, sans apport d'informations complémentaires, et sans qu'il soit possible d'incorporer les ouvertures et autres composants dans le processus de segmentation, sauf à procéder à une phase d'édition manuelle ou semi-automatisée (à l'aide des nuages de points ou de sections, par exemple), augmentant alors le temps d'édition mais permettant ainsi de compléter et améliorer la qualité et la précision des géométries finales.

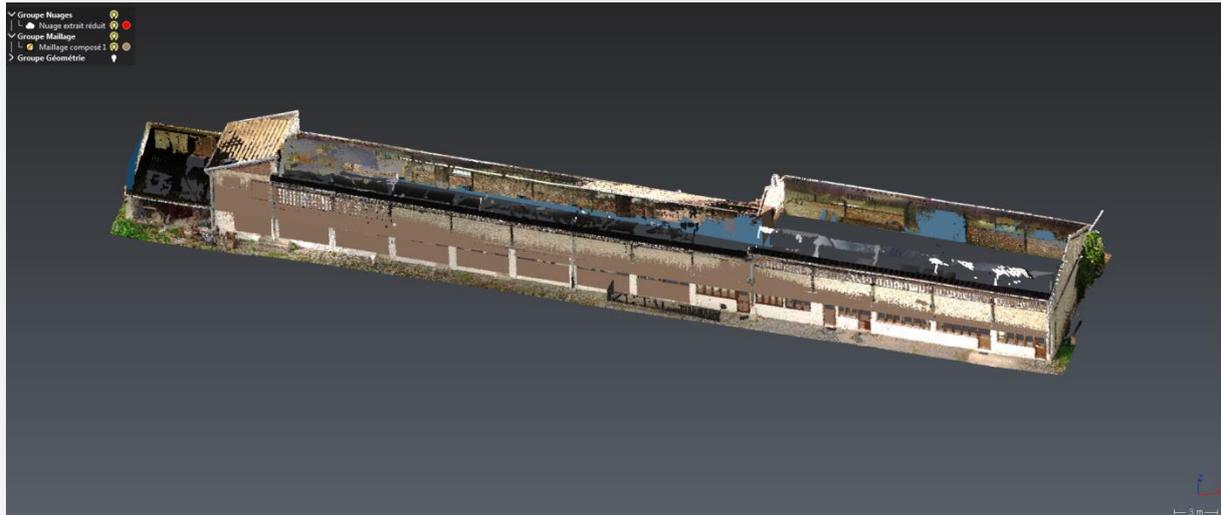


Figure 53 : Extraction de plans semi-automatisée sur les principaux éléments structuraux de la Ferme

Les géométries ainsi créées sont ensuite exportées sous des formats géométriques surfaciques de type .obj, .dxf, vers des logiciels de modélisation géométrique ou BIM, afin de les transformer en composants paramétriques, leur attribuer des propriétés, placer d'autres composants tels que les ouvertures, etc. La délimitation des pièces, espaces et volumes d'enveloppe interne ou externe doit également être réalisée manuellement ou de façon semi-automatisée afin de finaliser les géométries servant à délimiter l'enveloppe thermique du bâtiment. (cf figure 54). En conséquence, les étapes de finalisation et assemblage des géométries restent importantes dans toutes les conditions d'exploitation et de modélisation, sinon les données exportées risquent de se montrer incorrectes et les fichiers résultants potentiellement inexploitable.

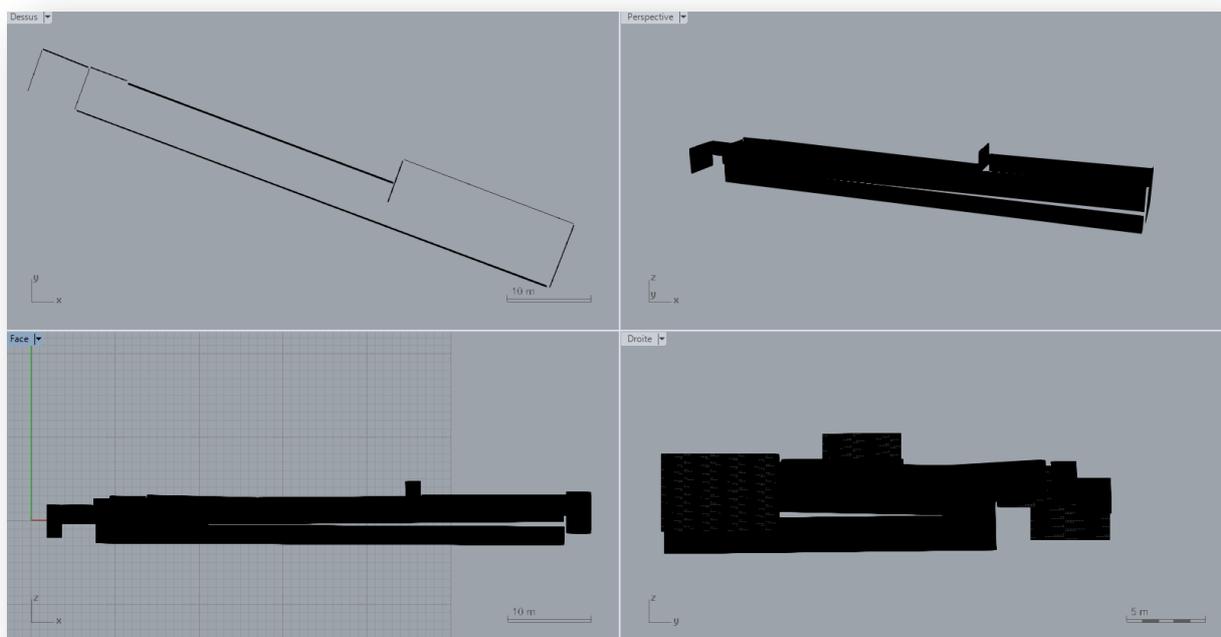


Figure 54 : Géométrie brute de la Ferme importée dans le logiciel Rhinoceros5 (avant traitement)

Une fois les divers travaux d'édition effectués et les conditions minimales remplies, des exportations sous les types de formats de fichiers IFC ou .gbXML peuvent ensuite être effectués. Cependant, l'intérêt et la pertinence réelle de ce type d'utilisation des données issues des nuages de points pour la modélisation et l'exploitation avancée reste questionnable par rapport à des travaux de modélisation de type BIM basés sur les nuages de points, en raison notamment des imprécisions potentielles des plans détectés (plans de murs obliques, par exemple) et des travaux d'édition et exportation nécessaires pour transformer l'ensemble des données et entités géométriques et les exporter sous des formats compatibles.

La conversion de fichiers au format .gbXML est une étape délicate qui requiert nécessairement le passage par un logiciel de modélisation BIM, afin d'y intégrer toutes les informations voulues concernant les matériaux et leurs propriétés, par exemple, ainsi que les pièces et espaces internes. En conséquence, des risques de perte de précision et de qualité des modélisations géométriques 2D ou 3D sont également possibles et doivent être bien pris en compte puisque les éléments extraits par application et utilisation des algorithmes ne présentent pas systématiquement les mêmes caractéristiques que les nuages de points et nécessitent beaucoup de préparation des nuages de points en amont, afin de permettre leur application sans aboutir à des résultats aberrants ou manquant de précision.

4.9. Bilan et perspectives pour la modélisation géométrique par extraction et détection

Les procédures de **détection, extraction et segmentation mises en place et appliquées dans le cadre de nos travaux sont exploitables** bien que leur potentiel reste **fortement dépendant des paramètres appliqués pour l'extraction de composants et de géométries**, ainsi qu'à sensibilité et la variabilité des résultats obtenus, en fonction notamment de la complexité des nuages de points ou du nombre d'éléments initiaux. Les éléments obtenus par les deux principales procédures exploitées et mises en application servent donc de base pour la modélisation géométrique 3D surfacique ou orientée BIM, et les études avancées correspondantes.

La complexité potentielle des structures et bâtiments ainsi que l'ensemble des éléments et détails composants les nuages de points engendrent des **limites d'utilisation et d'exploitation des résultats de segmentation et détection** que seuls des travaux préalables ou complémentaires d'édition et traitement permettent de compléter, ce qui en restreint donc la pertinence et les capacités d'utilisation ultérieures en raison de la nécessité d'adaptation correcte des algorithmes de détection et d'extraction à chaque contexte, puisque **les paramètres à appliquer et les résultats peuvent différer sensiblement dès lors que les structures et géométries se complexifient et ne présentent pas des formes idéales ou basiques**.

En conséquence, ces travaux n'ont pas fait l'objet d'investigations davantage détaillées, notamment par manque de temps, mais aussi en raison des trop grandes incertitudes et variations de qualité des résultats et géométries créées en fonction des contextes et

structures à modéliser. Des études plus approfondies sont requises afin d'améliorer la compréhension, l'utilisation et l'implantation efficace des algorithmes pour optimiser l'application de ces méthodes de détection, segmentation et extraction. De telles améliorations feront l'objet de travaux futurs.

4.10. Bilan du chapitre

L'ensemble des travaux et résultats présentés dans ce chapitre ont constitué le point central des travaux de thèse, en contribuant ainsi à proposer des utilisations spécifiques, des améliorations et optimisations sur les plans méthodologiques et informatiques concernant l'utilisation des données issues de la numérisation. Les nuages de points constituant dorénavant des sources structurées, cohérentes et fiables d'informations surfaciques, structurales et architecturales, leur utilisation pour la modélisation géométrique s'impose de plus en plus comme une évidence pour la modélisation géométrique par rétro-ingénierie, quel que soit le type de modélisation employé (NURBS, voxels, volumes et modèles BIM/hBIM) et les utilisations prévues pour la simulation numérique. Dans certains cas, des verrous scientifiques persistent encore et devront faire l'objet de travaux plus approfondis permettant de les lever et améliorer davantage les processus d'extraction, segmentation et modélisation géométrique concernés. Cependant, la compréhension et la mise en application des différentes méthodes spécifiques de modélisation géométrique en fonction des contextes d'études et des besoins pour la simulation se montrent correctement abouties concernant la modélisation géométrique par surfaces NURBS et la construction de géométries solides et maquettes de type BIM/hBIM. Les utilisations pour la simulation numérique sont dès lors bien adaptées à partir de telles géométries correctement modélisées et paramétrées.

5. Modèles 3D et maillages éléments finis pour les analyses structurales

Afin de valider la cohérence et la fiabilité des différents types de modèles 3D géométriques et paramétriques construits par l'intermédiaire des méthodes proposées précédemment, certains types de modèles ont été par la suite utilisés pour effectuer des analyses structurales et déterminer ainsi leur pertinence à cet égard. **L'objectif des analyses aux éléments finis est dans ce cas d'effectuer des analyses statiques des structures étudiées**, sous l'influence de chargements initiaux tels que le poids propre ou des charges climatiques. Ce type d'analyse s'avère **essentiel pour la compréhension du comportement des structures, leur état de conservation actuel** ou encore l'influence de l'environnement et l'épreuve du temps sur les structures. Ces études permettent ainsi de déterminer, après obtention des résultats, les différentes contraintes et sollicitations auxquelles sont soumis les bâtiments concernés, et le cas échéant, quels désordres ou défauts sont constatés et quelles actions peuvent être menées pour y remédier.

5.1. Analyse numérique par éléments finis

Dans le cadre de nos travaux, le logiciel *Hypermesh* [90] a été utilisé afin de générer, à partir des géométries existantes, des maillages aux éléments finis de type surfaciques ou volumiques. Les étapes de traitement et d'analyse ont eu recours à un protocole de traitement et édition rigoureux, suite à l'importation des modèles géométriques ou paramétriques étudiés :

- importation des géométries (sous des formats de type surfacique ou volumique .iges ou .sat) ;
- édition potentielle de surfaces ou volumes pour correction ou adaptation des géométries ;
- génération de maillages aux éléments finis de type 2D surfacique ainsi que de type 3D tétraédrique à partir des volumes ;
- définition des matériaux et des propriétés des éléments, définition des conditions limites (degrés de liberté, appuis, liaisons, etc),
- définition et positionnement des différents types de chargements (poids propre, charges ponctuelles, pressions réparties, etc) ;
- vérification de l'intégrité et de la cohérence des maillages, correction et optimisation des éléments ;
- lancement des simulations, calculs, analyse et interprétation des résultats.

Les calculs ont été effectués via le solveur *Optistruct* [91] (faisant partie de la suite logicielle), mais il est également possible de préparer les données pour les envoyer vers un autre solveur (*Abaqus*, *ANSYS*, etc, par exemple).

Les différents types de géométries 3D construites via les méthodes présentées précédemment ont été étudiés et analysés. Dans le cas des géométries NURBS, les supports d'étude ont été des parties du site du château de Coucy, (les murs du Logis et celui

de la Salle des Preux). Il en est de même pour le cas des modèles en voxels. Enfin, le cas des modèles orientés BIM a été traité avec le modèle 3D de la flèche de la cathédrale de Senlis.

5.1.1. Cas du château de Coucy

5.1.1.1. Analyse à partir des géométries 3D NURBS

Les géométries NURBS, importées au format volumique *.sat* dans le logiciel *Hypermesh*, se sont montrées pleinement exploitables pour des analyses aux éléments finis, sous réserve que les géométries aient été correctement éditées et corrigées lors de la phase de modélisation. Tant que les modèles surfaciques traités ne sont pas complets ou considérés comme « géométriquement parfaits », c'est à dire sans bords libres ou « non-manifolds », des problèmes surviennent, notamment lors des phases de création de maillages tétraédriques (incohérences des surfaces ou des maillages et zones solides non prises en compte, d'où des maillages incomplets ou erronés).

Les modèles aux éléments finis construits après traitement sont basés sur des **maillages tétraédriques avec des éléments linéaires à quatre nœuds** (trias sur surfaces et tétras pour volumes). Après différentes étapes d'optimisation des maillages, les maillages finaux étudiés contenaient 411 652 éléments et 83 159 nœuds (cas du mur du Logis, cf figure 55), et 1 308 840 éléments et 271 512 nœuds (cas du mur de la salle des Preux, cf figure 56).

En tant que première analyse structurale, l'analyse statique des murs sous leur poids propre ainsi que sous l'influence de charges de vent latérales ont été effectuées. Les murs ont été supposés encastés en partie basse, reposant sur leurs fondations. L'analyse par éléments finis a été réalisée à l'aide du solveur *Optistruct*.

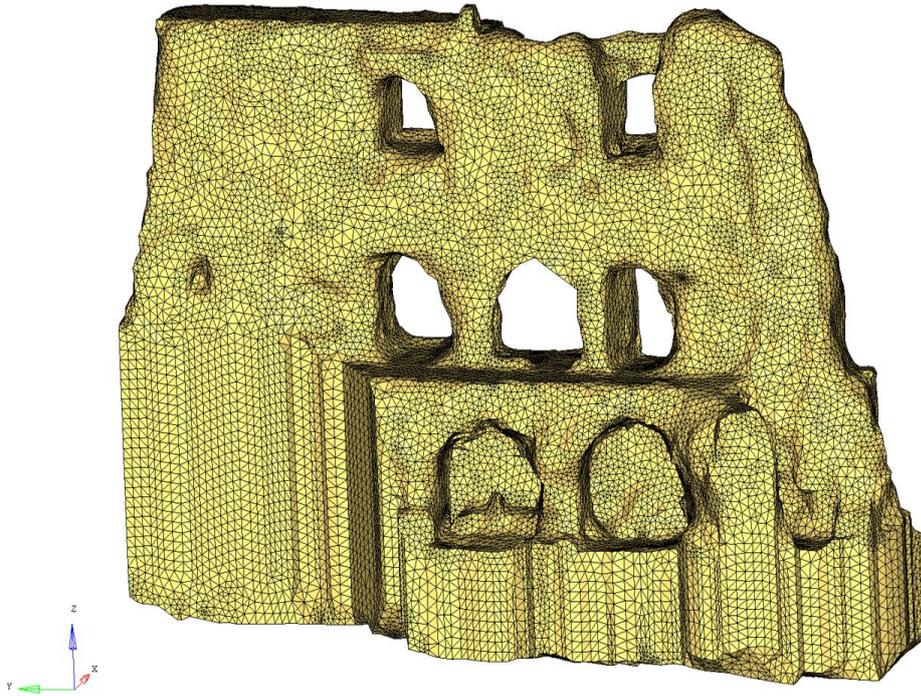


Figure 55 : Maillage tétraédrique du mur du Logis (taille moyenne des mailles de 40cm)



Figure 56 : Maillage tétraédrique du mur de la salle des Preux (taille moyenne des mailles de 40cm)

Les résultats obtenus montrent des **valeurs de déplacements et des répartitions de contraintes homogènes dans les structures, qui restent faibles** (cf figures 57 à 60). Par exemple, dans cette configuration, les valeurs maximales de déplacement vertical sous influence du poids propre sont nettement inférieures à 1mm (0,062 mm pour le mur du Logis ou 0.056 mm pour le mur de la salle des Preux), et les contraintes verticales maximales relevées sont de l'ordre du kPa (1kPa en compression pour le mur du Logis et 1,25kPa pour le mur de la salle des Preux). Les contraintes verticales moyennes sont de 0,20kPa pour le mur du Logis et 0,30kPa pour le mur de la salle des Preux. De tels résultats ne peuvent cependant qu'être **interprétés à titre indicatif** et ne peuvent pas être comparés à des résultats, informations ou analyses existantes des structures étudiées, puisque qu'aucune information n'était disponible à ce sujet, peu d'archives subsistant ou n'étant pas accessibles.

Dès lors, **aucun résultat de ce cas de figure ne doit être considéré comme définitif**, mais comme une **illustration de l'application de la méthode de modélisation géométrique par surfaces NURBS à partir des nuages de points**, et du processus de transfert de données entre les logiciels de modélisation géométrique et ceux dédiés à l'analyse structurale permettant de récupérer l'ensemble des informations géométriques sans perte d'informations.

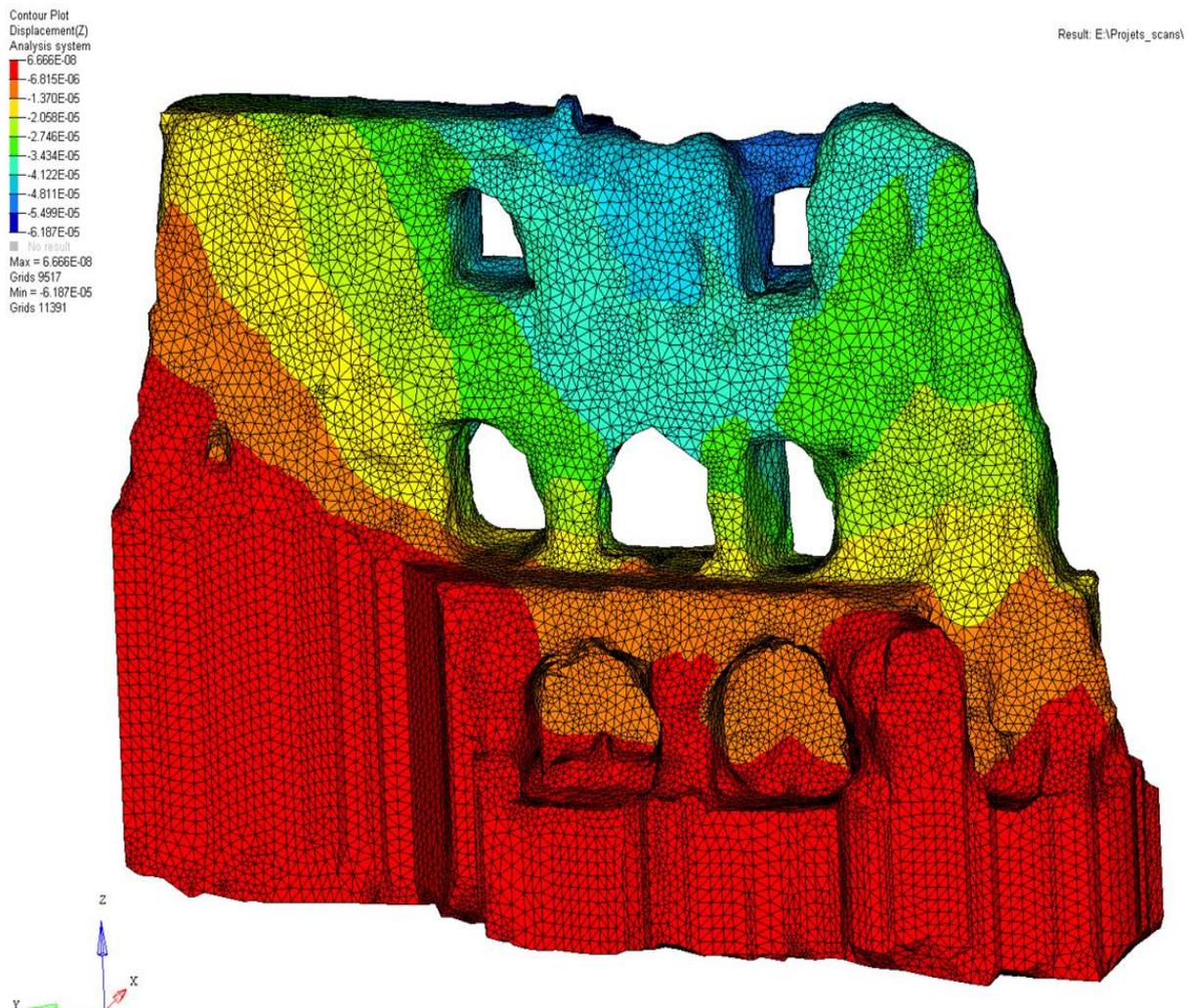


Figure 57 : Résultats sur le mur du Logis – déplacements verticaux selon l'axe Z (en mm, cas du poids propre)

Contour Plot
Displacement(Z)
Analysis system
1.280E-06
-5.127E-06
-1.163E-05
-1.794E-05
-2.436E-05
-3.076E-05
-3.716E-05
-4.357E-05
-4.998E-05
-5.638E-05
No result
Max = 1.280E-06
Grids 10353
Min = -5.638E-05
Grids 24849

Result: E:\Projets_scano\Ch teau_Coucy\Salle_preux\Sallepreux_Surfrone_fromSTL_LVL2_mod
Subcase 1 (PP)

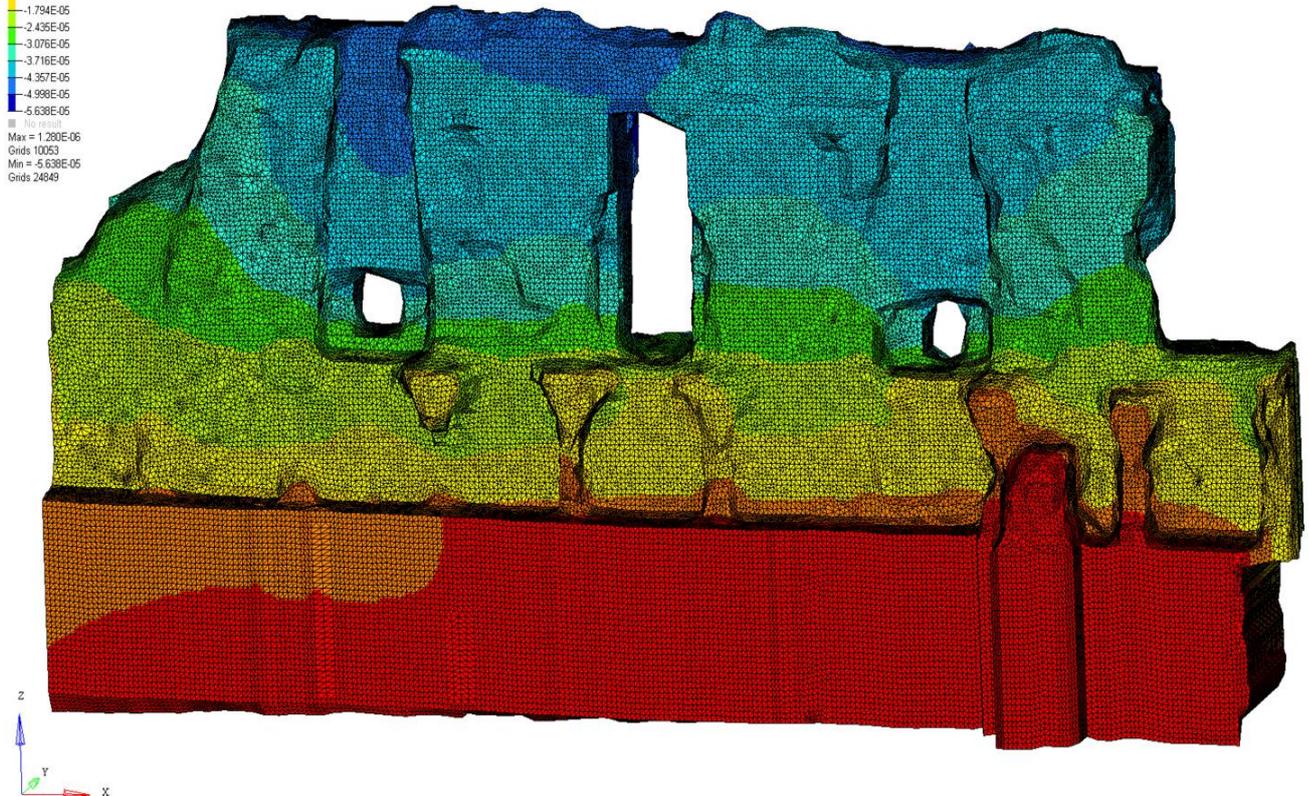


Figure 58 : Résultats sur le mur de la salle des preux – déplacements verticaux selon l'axe Z (en mm, cas du poids propre)

Contour Plot
Element Stresses (2D & 3D)(ZZ)
Analysis system
6.000E-04
4.222E-04
2.444E-04
6.667E-05
1.111E-04
2.889E-04
4.667E-04
6.444E-04
8.222E-04
1.000E-03
No result
Max = 1.321E-03
3D 1026607
Min = -1.287E-03
3D 1239783

Result: E:\Projets_scano\



Figure 59 : Contraintes de compression s_{zz} (MPa) dans le mur du Logis (cas du poids propre)

Contour Plot
 Element Stresses (2D & 3D)(ZZ)
 Analysis system
 -6.794E-04
 -4.647E-04
 -2.501E-04
 -3.538E-05
 -1.793E-04
 -3.940E-04
 -6.067E-04
 -8.233E-04
 -1.038E-03
 -1.253E-03
 Max = 6.794E-04
 3D 2766321
 Min = -1.253E-03
 3D 3482636

Result: E:\Projets_scans\Chateau_Coucy\Salle_preux\Sallepreux_Surdrone_from_STL_LVL2_mod_Subcase 1 (PP)

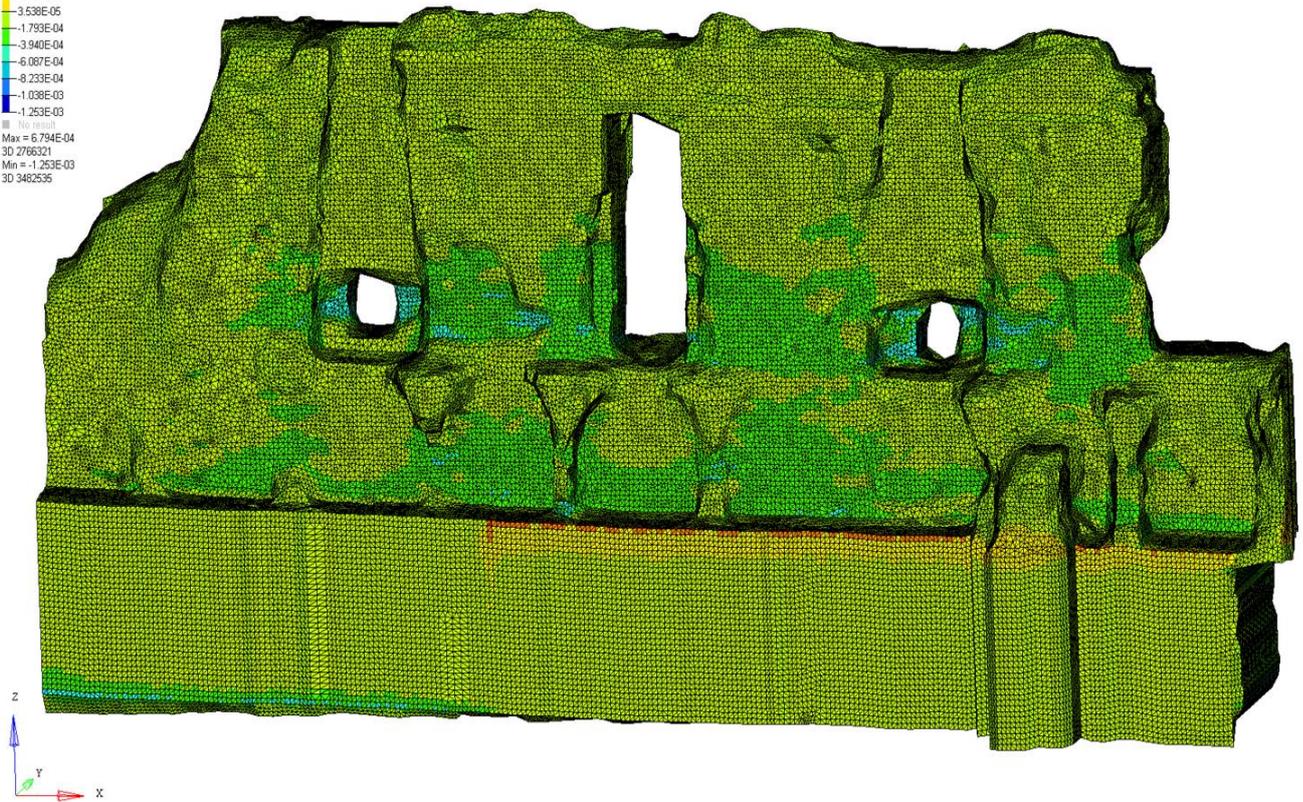


Figure 60 : Contraintes de compression s_{zz} (MPa) dans le mur de la salle des Preux (cas du poids propre)

L'analyse des résultats obtenus montre cependant qu'en raison de la complexité croissante des modèles 3D géométriques de type NURBS en fonction de l'augmentation du nombre de surfaces, les maillages aux éléments finis restent sensibles aux conditions imposées pour leur création, et particulièrement la taille initiale des mailles et les étapes d'optimisation de ces maillages aux éléments finis. De plus, selon la géométrie initiale des modèles 3D fournie en entrée, les tailles de mailles pouvant être créées posent parfois des problèmes et ne peuvent pas être générées correctement. Pour résoudre ce problème, il suffit de changer la taille des mailles en l'augmentant ou en la diminuant, mais dans ce cas, si l'on souhaite comparer plusieurs modèles, il faut tenir compte de ce paramètre.

Une phase complémentaire de modélisation et analyse structurale aux éléments finis, plus poussée, a été réalisée, en utilisant cette fois des modèles géométriques NURBS plus détaillés (classés LVL4) contenant entre 30 000 et 50 000 faces. Un premier constat suite aux travaux d'édition et modélisation 3D concerne le fait que les temps d'édition et correction de la géométrie devenaient alors sensiblement plus longs, même en ayant recours aux algorithmes de reconstruction de surfaces, car en raison de la complexité des modèles et du nombre de faces, de nombreuses erreurs persistent (raccordements, trous, surfaces formant des doubles enveloppes...).

Dès lors, cette augmentation de la complexité ne présente que peu d'intérêt vis-à-vis des modélisations structurales, des maillages et des analyses aux éléments finis, puisque la précision des résultats obtenus (contraintes et déplacements) ne varie que peu par rapport aux modèles comportant moins de 20 000 faces, limitant de fait son intérêt outre mesure. De

plus, en raison de la présence de nombreux détails localisés, les maillages aux éléments finis sont de qualité élevée (taille des mailles de 10 ou 20cm), ce qui engendre des temps de traitement, édition et optimisation nécessairement plus longs.

Dans ce cas, la taille optimale des modèle 3D géométriques NURBS pouvant se montrer les plus pertinents pour des analyses structurales se situe entre 10 000 et 20 000 faces, présentant un compromis entre temps d'édition, qualité du modèle, détails géométrique et précision des surfaces.

5.1.2. Cas de la flèche de la cathédrale de Senlis

5.1.2.1. Analyse à partir d'une géométrie orientée hBIM

Afin d'étudier le comportement structural de la flèche de la cathédrale de Senlis, la géométrie construite a été exportée dans le logiciel dédié de maillage par éléments finis 3D *Hypermesh*. Des étapes de traitement de la géométrie se sont avérées nécessaires avant les opérations de maillage, comme la suppression de surfaces dupliquées ou la fusion de composants, pour mailler tous les composants avec des paramètres similaires et pour conserver les limites entre les faces.

Le modèle aux éléments finis construit après traitement est basé sur des maillages tétraédriques avec des éléments linéaires à quatre nœuds (trias sur surfaces et tétras pour volumes). Chaque composant du modèle numérique entier a été fusionné et traité progressivement, de manière à construire un maillage complet avec des liens sur des surfaces et des bords partagés.

La taille du maillage est d'une grande importance pour les résultats d'analyse structurale par éléments finis. Sa sélection n'est pas une tâche facile dans le cas de la géométrie complexe de la flèche de la cathédrale de Senlis. Différentes contraintes doivent être satisfaites, comme la représentation satisfaisante de la géométrie 3D, l'acceptation de la distorsion des éléments maillés, ou encore la précision des états de contraintes globaux et locaux.

Différents maillages tétraédriques ont été considérés en utilisant le logiciel *Hypermesh* :

- Un maillage raffiné complet avec des éléments ayant une taille moyenne de 10 cm a été construit, mais en raison du nombre élevé d'éléments (2 462 145 éléments avec une taille minimale de 1 cm) après l'étape d'optimisation de maillage, les erreurs géométriques sont restés et ne pouvaient pas être corrigées correctement. La présence de trop de détails et de petits éléments rendait ce maillage trop difficile à traiter pour l'analyse par éléments finis.
- D'autre part, un maillage plus grossier avec des éléments de taille moyenne de 40 cm a également été pris en compte (365 450 éléments dans le maillage final, avec une taille minimale de 4 cm), et des erreurs géométriques sont également survenues. Les erreurs sur les jacobiens ne pouvaient être surmontées même en limitant les contrôles sur la qualité des éléments.

En conséquence, aucun de ces deux maillages n'a pu être utilisé pour l'analyse structurale, et donc un bon compromis a été de construire un maillage avec une taille moyenne des

éléments de 20cm (l'épaisseur moyenne des murs étant de 45cm). Le maillage intégral en tétraèdres a été construit sur toute la structure en une seule opération.

Afin de corriger les erreurs géométriques potentielles sur les tétras, améliorer la qualité des éléments et éviter les erreurs pendant la phase de calcul, des étapes d'optimisation de maillage ont été nécessaires. La vérification des éléments, la validation des critères et la correction des éléments nécessitaient plusieurs actions. Des erreurs telles que le paramètre d'effondrement des tétraèdres (*tet collapse*), le mauvais rapport d'aspect (*aspect ratio*) défini par le rapport du bord le plus long d'un élément à son bord le plus court, ou des formes d'inclinaison (*skew*) ont été corrigées en utilisant un outil spécifique dans le logiciel *Hypermesh*.

La grande complexité de la géométrie initiale a nécessité une attention particulière sur les paramètres de maillage à valider, tels que l'effondrement, qui est le paramètre le plus important. Ce paramètre est calculé par la procédure suivante : à chacun des quatre nœuds du tétraèdre, la distance du nœud au côté opposé de l'élément est divisée par la racine carrée de la surface du côté opposé. La valeur minimale trouvée est normalisée en la divisant par 1,24, puis signalée. Lorsque le tétraèdre est de mauvaise qualité, cette valeur approche 0,0. Pour un tétraèdre parfait, cette valeur est de 1.0. La valeur minimale de ce paramètre doit être supérieure à 0,2 pour lancer l'analyse sans message d'erreur.

Les tétraèdres ayant échoué en ne répondant pas aux conditions requises ont dû être corrigés et redéfinis avec l'outil d'optimisation de maillage tétraédrique. Trois mesures ont été appliquées pour l'optimisation: triangles de fixation (les nœuds sont déplacés pour améliorer la qualité des triangles, ce qui affecte les tétraèdres issus de ces triangles), la permutation d'arête (les paires de triangles peuvent avoir leurs bords échangés pour créer de meilleurs éléments) et de remaillage (le maillage courant est rejeté et un nouveau maillage est généré pour répondre aux critères spécifiés, ce qui produit généralement de meilleurs résultats).

Après l'étape d'optimisation du maillage, le maillage final contenait ainsi 647 639 éléments et 165 961 nœuds (voir la figure 61). Le maillage 3D permet de calculer le volume de la structure entière, soit 391,3 m³, conduisant à une masse totale de 785 tonnes de matière.

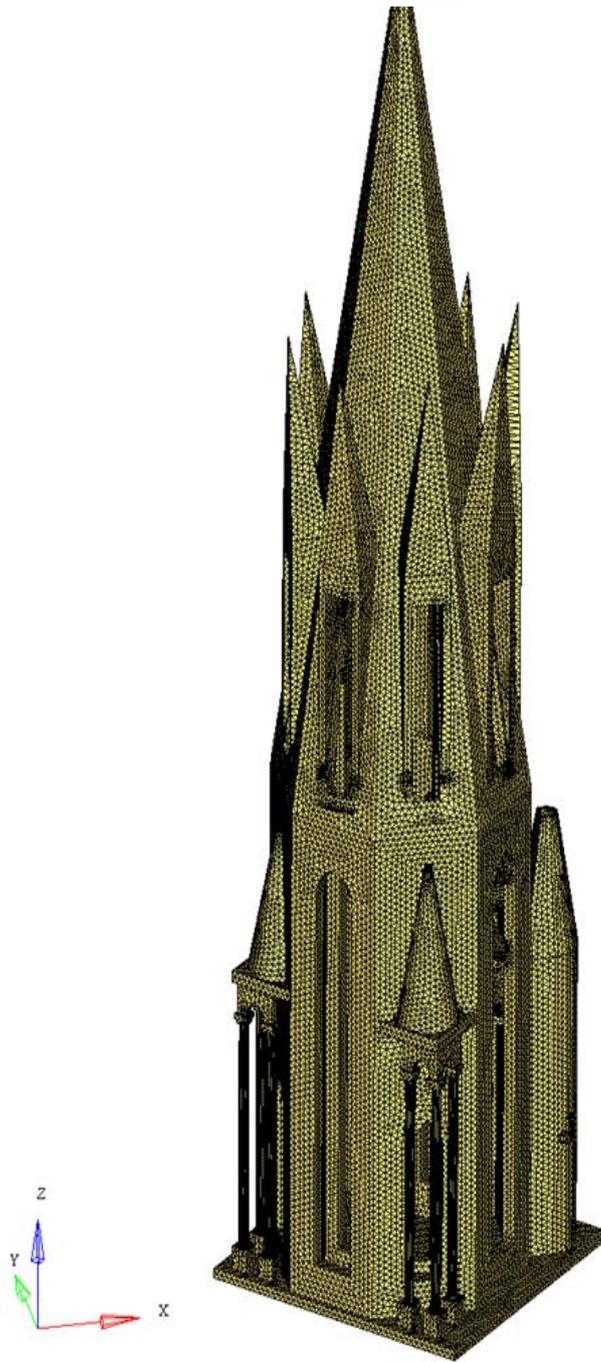


Figure 61 : Maillage tétraédrique complet de la flèche

5.1.2.2. Analyse de qualité du maillage et déviation

La géométrie constituant le modèle aux éléments finis peut être extraite et importée dans le logiciel *CloudCompare*, pour effectuer des **analyses de qualité et de déviation entre le maillage final et un ensemble de points échantillonnés du nuage de points initial**.

La distance du nuage à la maille entre un nuage de points échantillonné de la flèche (contenant 30 721 038 points) et la géométrie des éléments finis a été calculée pour estimer les principales déviations et différences. Les résultats montrent un bon recouvrement entre les deux séries (voir figures 62 et 63). Les indices de recouvrement sont bons, et les

principales variations de distance visibles sont observées sur la partie supérieure des pinacles et au niveau du sol, comme dans l'analyse effectuée par rapport à la géométrie hBIM. Seuls les éléments structuraux restent dans la géométrie finale. Les éléments architecturaux omis expliquent également les variations locales potentiellement élevées qui peuvent apparaître et ne sont pas prises en compte dans la géométrie finale. La moyenne des écarts constatés entre le maillage aux éléments finis et le nuage de points se situe à 5cm, ce qui n'apparaît pas aussi clairement sur les illustrations en raison des éléments architecturaux du nuage de points faussant les écarts et distances moyennes calculés.

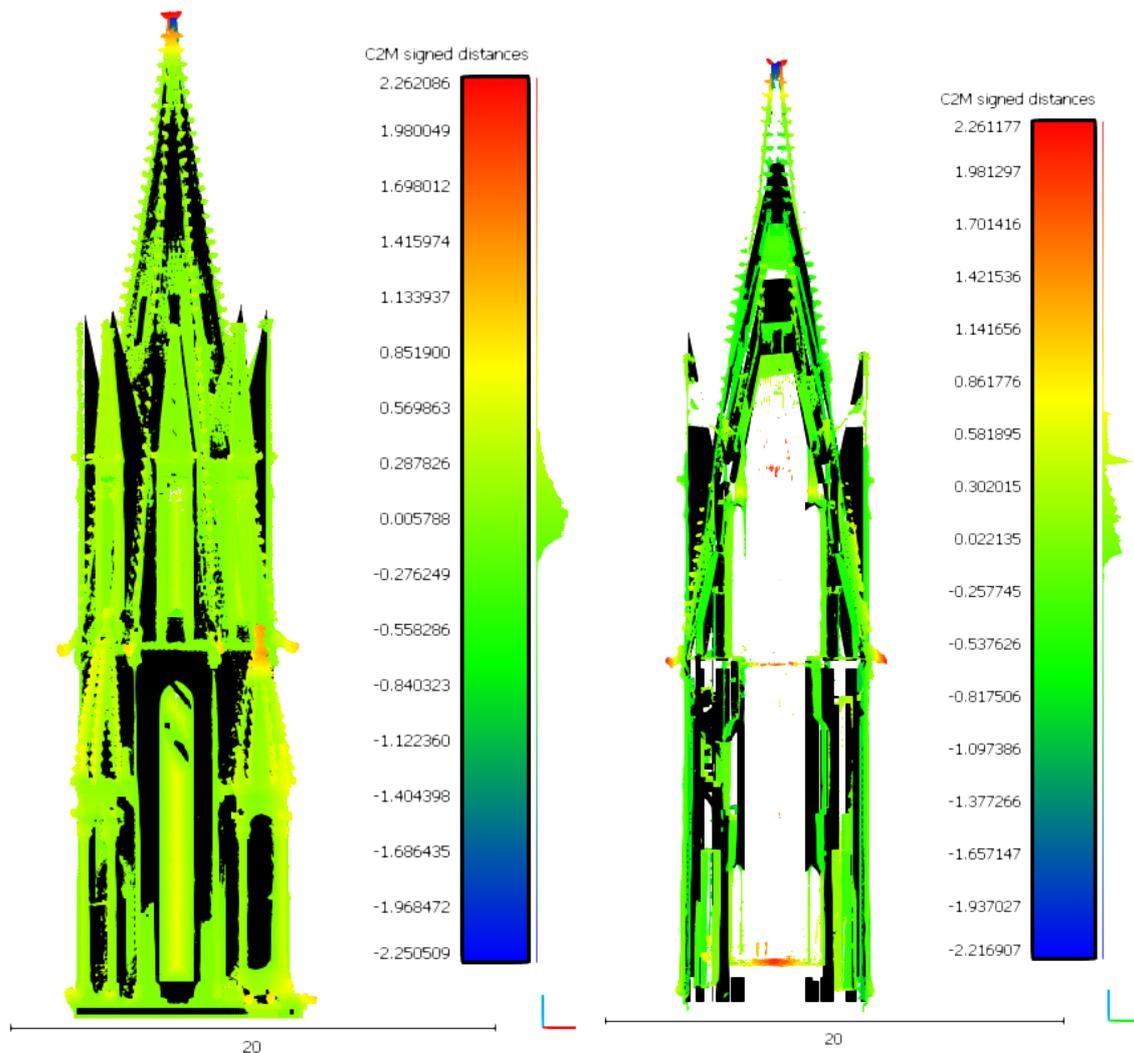


Figure 62 : Comparaison entre le nuage de point (en couleurs) et la géométrie du modèle aux éléments finis (en noir) par calcul de distance *cloud-to-mesh*. Résultats en vue de face et section selon l'axe Y. Distances en m

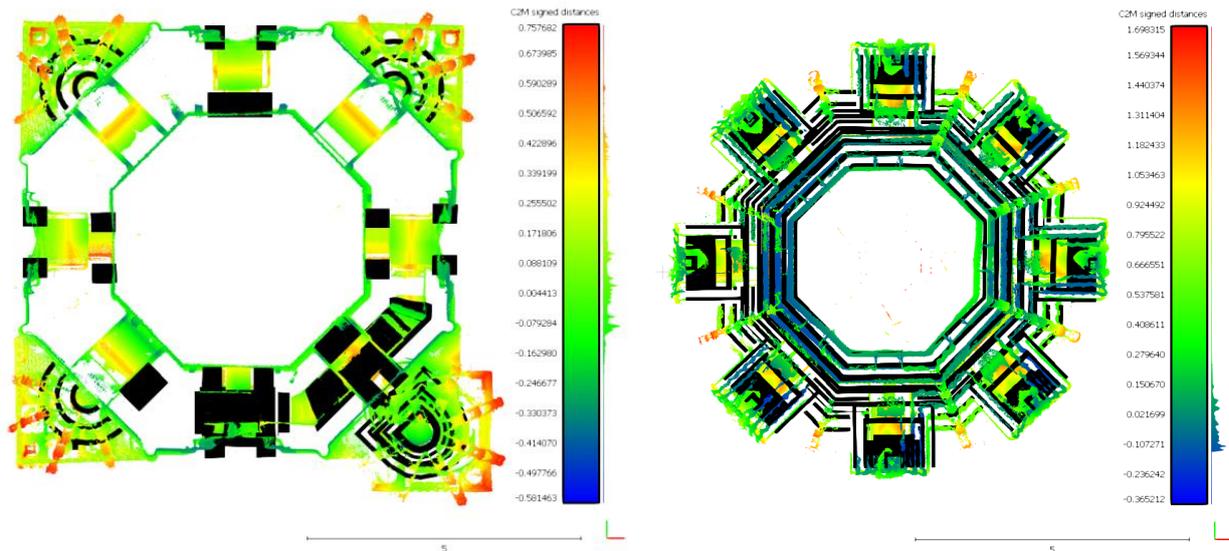


Figure 63 : Comparaison entre le nuage de point (en couleurs) et la géométrie du modèle aux éléments finis (en noir) par calcul de distance *cloud-to-mesh*. Résultats en section selon l'axe Z, distances en m

A partir des résultats précédents, une distribution gaussienne des distances entre les points a été tracée, comme illustré dans la figure 64. La distribution des distances reste cohérente sur l'ensemble de la structure pour les parties internes et externes. Par exemple, le pic des écarts les plus concentrés apparaît autour de -5 et 5 cm, et le nombre de points présentant des distances plus élevées diminue rapidement, ce que l'on retrouve également sur les figure 35. De tels éléments indiquent que le maillage résultant est fiable et exploitable pour une analyse structurale avancée.

Gauss: mean = 0.098308 / std.dev. = 0.199358 [5543 classes]

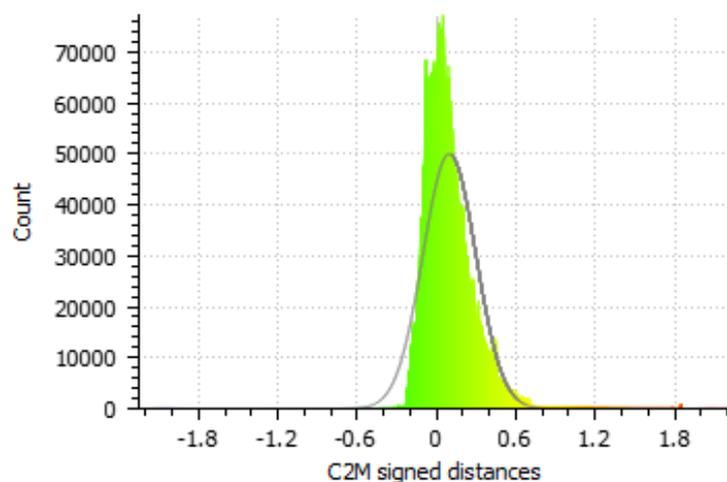


Figure 64 : Distribution gaussienne des distances entre le nuage de points et la surface du maillage aux éléments finis

La qualité des éléments structuraux et des composants construits à partir du nuage de points initial respecte la forme échantillonnée. De tels tests statistiques locaux ont un faible coût de calcul et constituent une méthode d'estimation rapide pour évaluer la qualité des géométries.

5.1.3. Analyse statique linéaire

L'analyse statique de la flèche sous son poids propre, en régime linéaire et en considérant des propriétés élastiques de matériau homogène a été effectuée. La base de la flèche a été supposée entièrement encastree sur la partie supérieure de la tour de droite, sur laquelle elle repose.

L'analyse par éléments finis a été réalisée à l'aide du solveur *OptiStruct*. Le nombre total de degrés de liberté est de 397 883. La répartition des déplacements verticaux est représentée sur la figure 65 et présente une déformation globale attendue en poids propre. Le déplacement maximal au sommet de la flèche est de -52 mm le long de la direction Z (-18 mm le long de la direction X et -6 mm le long de la direction Y), et aucune déformation excessive n'est observée. Les différents déplacements selon X et Y sont dus à une symétrie non-complète de la géométrie de la structure. Les résultats (petits déplacements et déformations) valident donc les hypothèses relatives à l'analyse structurale en régime élastique linéaire (cf figures 65 et 66).

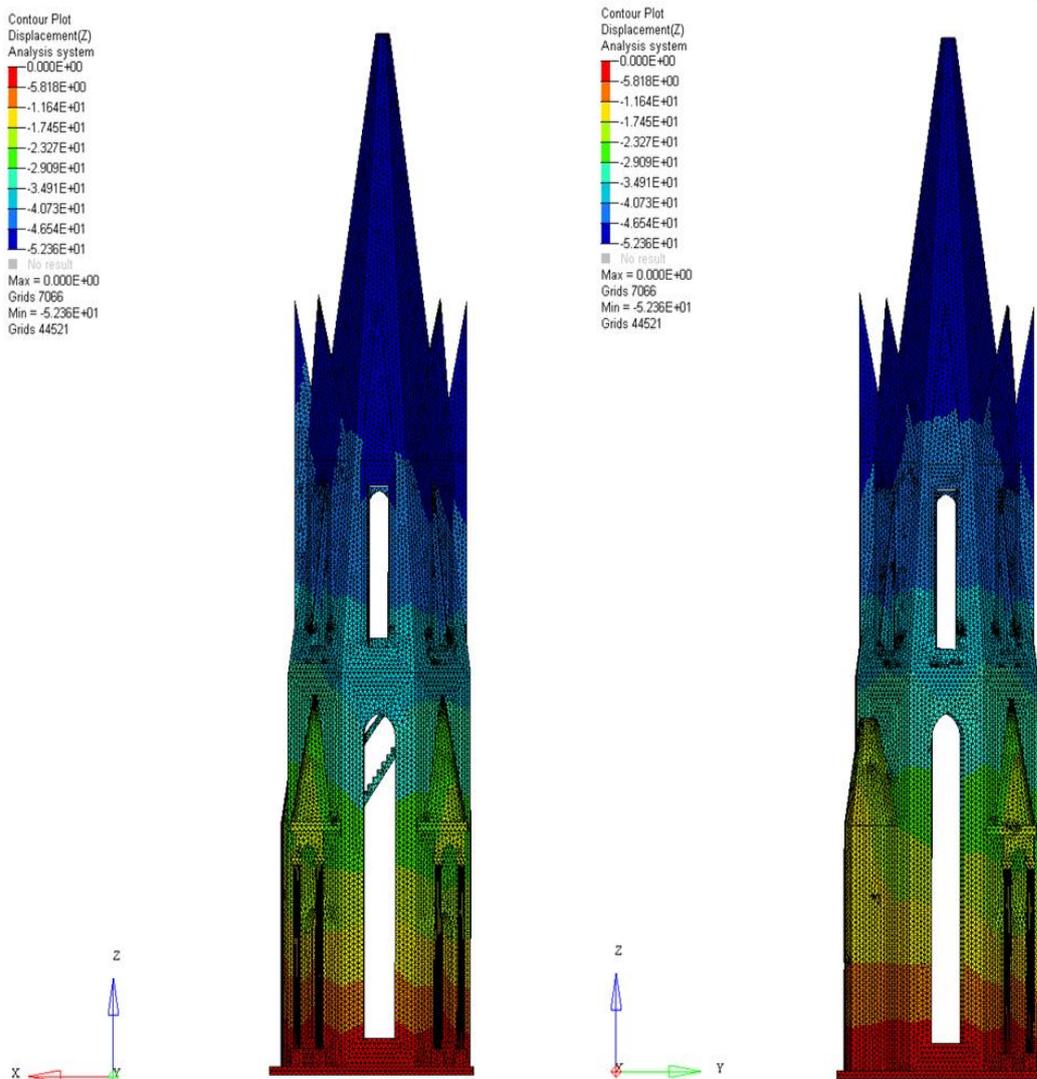


Figure 65 : Déplacements verticaux (selon l'axe Z) sur la structure (mm) en vue Nord-Est et vue Sud-Est

De la même façon, les figures suivantes présentent la répartition des déplacements verticaux selon les sections E-E' et F-F' définies précédemment.

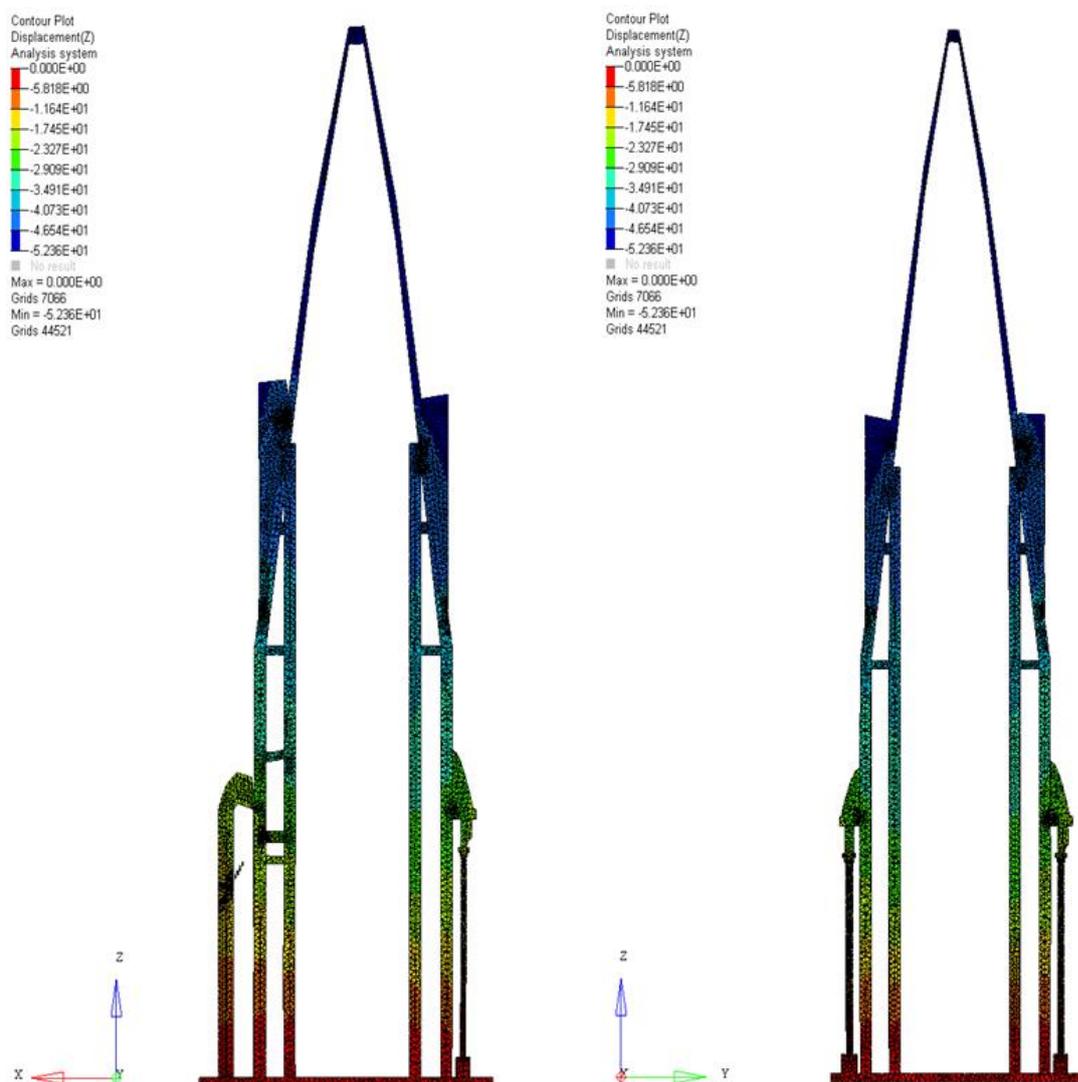


Figure 66 : Déplacements verticaux (selon l'axe Z, en mm) dans les sections E-E' (à gauche) et F-F' (à droite)

La répartition des contraintes dues au poids propre est également régulière dans l'ensemble de la structure. Sous l'effet du seul poids propre, la structure travaille principalement en compression et aucune discontinuité ou concentration de contrainte inhabituelle n'est observée. De plus, la base de la flèche travaille strictement en compression, en supportant l'ensemble du poids propre.

En raison de ses grandes dimensions (40m de hauteur, 10m de large, 78m d'altitude au sommet du pinacle), l'effet de la gravité produit une valeur de contrainte maximale d'environ 1,3 MPa à la base de la flèche, ce qui est bien inférieur à la contrainte maximale critique pour le matériau considéré (15 MPa).

De plus, aucune valeur particulière ou de concentration de contrainte n'est observée au niveau des escaliers, à l'intérieur des octogones ou de la tour. Ces éléments structuraux importants n'affectent donc pas la stabilité globale de la structure malgré le fait qu'ils ne soient pas répartis symétriquement à l'intérieur de la structure. Dans ce cas, la contrainte de compression maximale atteint 1,3 MPa et se retrouve dans les coins en partie basse des murs de l'octogone externe. Une analyse de la répartition des contraintes le long des sections verticales pour toutes les directions montre une distribution régulière et cohérente (voir figure 67). Aucune valeur anormale n'est observée, la compression globale et les valeurs de traction restent faibles, comme expliqué précédemment, ce qui confirme le bon comportement de la structure sous l'effet du poids propre. Comme noté précédemment, la contrainte principale mineure est la plus proche de la contrainte s_{zz} : les valeurs maximales sont assez similaires (1,3 MPa / 1,1 MPa) et le comportement de la structure apparaît similaire sous contraintes de compression (majoritaires dans la structure).

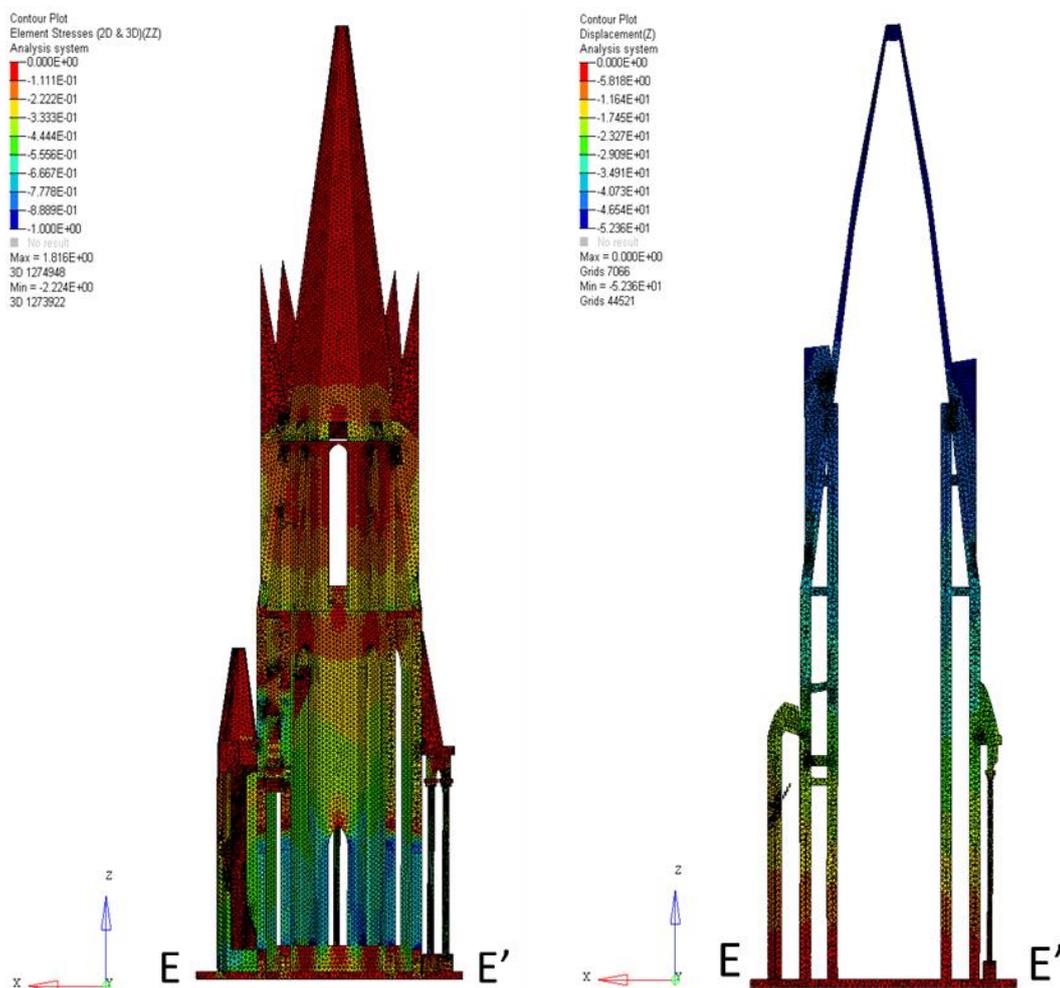


Figure 67 : Contraintes de compression s_{zz} (MPa) à l'intérieur de la structure (coupe et section E-E')

La figure 68 montre des valeurs de contraintes de compression comprises entre -0,5 et -1,4 MPa. Les valeurs maximales sont localisées à la base des parois des murs des octogones ainsi que les colonnes supportant les pinacles.

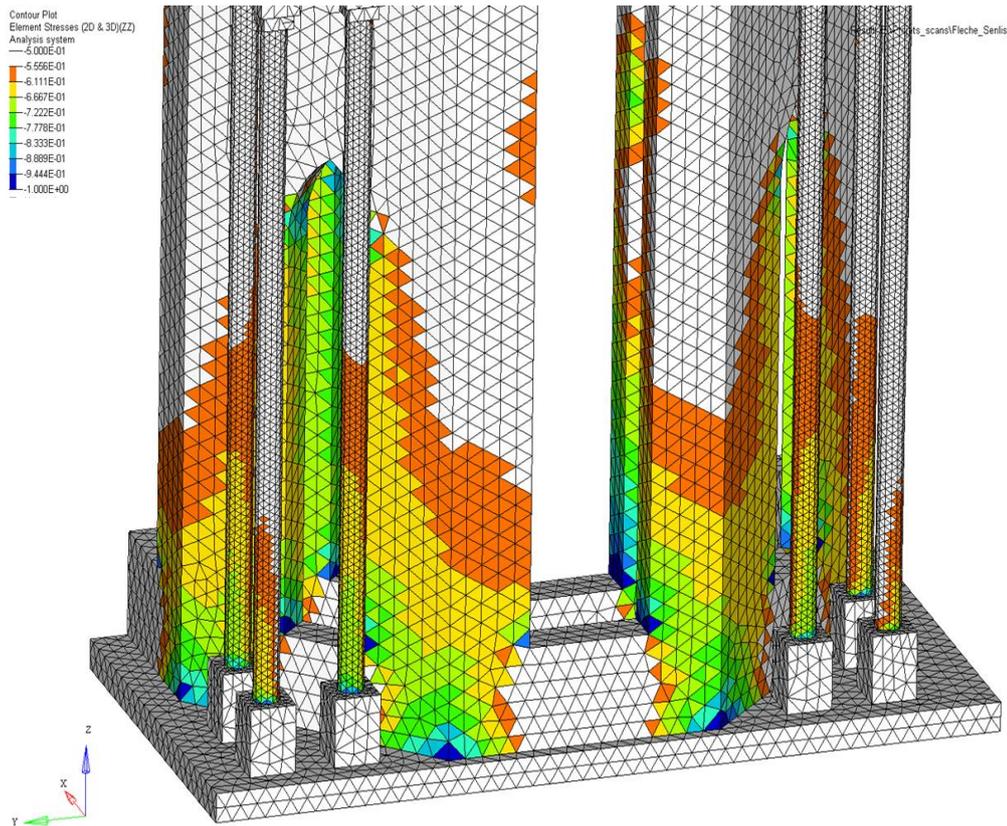
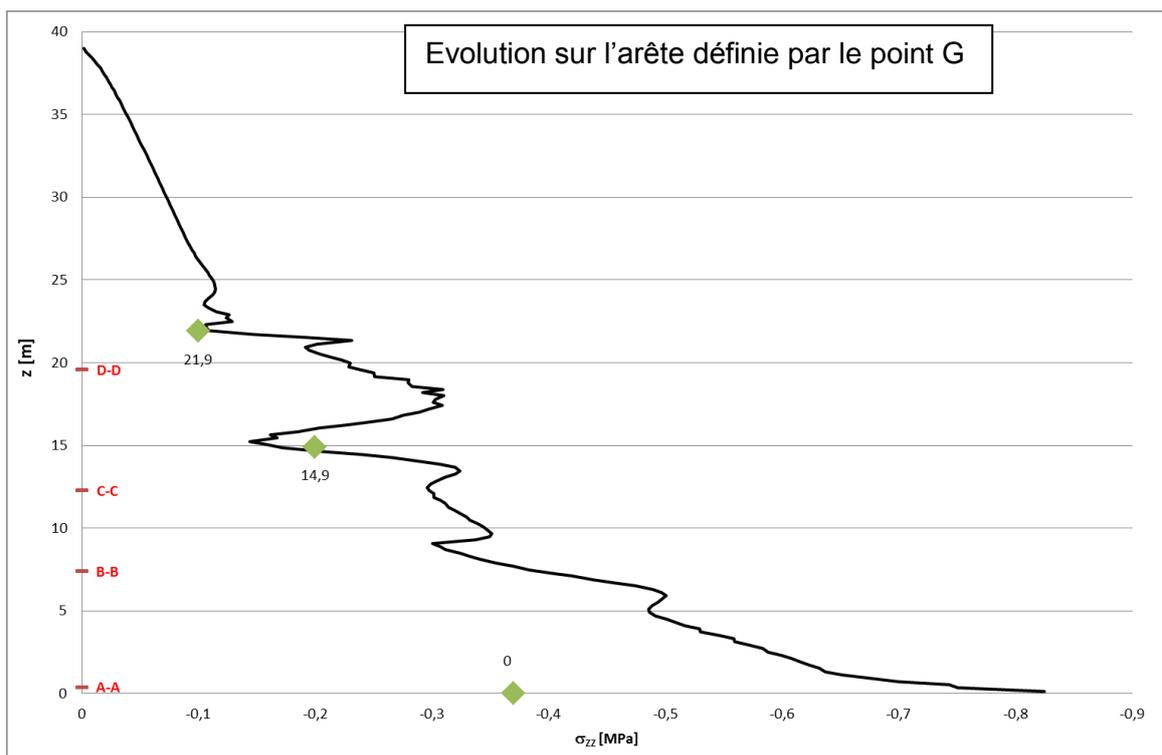


Figure 68 : Contraintes de compression s_{zz} , (MPa) raffinée entre -0.5 et -1.4 MPa

Les contraintes principales ont également été calculées et nous avons trouvé que la valeur minimale s_3 est presque identique à s_{zz} : dans la structure actuelle. Afin d'étudier plus précisément l'évolution des contraintes verticales sur la structure globale, la figure 69 présente les variations de s_{zz} le long des deux bords de la flèche. Les arêtes sont définies par G et H, appartenant à l'octogone externe (cf figure 32 à 34).



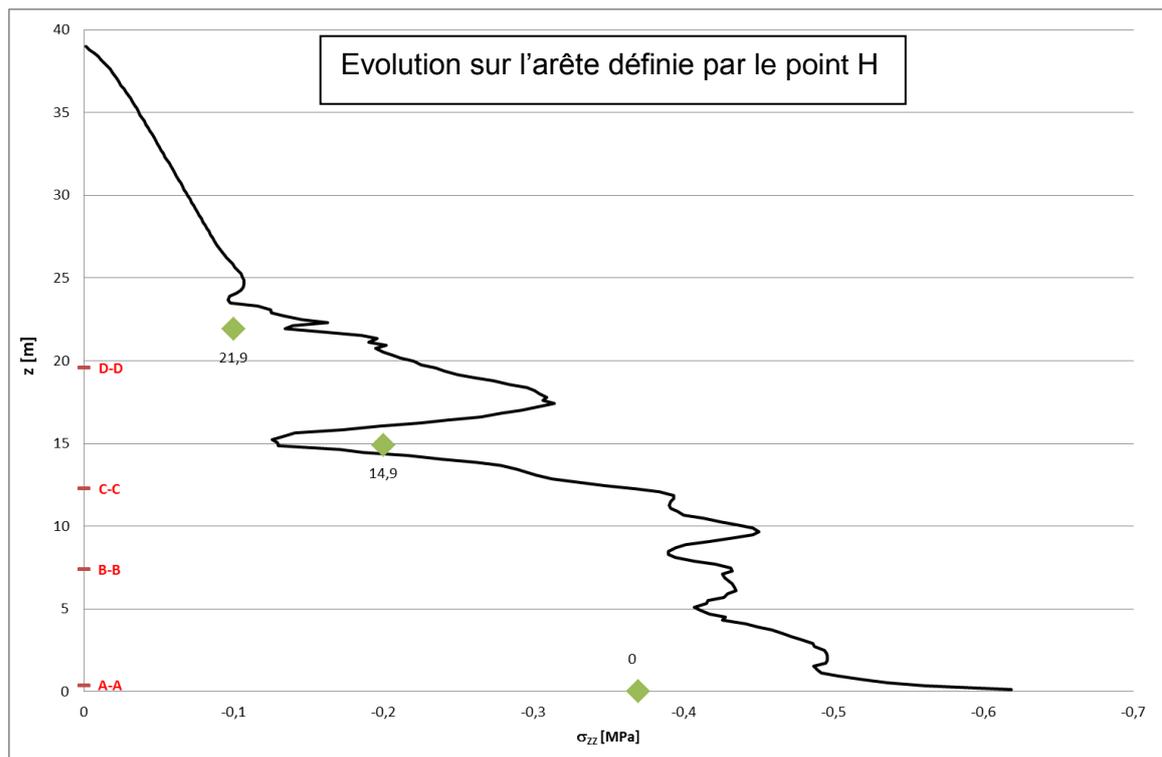


Figure 69 : Evolution de la contrainte verticale s_{zz} en fonction de l'altitude des nœuds (m)

La partie supérieure de la figure 69 traite des valeurs de s_{zz} au niveau du point G (un coin obtus de l'octogone externe), tandis que la partie inférieure est liée au niveau du point H (à un angle opposé obtus de l'octogone externe). Les courbes continues sont obtenues à partir des valeurs des éléments finis discrétisés. Pour une altitude supérieure à 23 m, la distribution est linéaire puisqu'il n'y a pas de variation de la géométrie. Cependant, des variations importantes de contraintes sont observées sur les niveaux de la flèche avec des changements structuraux (entre 9 et 23 m), en raison de la connexion des ouvertures entre les octogones externes et internes.

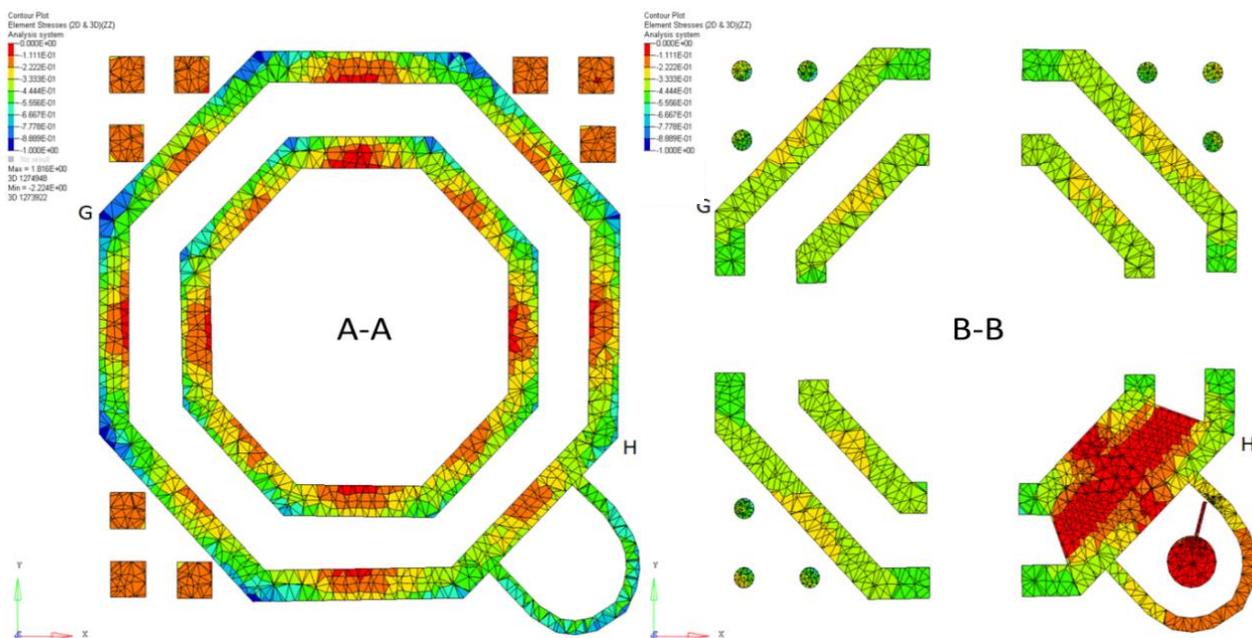
Les valeurs de s_{zz} à la section A-A (niveau 0,4 m) sont légèrement différentes, avec -0,82 MPa pour le point G et -0,62 MPa pour le point H. Les valeurs moyennes de la contrainte s_{zz} sont rapportées sur la figure 69 (losanges verts). Ils ont été obtenus à trois niveaux d'altitudes différents (0 m, 14,9 m et 21,9 m), en calculant le poids de la structure au-dessus de ces niveaux, et en considérant la surface des matériaux de support à ces niveaux. Par exemple, au niveau 0 m, le volume de matière supporté par la base est de 391,3 m³, conduisant à une valeur min de $\sigma_{zz} = \frac{391.3 * 2010 * 9.81}{20.98} * 10^{-6} = 0.37 \text{ MPa}$

Nous pouvons ainsi observer que les deux valeurs de la contrainte de compression moyenne à la partie supérieure de la flèche sont en bon accord avec les résultats de l'élément fini (local). À ces deux niveaux, les contraintes semblent être uniformes sur la section. Cependant, la contrainte moyenne de -0,37 MPa à la base diffère significativement des valeurs des éléments finis au point G (-0,8 MPa) et au point H (-0,6 MPa). Ceci est dû à un état de contrainte non uniforme près de la limite inférieure.

Pour confirmer cela, nous avons reporté sur la figure 69 les isovaleurs de s_{zz} sur la section A-A (échelle entre 0 et -1 MPa). Il est confirmé qu'une valeur maximale de $|s_{zz}|$ apparaît aux

angles obtus de l'octogone externe, avec une valeur plus grande sur le bord G par rapport à H. La figure 70 confirme également que sur les sections B-B, C-C et D-D: les contraintes sont beaucoup plus uniformes. La figure 70 montre aussi que plusieurs éléments tétraèdres étant présents à travers l'épaisseur de la paroi, les résultats des éléments finis ont été obtenus avec une précision suffisante. La contrainte de compression s_{zz} est évidemment la principale composante des contraintes. Ceci est prouvé en calculant les trois contraintes principales en tout point de la structure. La contrainte principale mineure s_{\min} est presque identique à s_{zz} sur les quatre sections horizontales de la figure 70.

Dans la figure 71, nous présentons la distribution de la contrainte principale dans les plans verticaux, en mettant l'accent sur les valeurs comprises entre 0 et 0,3 MPa. Une certaine contrainte de traction peut être trouvée sur des zones particulières : sur les parties inférieures de toutes les ouvertures des murs, sous les voûtes des ouvertures et dans la partie supérieure de la structure, par exemple sous les escaliers et leur dalle d'appui et à la zone de jonction entre la tour et les murs. Les valeurs maximales sont d'environ 0,5 MPa, dans un très petit nombre d'éléments, et restent inférieures à la valeur limite admise par le matériau (2 MPa).



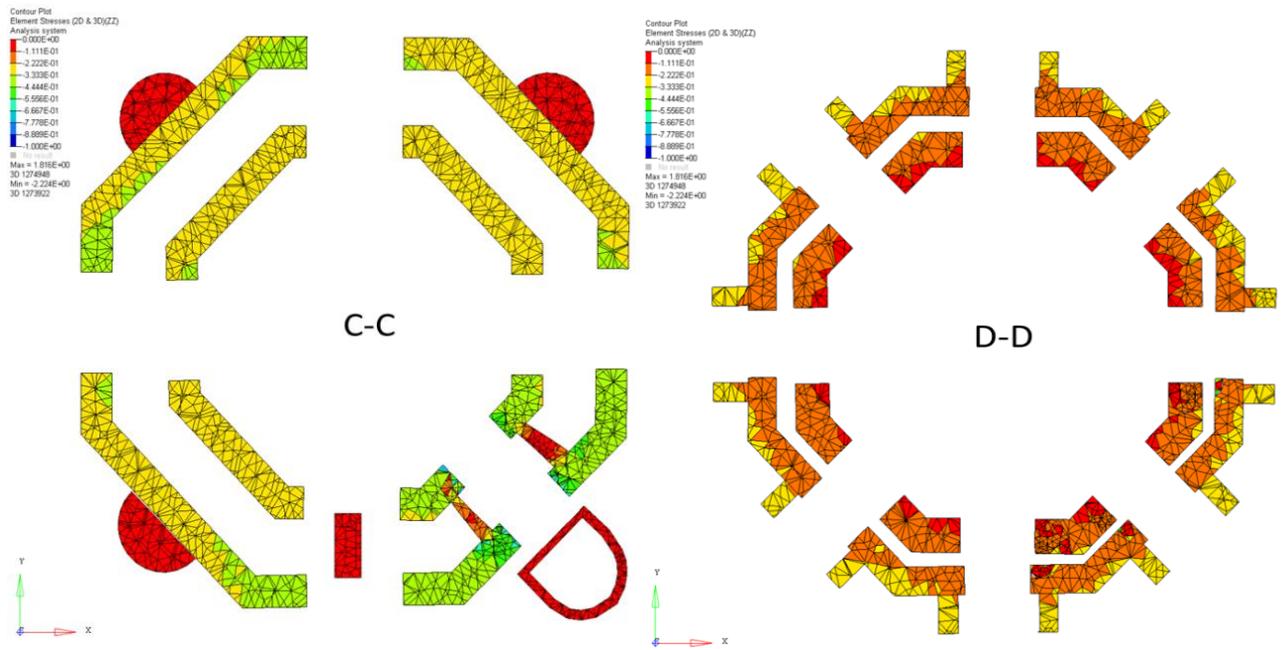


Figure 70 : Contraintes de compression s_{zz} (MPa) dans les sections A-A à D-D

L'analyse détaillée des états de contrainte sur la flèche montre que sous poids propre, et sous l'hypothèse concernant les propriétés matérielles, la structure est saine.

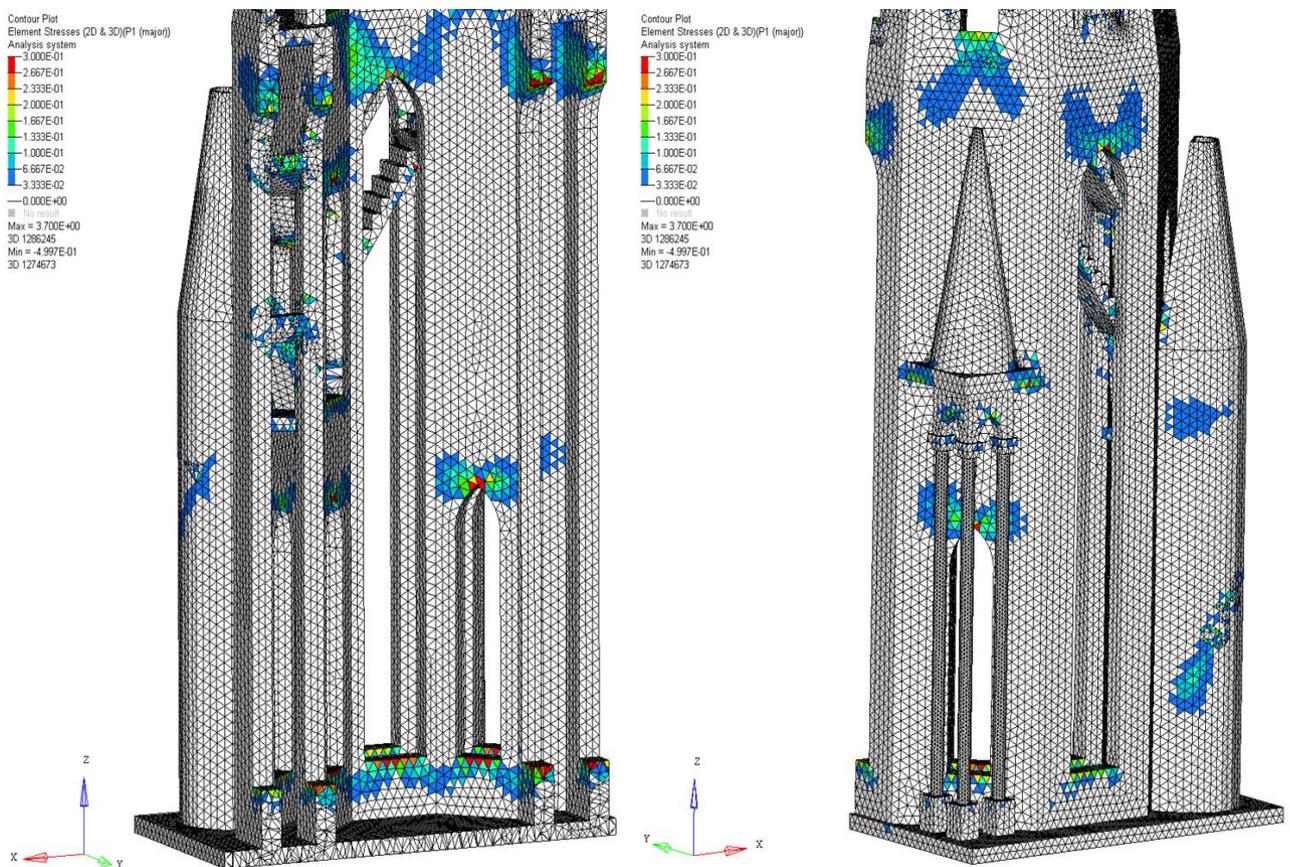


Figure 71 : Contraintes de traction significatives dans la structure (coupes en perspective dans le plan XZ)

En conséquence, le processus proposé de numérisation, de modélisation géométrique et d'analyse statique numérique linéaire fournit une première description intéressante de l'état actuel de la flèche de la cathédrale, et les résultats montrent une bonne relation entre les valeurs calculées et l'état de conservation actuel. L'ensemble de la structure est saine et aucun dommage récent ou fissure n'a été observé. Les matériaux utilisés pour la construction sont encore robustes et présentent une bonne résistance face aux différents états de contrainte. Aucun travail de restauration particulier ne semble donc nécessaire au niveau global.

5.1.3.1. *Analyse statique sous l'influence de charges dues au vent*

Afin de proposer des résultats plus avancés et continuer ainsi les études structurales menées précédemment, des **études sous l'influence des charges de vents** ont été effectuées. Des analyses statiques ont été possibles en calculant les pressions dynamiques de pointe du vent appliquée sur la flèche, en fonction des directions principales d'application. Comme base pour les calculs, des valeurs de référence de la vitesse du vent ont été utilisées. Ces valeurs caractéristiques sont déterminées en se basant sur les données et méthodes de l'*Eurocode 1 – NF EN 1991-1-4* (Actions du vent sur les structures).

A partir des données déterminées par la méthode des *Eurocodes*, les valeurs suivantes ont été retenues : vitesse du vent de 24m/s (catégorie de terrain IV), pression dynamique de pointe de 100 daN/m². A partir de ces données, les valeurs des pressions aérodynamiques sur chaque paroi ont permis de déterminer des valeurs en pression w_p variable selon la hauteur de la flèche. Trois principales valeurs de pressions aérodynamiques (210 daN/m², 235 daN/m² puis 216 daN/m²) ont été appliquées sur les parois externes exposées au vent, afin notamment de respecter une cohérence dans la configuration architecturale et structurale de l'édifice, et en fonction des directions d'application et de la hauteur de la structure : base des octogones, murs externes de l'octogone, et pyramide supérieure.

Les directions considérées pour l'application et l'étude de l'influence des charges de vent sur la structure sont les vents de Nord-Ouest (direction principale) ainsi que celles de Sud-Ouest et Nord-Est (directions secondaires). En intégrant ces valeurs de pression sur le maillage aux éléments finis précédemment construit avec le logiciel *Hypermesh*, les chargements de vent ont pu être modélisés et intégrés aux calculs, dans le cas d'analyses statiques linéaires (cf figures 72 et 73). Les charges de vent s'appliquent sur les parois externes uniquement.

Par ailleurs, dans un souci de clarté et de concision, seuls les résultats issus de l'étude de l'influence de charges de vent en direction Nord-Ouest sont présentés ci-après. Les principaux résultats et analyses mentionnés dans ce cas peuvent par ailleurs faire l'objet d'études dédiées plus approfondies visant à détailler et analyser intégralement le comportement de la structure dans ces conditions. Il s'agit dans le cas présent de valider l'utilisation de la géométrie aux éléments finis pour cet usage et de démontrer la polyvalence du modèle construit pour des travaux d'analyse structurale variés et adaptables selon les besoins d'études et les circonstances.



Figure 72 : Application des charges de vent de Nord-Ouest (direction X+) – vue de dessus

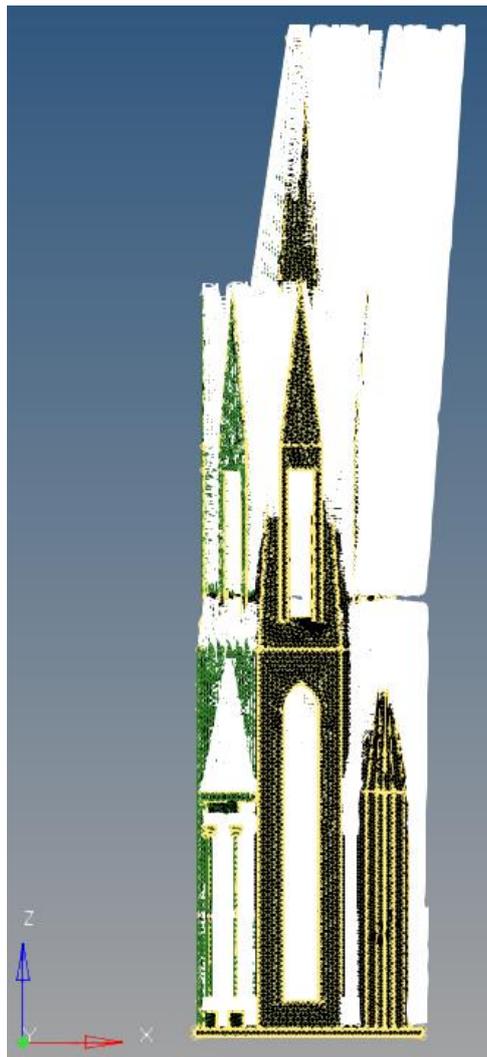


Figure 73 : Application des charges de vent de Nord-Ouest (direction X+) – vue en élévation

Les résultats fournis mettent ainsi en évidence des déplacements latéraux principaux selon la direction d'application Nord-Ouest (correspondant aux principales directions des vents dans la région). Les valeurs de déplacements sont situées dans une échelle proche de celle des déplacements dus au poids propre (cf figure 74). Les parties les plus hautes de la pyramide sont les plus soumises aux déplacements latéraux et participent le plus à la déformation de la structure dans ces conditions, avec des valeurs de déplacements potentielles maximales oscillant entre 1 et 9 cm.

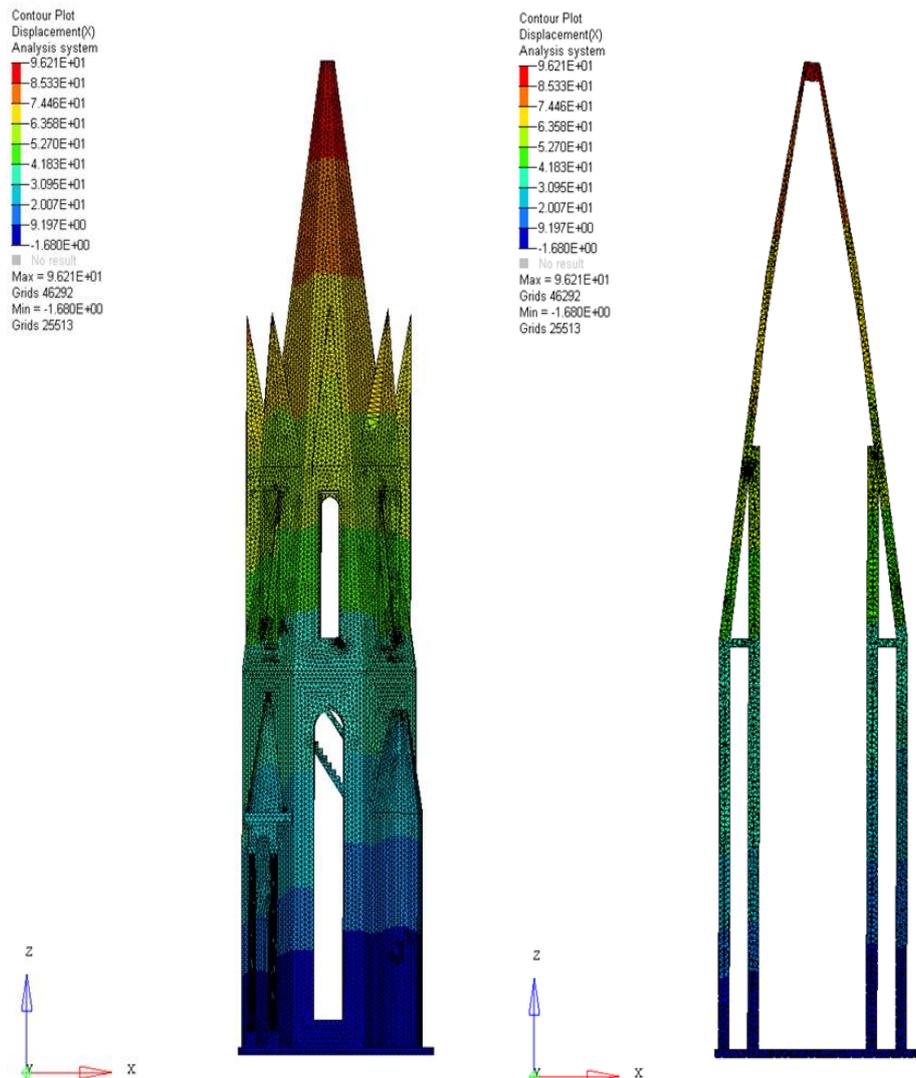


Figure 74 : Déplacements latéraux (en mm) dus à l'action du vent selon la direction Nord-Ouest – élévation et section

Les contraintes engendrées par l'effet des charges de vent selon la direction Nord-Ouest permettent d'identifier une hétérogénéité dans la répartition des contraintes, avec la présence de concentrations de contraintes régulières au niveau des ouvertures dans les murs de l'octogone ainsi qu'en partie basse des ouvertures de la pyramide. La structure travaille alors essentiellement en traction dans les parties exposées face au vent et en compression dans les parties opposées, comme illustré en figure 75.

Nous insistons sur le fait que, dans les résultats qui suivent, seul l'effet du vent est pris en compte (pas de superposition avec l'effet de la gravité). Les contraintes globales calculées restent faibles et varient entre -0.5 et 0.5 MPa. De tels résultats mettent ainsi en évidence la qualité de la conception et de construction de la flèche lui ayant permis de correctement résister aux fortes bourrasques et rafales de vent, notamment lors des tempêtes se produisant parfois dans la région. La structure reste donc également saine dans ces conditions.

Des pistes d'optimisation et d'amélioration de la qualité et de la précision des résultats restent possibles avec la décomposition plus détaillée de la géométrie et la prise en compte d'interactions entre composants en lieu et place d'un modèle global, ainsi qu'une répartition encore plus détaillée et avancée de la répartition des charges de vent.

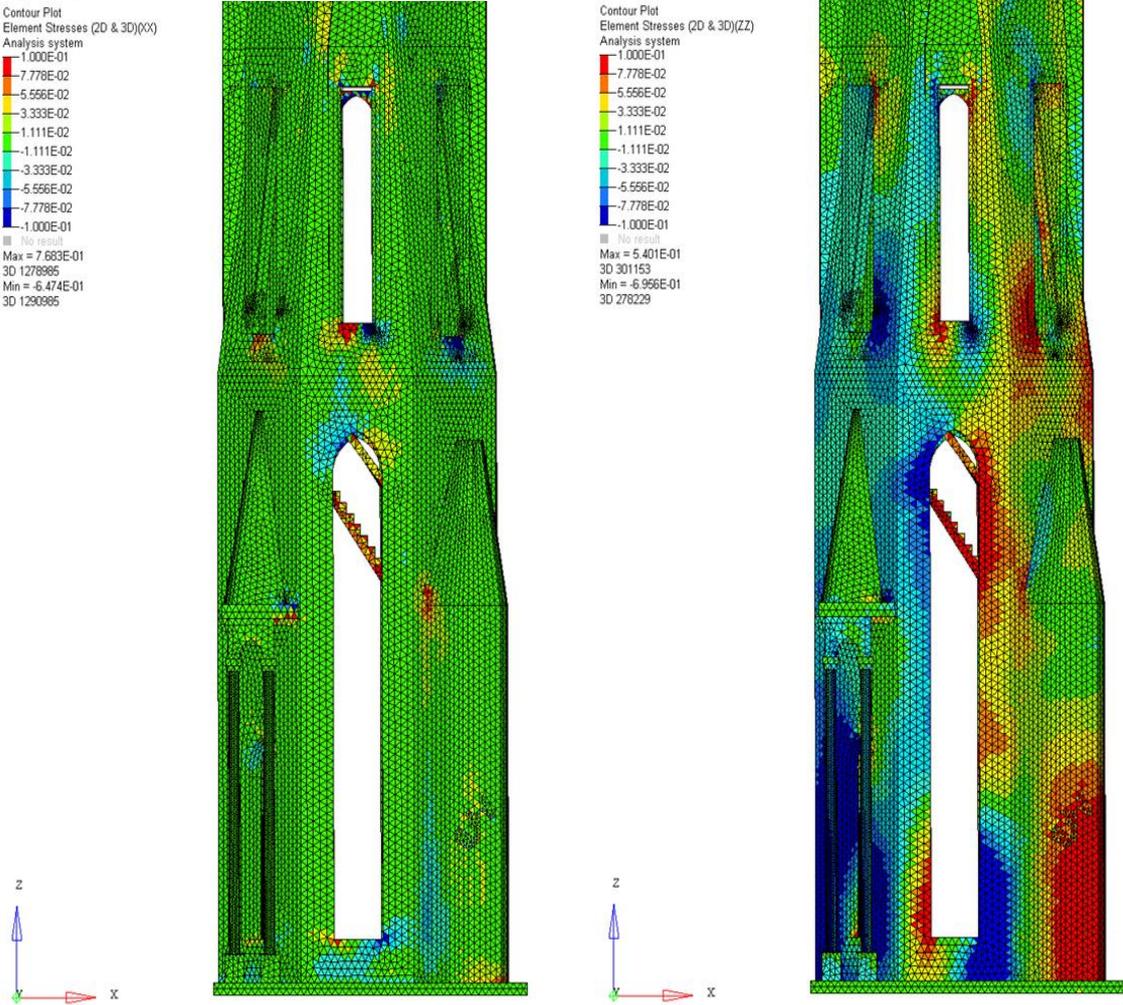


Figure 75 : Contraintes s_{xx} et s_{zz} (MPa) dues au vent selon la direction Nord-Ouest – détail entre -1 et 1 MPa

5.1.3.2. Amélioration de la procédure

Une **méthodologie complète de modélisation géométrique pour l'analyse numérique de bâtiments historiques** a été présentée et appliquée pour l'étude du comportement structural de la flèche de la cathédrale de Senlis. Les procédures de numérisation, de traitement des nuages de points et de modélisation géométrique semi-automatisée ont permis la **construction d'un modèle réaliste décrivant avec précision la structure**. La géométrie résultante, construite directement à partir du nuage de points, contient toutes les données et informations requises pour une bonne visualisation et également pour l'analyse structurale par éléments finis. Le **principal avantage** d'une telle méthode de modélisation concerne le **temps de travail requis pour la modélisation géométrique**, qui s'avère **moins chronophage et plus efficace** grâce à l'utilisation de composants paramétriques, et l'adaptation de la géométrie résultante au niveau de détail requis. La complexité de la géométrie est un grand défi à surmonter, pour éviter des maillages raffinés inutiles et un temps de calcul étendu.

En conséquence, **les différentes étapes du traitement des données et de la modélisation géométrique de type BIM/hBIM sont rendues possibles grâce à une utilisation judicieuse des logiciels existants et des formats d'échange de fichiers impliqués dans le processus**. Toutes les informations nécessaires pour l'analyse structurale sont ainsi concentrées et accessibles. L'analyse par éléments finis de contraintes 3D en utilisant le logiciel *Hypermesh* et le solveur *Optistruct* a montré que sous l'hypothèse d'un matériau homogène et isotrope, le comportement en poids propre conduit à des contraintes moyennes bien inférieures aux valeurs limite des calcaires. En plus des inspections in situ, les résultats actuels ont confirmé que la structure est saine. L'analyse par éléments finis peut fournir des informations supplémentaires pour les inspections de maintenance continue. **En utilisant le même modèle BIM et les mêmes maillages tétraédriques, des analyses supplémentaires peuvent être effectuées pour quantifier davantage les états de contrainte dus à la variabilité des propriétés des matériaux et aux charges de vent extrêmes**. Lorsque chaque aspect du processus numérique sera complet et pleinement exploitable avec une bonne fiabilité, celui-ci représentera un outil très précieux pour les architectes, les historiens et les responsables du patrimoine. Cette approche globale proposée basée sur la numérisation, les modèles BIM et l'analyse par éléments finis 3D peut dès lors être utilisée et adaptée au cas d'autres constructions historiques et architecturales, et donc selon différents contextes.

5.2. Bilan du chapitre et perspectives pour la simulation numérique et l'analyse structurale

Le potentiel des modèles orientés BIM et hBIM, et des géométries hybrides pour le présent type d'étude nécessite un processus de construction rigoureux pour les utiliser avec tous les logiciels d'analyse compatibles. Les géométries et les modèles numériques doivent être considérés de manière appropriée. Une géométrie simple mais non simpliste est adéquate si les paramètres de qualité et précision sont finalement obtenus : la

construction d'un modèle géométrique très détaillé n'est pas pertinente si sa complexité produit des difficultés pour la modélisation numérique, sans impact significatif sur les valeurs importantes de la répartition des contraintes.

Des améliorations peuvent être apportées à ce type de procédure de modélisation géométrique et modélisation physique par éléments finis, en envisageant des décompositions en sous-domaines et en intégrant des liaisons entre les différents composants, en lieu et place d'un modèle global. Ces décompositions en sous-domaines pourraient permettre des analyses plus poussées et des études mécaniques davantage avancées, sortant donc du périmètre d'étude envisagé dans le cas présent.

Les travaux de simulation numérique pour l'analyse structurale par éléments finis menés durant ces travaux de thèse montrent que l'exploitation des géométries pour la simulation, quelle que soit leur origine et la méthode de modélisation employée, s'avère pertinente et parfaitement valables lorsque les géométries initiales sont cohérentes et respectent bien les exigences et paramètres requis pour la construction de maillages surfaciques ou volumiques par éléments finis. Une contribution à l'utilisation la plus appropriée des géométries selon les besoins et contextes d'études ainsi que l'application des paramètres les plus efficaces pour l'exploitation des géométries, la construction de maillages aux éléments finis, l'optimisation des paramètres de traitement des maillages et leur exploitation pour des calculs d'analyse structurale (principalement en régime statique linéaire) est ainsi proposée dans ce chapitre. Là aussi, une compréhension optimale des géométries, des structures étudiées et des méthodes les plus appropriées pour la simulation et l'analyse structurale passe par l'intégration des processus appliqués dans la chaîne de numérisation mise en place dans le cadre de ces travaux de thèse, afin d'éviter une utilisation incorrecte ou difficilement configurable des géométries pour la simulation numérique. La maîtrise de l'ensemble des processus de modélisation géométrique couplés à l'analyse structurale par éléments finis est un élément clé de l'application d'une telle chaîne de numérisation appliquée au patrimoine bâti.

6. Conclusion et perspectives

6.1. Conclusion générale des travaux

L'objectif principal de cette thèse consistait à étudier, développer et mettre au point une chaîne de traitements numériques permettant d'exploiter de façon la plus efficace, la plus rapide possible et de façon semi-automatisée des nuages de points de bâtiments de toutes époques et de tout type (bâtiments modernes, historiques, ruines), afin de proposer différents types de modélisations géométriques 3D servant de base pour différentes études avancées (restitutions architecturales, études structurales, thermiques, historiques, etc).

La **première partie**, consacrée à un **état de l'art des techniques et travaux récents concernant les problématiques de numérisation, modélisation géométrique 3D et exploitation de ces modèles**, nous a permis de tirer de nombreux enseignements des travaux et publications récentes consacrées aux thématiques et champs d'étude du secteur : par exemple, l'étude de publications récentes dans les domaines de la numérisation, de la modélisation et des analyses structurales montre **l'importance croissante de l'utilisation des modèles 3D paramétriques et sémantiques de type BIM**, et de leur utilisation de plus en plus fréquente pour des travaux de restitution historique au travers d'une maquette numérique, mais également pour des analyses statiques et/ou dynamiques aux éléments finis. Les nouveaux enjeux concernent dorénavant **l'amélioration des processus de traitement des données issues des numérisations et les méthodes de modélisation géométriques les plus adaptées en fonction des circonstances**, afin de proposer les meilleurs compromis entre qualité architecturale des modèles, précision et quantité d'informations utiles pour les analyses structurales. De même, l'utilisation des nuages de points et des modèles géométriques et paramétriques comme outil d'aide à la décision et à la modélisation pour la rénovation et la reconstruction doivent davantage être développés et utilisés afin de s'affranchir d'un simple aspect logiciel et de la constitution de modèles orientés explicitement. De plus, la thématique consacrée à **l'enrichissement des modèles BIM par des données acquises en complément présente encore des limites**, bien qu'un potentiel soit présent. Le problème de l'interopérabilité et de la conservation des données lors des exportations et des différents formats de fichiers utilisés (particulièrement les formats gbXML et IFC) limite donc la rapidité des transferts et des phases d'édition avant calculs et analyses dans les logiciels d'études thermiques dédiés. Cependant, tous ces paramètres ne peuvent qu'évoluer et s'améliorer davantage au cours des prochaines évolutions informatiques. En effet, des améliorations des contenus et des formats de fichiers permettant une meilleure compatibilité de ces formats entre les différentes solutions logicielles ne manqueront pas de se produire au cours des prochaines années, grâce aux progrès constants des techniques informatiques.

Dans la **seconde partie**, les **principales techniques numériques d'acquisition** des environnements bâtis et des bâtiments de toute catégorie ont été présentées et contextualisées. La numérisation par scanner laser devient ainsi la technique émergente la plus prometteuse et la plus couramment utilisée, grâce à sa relative simplicité d'utilisation, sa grande polyvalence, sa précision (de l'ordre de quelques millimètres), et la qualité des nuages de points résultants (en termes de ratio de quantité de points/informations). De cette

façon, les scanners laser tendent à présent à supplanter et remplacer les outils traditionnels utilisés par les géomètres (stations totales et théodolites essentiellement), et forment également des alternatives redoutables à la photogrammétrie architecturale.

Des limites persistent cependant et ne peuvent pas encore être contournées : le coût des appareils reste encore élevé, malgré leur baisse régulière à chaque nouvelle génération d'appareils. Le poids et l'encombrement de certains appareils représente également un frein à leur utilisation, particulièrement dans le cas d'espaces intérieurs réduits ou de zones difficiles d'accès. Les appareils les plus récents proposent cependant des améliorations en termes de compacité et de praticité, ce qui améliore nettement les possibilités d'utilisation et de transport. De plus, étant donné qu'il ne s'agit que d'appareils terrestres, certaines zones telles que des toitures, des détails architecturaux situés en hauteur, des murailles, etc, sont parfois impossibles à scanner correctement, ce qui engendre des occlusions, des trous ou des pertes de précision non négligeables sur les nuages de points.

La photogrammétrie terrestre ou aérienne présente cependant quelques avantages qui la rendent nécessaires dans certaines configurations et conditions particulières : le coût bien plus modéré du matériel la rend beaucoup plus accessible, de même que la simplification et l'automatisation des processus d'assemblage et traitement dans les logiciels. De plus, étant donné la grande variété et la flexibilité du matériel photographique disponible ainsi que leur précision adaptable en fonction du contexte (objectifs grand angle, téléobjectifs, drones, mâts, trépieds...), certaines situations se montrent plus favorables à l'utilisation de la photogrammétrie en lieu et place de la lasergrammétrie. Les phases d'acquisition s'avèrent également beaucoup plus rapides et les volumes de données à traiter (quantité d'images et taille des nuages de points) sont en général moins importants. L'utilisation de drones permet également des acquisitions impossibles à réaliser par acquisition terrestre, particulièrement dans le cas de toitures ou zones difficiles d'accès, voire de vastes zones ouvertes (champs, carrières, mines...) où l'emploi de scanners laser peut s'avérer plus long ou présenter trop de contraintes.

La problématique de fusion des données issues de différentes sources (telles que des combinaisons entre lasergrammétrie et photogrammétrie) et les opérations de traitement parfois nécessaires lorsque les nuages de points contiennent trop d'informations constituent des étapes importantes, afin de préparer correctement les nuages de points et optimiser leur utilisation de la façon la plus efficace possible pour la modélisation géométrique 3D, en déterminant dans chaque cas le meilleur compromis entre qualité, quantité de points et précision souhaitée. Cependant, ces procédés doivent être employés de façon rigoureuse et précise, afin d'éviter toute perte de données ou précision due à un mauvais recalage des différents nuages, particulièrement si les échelles d'entrées des nuages sont différentes et nécessitent alors un recalage préalable. De telles notions doivent encore être davantage améliorées mais n'ont pas fait l'objet de plus d'investigations durant nos travaux en raison d'un manque de temps.

Dans la **troisième partie**, les **différentes méthodologies proposées et employées pour la modélisation géométriques 3D** à partir des nuages de points ont été présentées et détaillées, en fonction des types de construction, des contextes d'études et des besoins pour les restitutions et études ultérieures. En effet, **les nuages de points constituent d'excellents supports pour la restitution intégrale de scènes et environnements en 3D**, ainsi qu'un outil efficace pour la modélisation géométrique ou paramétrique. Dès lors, une

fois les nuages de points optimisés pour une exploitation avancée, différentes options possibles pour la modélisation géométrique se présentent.

Nous avons ainsi vu que **la modélisation géométrique par surfaces NURBS forme une méthode de représentation intéressante pour réduire la complexité de modélisation d'objets et de scènes complexes**, notamment pour la modélisation 3D de bâtiments historiques comportant de nombreux détails structuraux ou architecturaux (lieux de cultes, châteaux, ruines, etc) ou de scènes complexes (tunnels, grottes, etc). Cependant, dès que le nombre de faces constituant les géométries augmente significativement, allant de pair avec la qualité et la précision des géométries, il devient plus difficile d'envisager une utilisation des modèles les plus détaillés et complets pour des analyses avancées telles que des études structurales aux éléments finis, en raison des travaux d'inspection et d'édition lourds (chronophages et fastidieux) requis dans ce cas, surtout si ces tâches doivent être accomplies de façon manuelle. Le cas d'étude du site du château de Coucy nous a montré que l'intérêt de ce type de géométries très détaillées présente des avantages très intéressants en cas de besoins précis pour la restitution architecturale ou des applications de réalité augmentée ou de visite virtuelle, mais reste limitée dans d'autres circonstances.

La représentation de volumes à l'aide de voxels représente également une méthode de modélisation rapide et potentiellement efficace, mais n'est pas non plus exempte de défauts : les environnements et objets réels n'étant pas constitués d'un assemblage de petits cubes, il peut s'avérer difficile d'obtenir une représentation suffisamment exacte de la plupart des volumes à l'aide de voxels, ou alors en optant pour des résolutions élevées comportant un très grand nombre d'éléments, requérant des ressources matérielles plus conséquentes. De plus, les modèles construits de la sorte étant du type géométrique et ne comportant pas d'informations paramétriques, des travaux d'édition de tels modèles se montrent souvent nécessaires pour une utilisation plus avancée, afin de vérifier notamment la cohérence des liaisons entre les composants. Cette méthodologie semi-automatisée par conversion des points des nuages en voxels se montre adaptée essentiellement pour des problématiques de restitution 3D plus ou moins détaillée de structures ainsi que la construction de géométries 3D cohérentes.

En revanche, **la construction de modèles géométriques 3D de type BIM ou hBIM, que ceux-ci soient partiels ou intégraux, permet de faciliter les démarches pour la modélisation géométrique, la restitution et la compréhension des caractéristiques architecturales, structurales ou thermiques des bâtiments** tant que les éléments à modéliser restent cohérents. Ainsi, la construction d'un modèle complexe par accumulation et assemblage de composants simples décrivant correctement la géométrie est rendue possible. L'objectif de ce type de processus est de proposer une phase de modélisation rapide, améliorée et fiable de la structure étudiée, ne nécessitant que peu, voire pas du tout de phase d'édition complémentaire. Les modèles géométriques ainsi construits doivent pouvoir être par la suite exportés vers d'autres solutions logicielles dédiées à des analyses précises, et notamment les analyses structurales et les études thermiques, comme nous avons pu le voir. Les modèles construits en ayant recours à la procédure semi-automatisée employée dans le cadre de nos travaux (cas de la flèche de la cathédrale de Senlis, et site de l'Hermitage) s'avèrent donc relativement simples à modéliser intégralement, de façon semi-automatisée, particulièrement si l'on souhaite construire un modèle global plus simple, sans y intégrer l'ensemble des détails architecturaux complexes existants.

Des limites restent également présentes dans le cas de ce type de modélisation, puisque **la construction de géométries orientées BIM ou hBIM s'avère également un exercice difficile dans le contexte de bâtiments historiques complexes**, notamment en raison de la grande complexité de la structure et des géométries, comme l'a démontré l'exemple de la flèche de la cathédrale de Senlis, mais aussi par la nécessité de disposer de l'ensemble des informations historiques, structurales et architecturales afin d'intégrer correctement l'ensemble des paramètres. Dès lors, l'emploi d'une telle méthode de modélisation reste pertinent, mais il convient de clairement définir les enjeux initiaux, et choisir entre rapidité de modélisation pour l'obtention d'un modèle global, ou une édition beaucoup plus longue, mais permettant l'obtention de modèles plus détaillés.

L'application d'algorithmes de détection, segmentation et extraction de surfaces géométriques (RANSAC) directement à partir des nuages de points montre encore des limites d'utilisation importantes, liées notamment à la nécessité de disposer de nuages de points « propres » et une grande sensibilité aux perturbations, artefacts résiduels et à la complexité des formes géométriques. Le besoin de retravailler les géométries pour compléter les assemblages, intégrer l'ensemble des ouvertures et autres composants, et ainsi finaliser les modèles, constituent encore des points particuliers d'utilisation qui restent difficiles à lever intégralement. **L'amélioration de ce type de procédures reste un pont essentiel, dont l'utilisation reste encore trop sujette à variations en fonction du contexte et du type de structure et géométries à analyser**, mais qui pourrait représenter, si les méthodes et algorithmes peuvent être améliorés et stabilisés, une alternative intéressante à la modélisation de type BIM dans les cas où cette dernière ne s'avèrerait pas nécessaire.

Enfin, **la dernière partie** de nos travaux, consacrée à **l'exploitation des géométries 3D** précédemment construites au travers des différentes procédures et des cas d'études concernés, nous a permis de mettre en évidence les caractéristiques et les avantages ou inconvénients de ces différents types de géométries, dans le cas de travaux d'analyses structurales statiques aux éléments finis ainsi que l'utilisation des modèles BIM et la problématique des formats de fichiers pour des études thermiques. Les résultats nous montrent que **les modèles basés sur composants paramétriques et des géométries de type BIM permettent à la fois de récupérer le plus d'informations et de caractéristiques provenant de ces modèles, et limitent également les différentes phases d'édition et préparation**. Dans le cas d'étude de la flèche de la cathédrale de Senlis, les différents résultats obtenus dans le cas des simulations de l'influence de poids propre et des charges de vent sur la structure ont ainsi permis de montrer et étudier en détail les répartitions des contraintes et comportements de la structure, permettant d'en tirer les conclusions nécessaires. Ce type de modélisation mécanique et d'analyse représente une avancée significative dans le cadre de la numérisation, la modélisation géométrique, l'analyse structurale et l'aide à la décision et à la maintenance préventive du patrimoine bâti.

Les **contributions et apports proposés** dans le cadre de nos travaux, au travers de démarches méthodologiques intégrales et adaptées aux différents contextes et enjeux, permettent de **mieux comprendre, cibler et exploiter les possibilités offertes par les différentes méthodes de modélisation géométrique**, ce qui représente une avancée pertinente, et **dont les différentes composantes se montrent applicables et exploitables** au plus grand nombre d'utilisateurs, sans se voir réservées à une utilisation tournée uniquement vers la recherche.

6.2. Perspectives

Des pistes d'améliorations et perspectives de travaux ultérieurs restent ouvertes sur plusieurs thématiques, suite à l'ensemble des travaux menés et présentés. Ainsi, sur les plans de l'approche méthodologique, l'utilisation des solutions logicielles disponibles et en développement doit faire l'objet d'un suivi et d'une veille technologique constante, en raison de leur évolution rapide et de l'émergence régulière de nouveaux outils, bases de données et versions de logiciels. Concernant le développement d'algorithmes et d'outils dédiés pour l'extraction de données, l'analyse des nuages de points et la modélisation géométrique, beaucoup de pistes restent là aussi accessibles et focalisés sur des aspects informatiques spécifiques requérant des compétences particulières en programmation et développement. Les travaux d'études numériques concernant l'analyse structurale par éléments finis, les études thermiques, les outils d'application pour la réalité virtuelle ou augmentée doivent ainsi bénéficier de ces améliorations régulières.

La modélisation géométrique en voxels à partir des nuages de points présente encore des lacunes à combler. L'utilisation de voxels détaillant les géométries est tout à fait pertinente, mais requiert nécessairement des scripts de conversion des points et de modélisation géométrique aboutis. La taille des éléments doit également être systématiquement adaptée, au risque de perdre en précision et en qualité des géométries construites. Par exemple, l'intégration de composants géométriques ou l'implantation de voxels permettant de combler les zones manquantes ou vides en raison d'occlusions lors des numérisations reste un défi à relever. Le développement de programmes ou algorithmes dédié à ce processus est un sujet d'étude récurrent où différentes solutions et méthodes sont proposées, sans pour autant se montrer efficace ou compatible dans toutes les configurations. De plus, ce champ d'étude relève du développement informatique et doit donc être pleinement opérationnel pour permettre son utilisation et une exploitation avancée des géométries construites.

A partir de modèles géométriques complets, éditables et intégralement fonctionnels, des travaux d'analyses numériques avancées telles que des analyses aux éléments finis représentent une piste non négligeable pour une compréhension du comportement global ou local des structures. En conséquence, l'utilisation de modèles 3D géométriques de type NURBS doit être davantage étudiée, car son potentiel est remarquable, aussi bien pour la modélisation architecturale, structurale ou historique. Les limites constatées concernant la complexité croissante des modèles très détaillés et les travaux d'édition requis pourront faire l'objet de recherches plus approfondies concernant de meilleures méthodes pour l'exploitation des nuages de points et la modélisation géométrique.

De même, l'étape de transfert des géométries pour la construction de maillages tétraédriques aux éléments finis (ou des maillages d'un autre type) peut également faire l'objet de travaux complémentaires, notamment dans le cas où l'on souhaite décomposer les géométries pour créer différentes catégories d'éléments ou de composants dans les géométries. Cela permettra ainsi de mieux détailler le comportement mécanique des structures étudiées, avec des possibilités d'études localisées, en complément d'analyses sur les structures globales, qui restent soumises à une nécessaire cohérence de l'ensemble de la structure et des géométries. L'obtention de résultats cohérents pour les analyses structurales en régime statique linéaire, à l'image du cas d'étude de la flèche de la cathédrale de Senlis, valide ensuite la pertinence d'analyses davantage détaillées telles que

des analyses dynamiques ou sismiques, qui restent importantes pour la compréhension complète des patrimoines bâtis et historiques. Ces champs relèvent de la mécanique numérique avancée et requièrent des compétences et une expertise propre à ce domaine pour permettre leur pleine exploitation.

L'ensemble des processus et méthodologies présentées dans nos travaux ont été orientés vers une démarche numérique et technique accessible au plus grand nombre d'utilisateurs, nécessitant certes des compétences spécifiques en fonction des différentes étapes (numérisation, traitement des données, modélisation géométrique, études structurales ou thermiques, etc), mais sans se montrer réhibitoire en raison de programmes spécifiques ou algorithmes développés et restant « en interne ».

L'objectif était ici de proposer des améliorations concrètes sur le plan de l'utilisation informatique et méthodologique. Les perspectives d'amélioration et de réutilisation des méthodes et traitements proposés sont claires. Il ne fait nul doute qu'elles pourront être améliorées au fil du temps et des évolutions informatiques et numériques à venir. Pour les différentes entités ayant recours à de tels processus et méthodologies, (services archéologiques, patrimoniaux, architectes et bureaux d'études Tout Corps d'Etat ou spécialisés), ainsi que l'ensemble des services techniques (gestion, maintenance et préservation du patrimoine bâti), les évolutions apportées permettront à l'avenir une meilleure intégration, compréhension, prise en compte et utilisation des méthodes numériques dédiées. L'ensemble des processus de la chaîne de numérisation proposés dans ces travaux (relevé, restitution et étude de l'existant, modélisation géométrique, études avancées pour la gestion, l'entretien et la maintenance des patrimoines bâtis et tous types de projets de construction ou rénovation) forment donc une base solide adaptable et applicable à l'ensemble des problématiques liées au domaine et champ d'application.

7. Bibliographie et références

1. N. Hichri, C. Stefani, L. De Luca, and P. Veron. Review of the « as-built BIM » approaches. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W1*, page 6. 3DARCH 2013 - 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures,, February 2013.
2. R. Volk, J. Stengel, and F. Schultmann. Building information modeling (BIM) for existing buildings—literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38 :109–127, 2014.
3. L. Ding, Y. Zhou, and B. Akinici. Building information modeling (BIM) application framework: The process of expanding from 3d to computable nd. *Automation in Construction*, 46 :82–93, 2014.
4. R. Miettinen and S. Paavola. Beyond the BIM utopia: Approaches to the development and implementation of building information modeling. *Automation in Construction*, 43 :84–91, 2014.
5. E. Farr, P. Piroozfar, and D. Robinson. BIM as a generic configurator for facilitation of customisation in the AEC industry. *Automation in Construction*, 45 :119–125, 2014.
6. K. Chen, W. Lu, Y. Peng, S. Rowlinson, and G-Q. Huang. Bridging BIM and building: From a literature review to an integrated conceptual framework. *International Journal of Project Management*, 33 :1405–1416, 2015.
7. J. Kwok W. Wong and J. Zhou. Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green Bim: A review. *Automation in Construction*, 57 :156–165, 2015.
8. V. Patraucean, I. Armeni, M. Nahangi, J. Yeung, I. Brilakis, and C. Haas. State of research in automatic as-built modelling. *Advanced Engineering Informatics*, 29 :162–171, 2015.
9. X. Brunetaud, L. De Luca, S. Janvier-Badosa, K. Beck, and M. Al-Mukhtar. Application of digital techniques in monument preservation. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16 :543–556, 2012.
10. X. Brunetaud, C. Stefani, S. Janvier Badosa, K. Beck, and M. Al-Mukhtar. Comparison between photomodelling and laser scanning to create a 3D model for a digital health record. *European Journal of Environmental and Civil Engineering Vol. 16, Supp. 1*, June 2012, s48–s63, Vol. 16, Supp. 1 :s48–s63, 2012.
11. F. Fassi, C. Achille, F. Gaudio, and L. Fregonese. Integrated strategies for the modeling of very large, complex architecture. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-5/W16*, pages 105–112. ISPRS Trento 2011 Workshop, March 2011.

12. H. Barki, F. Fadli, A. Shaat, L. Mahdjoubi, P. Boguslawski, and V. Zverovich. 3D capture techniques for Bim enabled Icm.
13. M. Pejic. Design and optimisation of laser scanning for tunnels geometry inspection. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 37 :199– 206, 2013.
14. B. Riveiro, H. González-Jorge, M. Varela, and D.V. Jauregui. Validation of terrestrial laser scanning and photogrammetry techniques for the measurement of vertical underclearance and beam geometry in structural inspection of bridges. *Measurement*, 46 :784–794, 2013.
15. W. Wang, W. Zhao, L. Huang, V. Vimarlund, and Z. Wang. Applications of terrestrial laser scanning for tunnels: a review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 1(5) :325–337, 2014.
16. C. Achille, A. Adami, S. Chiarini, S. Cremonesi, F. Fassi, L. Fregonese, and L. Taffurelli. UAV-based photogrammetry and integrated technologies for architectural applications—methodological strategies for the after-quake survey of vertical structures in Mantua (Italy). *Sensors*, 15 :15520–15539, 2015.
17. M. Acierno, Stefano Cursi, Davide Simeone, and Donatella Fiorani. Architectural heritage knowledge modelling: An ontology-based framework for conservation process. *Journal of Cultural Heritage*, 24 :124–133, 2017.
18. Y. Shen, R. Lindenbergh, and J. Wang. Change analysis in structural laser scanning point clouds: The baseline method. *Sensors*, 17(26), 2017.
19. M. Kedzierski and A. Fryskowska. Methods of laser scanning point clouds integration in precise 3d building modelling. *Measurement*, 74 :221–232, 2015.
20. L. Barazzetti, F. Banfi, R. Brumana, G. Gusmeroli, M. Previtali and G. Schiantarelli. Cloud-to-BIM-to-Fem: Structural simulation with accurate historic BIM from laser scans. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 57 :71–87, 2015.
21. G. Castellazzi, A. Maria D’Altri, G. Bitelli, I. Selvaggi, and A. Lambertini. From laser scanning to finite element analysis of complex buildings by using a semi-automatic procedure. *Sensors*, 15, 2015.
22. J. Jung, S. Hong, S. Jeong, S. Kima, H. Choa, S. Hong, and J. Heo. Productive modeling for development of as-built BIM of existing indoor structures. *Automation in Construction*, 42 :68–77, 2014.
23. S. B. Walsh, D-J. Borello, B. Guldur, and J-F. Hajjar. Data processing of point clouds for object detection for structural engineering applications. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 28 :495– 508, 2013.
24. F. Bosché. Plane-based registration of construction laser scans with 3D/4D building models. *Advanced Engineering Informatics*, 26 :90– 102, 2012.
25. X. Xiong, A. Adan, B. Akinci, and D. Huber. Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data. *Automation in Construction*, 31 :325–337, 2013.

26. C. Kim, H. Son, and C. Kim. Automated construction progress measurement using a 4D building information model and 3d data. *Automation in Construction*, 31 :75–82, 2013.
27. C. Kim, H. Son, and C. Kim. Fully automated registration of 3D data to a 3D cad model for project progress monitoring. *Automation in Construction*, 35 :587–594, 2013.
28. H. Macher, T. Landes, and P. Grussenmeyer. Point clouds segmentation as base for as-built BIM creation. In *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume Volume II-5/W3 of 25th International CIPA Symposium 2015, page 7, August-September 2015.
29. C. Wang, Y-K. Cho, and C. Kim. Automatic BIM component extraction from point clouds of existing buildings for sustainability applications. *Automation in Construction*, 56 :1–13, 2015.
30. G. Erdos, T. Nakano, G. Horváth, Y. Nonaka, and J. Váncza. Recognition of complex engineering objects from largescale point clouds. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 64 :165–168, 2015.
31. A. Dimitrov and M. Golparvar-Fard. Segmentation of building point cloud models including detailed architectural/structural features and MEP systems. *Automation in Construction*, 51 :32–45, 2015.
32. S. Ochmann, R. Vock, R. Wessel, and R. Klein. Automatic reconstruction of parametric building models from indoor point clouds. *Computers & Graphics*, 54 :94–103, 2016.
33. F. Bosché, M. Ahmed, Y. Turkan, C-T. Haas, and R. Haas. The value of integrating scan-to-BIM and scan-vs- BIM techniques for construction monitoring using laser scanning and BIM : The case of cylindrical MEP components. *Automation in Construction*, 49 :201–213, 2015.
34. A-V Vo, L. Truong-Hong, D-F. Laefer, and M. Bertolotto. Octree-based region growing for point cloud segmentation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104 :88–100, 2015.
35. C. Biagini, P. Capone, V. Donato, and N. Facchini. Towards the BIM implementation for historical building restoration sites. *Automation in Construction*, 2016.
36. L. Barazzetti. Parametric as-built model generation of complex shapes from point clouds. *Advanced Engineering Informatics*, 30 :298– 311, 2016.
37. L. Díaz-Vilariño, B. Conde, S. Lagüela, and H. Lorenzo. Automatic detection and segmentation of columns in as-built buildings from point clouds. *Remote Sensing*, 7 :15651–15667, 2015.
38. S. Hong, J. Jung, S. Kim, H. Cho, J. Lee, and J. Heo. Semi-automated approach to indoor mapping for 3D as-built building information modeling. *Computers, Environment and Urban Systems*, 51 :34–46, 2015.
39. T. Hinks, H. Carr, L. Truong-Hong, and D-F. Laefer. Point cloud data conversion into solid models via point-based voxelization. *Journal of Surveying Engineering*, 2013.

40. L. Truong-Hong, D-F. Laefer, T. Hinks, and H. Carr. Combining an angle criterion with voxelization and the flying voxel method in reconstructing building models from Lidar data. *Computer- Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 28 :112–129, 2013.
41. A. Tonini, E. Guastaldi, G. Massa, and P. Conti. 3D geo-mapping based on surface data for preliminary study of underground works: A case study in Val Topina (central Italy). *Engineering Geology*, 99 :61–69, 2008.
42. C. Vanneschi, R. Salvini, G. Massa, S. Riccucci, and A. Borsani. Geological 3D modeling for excavation activity in an underground marble quarry in the apuan alps (Italy). *Computers & Geosciences*, 69 :41–54, 2014.
43. L. Barazzetti, F. Banfi, R. Brumana, G. Gusmeroli, D. Oreni, M. Previtali, F. Roncoroni, and G. Schiantarelli. BIM from laser clouds and finite element analysis: combining structural analysis and geometric complexity. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume XL-5/W4, February 2015.
44. D-H Zhong, M-C Li, L-G Song, and G. Wang. Enhanced NURBS modeling and visualization for large 3D geoenvironmental applications: An example from the jinping first-level hydropower engineering project, china. *Computers & Geosciences*, 32 :1270–1282, 2006.
45. M. Berger, A. Tagliasacchi, L-M. Seversky, P. Alliez, G. Guennebaud, J-A. Levine, A. Sharf, and C-T. Silva. A survey of surface reconstruction from point clouds. *Computer Graphics Forum*, 0(0) :1–28, 2015.
46. D. Cin and S. Russo. Annex and rigid diaphragm effects on the failure analysis and earthquake damages of historic churches. *Engineering Failure Analysis*, 59 :122–139, 2016.
47. F. Ascione, F. Ceroni, R. Francesca De Masi, F. de Rossi, and M. Rosaria Pecce. Historical buildings: Multidisciplinary approach to structural/energy diagnosis and performance assessment. *Applied Energy*, 185 :1517–1528, 2017.
48. M. Betti and A. Vignoli. Numerical assessment of the static and seismic behaviour of the basilica of Santa Maria all'impruneta (Italy). *Construction and Building Materials*, 25 :4308–4324, 2011.
49. M. Betti and A. Vignoli. Modelling and analysis of a Romanesque church under earthquake loading: Assessment of seismic resistance. *Engineering Structures*, 30 :352–367, 2008.
50. M. Betti, M. Orlando, and A. Vignoli. Static behavior of an italian medieval castle: Damage assessment by numerical modelling. *Computers and Structures*, 89 :1956–1970, 2011.
51. M. Betti, G. Bartoli, and M. Orlando. Evaluation study on structural fault of a renaissance italian palace. *Engineering Structures*, 32 :1801–1813, 2010.
52. S. Saloustros, L. Pelà, P. Roca, and Jo Portal. Numerical analysis of structural damage in the church of the poblet monastery. *Engineering Failure Analysis*, 48 :41–61, 2015.

53. M. Valente and G. Milani. *Seismic assessment of historical masonry towers by means of simplified approaches and standard fem*. *Construction and Building Materials*, 108 :74–104, 2016.
54. S. Casolo and C-A Sanjust. *Seismic analysis and strengthening design of a masonry monument by a rigid body spring model: The "Maniace castle" of Syracuse*. *Engineering Structures*, 31:1447–1459, 2009.
55. L-J Sánchez-Aparicio, B. Riveiro, D. Gonzalez-Aguilera, and L-F. Ramos. *The combination of geomatic approaches and operational modal analysis to improve calibration of finite element models: A case of study in Saint Torcato church (Guimarães, Portugal)*. *Construction and Buildings Materials*, 2014.
56. L-J Sánchez-Aparicio, A. Villarino, J. García-Gago, and D. González-Aguilera. *Photogrammetric, geometrical, and numerical strategies to evaluate initial and current conditions in historical constructions: A test case in the church of San Lorenzo (Zamora, Spain)*. *Remote Sensing*, 60, 2016.
57. G. Fortunato, M-F Funari, and P. Lonetti. *Survey and seismic vulnerability assessment of the baptistry of san Giovanni in Tumba (Italy)*. *Journal of Cultural Heritage*, 26 :64–78, 2017.
58. R. Fanti, G. Gigli, L. Lombardi, D. Tapete, and P. Canuti. *Terrestrial laser scanning for rockfall stability analysis in the cultural heritage site of Pitigliano (Italy)*. *Landslides*, 10 :409–420, 2013.
59. J. Bum Kim, W. Seong Jeong, M-J. Clayton, J-S. Haberl, and W. Yan. *Developing a physical BIM library for building thermal energy simulation*. *Automation in Construction*, 50 :16–28, feb 2015.
60. Y. Ham and M. Golparvar-Fard. *Mapping actual thermal properties to building elements in gbXML-based BIM for reliable building energy performance modeling*. *Automation in Construction*, 49 :214–224, 2015.
61. S. Lagüela, L. Díaz-Vilariño, J. Armesto, and P. Arias. *Non-destructive approach for the generation and thermal characterization of an as-built BIM*. *Construction and Building Materials*, 51 :55–61, 2014.
62. G. Goullis and I. Kovacic. *Building information modelling for analysis of energy efficient industrial buildings – a case study*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68 :953–963, 2017.
63. R.Héno and L. Chandelier. *Numérisation 3D de bâtiments – cas des édifices remarquables*. ISTE éditions, Hermes Science Publishing, 2014.
64. SCENE : <https://www.faro.com/en-gb/products/product-design/faro-scene/>
65. ReCap Pro : <https://www.autodesk.com/products/recap/overview>
66. Photoscan : <http://www.agisoft.com>

67. X-F Han, J-S Jin, M-J Wang, W Jiang, L. Gao and L. Xiao. A review of algorithms for filtering the 3D point cloud. *Signal Processing: Image Communication*, 57, 103–112, 2017.
68. S. Chen, D. Tian, C Feng, A. Vetro and J. Kovacevic. Fast Resampling of Three-Dimensional Point Clouds via Graphs. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 66 :666-681, 2018.
69. F. Khameneifar, H-Y Feng. Establishing a balanced neighborhood of discrete points for local quadric surface fitting. *Computer-Aided Design*, 84 :25-38, 2016.
70. T. Hackel, J-D Wegner and K. Schindler. Joint classification and contour extraction of large 3D point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 130 :231-245, 2017.
71. A. Esteves-Stamford. Etude des méthodes de levé de bâtiment en vue d'une modélisation 3D - Application à la flèche de la cathédrale Notre Dame de Senlis. Rapport de stage TN09, UTC, 2015.
72. 3D Reshaper : <https://www.3dreshaper.com/fr/software-fr/>
73. E.Girma. Mise en place d'une méthodologie pour la création d'un modèle 3D réaliste d'un site historique incomplet, le château de Coucy. Rapport de stage TN09, UTC, 2016.
74. Cloud Compare : <http://cloudcompare.org>
75. Z. Chen, J. Cao and W.Wang. Isotropic Surface Remeshing Using Constrained Centroidal Delaunay Mesh. *Computer Graphics Forum*, 31 :2077-2085, 2012.
76. JJ Little and P. Shi. Ordering Points for Incremental TIN Construction from DEMs. *Geoinformatica*, 7 :33-53, 2003.
77. H. Theisel. Extract Isosurfaces for Marching Cubes. *Computer Graphics forum*, 21 :19-31, 2002.
78. RPR Cardoso and JMA Cesar de Sa. Blending moving least squares techniques with NURBS basis functions for nonlinear isogeometric analysis. *Computational Mechanics*, 53 :1327-1340, 2014.
79. Z. Majdisova, V. Skala. Big geo data surface approximation using radial basis functions: A comparative study. *Computers and Geosciences*, 109 :51-58, 2017.
80. A. Maiti and D. Chakravarty. Performance analysis of different surface reconstruction algorithms for 3D reconstruction of outdoor objects from their digital images. *SpringerPlus*, 5, 2016.
81. S-H Bae and B-K Choi. NURBS surface fitting using orthogonal coordinate transform for rapid product development. *Computer-Aided Design*, 34 :683-690, 2001.
82. Rhinoceros5 : <https://www.rhino3d.com>
83. Grasshopper : <http://www.grasshopper3d.com>

84. DURAARK (Durable Architectural Knowledge) : <http://duraark.eu>
85. VisualARQ2 : <http://www.visualarq.com>
86. Revit : <https://www.autodesk.fr/products/revit-family/overview>
87. Pleiades : <http://www.izuba.fr/logiciels/outils-logiciels/>
88. M.A. Fischler and R.C. Bolles. *Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography*. *Communications of the ACM*, 24(6):381–395, 1981.
89. A. Hidalgo-Paniagua, M-A. Vega-Rodríguez, N. Pavón and J. Ferruz. *A comparative study of parallel RANSAC implementations in 3D space*. *Int J Parallel Prog* (2015) 43:703–720, 2014.
90. Hypermesh : <https://altairhyperworks.com/product/HyperMesh>
91. Optistruct : <https://altairhyperworks.com/product/OptiStruct>

Annexes

Formats de fichiers utilisés et caractéristiques

Nuages de points

.fls : format bruts des scans issus des scanners laser FARO

.rcp : format propriétaire des nuages de points enregistrés par le logiciel Recap et utilisable directement dans les logiciels Autodesk

.e57 : format libre et interopérable des nuages de points utilisables par de nombreux logiciels, pour l'importation et l'exportation

.txt : format texte utilisé entre autres pour convertir des fichiers de nuages de points en formats ascii

Modélisation géométrique

.rvt : format propriétaire des modèles 3D paramétriques de type BIM enregistrés par le logiciel Revit

.dxf : format interopérable de plans et modèles 3D surfaciques ou volumiques utilisables pour l'exportation et l'importation depuis des logiciels Autodesk et vers d'autres suites logicielles

.3dm : format propriétaire des modèles et géométries 3D enregistrés par le logiciel Rhinoceros

.iges : format de fichier interopérable utilisé pour l'importation et l'exportation de géométries surfaciques

.sat : format de fichier interopérable utilisé pour l'importation et l'exportation de géométries volumiques

Modélisation par éléments finis et analyses numériques

.hm : format de fichier propriétaire utilisé par le logiciel Hypermesh pour l'enregistrement de modèles

.h3d : format de fichier propriétaire généré par le solveur Optistruct pour l'analyse de résultats