Grenoble INP – ENSIMAG
École Nationale Supérieure d'Informatique et de Mathématiques Appliquées

Rapport de projet de fin d'études

Effectué à l'École Nationale des Sciences Géographiques (ENSG)

Contribution au développement d'un système d'information à l'échelle architecturale pour la gestion de la documentation métrique et documentaire de la cathédrale d'Amiens

Grémion Estelle

3ème année – Option MMIS - IRVM

17 février 2014 – 11 juillet 2014

ENSG
6-8 Avenue Blaise Pascal
Cité Descartes - Champs-sur-Marne
77455 Marne-la-Vallée cedex 2

Responsable de stage
Héno Raphaële
Tuteur de l'école
Desvignes Michel

Contacts

Étudiant

Nom Grémion Estelle

Adresse 52 Grande Rue
25240 MOUTHE

Téléphone 06 78 58 42 41

e-mail estelle.gremion@ensimag.grenoble-inp.fr

Responsable de stage

Nom Héno Raphaële

Adresse École Nationale des Sciences Géographiques
6 et 8 avenue Blaise Pascal
Cité Descartes - Champs-sur-Marne
77455 Marne la Vallée Cedex 2

Téléphone 01 64 15 31 40

e-mail raphaele.heno@ensg.eu

Tuteur de l'ENSIMAG

Nom Desvignes Michel

Adresse GIPSA-LAB/UMR 5216 CNRS
11 rue des Mathématiques BP 46 F
38402 Saint Martin d'Hères Cedex

Téléphone 04 76 82 64 21

e-mail michel.desvignes@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

Table des matières

Contacts i

Résumé v

Mots Clés v

Remerciements vi

Glossaire vii

1 L'École Nationale des Sciences Géographiques 2
1.1 Présentation de l'école . . . 2
1.2 Encadrement du stage . . . 2
1.3 Enjeux pour l'école . . . 2

2 Contexte du stage 3
2.1 Acquisition de données 3D : l'essor du scanner laser . . . 3
2.1.1 Évolution des techniques . . . 3
2.1.2 La lasergrammétrie . . . 3
2.2 Un sujet d'étude complexe : la cathédrale d'Amiens . . . 4
2.2.1 Historique . . . 4
2.2.2 Caractéristiques architecturales . . . 4
2.2.3 Difficultés pour les relevés laser . . . 5
2.2.4 Des projets étudiants sur plusieurs années . . . 5
2.3 Un autre sujet d'étude : l'église Saint-Siméon-le-Stylite . . . 6
2.3.1 Le site et son histoire . . . 6
2.3.2 Les données acquises . . . 7

3 Les objectifs 8
3.1 Archiver les données . . . 8
3.2 Visualiser les données . . . 8
3.3 Rendre les données accessibles . . . 8
3.4 Enrichir les données avec des informations sémantiques . . . 8

4 Travail réalisé 9
4.1 Étude bibliographique . . . 9
4.1.1 Familiarisation avec le projet de numérisation de la cathédrale . . . 9
4.1.2 Étude de la lasergrammétrie et du traitement des données laser . . . 9
4.1.3 Étude des plateformes et logiciels existants . . . 10
4.2 Définition du cahier des charges . . . 11
4.2.1 Utilisateurs concernés . . . 12
4.2.2 Besoins des utilisateurs . . . 12
4.2.3 Fonctionnalités envisagées . . . 13
4.2.4 Contraintes techniques . . . 15
4.2.5 Traitements à appliquer aux données . . . 16
4.3 Premier choix technique : utilisation de `CloudCompare` . . . 17
4.4 Structure choisie pour le stockage des données . . . 18
4.4.1 Plusieurs solutions envisagées . . . 18

4.4.2 Un système de fichiers pour stocker les données laser . . . 19
4.4.3 Une base de données pour stocker les métadonnées . . . 21
4.4.4 La base de données et le système de fichiers . . . 22
4.5 Le développement du plugin . . . 23
4.5.1 Compilation du logiciel `CloudCompare` . . . 23
4.5.2 Prise en main des outils . . . 23
4.5.3 Présentation du plugin . . . 23
4.5.4 L'ajout des données . . . 25
4.5.5 La visualisation des données . . . 27
4.5.6 La consultation des métadonnées . . . 28
4.5.7 Gestion des annotations et de la recherche sémantique . . . 29
4.6 Documentations rédigées . . . 30

5 Résultats **32**
5.1 L'état actuel du programme . . . 32
5.2 Les tests effectués . . . 32
5.3 Comparaison avec ce qui était attendu . . . 33

6 Suite du développement **34**
6.1 Ajout des métadonnées dans la base . . . 34
6.1.1 Informations sur les stations et les scans . . . 34
6.1.2 Ajout de données dans un projet existant . . . 34
6.2 Autres formats d'entrée pour l'ajout des données . . . 34
6.3 Recherches dans le nuage de points . . . 34
6.3.1 Autres critères de sélection . . . 34
6.3.2 Recherche par zone géographique . . . 35
6.4 Affichage des nuages de points et des maillages . . . 35
6.4.1 Création de fichiers intermédiaires sous-échantillonnés . . . 35
6.4.2 Utilisation de l'octree . . . 35
6.4.3 Choix de visualisation . . . 35
6.5 Outil de sélection de points . . . 36
6.6 Adaptation pour la photogrammétrie . . . 36

7 Planning **37**
7.1 Temps consacré aux différentes parties du projet . . . 37
7.2 Comparaison avec le planning prévisionnel . . . 37

8 Bilan personnel **38**
8.1 Difficultés rencontrées . . . 38
8.2 Journée type . . . 38
8.3 Apports personnels et techniques . . . 38

Références **ii**

A Photographies de Notre Dame d'Amiens **iii**

B Photographies de Saint-Siméon-le-Stylite **vi**

Table des figures

1 Plan général d'une cathédrale : vocabulaire, d'après les informations recueillies dans [FHCS+07] . . . vii
2 La cathédrale Notre-Dame d'Amiens . . . 1
3 Plan de la cathédrale Notre-Dame d'Amiens . . . 5
4 Vue globale de Saint-Siméon-le-Stylite . . . 7
5 Récapitulatif des fonctionnalités de la plateforme . . . 15
6 Exemples d'arborescences de dossiers créées par le programme d'ajout de données 19
7 Structure de l'octree associé à la première arborescence de la figure 6 . . . 20
8 Structure de la base de données pour la gestion des données laser . . . 21
9 Interface graphique de `CloudCompare` . . . 24
10 Icône du plugin . . . 25
11 Fenêtre de connexion . . . 25
12 Les quatre onglets de la fenêtre principale du plugin . . . 26
13 Fenêtre d'ajout d'une station . . . 27
14 Fenêtre d'ajout d'un scan . . . 28
15 Partie inférieure de la façade ouest . . . iii
16 Porte centrale de la façade ouest . . . iii
17 Portail de la Vierge Dorée (sud) . . . iii
18 Rosace du transept nord . . . iv
19 Rosace du transept sud . . . iv
20 Rosace de la façade principale (ouest) . . . iv
21 Rosace du collatéral nord . . . iv
22 Rosace du collatéral sud . . . iv
23 Stalles . . . v
24 Chœur . . . v
25 Tombeau du chanoine Guilain Lucas . . . v
26 Restes de la colonne de Saint Siméon . . . vi
27 Vue oblique de l'église . . . vi
28 Vue oblique de l'église . . . vi
29 Photographie aérienne de l'église . . . vii
30 Scanner laser pendant une acquisition . . . vii
31 Nombres de stations et de scans pour chaque monument étudié . . . vii

Résumé :

Ce stage, réalisé dans le cadre d'une formation à l'École Nationale Supérieure d'Informatique et de Mathématiques Appliquées de Grenoble, s'est déroulé à Marne la Vallée, au sein de l'École Nationale des Sciences Géographiques.

Depuis plusieurs années, cette école a mené des campagnes de lasergrammétrie visant à numériser la cathédrale Notre-Dame d'Amiens. Ces quatre campagnes ont produit d'importantes quantités de données, qu'il faut trier, traiter et rendre accessibles et utilisables par des personnes n'ayant pas pris part aux relevés.

Ainsi, l'objectif de ce stage est de définir et implémenter une plateforme permettant la visualisation et la manipulation des données acquises à Amiens.

Après une importante phase de documentation et de recherche d'informations, un cahier des charges a été établi, listant les utilisateurs potentiels de la plateforme ainsi que leurs besoins, décrivant les fonctionnalités nécessaires, et détaillant les traitements qui devront être effectués sur les données avant leur chargement dans la plateforme. Une fois ce cahier des charges rédigé et validé par les commanditaires et acteurs du projet, la phase de développement de la plateforme a pu commencer. Le développement n'a pas été terminé et certaines fonctionnalités devront être améliorées par la suite. Cependant, l'état actuel du projet a permis d'effectuer des tests sur différents jeux de données afin de valider le bon fonctionnement de la plateforme.

Ce stage a une grande importance pour l'ENSG qui souhaite que les données 3D acquises dans le cadre de travaux d'élèves sur le terrain servent au plus grand nombre, et soient donc correctement archivées, et facilement utilisables.

Mots Clés :

Lasergrammétrie, modélisation 3D, nuages de points, visionneuse web, cathédrale Notre-Dame d'Amiens, patrimoine culturel.

Remerciements

Je tenais tout d'abord à remercier Mme Raphaële Héno de m'avoir accueillie dans son équipe et encadrée durant ces cinq mois de stage. Je remercie également les autres membres du Département Imagerie Aérienne et Spatiale, Mme Patricia Pellardi, M. Daniel Schelstrate, M. Antoine Pinte et M. Sébastien Giordano, pour leur accueil et leur aide tout au long du projet.

Les avis et conseils des membres du Département Positionnement Terrestre et Spatial ont été très appréciés, notamment les explications de M. Pierre Valentin concernant l'utilisation des scanners laser. Les informaticiens de l'École Nationale des Sciences Géographiques ont également apporté une aide précieuse dans les choix techniques de stockage des données et dans la définition de la base de données. Je tiens particulièrement à remercier M. Emmanuel Bardière pour ses nombreux conseils. Je pense aussi à toutes les autres personnes travaillant à l'École Nationale des Sciences Géographiques et que j'ai pu rencontrer au cours de ce stage.

Je remercie également M. Mustapha Mouaddib pour le temps qu'il a consacré à ce projet, ses explications sur les données acquises à Amiens et son accueil lors de notre visite à Amiens. M. Xavier Bailly, directeur du patrimoine d'Amiens Métropole, a également apporté un avis précieux sur le projet et les différentes questions qui se sont posées.

M. Yves Egels a également joué un rôle important durant ce stage, tant par ses explications concernant le logiciel `Cumulus`, que pour les données laser qu'il a fournies afin de tester le programme. Je le remercie également pour les informations et photographies concernant Saint-Siméon-le-Stylite.

L'aide de M. Daniel Girardeau-Montaut a été très appréciée lors de ce stage. Ses conseils ont permis de compiler les sources du logiciel `CloudCompare`, de rendre le plugin utilisable depuis l'interface du logiciel et de régler différents problèmes.

Je tenais également à remercier M. Michel Desvignes, qui a été mon tuteur de stage à l'ENSIMAG. Je le remercie d'avoir accepté de m'encadrer.

J'adresse enfin un immense merci à M. Roland Groz qui m'a conseillée lors de ma recherche de stage et sans qui je n'aurais pas eu l'opportunité de participer à ce projet.

Glossaire

Laser : Initiales de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation : Dispositif qui amplifie la lumière (et plus généralement tout rayonnement électromagnétique).

Photogrammétrie : Science et art dont le sujet d'étude est la photographie, dans l'intention de recueillir des données conduisant à des restitutions dimensionnelles et à déterminer la forme et la position d'un objet dans l'espace.

Télédétection : Domaine d'étude des méthodes permettant de déterminer les caractéristiques physiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel.

Lasergrammétrie ou relevé par laser-scanner 3D : Technique permettant l'acquisition, sans contact, de grandes scènes complexes en trois dimensions. Les objets obtenus sont des nuages composés de plusieurs millions de points tridimensionnels.

Scanner laser : Appareil qui analyse les objets et leur environnement proche pour recueillir des informations précises sur leur forme et éventuellement leur apparence. Les données collectées peuvent être utilisées pour construire des images de synthèse en trois dimensions.

Nef : Partie d'une église où se tiennent les fidèles, généralement comprise entre le portail et le chœur dans le sens longitudinal. La nef comprend le vaisseau central et les éventuels collatéraux.

Chœur : Partie de l'église où l'on chante l'office divin, séparée de la nef et qui abrite l'autel et prévue pour les clercs et les chantres.

Transept : Partie transversale d'une église qui coupe à angle droit la nef. Elle donne ainsi à l'édifice religieux la forme d'une croix.

Collatéral : Vaisseau latéral de la nef d'un édifice religieux, de part et d'autre du vaisseau central.

Travée : Espace entre deux piliers ou deux colonnes.

Abside : Extrémité d'une église, derrière le chœur.

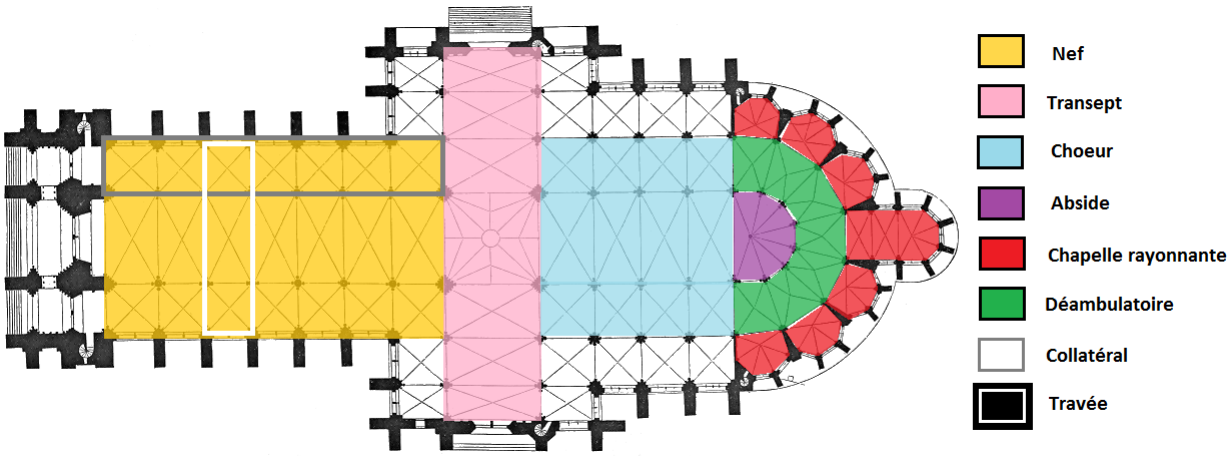


Figure 1 – Plan général d'une cathédrale : vocabulaire, d'après les informations recueillies dans [FHCS+07]

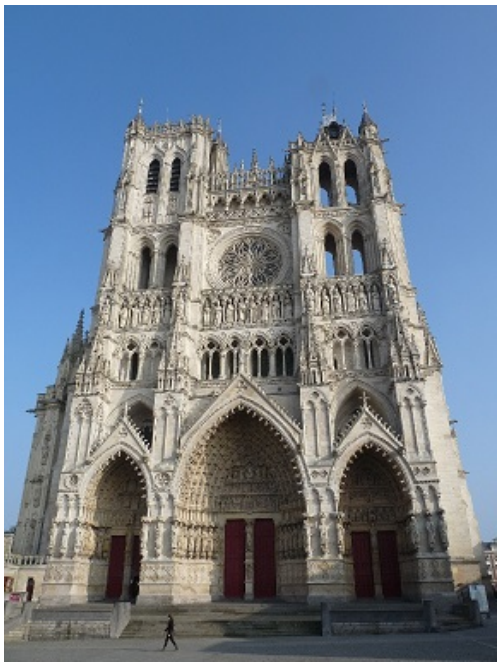
Introduction

Dans le cadre de projets d'élèves, l'École Nationale des Sciences Géographiques a effectué quatre campagnes successives de relevés laser sur la cathédrale d'Amiens, dans le cadre du projet e-cathedr@le initié par le laboratoire MIS (Modélisation, Information & Systèmes) de l'université Picardie Jules Verne. Ce projet e-cathedr@le vise à numériser l'édifice dans sa totalité et à fournir des outils d'exploitation du modèle. Pour l'ENSG, l'intérêt de participer à un tel projet réside essentiellement dans la possibilité de faire pratiquer à ses étudiants les différentes techniques d'acquisition de données 3D géoréférencées.. Chaque année, une partie différente de la cathédrale a été étudiée. Les données ainsi acquises sont composées de nombreux nuages, comportant plusieurs millions de points.

Afin de rendre ces données utilisables par différentes personnes, de faciliter leur accessibilité et de garantir leur durabilité, il convient de mettre en place un système de gestion des nuages de points. C'est dans ce cadre que se déroule ce stage. L'objectif est d'étudier les structures de données existantes, de lister les fonctionnalités que devrait proposer un système de gestion de données laser idéal, et de mettre en place un tel système.

Ce système sera ensuite utilisé pour gérer les nombreux projets de numérisation réalisés par l'École Nationale des Sciences Géographiques depuis plusieurs années. La cathédrale d'Amiens n'est qu'un exemple des monuments qui pourront bénéficier du développement de ce logiciel.

Après une brève présentation de l'École Nationale des Sciences Géographiques en partie 1, le contexte et les objectifs du stage seront développés plus en détail dans les parties 2 et 3. Les résultats des études bibliographiques réalisées et la solution mise en place pour répondre aux attentes de l'école seront ensuite exposés dans une 4ème partie. La partie 5 présentera les résultats obtenus à la fin du stage, puis des pistes pour la poursuite du projet seront données dans la partie 6. Un point sur le planning sera fait dans la partie 7. La partie 8, plus personnelle, présentera les difficultés rencontrées ainsi que les apports personnels du stage.



Façade Ouest

Nef vue depuis le chœur

Figure 2 – La cathédrale Notre-Dame d'Amiens

1 L'École Nationale des Sciences Géographiques

1.1 Présentation de l'école

Initialement destinée à former le personnel technique de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), l'École Nationale des Sciences Géographiques (ENSG) est désormais ouverte à des élèves se destinant à des métiers dans les différents secteurs économiques en lien avec la production ou l'utilisation d'informations géographiques.

L'école propose des diplômes de différents niveaux (BTS, licence professionnelle, diplôme d'ingénieur, masters et mastères spécialisés) dans différentes formations concernant principalement l'acquisition et la gestion d'informations géographiques, ainsi que leur utilisation ultérieure. L'enseignement est composé d'une partie théorique, complétée par de nombreux projets et stages pratiques sur le terrain.

L'École Nationale des Sciences Géographiques collabore avec les différents laboratoires de recherche de l'IGN, mais possède également son propre laboratoire, le Laboratoire de Géomatique Appliquée (LGA).

1.2 Encadrement du stage

Au sein de l'École Nationale des Sciences Géographiques, il existe différentes unités d'enseignement. Parmi elles, le Département Imagerie Aérienne et Spatiale (DIAS) gère les activités concernant la photogrammétrie et la télédétection, utilisant des images optiques, radar ou obtenues par laser. Le département participe également à la diffusion des techniques de photogrammétrie auprès de personnes généralement peu concernées par ce domaine, tels que les archéologues ou les architectes.

Ce département est dirigé par Mme Raphaële Héno, enseignante à l'École Nationale des Sciences Géographiques, et responsable de ce stage. Quatre autres personnes, spécialistes en photogrammétrie ou télédétection appartiennent également au Département Imagerie Aérienne et Spatiale. De nombreuses autres personnes, enseignants à l'École Nationale des Sciences Géographiques ou chercheurs à l'Institut national de l'information géographique et forestière, ont également apporté aide et conseils tout au long de ce stage.

1.3 Enjeux pour l'école

Les résultats de ce stage sont très attendus, par différentes personnes au sein de l'ENSG, ainsi que par les commanditaires de l'étude de la cathédrale d'Amiens. En effet, la quantité de données acquises au cours des différentes campagnes de relevés, ainsi que les conditions d'acquisition, rendent ces données difficilement exploitables dans leur état actuel.

Afin de permettre aux différentes catégories de personnes susceptibles d'utiliser ces données d'y accéder facilement et de manière intuitive, il convient de mettre en place un système de stockage et de gestion des données laser. Les fonctionnalités de ce système doivent être définies en étudiant les besoins spécifiques des personnes pouvant avoir besoin de ces données. Les personnes concernées peuvent être des géomètres, des architectes et conservateurs du patrimoine, des archéologues, voire le grand public.

Il convient donc de rendre cohérentes les données acquises au cours des différentes campagnes, de les organiser de manière logique et de permettre leur consultation au travers d'une application dédiée à la manipulation de grands ensembles de données en trois dimensions.

La plateforme développée durant ce stage permettra également la gestion de données laser acquises sur d'autres sites.

2 Contexte du stage

2.1 Acquisition de données 3D : l'essor du scanner laser

2.1.1 Évolution des techniques

Depuis quelques années, les techniques permettant l'acquisition de données en trois dimensions du monde réel sont en plein essor.

La photogrammétrie est utilisée depuis longtemps pour avoir une vision tridimensionnelle du monde, à partir d'images bidimensionnelles. Utilisée à l'origine principalement pour réaliser des dessins représentant le relief de l'objet d'étude, cette technique a évolué avec le développement de l'informatique et de la photographie numérique. La photogrammétrie permet désormais d'obtenir des nuages de points denses en trois dimensions.

Avec le développement des scanners laser, une nouvelle technique de numérisation d'objets et de monuments est apparue. Les scanners laser permettent d'obtenir des nuages de points représentant leur environnement. Les premiers scanners de ce type sont apparus dans les années 1960. Cependant, il a fallu attendre les années 2000 et l'apparition d'appareils suffisamment performants pour que les techniques de relevés laser se répandent. La précision et surtout la rapidité sont deux des critères prépondérants dans l'évolution des dispositifs. Les scanners actuels peuvent acquérir plus de 500 000 points à la seconde, tandis que les modèles des années 1980 n'en produisaient que 100.

2.1.2 La lasergrammétrie

La lasergrammétrie permet d'obtenir des nuages de points tridimensionnels précis, représentant des objets réels, en un temps relativement court. Pour chaque point enregistré, représenté par ses trois coordonnées, le laser fournit également une valeur correspondant à l'intensité du laser renvoyé par l'objet et reçu par le scanner. Cette intensité est utilisée afin de colorier le nuage obtenu et fournit des informations sur l'objet scanné.

Il convient de préparer soigneusement l'acquisition, afin de choisir les positions du scanner, appelées stations, pour avoir une représentation complète de l'objet d'étude. Il faut prévoir suffisamment de stations pour obtenir des données dans tout l'espace d'étude. Il convient donc d'être très attentif aux obstacles qui peuvent cacher des objets d'intérêt. Il est également nécessaire de placer des points de repère, visibles sur les scans effectués, afin de pouvoir assembler les nuages de points obtenus par différentes stations. La position de ces repères doit aussi être prévue de manière précise avant la phase d'acquisition.

Il faut ensuite définir les niveaux de précision nécessaires à l'étude envisagée et choisir les différents paramètres du scanner.

Une fois les paramètres définis, la phase d'acquisition peut commencer. Cette étape est entièrement automatique. Le scanner balaie la zone définie par l'utilisateur, avec la résolution adaptée. Cette étape peut prendre un certain temps selon les exigences de l'étude, mais les utilisateurs peuvent profiter de ce temps pour rédiger la documentation devant accompagner le chantier de numérisation.

Lorsque l'acquisition est terminée, les données peuvent être exportées vers un ordinateur, en vue d'être traitées et visualisées. Le scanner fournit un nuage de points brut, qu'il convient par la suite de traiter pour le rendre utilisable. L'un des traitements les plus importants est le géoréférencement. Cette étape consiste à calculer les coordonnées des points du nuage dans un système de référence global officiel. Un système de référence est une implémentation concrète sur Terre d'un système de coordonnées.

De nombreux traitements sont effectués sur le nuage de points obtenu, afin de le nettoyer et de le simplifier. En effet, de nombreux points peuvent être supprimés, ainsi que les objets indésirables présents dans le champ de vision du scanner au moment de l'acquisition. D'autres traitements ont pour but de créer un modèle 3D à partir du nuage de points. Les différents traitements effectués dépendent de l'utilisation future du nuage de points et des délivrables attendus par les commanditaires de l'étude. Le nuage peut n'être qu'un intermédiaire pour créer des plans en deux dimensions ou des images de l'objet scanné, ou il peut servir à fournir un modèle 3D complet. Dans ce dernier cas, il faut souvent créer une surface à partir du nuage, par triangulation de Delaunay par exemple, et appliquer ensuite une texture pour rendre le modèle réaliste.

A l'heure actuelle, l'une des principales difficultés concernant les données acquises par lasergrammétrie est la taille des nuages de points obtenus. En effet, avec l'augmentation de la rapidité des appareils, le nombre de points contenus dans les nuages ne cesse d'augmenter. Cela permet de créer des représentations numériques fidèles à la réalité, mais pose de nombreux problèmes concernant la gestion des nuages de points obtenus. En effet, les logiciels permettant la visualisation et le traitement des nuages de points ne sont pas tous capables de manipuler correctement de si grandes quantités de données. Le problème du stockage des données laser se pose également, car les répertoires contenant les données brutes peuvent atteindre plusieurs dizaines de gigaoctets, voire quelques centaines.

2.2 Un sujet d'étude complexe : la cathédrale d'Amiens

2.2.1 Historique

Plusieurs édifices de culte se sont succédés à l'emplacement de l'actuelle cathédrale. En raison de la présence de la relique de Saint Jean-Baptiste, l'édifice devient trop petit, et suite à un incendie dévastateur, l'évêque Evrard de Fouilloy décide de construire une nouvelle cathédrale, beaucoup plus belle et plus vaste. En 1220, les travaux débutent. La construction commence par la nef, puis la façade occidentale. Le transept est ensuite édifié, puis c'est au tour du chœur et des chapelles rayonnantes. La construction de la cathédrale se termine en 1269. La flèche sera ajoutée en 1288. Par la suite, des chapelles latérales sont construites et les tours sont achevées en 1402.

De nombreuses modifications et restaurations ont été effectuées depuis, mais la majeure partie de la cathédrale a été conservée depuis le XIIIème siècle. Elle est donc un important témoignage historique de l'époque médiévale.

En 1981, la cathédrale est inscrite au patrimoine mondial de l'UNESCO. Classée monument historique en France depuis 1862, la cathédrale attire de nos jours de nombreux touristes. Elle est également un lieu de prière et de recueillement.

2.2.2 Caractéristiques architecturales

La cathédrale Notre-Dame d'Amiens est, de par son volume intérieur, la plus vaste cathédrale de France. Avec ses 145 m de long et sa nef dont la hauteur atteint presque 43 m, cette cathédrale est un des chefs-d'œuvre de l'architecture médiévale.

Les photos de la figure 2, ainsi que celles de l'annexe A, montrent différentes vues de la cathédrale, tant de l'intérieur que de l'extérieur, ainsi que certains détails architecturaux. Ces photos permettent d'avoir un aperçu de la complexité de la cathédrale.

La façade principale, ou façade ouest, est constituée de trois portails ornés de nombreuses statues et de deux tours dont les sommets culminent à plus de 60 m au-dessus du parvis. Entre

les deux tours, au milieu de la façade, se trouve une imposante rosace de pierre. Les autres façades sont également ornées de nombreuses statues et rosaces. L'extérieur de la cathédrale est ainsi très complexe et regorge de détails architecturaux et artistiques.

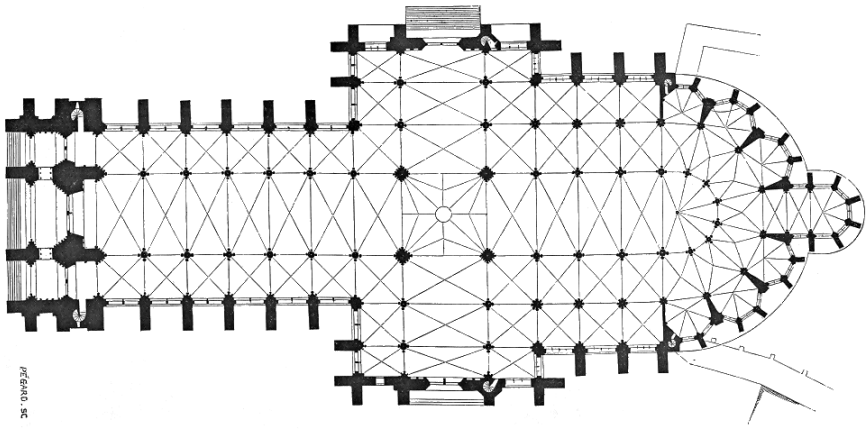


Figure 3 – Plan de la cathédrale Notre-Dame d'Amiens

L'immense volume interne de la cathédrale, de 200 000 m^3, est partitionné en de nombreuses entités architecturales, comme le montre la figure 3. La nef est bordée de deux collatéraux de même largeur et découpée en sept travées. De nombreuses colonnes délimitent ces différents espaces. Le chœur est lui-même composé de quatre travées avec doubles collatéraux et d'une abside à sept pans. Un déambulatoire et sept chapelles rayonnantes complètent cette structure. Le transept est quant-à lui constitué de trois travées et deux collatéraux.

Le livre [HB08], ainsi que le site internet `Wikipédia`, ont fourni de précieuses informations concernant l'histoire et l'architecture de la cathédrale.

2.2.3 Difficultés pour les relevés laser

Toutes ces caractéristiques représentent la richesse architecturale de la cathédrale, mais elles compliquent grandement la tâche des personnes effectuant les relevés laser. En effet, chaque colonne est un obstacle gênant l'acquisition des parties situées derrière. Il faut donc multiplier les stations afin de voir chaque partie de la cathédrale sur au moins un scan.

Une autre difficulté est la différence des niveaux de détails entre différents objets de la cathédrale. Certains murs représentent de grandes surfaces assez lisses, avec peu de détails, tandis que les statues ou les bas-reliefs sont constitués de très petits détails. La résolution du modèle final n'est donc pas la même dans toute la cathédrale. En effet, le modèle 3D à produire doit représenter le monument dans son intégralité, tout en rendant compte de tous les détails présents.

2.2.4 Des projets étudiants sur plusieurs années

Les données laser de la cathédrale d'Amiens ont été acquises sur quatre années, lors de projets étudiants. Les scans ont donc été effectués par des élèves, en phase d'apprentissage des techniques de lasergrammétrie. Cette particularité de la campagne d'acquisition est à l'origine, ou en partie responsable, de certaines difficultés concernant ce projet de numérisation.

En raison de l'aspect pédagogique de ces stages, les acquisitions n'ont pas été effectuées de manière optimale. Le but étant que les élèves manipulent et découvrent les scanners laser, les conditions d'acquisition n'étaient pas les mêmes que lors d'une étude classique.

Les projets d'élèves sont limités dans le temps, tant au niveau de la durée de la campagne, qu'au niveau des horaires journaliers. Les projets n'avaient pas la flexibilité que pourrait avoir une étude menée par des professionnels.

Le fait que les mesures aient été effectuées sur quatre années successives compliquent également la création d'un unique modèle comportant toutes les données. Certains éléments peuvent être modifiés entre deux campagnes. Par exemple, entre deux projets, une estrade en bois a été ajoutée devant le chœur de la cathédrale. De plus, la cohérence des données a souffert de cette séparation temporelle entre les acquisitions. Certaines données sont redondantes d'une année à l'autre, tandis que d'autres manquent pour assembler touts les nuages. Les conventions pour nommer les stations et les scans effectués ont également évolué au fil des années. Les professeurs responsables n'étaient pas les mêmes et de meilleures idées ont été trouvées entre temps, notamment au moment du traitement des données. Les données n'ont pas non plus été rangées de la même manière à chaque stage et il convient donc de les réorganiser afin de les traiter.

Au cours des quatre années, près de 100 stations ont été mises en place, produisant plusieurs milliards de points. Les données totales représentent un dossier d'environ 300 gigaoctets. Certaines des données stockées dans ce répertoire ne sont pas utiles, mais la taille des dossiers nécessaires reste tout de même très grande et difficile à gérer.

De plus, les stages étudiants ne concernaient pas uniquement la lasergrammétrie. Les élèves devaient également effectuer des prises de vue photogrammétriques et réaliser des relevés topographiques. Ce stage ne concerne que les données laser, mais il existe beaucoup d'autres données qui devront être prises en compte dans le traitement ultérieur des informations acquises sur la cathédrale.

Chaque année, une partie différente de la cathédrale était étudiée. Le portail sud, la façade ouest, puis le nord du bâtiment ont été scannés successivement. Les parties intérieures correspondaient à ce découpage géographique. Cependant, pour l'intérieur principalement, la séparation selon les années n'a pas de logique sémantique. En effet, un scanner placé au centre du transept par exemple va scanner tout son environnement, sur 360 ° . Il n'est donc pas possible d'attribuer un lieu géographique aux points acquis depuis une station donnée.

2.3 Un autre sujet d'étude : l'église Saint-Siméon-le-Stylite

En raison de leur date d'acquisition récente, les données laser d'Amiens n'ont pas pu être utilisées en totalité pour tester le bon fonctionnement du logiciel. En effet, certaines données étaient encore en cours de traitement.

Cependant, d'autres données, fournies par M.Egels, ont été utilisées afin de mener des tests à grande échelle. Il s'agit de données acquises il y a plusieurs années en Syrie, sur le site de l'église Saint-Siméon-le-Stylite, visible sur la photo de la figure 4.

2.3.1 Le site et son histoire

L'église Saint-Siméon-le-Stylite, située à 30 kilomètres au nord-ouest d'Alep, est la plus ancienne église byzantine encore visible. Elle fut construite au Vème siècle à l'emplacement où se trouve la colonne de Saint Siméon le Stylite. Cet ascète aurait vécu en ermite durant 37 ans au sommet d'une colonne de 15 mètres de hauteur. De nombreuses personnes se rendaient au pied de sa colonne afin de l'entendre prêcher et l'emplacement est resté un lieu de pèlerinage après la mort de Saint-Siméon.

Plusieurs bâtiments religieux ont été construits autour de la colonne, formant un vaste ensemble religieux composé d'un martyrium formé de quatre basiliques, plusieurs monastères, deux églises de taille inférieure, divers bâtiments de résidence et un mur d'enceinte. L'annexe B

présente des photographies de ce monument. Ces photos proviennent du site internet de M.Egels, accessible à l'adresse `yves.egels.free.fr/Symeon/Saint_Symeon.html`.

Figure 4 – Vue globale de Saint-Siméon-le-Stylite

2.3.2 Les données acquises

Des acquisitions laser ont été réalisées sur plusieurs monuments de l'ensemble religieux de Saint-Siméon-le-Stylite. Les scans sur lesquels le programme a été testé représentent des citernes situées sous le monument, le mur d'enceinte, deux couvents, une église, un lapidarium et un monastère. Ces données représentent plusieurs centaines de méga-octets ou quelques giga-octets selon les monuments. Les nombres de stations et de scans pour chacun des monuments scannés sont donnés dans le tableau 31 de l'annexe B.

Les données acquises sur chaque monument ont été traitées, assemblées et géoréférencées. Les nuages de points ont également été triangulés afin d'obtenir des maillages. La plupart des données contiennent des informations de couleur, mais certaines ne possèdent que la valeur de l'intensité du laser.

Ces données ont donc été intéressantes pour le présent projet, car elles étaient prêtes à l'emploi, de taille importante et triangulées. Cela a permis de tester le logiciel dans des conditions réelles d'utilisation.

3 Les objectifs

Les objectifs du stage sont multiples. Il s'agit de concevoir une plateforme de manipulation et de traitement de données laser, et d'en commencer le développement.

3.1 Archiver les données

Les données acquises par scanner laser sont souvent difficiles à archiver. Elles sont généralement acquises sur plusieurs jours, voire plusieurs années, et par différentes équipes. Il est par la suite nécessaire de traiter ces données. La quantité d'information acquise nécessite de grands espaces de stockage pour conserver toutes les données. De plus, il est indispensable d'effectuer des copies de sauvegarde afin d'éviter toute perte. En effet, il est souvent impossible ou difficile de refaire les mesures en cas de problème.

Il est donc important d'avoir une méthode rigoureuse afin de stocker les données acquises. Le présent stage doit donc proposer une solution à ce problème d'archivage, en permettant de stocker les données de manière ordonnée et d'effectuer une copie de sauvegarde automatique.

3.2 Visualiser les données

Une autre problématique concernant les données acquises par scanner laser est la visualisation. Le volume des données étant très important, de nombreux logiciels ne permettent pas de les afficher et de les manipuler de manière satisfaisante.

Plusieurs logiciels ont été testés afin de comparer leurs performances. Leurs caractéristiques seront présentées dans la partie4.1.3.

3.3 Rendre les données accessibles

Les données laser acquises sur un site intéressent souvent de nombreuses personnes, de métiers différents et situées dans des lieux éloignés. Or elles sont généralement stockées par les personnes ayant participé à l'acquisition. Il est difficile de les partager avec toutes les personnes concernées, notamment en raison de leur taille. Il faut souvent utiliser des supports physiques tels que des disques durs externes afin de transmettre les données, ce qui rend leur communication difficile et peu sûre lorsque les personnes concernées sont éloignées.

Il est donc intéressant de mettre au point un système permettant à tous les acteurs concernés d'accéder aux données. Il faut prévoir de partager les données acquises et toutes les informations complémentaires avec les personnes qui peuvent en avoir besoin, ou peuvent souhaiter les consulter.

3.4 Enrichir les données avec des informations sémantiques

Les données acquises possèdent rarement des informations sémantiques sur le contenu. Il est certes possible de nommer les fichiers en utilisant des noms explicites permettant de savoir ce qui est représenté par les nuages de points qu'ils contiennent, mais cela est rarement réalisé. De plus, un fichier peut contenir des points faisant partie de différentes structures architecturales et il n'est donc pas aisé de trouver des noms pertinents.

Il est donc intéressant de proposer une fonction d'annotations permettant de sélectionner des portions de nuage de points ou de maillage afin d'y ajouter des informations textuelles. Cette fonctionnalité permet d'insérer des données sémantiques sur des parties de la représentation tridimensionnelle, afin de l'enrichir en lui ajoutant des annotations.

4 Travail réalisé

4.1 Étude bibliographique

4.1.1 Familiarisation avec le projet de numérisation de la cathédrale

Afin de mieux comprendre le contexte du stage et les données qui doivent être traitées, il était nécessaire de commencer par lire des articles traitant des deux premières campagnes de numérisation de la cathédrale d'Amiens, effectuées par les élèves de l'école.

Dans l'article [HCCH11], écrit en 2010 suite à la première campagne, les auteurs et encadrants du stage d'acquisition présentent leur nouveau projet. Le contexte pédagogique de l'étude, ainsi que les modalités pratiques d'acquisition et de traitement des données sont détaillés. L'année suivante, le rapport [HCS12] est rédigé afin de présenter la suite de la campagne de numérisation. Il présente notamment la numérisation 3D à partir de photographies acquises à l'aide d'une perche.

Ces deux documents ont permis de mieux comprendre les conditions dans lesquelles les données ont été acquises et les traitements qui leur ont été appliqués. Ces documents ont également fourni des références vers d'autres travaux intéressants.

Parallèlement à ces recherches, les données acquises ont été étudiées, afin de comprendre comment elles sont rangées, ce qu'elles représentent et comment les traiter. Afin de mieux réaliser la complexité de ces données et l'envergure du projet, une visite à Amiens a été organisée afin de voir la cathédrale en vrai. La visite a permis d'assimiler le vocabulaire spécifique et de découvrir le monument étudié, ainsi que de rencontrer certains acteurs du projet.

4.1.2 Étude de la lasergrammétrie et du traitement des données laser

La première partie de l'étude bibliographique réalisée avait pour but de se familiariser avec le domaine de la lasergrammétrie, principalement appliquée à l'étude du patrimoine. La semaine de cours avec les élèves de l'École des Ponts et Chaussées a permis de découvrir ce domaine, mais une étude plus approfondie était nécessaire.

Le rapport [BMa11] donne de nombreux conseils sur l'utilisation des scanners laser dans le contexte de l'étude du patrimoine culturel. La première partie du document discute du choix du laser pour une étude et des raisons qui doivent pousser à utiliser cette technique, en présentant des alternatives. La suite recense de nombreux cas d'études de monuments étudiés par lasergrammétrie, avec les avantages de cette méthode et les difficultés rencontrées.

Dans le même esprit que le document précédent, la revue [Soc10] a permis de voir d'autres exemples d'études réalisées à partir de données laser et de commencer à trouver des pistes concernant l'application à développer. Cette revue traite en effet de problèmes couramment rencontrés lors de l'acquisition ou du traitement des données.

Deux livres ont également été utiles lors de cette première phase de documentation sur la lasergrammétrie. [ST09] présente les différentes utilisations actuelles de scanner laser, les différents types d'appareils et leurs caractéristiques, ainsi que des exemples de traitements des données obtenues. Dans [VM10], les auteurs donnent un véritable cours sur le laser. De la description de la technologie utilisée, aux diverses applications, en passant par la description des nuages de points obtenus et des différents produits pouvant être créés, ce livre donne une présentation très complète du domaine. De plus, une partie est dédiée aux applications de la lasergrammétrie dans l'étude du patrimoine culturel.

Concernant de manière plus précise la surveillance d'édifices historiques et d'autres types de bâtiments, [GGHQ08] présente de manière succincte le principe du scanner laser et son

utilisation pratique. La suite du document donne des exemples d'études où les données laser sont utilisées afin de surveiller des bâtiments. [GQH07] regroupe divers articles traitant de la documentation de monuments historiques ou de lieux nécessitant une surveillance particulière. Ces études de cas détaillent les techniques utilisées pour l'acquisition et le traitement des données, et donnent des conseils pratiques pour réaliser ce genre d'études.

4.1.3 Étude des plateformes et logiciels existants

La suite du travail de recherches bibliographiques a concerné l'étude des plateformes web et des logiciels permettant la manipulation de données laser. Une étude comparative de différents logiciels est effectuée dans [Dau09]. En effet, il était important d'avoir une bonne connaissance des applications déjà existantes, de leurs avantages et de leurs limites. Cette étude a permis de compléter la liste des fonctionnalités à proposer, en s'inspirant de ce qui existe actuellement. Ceci a également permis de remédier aux inconvénients que peuvent présenter ces plateformes, afin de proposer une application la plus performante et la plus complète possible.

`Leica TruView` `Leica TruView` est un plugin pour Internet Explorer, permettant la visualisation et la manipulation de nuages de points. Cette application est à utiliser avec `Cyclone`, logiciel utilisé pour le traitement des nuages de points acquis avec les scanners de la marque Leica. Ce plugin permet de visualiser directement dans le navigateur des nuages de points traités au préalable avec `Cyclone`, afin d'être exportés dans un fichier `.htm`. Ce plugin est gratuit, mais le logiciel `Cyclone` nécessite une licence payante.

`Leica TruView` permet de visualiser le nuage de points, du point de vue des différentes stations laser. Une vue à 360 ° est proposée et permet de voir tout le nuage. Cette application offre également la possibilité d'effectuer des mesures dans le nuage, comme des mesures de distance entre deux points ou l'affichage des coordonnées d'un point. Il est aussi possible d'annoter le nuage de points, afin d'identifier des zones d'intérêt par exemple. L'outil de marquage propose de tracer des rectangles, des cercles ou des flèches. La création d'hyperliens associés à un point du nuage permet de diriger l'utilisateur vers des pages comportant des informations complémentaires.

`NUBES VISUM` Le projet `NUBES` a pour objectif de définir un système d'information à l'échelle architecturale, exploitant les relations entre la représentation tridimensionnelle d'un monument historique et des informations variées issues de divers domaines. Une plateforme visant à organiser ces données de manière logique et cohérente a été créée pour l'observation de monuments historiques.

Plusieurs outils sont proposés afin d'atteindre l'objectif fixé. Un premier outil, appelé `NUBES Forma` permet la création d'un modèle 3D de l'édifice, à partir de données laser et photographiques. L'outil `NUBES Imago` permet d'ajouter des photographies issues du web, afin de compléter la documentation fournie. `NUBES Tempus` gère l'étude et la visualisation des transformations temporelles subies par le monument. Enfin, `NUBES VISUM` est la plateforme de visualisation à proprement parler.

`NUBES VISUM` est un système de consultation de relevés laser et de représentations d'édifices sur internet. Il s'agit d'une interface de manipulation temps réel et interactive de modèles 3D. Cette application permet l'accès aux données relevées et leur manipulation. Ces données peuvent être des nuages de points ou des photographies. Il est également possible d'extraire des informations concernant les dimensions du bâtiment, par le biais de prises de mesures ou de création de profils.

`CyArk` `CyArk` est une organisation dont le but est de répertorier les sites historiques en danger à travers le monde, afin de les numériser et constituer ainsi une immense bibliothèque

numérique, pouvant servir à la préservation ou la restauration de ces sites, ou être utilisée à des fins pédagogiques. Le projet `CyArk 500 Challenge` a pour but de scanner et préserver numériquement cinq cents sites historiques dans les cinq prochaines années. Ce projet est né du constat que les monuments historiques font partie de la mémoire collective, mais disparaissent de manière alarmante, en raison des conditions climatiques, des catastrophes naturelles ou d'actes de vandalisme. D'autres informations sur `CyArk` peuvent être trouvées dans [HHHA13].

Afin de permettre au plus grand nombre d'accéder à cette bibliothèque numérique, le site internet de l'organisation dispose d'une visionneuse 3D très intuitive et simple à utiliser. Cette application permet la visualisation du nuage de points choisi, en offrant des commandes de navigation simples. Une carte interactive, représentant le plan du monument ou du site, permet de choisir le nuage désiré. Cette visionneuse offre le choix de la représentation, sous forme de nuage de points ou de modèle 3D. Il est également possible de choisir si l'on veut une représentation filaire, colorée ou texturée. Des boutons offrent la possibilité d'observer l'objet selon différents points de vue, depuis le côté, le dessus ou l'arrière par exemple. Il est aussi possible de choisir entre une vue perspective ou orthographique. L'application permet également de sélectionner une partie de la représentation grâce à une boîte englobante, dont les dimensions et l'orientation peuvent être ajustées.

Un second niveau d'accès est réservé aux utilisateurs possédant un compte professionnel. Il est alors possible de manipuler le nuage afin d'effectuer des coupes ou des mesures au sein de la représentation.

`MeshLab` Le logiciel libre `MeshLab` permet de visualiser et manipuler des nuages de points, mais ne supporte pas les gros volumes de données. Certains fichiers utilisés pour les tests n'ont pas pu être ouverts avec ce logiciel.

`Leica Cyclone` Le logiciel `Leica Cyclone`, fourni avec les scanners laser de la marque `Leica`, permet de manipuler de gros volumes de données de manière fluide. L'inconvénient de ce logiciel est qu'il n'est pas libre. Il est nécessaire de payer une licence pour l'utiliser et il n'est pas possible de modifier le code.

`Cumulus` Le logiciel `Cumulus` est conçu pour manipuler des nuages de très gros volume. Il permet une manipulation très fluide et un traitement des nuages de points et maillages, lorsque leur taille est très importante. Cependant, le code est écrit en `Pascal`.

`CloudCompare` `CloudCompare` est un logiciel libre d'édition et de traitement de nuages de points 3D. Il est destiné à gérer de très gros nuages de points et possède une structure d'octree particulièrement optimisée. Le code, en `C++`, est disponible gratuitement sur internet sous licence GNU GPL. Il possède également un système de plugins permettant d'ajouter des fonctionnalités.

4.2 Définition du cahier des charges

La seconde partie de l'étude bibliographique visait à définir le cahier des charges de la plateforme d'utilisation et de partage des données. Cette étude devait permettre d'identifier les personnes susceptibles d'accéder à cette application et de déterminer leurs attentes et leurs besoins. La diversité et le nombre de ces acteurs ont représenté une difficulté pour cette tâche. La diversité des métiers intéressés et des lieux où travaillent ces personnes ont compliqué le recensement de leurs besoins. Le cahier des charges devait également prévoir les contraintes techniques à prendre en compte lors de l'écriture des spécifications et du développement. Enfin, il était important de choisir la nature des données prises en entrée par la plateforme et les traitements qu'elles devront subir avant chargement.

4.2.1 Utilisateurs concernés

De nombreuses personnes peuvent bénéficier d'un accès aux données laser.

Parmi les catégories d'utilisateurs identifiées lors de l'étude préliminaire, certaines n'ont pas été conservées. C'est le cas du grand public. Il a été décidé que la plateforme serait réservée aux professionnels concernés par les données laser. Les utilisateurs ciblés par le stage sont les fournisseurs de données, les professionnels étudiant le bâtiment, tels que les archéologues ou les architectes, ainsi que les personnes chargées de la conservation et de la communication autour du monument.

La liste détaillée des utilisateurs pouvant être intéressés par la plateforme est la suivante :

- Archéologues, architectes
- Artisans intervenant sur le monument
- Conservateurs, restaurateurs
- État, ministère de la culture
- Commanditaires du projet
- Géomètres, photogrammètres et lasergrammètres
- Guides
- Historiens, personnes travaillant dans le domaine de l'art
- Informaticiens
- Responsables des travaux

Cette liste a été établie à partir d'informations trouvées dans divers articles traitant de l'accès aux données laser, ainsi qu'en discutant avec plusieurs personnes concernées par le projet. La visite à Amiens a notamment permis de rencontrer et d'interroger des personnes impliquées.

La revue [Soc10] fait référence, à plusieurs reprises, à des catégories de personnes ou des métiers qui peuvent tirer partie d'un accès aux données tridimensionnelles d'un monument historique.

L'accès à différents rapports de projets ou de stages, rédigés par des élèves ayant travaillé sur la gestion et le stockage de données acquises lors d'anciens projets d'élèves de l'ENSG, à la Chartreuse de Villeneuve-lez-Avignon, a apporté des informations complémentaires. Bien que la problématique et l'objectif de ce stage soient différents de ceux de ces précédents projets, les études réalisées pour déterminer les personnes concernées ont permis de compléter la liste précédemment établie. Ces documents sont [Gre09], [AHM+07] et [BBC+06].

4.2.2 Besoins des utilisateurs

Chaque catégorie d'utilisateurs peut avoir des besoins spécifiques. Certains ne sont pas intéressés par le nuage de points ou le modèle 3D associé, mais par des produits dérivés de ce modèle. Il faut donc connaître les attentes des différents usagers.

Les buts de la plateforme sont multiples et variés.

Vue d'ensemble pour les travaux Pour les personnes chargées d'effectuer des travaux sur la cathédrale, le modèle 3D permet d'avoir une vue d'ensemble du monument et de prévoir et gérer les travaux à effectuer. La précision des relevés effectués offre également la possibilité d'étudier de près certains détails, difficiles d'accès autrement. Grâce à la représentation informatique du monument, les responsables des travaux peuvent prévoir leur intervention sans se rendre sur place, ce qui évite des trajets. La plateforme est dans ce cas un outil de travail à part entière pour un certain nombre de personnes.

But pédagogique La plateforme et les données stockées peuvent aussi être utilisées dans un but pédagogique. Le modèle 3D peut notamment servir à présenter l'architecture aux élèves, sans les emmener voir le monument réel. Cela peut représenter un support de cours visuel utile et intéressant.

Centralisation des informations de différents types La plateforme peut également servir à centraliser dans un même lieu toutes les informations disponibles et tous les documents concernant la cathédrale. Ces documents peuvent être des textes, des dessins, des photographies ou de toute autre nature. Cette possibilité offerte par la plateforme semble très intéressante, mais elle ne sera pas prise en compte dans un premier temps.

Utilisation pour la recherche La plateforme et les données laser peuvent alimenter la recherche dans différents domaines. Les données acquises sont un support pour des études en histoire, en architecture, en archéologie ou en histoire de l'art. Elles peuvent alimenter différents domaines de recherche autour du bâtiment. Mais la création de cette plateforme et les différents problèmes que cela soulève impliquent également des recherches en informatique et dans le domaine de la numérisation. Les méthodes d'acquisition des données, les traitements appliqués puis l'utilisation des résultats sont en effet des sujets de recherche d'actualité. Comme il sera évoqué dans la partie 4.2.4, les enjeux sur le stockage, tant concernant la capacité que la durée, sont très importants et peuvent mener à différentes études.

4.2.3 Fonctionnalités envisagées

Une partie de l'application doit fournir des fonctionnalités basiques permettant la visualisation et la manipulation des données, mais il convient également de prévoir des fonctionnalités plus poussées pour satisfaire tous les utilisateurs. Certaines des fonctionnalités décrites ci-dessous ont été tirées de divers articles, mais également de l'étude des plateformes et logiciels existants mentionnée en partie 4.1.3. Cette liste a été étudiée afin de classer les fonctionnalités par ordre d'importance et de sélectionner celles qui devaient être conçues et développées durant le stage.

Visualisation et navigation Parmi les fonctionnalités basiques se trouvent les outils de visualisation et de navigation au sein de la représentation tridimensionnelle. Le modèle peut être composé de différentes parties et sous-parties, formant des ensembles cohérents, ou représentant des objets d'intérêt du monument. L'accès aux différentes parties peut être effectué de plusieurs manières. Comme il a été identifié dans le rapport [BBC+06], la plateforme peut proposer un accès par lieu ou par date. Il est également possible, afin de faciliter la sélection du lieu désiré, d'afficher un plan interactif du monument permettant la sélection des lieux dont les scans sont disponibles. Cela rend la navigation plus facile. Il faut également prévoir un bouton pour revenir à la carte interactive.

Temps réel La visualisation doit s'effectuer en temps-réel et la navigation au sein du modèle doit être intuitive. Les opérations permettant de se déplacer, de zoomer ou de tourner le modèle doivent paraître évidentes et pouvoir être comprises sans explications approfondies.

Multi-résolution La plateforme doit être capable de gérer différentes résolutions du modèle ou du nuage de points. L'importance de cette approche multi-résolution est soulignée dans [Rem11].

Ajout de données Il doit également être possible d'ajouter des données à la plateforme, dans le cas où d'autres campagnes d'acquisition seraient menées. Les données déjà présentes doivent être modifiables et pouvoir être mises à jour.

Informations géométriques Les informations concernant les points du nuage ou certaines zones doivent être accessibles. [DPB12] propose l'utilisation de boîtes englobantes tridimensionnelles afin de sélectionner une portion d'espace. L'application peut alors afficher différentes informations concernant le point sélectionné ou les points contenus dans la zone. Les coordonnées des points sont intéressantes à connaître. De même, les dimensions, le volume, le nombre de points dans la boîte, peuvent être utiles. Cet outil peut également calculer la distance entre deux points sélectionnés ou fournir les coordonnées du vecteur les reliant.

Points de vue et orientation Différents points de vue peuvent également être définis, ainsi que des outils permettant de passer d'une vue à une autre, de se placer à certains endroits intéressants ou d'orienter la vue de manière prédéfinie. Il est par exemple possible de placer la caméra à l'emplacement des stations ayant servi à l'acquisition. Cette technique est celle adoptée par la marque `Leica` dans leur visionneuse web `Leica TruView`. Une autre possibilité est de placer un point dans l'espace, qui sert de centre pour les rotations de la caméra et les zoom. Dans ce cas, il convient de proposer une fonction pour revenir au point de vue initial, et d'offrir la possibilité de placer le centre de vue à un endroit quelconque de l'espace. La visionneuse `CyArk` met aussi à disposition des orientations de caméra prédéfinies, accessibles via différents boutons, et permettant entre autre de voir le modèle de face, depuis un côté ou de dessus.

Vue orthographique ou perspective Concernant les différentes vues disponibles, il est possible de proposer une fonction permettant d'afficher le modèle en vue perspective ou en vue orthographique. Ces deux vues présentent chacune des avantages et des inconvénients, et il peut être pratique de pouvoir passer de l'une à l'autre selon l'utilisation du modèle.

Choix du rendu Il peut être intéressant d'offrir la possibilité d'afficher soit un nuage de points, soit un modèle tridimensionnel. Plusieurs rendus peuvent être proposés, tant pour le nuage de points que pour le modèle 3D. Le nuage de points peut être coloré de différentes manières, selon l'intensité de la lumière réfléchie lors de la mesure, selon la station qui a acquis chaque point ou selon les couleurs réelles obtenues grâce à la caméra du scanner lorsque celui-ci en est équipé. De même, plusieurs rendus peuvent être proposés pour le modèle, comme une représentation filaire, un rendu obtenu par coloration numérique ou un modèle texturé avec des photos du monument donnant un rendu beaucoup plus réaliste.

Coupes et plans En ce qui concerne les fonctionnalités plus spécifiques, il est important de permettre aux différents utilisateurs professionnels d'extraire de la représentation tridimensionnelle les informations qui les intéressent. Il faut notamment proposer un outil intuitif et simple d'utilisation pour obtenir des élévations, des plans ou des coupes du monument. La définition du plan de coupe ou de projection doit être facile pour tous les utilisateurs, même ceux n'ayant pas de connaissances particulières en informatique ou en mathématiques.

Dates de construction et évolution Une autre fonction intéressante est de permettre à l'utilisateur de connaître la date de certains éléments du monument. Cela permet notamment de savoir ce qui est d'origine ou non dans l'édifice, et de suivre son évolution. Il est possible d'ajouter des informations sur les différentes campagnes de restauration. Une thèse a été effectuée à propos de la création de maquettes spatio-temporelles de monuments, offrant la possibilité de suivre l'évolution de l'édifice au cours du temps. Cette thèse est présentée dans [Ste10].

Annotations du nuage de points La plateforme devrait également permettre d'annoter le nuage de points ou le modèle 3D, afin d'identifier des parties ou objets intéressants. Différentes fonctions de marquage peuvent être proposées à l'utilisateur. Il peut aussi être utile de créer des liens hypertexte, permettant de rediriger l'utilisateur vers un site internet, une photo ou tout autre document, lorsque celui-ci clique sur une zone précise de la représentation.

Recherche sémantique Si des objets d'intérêt sont définis et identifiés dans la représentation 3D, une fonction de recherche peut être proposée afin de trouver l'emplacement d'un objet particulier. Cette fonction soulève cependant un certain nombre de problèmes, qui seront exposés dans le partie 4.2.4.

Parmi ces fonctionnalités, celles retenues pour le développement peuvent être rangées dans quatre catégories, présentées dans le tableau 5.

Catégorie	Fonctionnalités
Ajout de données	Ajout de nuages de points, ajout de maillages, ajout de métadonnées.
Visualisation des données	Manipulation du modèle, choix de visualisation, sélection selon différents critères.
Informations	Informations sur un point ou un groupe de points, consultation des métadonnées.
Annotations	Sélection d'une portion, ajout d'informations textuelles, recherche sémantique.

Figure 5 – Récapitulatif des fonctionnalités de la plateforme

4.2.4 Contraintes techniques

Avec l'établissement d'une liste de fonctionnalités à proposer apparaissent également certaines contraintes techniques à considérer.

Droits d'accès Parmi les contraintes identifiées à ce stade du stage, la gestion des droits d'accès à la plateforme occupe une place importante. En effet, les différentes catégories d'utilisateurs n'ont pas les mêmes besoins, mais surtout ils ne doivent pas avoir les mêmes possibilités d'accès et de modification des données. Par exemple, un utilisateur quelconque ne peut pas ajouter ou modifier les données, tandis que les personnes réalisant les acquisitions peuvent en ajouter et les architectes ou archéologues peuvent avoir besoin d'ajouter des informations. Il faut donc définir plusieurs catégories d'utilisateurs, avec des accès plus ou moins restreints et gérer un système de mots de passe. Les rapports [AHM+07] et [BBC+06], ainsi que l'article [BGZH13] mentionnent ces problèmes d'accès aux données et de droits des utilisateurs.

Système de stockage Le système de stockage et ses caractéristiques doivent également être étudiés en détail. L'espace mémoire nécessaire est important et la durée de vie du serveur ou du disque doit être prévue afin de faire des copies éventuelles pour sauvegarder et préserver les données. Les sauvegardes augmentent encore l'espace de stockage nécessaire pour le projet.

Outil libre et gratuit, multiplateforme La plateforme doit être libre et gratuite, et accessible par toutes les personnes identifiées. Il convient de faire en sorte que cette plateforme soit accessible depuis différents navigateurs et permettre ainsi un accès au plus grand nombre. Il convient également de développer un outil multiplateforme, afin de faciliter son utilisation par les personnes concernées.

Interactions Afin de faciliter l'utilisation de la plateforme et de permettre à tous les usagers de s'en servir sans difficulté, il convient de penser soigneusement les méthodes d'interactions avec la plateforme et le modèle 3D. Comme il a été expliqué dans la partie 4.2.3, il faut que la manipulation soit intuitive et simple.

Indexation et adressage Au niveau des données elles-mêmes, il faut stocker les dates d'acquisition des nuages de points, afin de pouvoir suivre l'évolution du contenu de la plateforme. Il est également nécessaire de mettre au point un système d'indexation et d'adressage, afin de pouvoir repérer et retrouver différents objets ou différentes parties du nuage ou du modèle. Cette indexation doit être pensée en partenariat avec des spécialistes du monument, afin de mettre en place un système logique et cohérent.

4.2.5 Traitements à appliquer aux données

Une autre question importante à considérer lors de ce stage est le type de données à charger sur la plateforme. En effet, les données brutes du scanner ne sont pas utilisables et doivent subir différents traitements afin d'être accessibles et de fournir les informations recherchées. Il a donc fallu étudier les différents traitements à appliquer avant le chargement et réfléchir au type de données mises à disposition sur internet.

Le choix des données à proposer sur la plateforme est la première étape. Il faut décider si les utilisateurs auront accès à un nuage de points, à un modèle 3D triangulé, ou aux deux produits. Les traitements appliqués dépendent en partie de ce choix.

Un certain nombre de manipulations doivent cependant être systématiquement appliquées au nuage de points brut produit par le scanner. Dans tous les cas, il est important de conserver une copie du nuage brut.

Filtrage et nettoyage Tout d'abord, il convient de filtrer le bruit dû au scanner. Il faut ensuite nettoyer le nuage et supprimer un certain nombre de points faux, qui peuvent correspondre à des obstacles scannés, à des personnes passant devant le scanner, ou tout autre type d'objets conduisant à la présence de points indésirables.

Recalage Le monument ayant été numérisé par le biais de plusieurs stations, il faut assembler tous les scans afin d'obtenir un modèle du bâtiment dans son intégralité. Pour cela, une étape de recalage est effectuée. Les points communs entre les nuages issus des différentes stations sont utilisés pour trouver les positions relatives des nuages. Certains de ces points sont scannés et entrés par l'utilisateur, afin de fournir une première information au logiciel. Celui-ci trouve ensuite d'autres correspondances entre les nuages pour affiner le recalage. Après cette étape, il faut vérifier la fiabilité de l'assemblage. Le logiciel fournit une liste des erreurs de recalage, et l'utilisateur a alors la possibilité d'intervenir afin de faire diminuer ces erreurs.

Géoréférencement Une fois le nuage de points complet obtenu, il faut le géoréférencer, c'est à dire calculer les coordonnées des points dans un système de référence global officiel, permettant de placer le nuage de points dans son environnement.

Rééchantillonnage Il peut être intéressant par la suite de rééchantillonner le nuage de points. En effet, les zones de recouvrement entre nuages ont des densités de points très élevées, tout comme certaines zones qui ont été scannées de manière plus précise. Comme présenté dans [LGB11], un rééchantillonnage peut permettre d'homogénéiser la densité de points dans tout le nuage, supprimant des points peu utiles et diminuant ainsi la taille des données. Différents types de sous-échantillonnages peuvent être proposés par les logiciels de traitement de nuages de points. Le logiciel peut conserver un point sur cinq par exemple, ou adapter le sous-échantillonnage à la zone, gardant plus de points dans le cas d'un angle que dans celui d'une zone plate. Il est aussi possible d'effectuer plusieurs niveaux de rééchantillonnage afin d'avoir des nuages à différentes résolutions.

Segmentation Une fois le nuage de l'édifice complet obtenu, il est possible de le découper en entités sémantiques ou géométriques. Un quadrillage peut être défini afin d'avoir des portions de nuage de taille constante. Le monument peut également être découpé selon les entités architecturales qui le composent. Ce découpage permet d'avoir des nuages de points beaucoup plus petits et plus faciles à manipuler. Une étape de segmentation, manuelle, semi-automatique ou automatique, faisant appel à des algorithmes tels que RANSAC ou la transformée de Hough, permet d'extraire certains éléments intéressants du nuage.

Triangulation Une fois ces étapes réalisées, la triangulation peut avoir lieu, afin d'obtenir un maillage. La méthode la plus répandue est la triangulation de Delaunay, qui fournit un maillage assez propre et léger. D'autres manipulations doivent être effectuées sur le maillage, afin de l'améliorer. Un lissage permet d'avoir un meilleur maillage. Il convient ensuite de remplir les trous éventuels qui peuvent être présents. Certaines faces peuvent être incorrectes et doivent donc être corrigées. Le maillage peut être allégé et simplifié par une réduction du nombre de triangles qui le composent. Il est également possible à ce stade d'obtenir des maillages à différentes résolutions, en modifiant les niveaux de simplification.

Textures Pour obtenir un modèle tridimensionnel ayant un aspect visuel satisfaisant, il faut appliquer des textures sur le maillage. Il est possible d'appliquer toute sorte d'image, mais un rendu réaliste est obtenu en texturant le maillage avec des images issues d'une caméra liée au scanner et prenant des photographies correspondant aux acquisitions de celui-ci. Cela permet d'avoir un modèle 3D visuellement fidèle à la réalité.

Suite à l'établissement de cette liste, il a été décidé de travailler avec des fichiers de données au format `ply`. Les fichiers de données originaux doivent donc être convertis dans ce format avant d'être ajoutés au logiciel. Ce format n'est pas un standard, mais il est très utilisé et géré par de nombreux logiciels. Il fut principalement conçu pour stocker des données tri-dimensionnelles provenant de scanners 3D. Il permet de stocker différentes propriétés et peut être personnalisé. Il offre la possibilité de stocker des nuages de points ou des maillages. Un autre avantage de ce format est la place mémoire réduite qu'il nécessite grâce à sa version binaire. Seul ce format est actuellement géré par le programme d'ajout, mais les données peuvent être binaires ou en ASCII. Ces fichiers peuvent contenir des nuages de points seuls ou des maillages triangulaires. Si un fichier contenant un autre type de maillage est passé en entrée, seul le nuage de points associé sera pris en compte. Les éventuelles informations de couleur présentes sont gérées par la plateforme.

4.3 Premier choix technique : utilisation de `CloudCompare`

L'analyse des besoins et l'établissement d'une liste de contraintes techniques ont montré l'importance de la visualisation des données. En effet, il est important de proposer des fonctions

de manipulation intuitives et simples à utiliser. La plateforme doit permettre à l'utilisateur de zoomer, de faire tourner le modèle tridimensionnel et de le déplacer. Il faut également proposer la gestion de différentes méthodes d'affichage.

Afin d'éviter de coder toutes les fonctions basiques permettant l'affichage et la manipulation des nuages de points et maillages, il a été décidé de prendre comme base pour le code un logiciel de visualisation et traitement de nuages de points existant. Comme il a été expliqué dans la partie 3.2, de nombreux logiciels de manipulation de modèles tridimensionnels existent. Il a donc fallu effectuer un choix.

Le logiciel `CloudCompare` a été choisi pour diverses raisons. Il permet la manipulation de gros nuages de points et de gros maillages, contrairement à d'autres logiciels comme `MeshLab`, et propose toutes les fonctions basiques de visualisation, de gestion de la vue et de déplacement du nuage. Il offre en outre de nombreuses fonctions qui pourront être utiles afin de manipuler et traiter les modèles gérés par la plateforme.

`CloudCompare` est un logiciel libre, sous licence GNU General Public License. Son code est donc accessible gratuitement et librement sur internet. Il est également possible de modifier ce code. Ce n'est par exemple pas le cas du logiciel `Cyclone` de `Leica`. Le langage `C++` et la bibliothèque `Qt` sont utilisés dans ce code, ce qui a facilité sa reprise, par opposition à `Cumulus` qui est codé en `Pascal`. L'existence de plugins dans `CloudCompare` était aussi un point intéressant. Cela a permis d'ajouter toutes les fonctionnalités nécessaires dans un plugin à part, sans modifier le code source de base du logiciel. De plus, ce logiciel est multiplateforme, ce qui est important, étant donné que le programme développé devra être utilisable sur diverses plateformes. Un autre avantage, découvert après le début de l'utilisation de ce logiciel est la possibilité d'obtenir de l'aide par mail. En effet, le développeur est très disponible et répond rapidement afin de résoudre les problèmes techniques rencontrés lors de la compilation du logiciel ou du développement de plugins.

Il a donc été décidé d'écrire un plugin pour le logiciel `CloudCompare` permettant d'accéder à toutes les fonctionnalités prévues dans le cahier des charges. Ce plugin doit entre autre proposer les opérations nécessaires au stockage et à la visualisation de données laser.

4.4 Structure choisie pour le stockage des données

L'une des opérations les plus importantes est de stocker et organiser les données, afin d'y accéder facilement par la suite. Une étude des systèmes existant et des discussions avec plusieurs informaticiens ont permis de choisir un système de stockage. Il est composé d'un système de fichiers et d'une base de données.

4.4.1 Plusieurs solutions envisagées

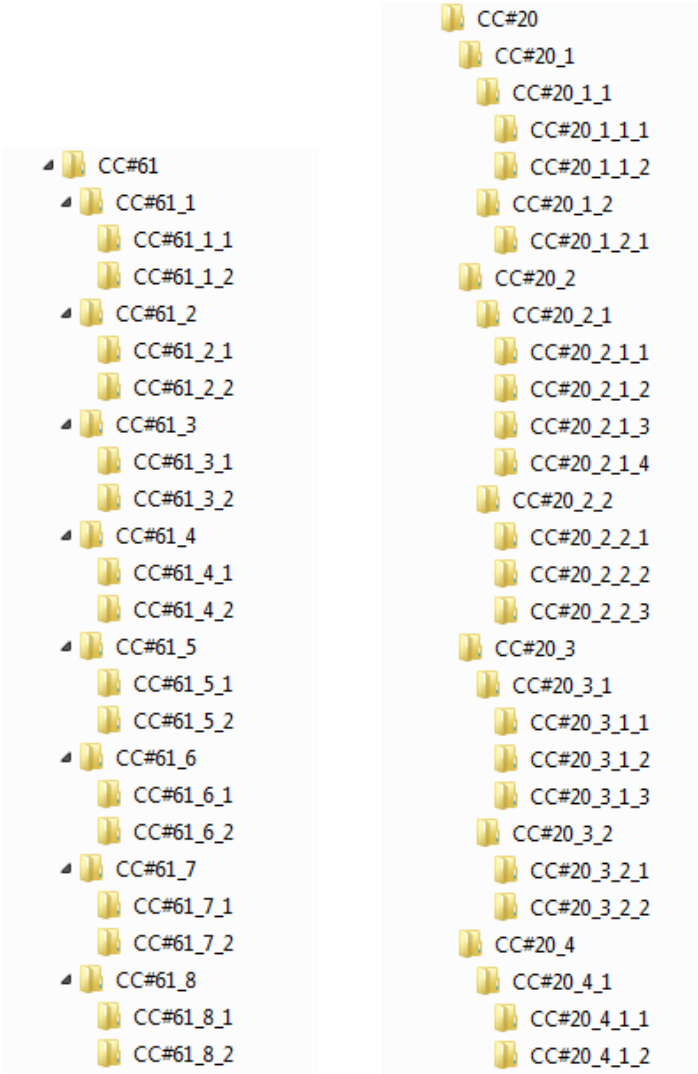
Après discussion avec plusieurs personnes travaillant dans le domaine de l'informatique, une structure a été choisie pour le stockage des données laser et des métadonnées associées.

En raison du nombre de points à traiter, la première solution envisagée, consistant à stocker chaque point, avec ses coordonnées et autres caractéristiques, dans une table de la base de données, s'est avérée inadaptée. Il a donc été décidé de stocker les nuages de points dans un système de fichiers, sous la forme de fichiers au format `ply`. Cependant, la taille des fichiers, pouvant atteindre plusieurs centaines de méga-octets, rendrait le téléchargement depuis le système de fichiers trop long. De plus, une telle méthode ne permettrait pas d'effectuer des recherches par zones géographiques. En effet, un fichier correspondant à un scan peut contenir des points se situant dans des zones très éloignées les unes des autres.

Afin de remédier à ces deux problèmes, une solution alternative a été proposée. Elle consiste à découper les fichiers `ply` originaux en fichiers `ply` de taille inférieure, en respectant la proximité des points. Pour cela, une structure d'octree est utilisée. Un octree est calculé sur l'intégralité des points chargés, provenant de plusieurs scans et donc de plusieurs fichiers. Une arborescence de dossiers est créée dans le système de fichiers, correspondant à la structure de l'octree. Les fichiers `ply` sont créés dans les dossiers représentant des feuilles de l'octree. Chaque fichier contient uniquement des points appartenant à cette feuille. Chaque feuille peut contenir plusieurs fichiers `ply`, si plusieurs fichiers d'entrée possèdent des points dans cette zone.

4.4.2 Un système de fichiers pour stocker les données laser

En pratique, une structure d'arbre composée de dossiers est créée dans le système de fichiers. Cette arborescence est enregistrée dans le dossier `BD`. Un dossier correspond à la racine de l'octree, la cellule de niveau 0. Ensuite, pour chaque cellule de niveau 1 contenant des points, un dossier est créé dans le précédent. Il peut donc y avoir jusqu'à huit dossiers dans le dossier racine. Puis de nouveaux dossiers sont créés selon le même principe dans chaque sous-dossier, jusqu'à atteindre un niveau défini au préalable.



Arborescence de niveau 2 Arborescence de niveau 3

Figure 6 – Exemples d'arborescences de dossiers créées par le programme d'ajout de données

La figure 6 donne deux exemples d'arborescences de dossiers créées par le programme. La première image correspond à un octree de niveau 2. Le dossier `CC#61` est la racine. Les dossiers `CC#61_x` correspondent aux cellules de niveau 1. Dans cet exemple, les huit cellules contiennent des points du nuage. Les dossiers nommés `CC#61_x_x` sont associés aux feuilles, les cellules de niveau 2. Ils contiennent des fichiers `ply` numérotés, selon le nombre de fichiers originaux contenant des points dans cette cellule. Ces fichiers sont alors nommés `CC#61_x_x-1`, `CC#61_x_x-2` et ainsi de suite.

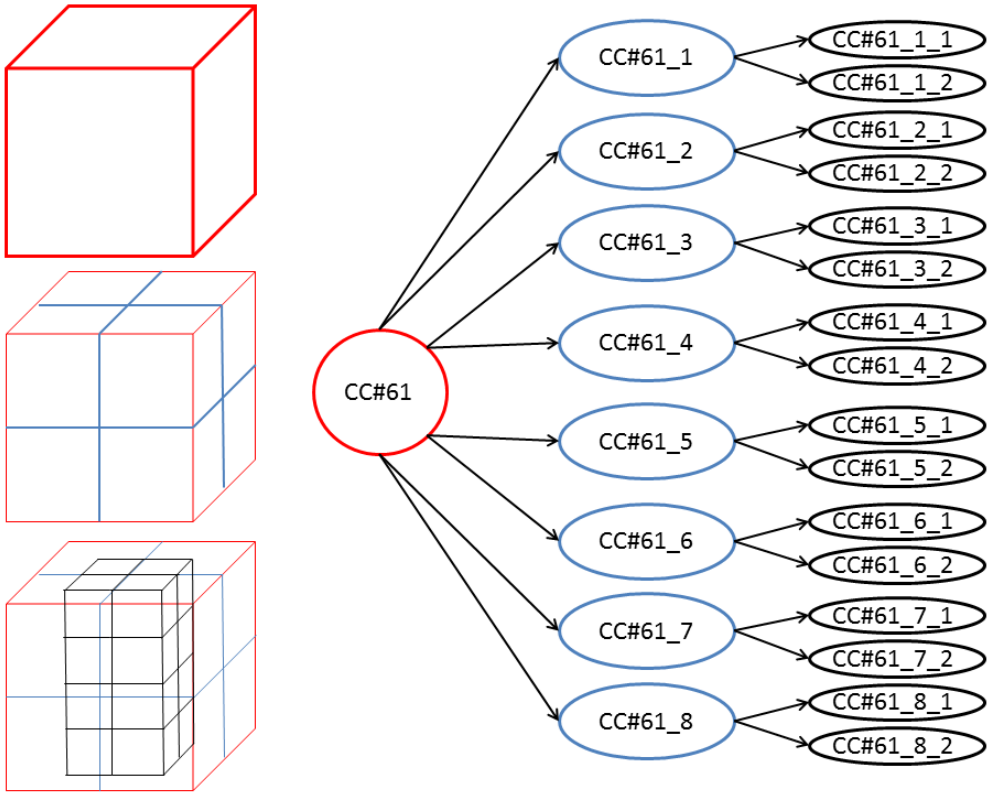


Figure 7 – Structure de l'octree associé à la première arborescence de la figure 6

La figure 7 présente un schéma de la structure d'octree associé avec l'arborescence précédente. Les trois niveaux de l'octree y sont représentés, ainsi que les dossiers correspondants, sous forme d'arbre. La troisième représentation de l'octree montre que, pour chaque cellule de niveau 1, seules deux cellules parmi les huit sont conservées au niveau 2.

La seconde image de la figure 6 présente un arbre de niveau 3. Dans ce cas, seules quatre cellules du premier niveau contiennent des points, ce qui implique la création de quatre sous-dossiers de niveau 1 seulement. La convention pour nommer les dossiers est la même que précédemment.

Une fois cette structure d'arbre créée, les points sont enregistrés dans des fichiers `ply` se trouvant dans les dossiers correspondant aux feuilles de l'arbre.

Grâce à cette structure, les fichiers `ply` qui seront téléchargés depuis le système de fichiers sont de taille faible et ils correspondent à une zone géographique définie par les bornes de la cellule.

Le système de fichiers contient également, dans un dossier à part nommé `Stockage`, les fichiers `ply` originaux qui ont été ajoutés.

Un troisième dossier, `Selections`, permet de stocker les fichiers correspondant aux sélections effectuées par l'utilisateur pour enregistrer des annotations.

4.4.3 Une base de données pour stocker les métadonnées

En plus de ce système de fichiers contenant les données laser elles-mêmes, une base de données est destinée à contenir les métadonnées associées. Cette base de données permet notamment d'avoir un lien vers les fichiers du système de fichiers, afin de savoir lesquels sont concernés lors d'une requête.

Cette base de données, dont la structure est présentée sur la figure 8, contient six entités, dont quatre faibles.

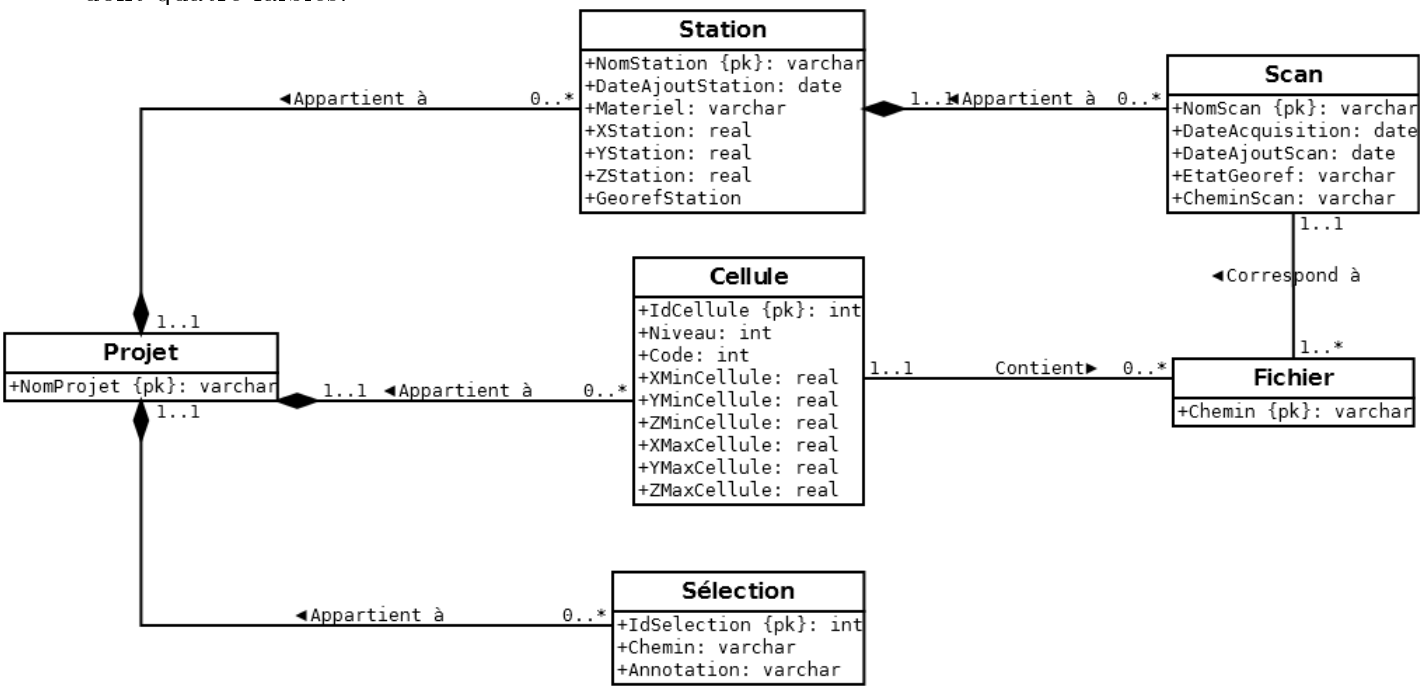


Figure 8 – Structure de la base de données pour la gestion des données laser

Une table `Projet` offre la possibilité d'utiliser cette base de données et le plugin du logiciel `CloudCompare` pour gérer de futurs projets, autres que la cathédrale d'Amiens. Chaque projet est identifié par son nom, par exemple le nom du lieu étudié. Le nom est le seul attribut de cette table.

La table `Station` contient diverses informations permettant de connaître la position et les caractéristiques du matériel ayant servi à l'acquisition des données. L'entité `Station` est une entité faible. Une station dépend d'un projet. Elle est identifiée par son nom, qui doit donc être unique au sein d'un projet.

La table `Scan` contient les informations spécifiques au fichier ajouté, correspondant à un scan particulier. Cette table contient notamment l'adresse dans le système de fichiers du fichier `ply` d'origine. Cette table est une entité faible, dépendant d'une station et donc d'un projet. Un scan est identifié, au sein d'une station, par son nom.

La structure d'octree utilisée pour le stockage des données est gérée par le biais de la table `Cellule`, qui contient les informations permettant d'identifier une cellule dans `CloudCompare`, ainsi que ses bornes. Une cellule dépend d'un projet et est identifiée par un numéro.

La table `Fichier` contient les chemins permettant de trouver les fichiers `ply` découpés dans le système de fichiers. Elle permet de stocker le nom du projet, de la station et du scan, ainsi que le numéro de la cellule, correspondant à ce fichier.

Enfin, la table `Selection` contient les informations concernant les annotations enregistrées. Elle permet de stocker l'adresse du fichier `ply` correspondant à la sélection ainsi que l'annotation associée. Une sélection dépend d'un projet.

4.4.4 La base de données et le système de fichiers

La base de données La base de données a été créée via le système de gestion de bases de données `PostgreSQL`. C'est un outil libre permettant de gérer des bases de données relationnelles et spatiales. Il reprend les fonctionnalités et commandes de `SQL`. Des bibliothèques permettent d'accéder à la base de données et de la manipuler depuis un programme écrit en `C` ou en `C++`.

La base de données dont la structure a été présentée sur la figure 8 a été créée en local afin de réaliser les premiers tests. Un script `SQL` nommé `creation.sql` permet de créer toutes les tables de la base et leurs liens, en une seule commande. Un second script, `suppression.sql`, permet leur suppression dans l'ordre adéquat.

La base de données a par la suite été créée sur un serveur distant, accessible à distance grâce à son adresse `IP`.

La gestion des utilisateurs est effectuée depuis le système de gestion de bases de données. Le logiciel `PgAdmin III`, proposant une interface graphique, a été utilisé afin de définir trois catégories d'utilisateurs, `Fournisseur`, `Specialiste` et `Spectateur`. Ces catégories correspondent à différents groupes d'utilisateurs, ayant des besoins et des compétences différents. Les droits sur chaque table ont été définis pour permettre à ces trois classes d'effectuer les opérations autorisées et uniquement celles-ci.

`Fournisseur` Les utilisateurs de cette catégorie ont la possibilité d'ajouter des données et des métadonnées depuis le logiciel. Ils peuvent visualiser ces informations et annoter des portions de nuage de points ou de maillage. Ils ont également accès à la fonction de recherche sémantique. Ces utilisateurs ont le droit de créer des entrées dans toutes les tables de la base de données et de supprimer des données dans les tables `Scan`, `Cellule` et `Fichier`.

`Specialiste` Cette catégorie concerne notamment les architectes et archéologues. Toutes les personnes ayant des connaissances particulières sur le monument peuvent appartenir à cette catégorie. Elle permet de visualiser les données et les métadonnées, ainsi que d'ajouter des annotations sur le modèle 3D. La recherche sémantique est également accessible aux personnes de ce groupe. Ces personnes ont les droits de lecture sur toutes les tables, ainsi que le droit d'écriture dans la table `Selection`.

`Spectateur` Le plus bas niveau d'accès à la plateforme permet uniquement la consultation des données et des métadonnées stockées. La recherche sémantique est également possible. Il s'agit de personnes souhaitant simplement consulter les données. Ces utilisateurs ont le droit d'accéder aux données de toutes les tables de la base, mais ne peuvent y écrire.

Le système de fichiers Pour commencer, les fichiers ont été stockés en local, sur l'ordinateur où s'est effectué le développement. Trois dossiers ont été créés afin de gérer les données à conserver.

Les fichiers `ply` passés en entrée du programme sont copiés dans le dossier `Stockage`. Pour chaque projet, un sous-dossier est créé. Cette méthode permet d'effectuer une copie systématique de tous les fichiers ajoutés à la plateforme. Cela offre la possibilité de retrouver les fichiers originaux, mais également d'avoir une copie des données.

Le dossier `BD` permet de stocker les fichiers `ply` découpés créés par le programme. Un sous-dossier est créé pour chaque projet, puis d'autres dossiers le sont à l'intérieur afin de reproduire l'arborescence correspondant à l'octree calculé, comme cela a été décrit dans la partie 4.4.2.

Un troisième dossier est utilisé pour l'enregistrement des annotations. L'utilisation de ce dossier appelé `Selections` sera détaillée dans la partie 4.5.7.

Par la suite, lorsque les tests avec ce système de fichiers local ont été concluants, un système de fichiers distant a été créé sur le serveur hébergeant la base de données. Les trois dossiers décrit plus haut ont été créés sur ce serveur, et des options de partage ont été définies afin d'y accéder à distance.

4.5 Le développement du plugin

En parallèle de la création de la base de données et du système de fichiers, le développement du plugin sous `Windows 7` a démarré.

La première phase du développement a permis de comprendre le code et le fonctionnement du logiciel `CloudCompare` afin de pouvoir réutiliser les outils mis à disposition. Cette phase a également permis de tester les fonctions de manipulation de la base de données.

Les fonctionnalités ont ensuite été développées une par une. Les fonctions pour ajouter des données et des métadonnées ont été mises en place, suivies de celles gérant la visualisation. La consultation des métadonnées a été proposée par la suite. Enfin, les fonctions concernant les annotations ont été développées.

4.5.1 Compilation du logiciel `CloudCompare`

Après la décision d'utiliser `CloudCompare`, la première étape a été de télécharger les sources du logiciel et de les compiler. Cette étape a posé un certain nombre de difficultés. Le développement devait initialement se dérouler sous `CodeBlocks`, en utilisant le logiciel `CMake`. Suite à de nombreux problèmes, il a été décidé d'utiliser `Visual Studio`. La version 9 du logiciel, `Visual Studio 2008`, a donc été utilisée.

Une fois les sources compilées, l'ajout d'un plugin s'est effectué sans grande difficulté, notamment grâce à la documentation fournie expliquant les étapes à suivre afin de développer son propre plugin.

4.5.2 Prise en main des outils

Pour découvrir le code de `CloudCompare` et le maîtriser, un premier plugin très simple a été développé. Ce plugin a servi de base pour comprendre le fonctionnement du logiciel et l'utilisation des nombreux outils proposés. Il a également été la base du plugin réel développé par la suite.

Une première fenêtre basique a été développée en suivant un tutoriel internet pour apprendre à maîtriser le langage `Qt` utilisé pour la réalisation de l'interface graphique. Plusieurs tests ont été menés afin de développer des fenêtres de plus en plus complexes.

Concernant la base de données, plusieurs essais ont été réalisés afin de prendre en main la bibliothèque permettant la manipulation des données de la base depuis le code `C++`. Des tests de connexion à la base, de lecture et d'ajout dans les tables ont été effectués.

Lorsque tous les outils et langages utilisés ont été maîtrisés, le développement du plugin final a pu débuter.

4.5.3 Présentation du plugin

Le plugin développé est accessible via deux boutons présents dans l'interface graphique de `CloudCompare`. L'un d'eux se situe dans le menu déroulant `Plugins` et le second dans la barre de menus, sous la forme d'un raccourci. L'interface graphique du logiciel est présentée sur la figure 9 et l'icône du plugin, apparaissant sur les boutons de démarrage, sur la figure 10.

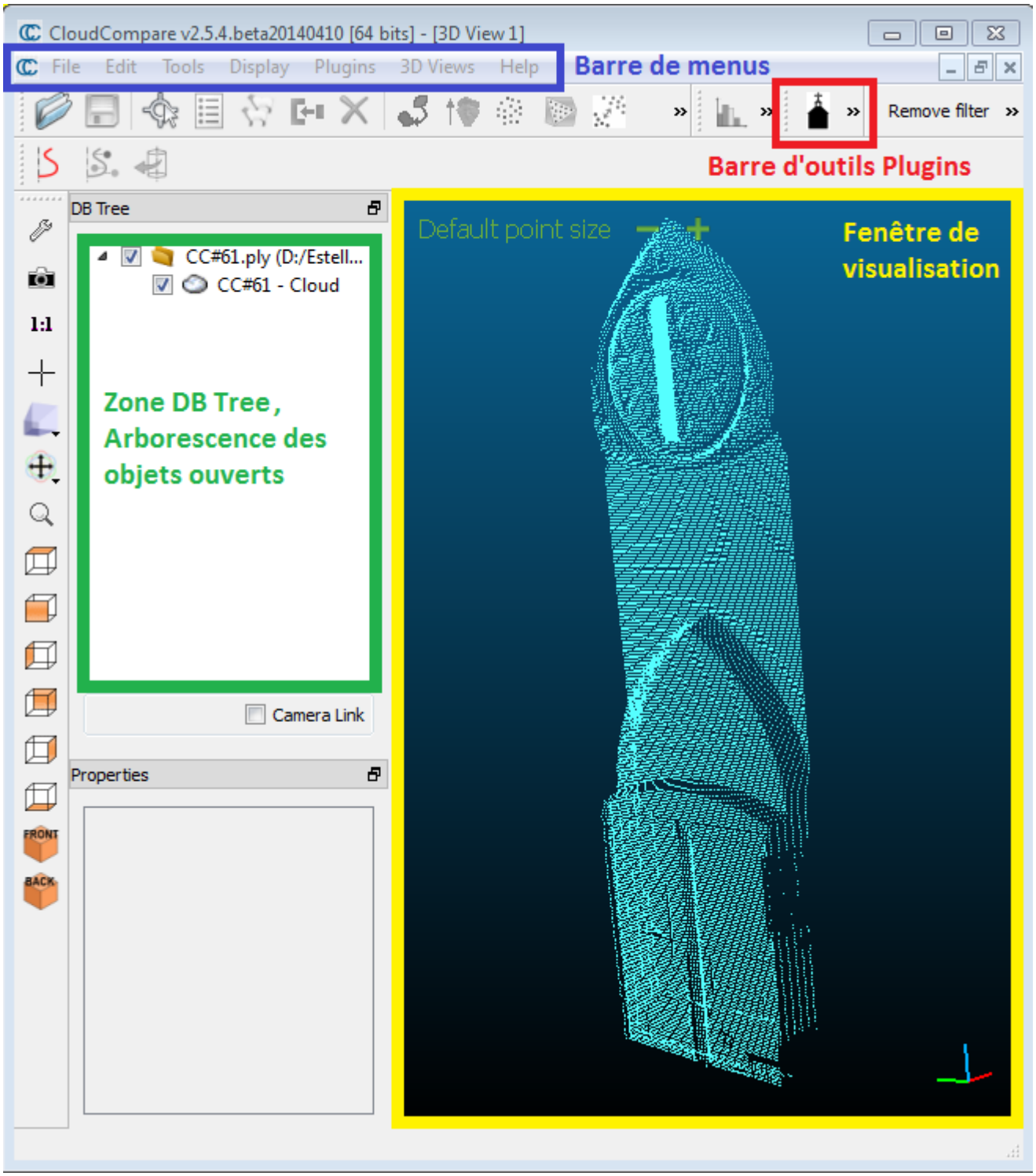


Figure 9 – Interface graphique de `CloudCompare`

Figure 10 – Icône du plugin

Le bouton de démarrage ouvre une fenêtre permettant de se connecter au logiciel et à la base de données via un nom d'utilisateur, correspondant à une des catégories d'utilisateurs, et un mot de passe. Cette fenêtre de connexion est visible sur la figure 11.

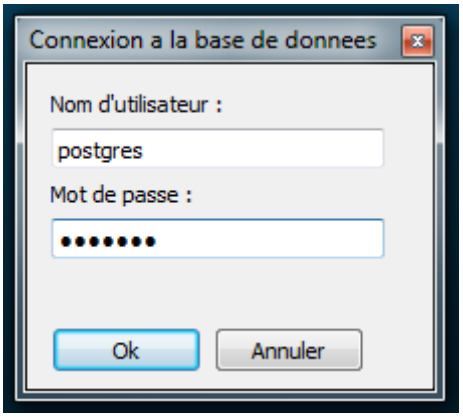


Figure 11 – Fenêtre de connexion

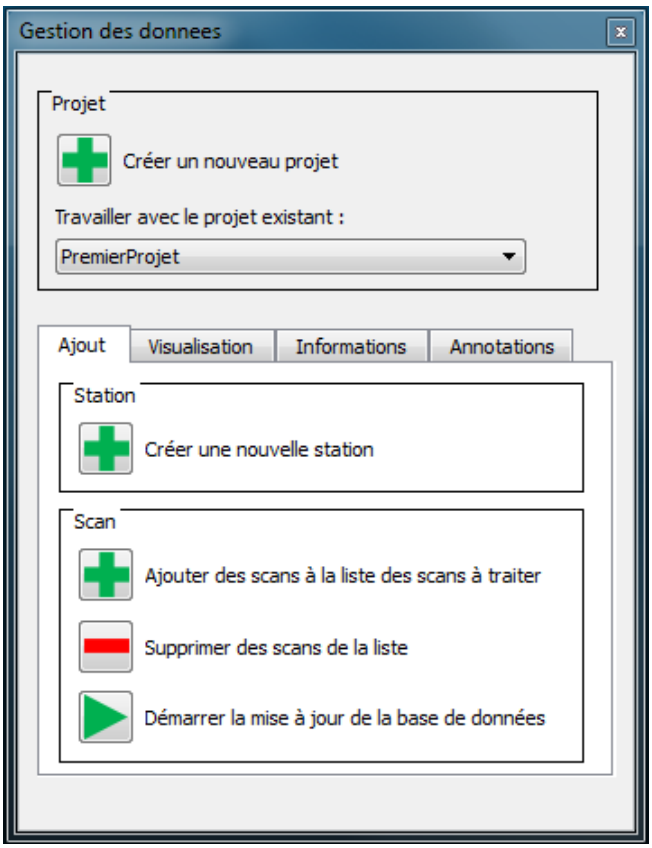
Lorsque la connexion est possible, une seconde fenêtre apparaît. Il s'agit de la fenêtre principale du plugin qui permet d'accéder à toutes les fonctions proposées. Ces fonctions sont réparties en quatre catégories, accessibles via quatre onglets visibles sur la figure 12. La fenêtre possède également une zone commune aux quatre onglets. Ces catégories correspondent aux groupes de fonctionnalités établis dans la partie 4.2.3, à savoir l'ajout de données et de métadonnées, la visualisation des données, la consultation des métadonnées et la gestion des annotations.

4.5.4 L'ajout des données

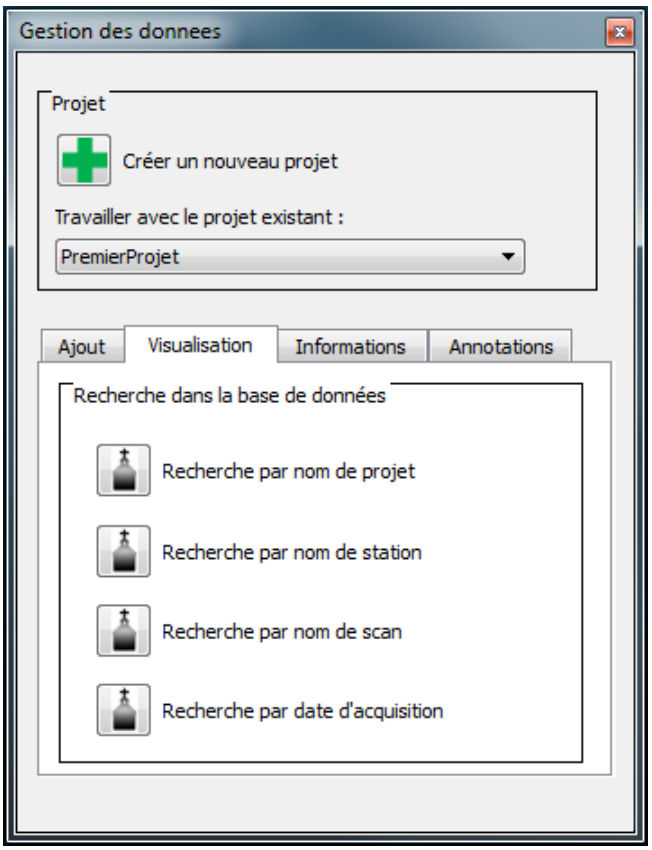
Le premier onglet de la fenêtre principale, visible sur la figure 12a, permet d'accéder aux fonctions d'ajout de métadonnées et de données dans la base.

Projet La première étape est de créer un nouveau projet. En effet, afin de gérer les données acquises sur différents sites, le plugin organise les informations fournies en plusieurs projets. Un projet correspond donc à un lieu qui a été numérisé. La zone commune de la fenêtre du plugin permet de créer un projet. Il suffit d'entrer un nom pour ce nouveau projet, par exemple le nom du site ou du monument. Ce projet est alors ajouté à la liste des projets existants. Il est également possible de sélectionner un projet existant dans le menu déroulant. Le projet créé ou sélectionné devient le projet courant.

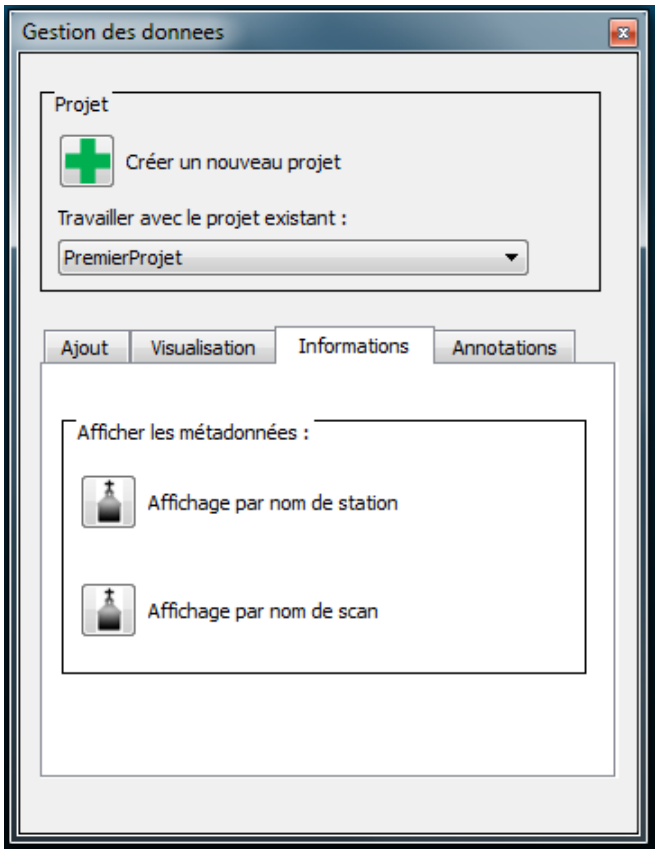
Station Le premier onglet de la fenêtre contient une zone destinée à l'ajout de stations au projet courant. La création d'une station nécessite davantage d'informations que celle d'un projet. En effet, comme il a été expliqué dans la partie 4.4.3, la table `Station` de la base de données possède de nombreux attributs. Les valeurs de certains d'entre eux sont définies automatiquement par le programme, mais l'utilisateur doit fournir les autres. Pour cela, la fenêtre



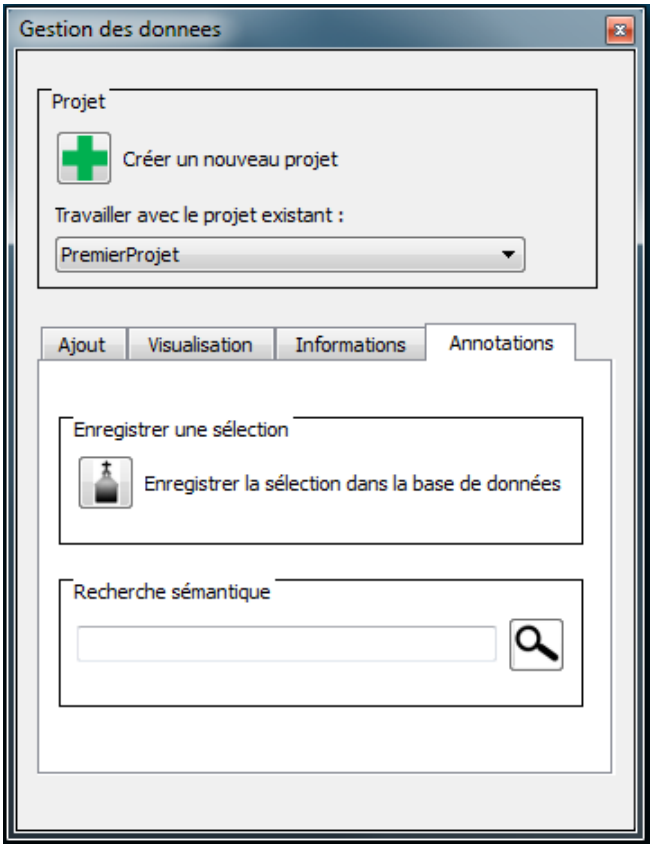
(a) Onglet d'ajout de données



(b) Onglet de visulaisation des données



(c) Onglet de consultation des métadonnées



(d) Onglet de gestion des annotations

Figure 12 – Les quatre onglets de la fenêtre principale du plugin

de la figure 13 s'affiche. Elle contient une ligne de texte pour chaque valeur que l'utilisateur doit fournir. Si le nom ou une des coordonnées est vide, le programme affiche un message d'avertissement, puis la fenêtre permettant d'entrer les attributs. La date d'ajout est calculée automatiquement grâce à la fonction `SQL CURRENT_TIMESTAMP` et le nom du projet est le projet courant. Plusieurs stations peuvent être créées dans un même projet.

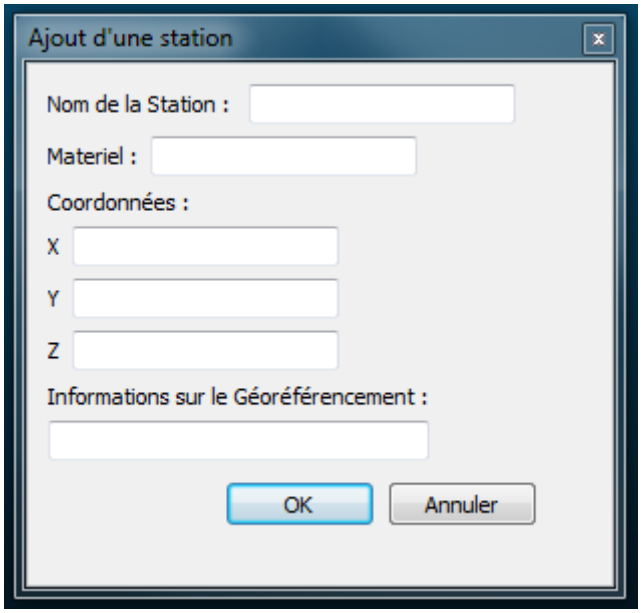


Figure 13 – Fenêtre d'ajout d'une station

Scan Lorsque toutes les stations désirées ont été créées, l'ajout de scans peut débuter. Les fichiers destinés à être ajoutés sont stockés dans une liste. Le bouton d'ajout permet de sélectionner des fichiers à ajouter à la liste. Il ouvre une fenêtre de choix de fichiers où l'utilisateur peut sélectionner un nombre quelconque de fichiers. S'il a choisi des fichiers qu'il ne souhaite pas conserver, l'utilisateur peut utiliser le bouton de suppression. Une fenêtre s'affiche, contenant les noms des fichiers présents dans la liste. L'utilisateur peut sélectionner plusieurs fichiers dans cette fenêtre afin de les supprimer de la liste. Lorsque le choix des fichiers à ajouter est terminé, l'utilisateur clique sur le bouton de démarrage de l'ajout. Cela lance le calcul de l'octree et le découpage des fichiers. Pour chaque scan sélectionné, la fenêtre de la figure 14 apparaît. Elle permet à l'utilisateur de fournir les données nécessaires à l'ajout d'une entrée dans la table `Scan`. L'utilisateur choisit une station parmi les stations du projet courant. Il fournit également le nom du scan, qui par défaut est le nom du fichier, et sa date d'acquisition, qui est par défaut la date courante. Des informations sur le géoréférencement peuvent également être ajoutées. Le nom du projet et la date d'ajout sont insérées par le programme. Les tables `Cellule` et `Fichier` de la base de données sont également remplies à ce moment là.

4.5.5 La visualisation des données

Le second onglet de la fenêtre principale du plugin, visible sur la figure 12b, offre la possibilité d'afficher les données stockées dans la base, selon différents critères. Il est possible de visualiser toutes les données du projet courant en cliquant sur le bouton correspondant. Une recherche est effectuée dans la base de données afin de sélectionner tous les scans appartenant à ce projet. Les chemins d'accès aux fichiers `ply` sont récupérés dans la table `Fichier` et les nuages de points ou maillages associés sont affichés dans la fenêtre de visualisation de `CloudCompare`.

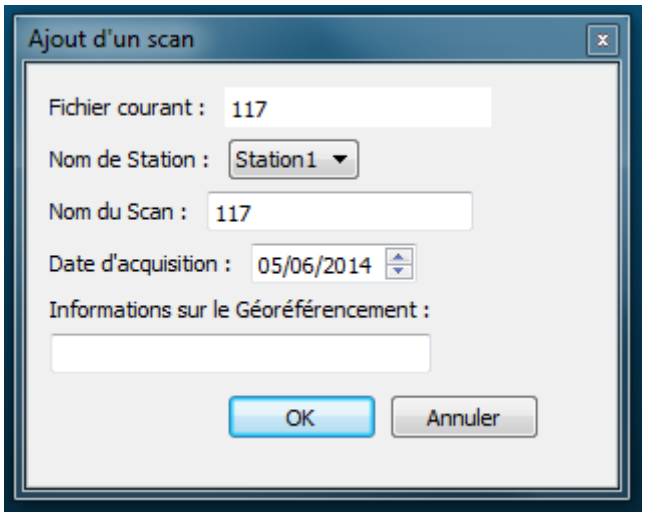


Figure 14 – Fenêtre d'ajout d'un scan

Il est également possible d'afficher toutes les données correspondant à une station du projet courant. Une fenêtre apparaît alors pour choisir la station grâce à un menu déroulant contenant toutes les stations du projet courant. La liste des stations est mise à jour lorsque le projet courant change, afin d'afficher les stations appartenant à ce projet. Une fois la station choisie, les fichiers correspondants sont cherchés dans la base, afin d'afficher les points de cette station.

Pour la sélection par nom de scan, une première fenêtre offre la possibilité de choisir une station du projet en cours. Une seconde fenêtre apparaît, avec la liste des scans appartenant à cette station. Il est ainsi possible de sélectionner un ou plusieurs scans de cette station afin de les afficher. Les chemins des scans choisis sont récupérés à partir de la base de données et chaque fichier est ouvert dans `CloudCompare`.

Une autre fonctionnalité est la recherche de données par date d'acquisition. Pour cela, un bouton a été ajouté à l'onglet de visualisation. Ce bouton ouvre une fenêtre permettant de spécifier des critères de date. Cette fenêtre comprend trois champs, pour entrer un jour, un mois et une année. Les valeurs du paramètre jour peuvent aller de 1 à 31, celles de mois de 1 à 12, et l'année doit être inférieure à l'année courante. Il est possible de remplir un champ, deux ou les trois. Si un champ n'est pas précisé, sa valeur est remplacée par le caractère `%` lors de la requête `SQL`. Ce caractère joker peut remplacer n'importe quelle chaîne de caractères. Cela permet par exemple de chercher tous les scans acquis durant l'année spécifiée, ou le mois entré dans la fenêtre. Cette méthode offre donc une grande flexibilité sur la recherche par date.

4.5.6 La consultation des métadonnées

Comme il a été expliqué auparavant, les métadonnées sont importantes dans le cadre des acquisitions de données laser. En effet, outre les informations concernant le scan en lui-même, comme sa date d'acquisition et les informations de géoréférencement, il est important d'avoir les caractéristiques de la station ayant servi à cette acquisition. Il peut être utile de connaître sa position ainsi que le matériel utilisé. La marque du scanner laser peut en effet être une information importante. Des informations concernant le géoréférencement peuvent également être fournies au niveau de la station.

Toutes ces métadonnées sont stockées dans les tables de la base de données, mais il faut pouvoir y accéder directement depuis le plugin, sans manipuler la base de données. Pour cela, un troisième onglet a été ajouté à la fenêtre principale du plugin. Cet onglet est visible sur

la figure 12c. Deux boutons sont disponibles, afin de choisir entre l'affichage des métadonnées d'une station ou d'un scan.

Dans le premier cas, une fenêtre contenant un menu déroulant apparaît pour permettre de choisir une station du projet courant. La validation provoque l'affichage d'une fenêtre composée de plusieurs champs de texte en lecture seule, correspondant aux différents attributs de la table `Station`. Le programme lit la base de données afin de récupérer les valeurs de ces champs et les affiche dans la fenêtre.

Si l'utilisateur souhaite obtenir des informations sur des scans, il clique sur le second bouton. Une fenêtre s'ouvre afin de proposer la liste des stations du projet courant. L'utilisateur choisit une station puis clique sur le bouton de choix de scans. Une fenêtre contenant les noms des scans de cette station s'ouvre, permettant de sélectionner un nombre quelconque de scans. Une fenêtre s'affiche pour chaque scan retenu. Elle possède un champ de texte en lecture seule pour afficher chacun des attributs de la table `Scan`.

4.5.7 Gestion des annotations et de la recherche sémantique

L'un des objectifs de la plateforme est d'offrir une fonctionnalité de recherche sémantique au sein du nuage de points. Il est donc possible de sélectionner des points, d'enregistrer cette sélection dans la base de données et d'y ajouter une annotation. Une recherche peut ensuite être effectuée afin d'afficher les nuages ayant une certaine propriété. Ces fonctions sont accessibles depuis le quatrième onglet de la fenêtre principale, visible sur la figure 12d.

Enregistrement d'une annotation Plusieurs solutions ont été envisagées afin de stocker des sélections dans la base de données et d'y associer des annotations. Aucune de ces solutions n'était à la fois optimale au niveau du stockage et flexible au niveau de la sélection.

Au début de la réflexion, lorsqu'il était envisagé de stocker chaque point dans la base de données, il a été suggéré de stocker les annotations sur chaque point qu'elles concernent. Cependant, cela pose problème car un même point peut comporter plusieurs annotations distinctes. Il est donc préférable de stocker les annotations sur des groupes de points. Il faut donc offrir la possibilité de sélectionner des points afin de leur affecter un commentaire. Pour l'instant, la sélection s'effectue à l'aide des outils du logiciel `CloudCompare`, comme la fonction `Cross Section` qui affiche une boîte englobante de taille réglable afin de sélectionner une portion de nuage de points ou de maillage. Un outil particulier pourra être développé ultérieurement afin de faciliter la sélection et de permettre une plus grande liberté.

Il a été proposé d'enregistrer une sélection en stockant le minimum d'informations sur sa géométrie, ce qui permet de réduire l'espace mémoire nécessaire, mais limite aussi la forme des sélections possibles. Il est alors possible d'enregistrer des sphères ou des boîtes englobantes. Les données géométriques auraient alors été stockées dans la base, avec les informations d'annotations.

La solution retenue consiste à sauvegarder les points sélectionnés dans un fichier `ply`. Ces fichiers sont enregistrés dans un dossier du système de fichiers nommé `Selections`. Le fichier est ensuite référencé dans la base de données, grâce à l'attribut `Chemin` de la table `Selection`. Les éventuelles annotations associées sont également stockées dans cette table. Si plusieurs éléments sont sélectionnés, chacun est sauvegardé dans un fichier différent, mais tous ont la même annotation.

Différentes raisons ont mené au choix de cette solution. Elle permet de stocker des ensembles de points de forme arbitraire. Cette solution n'est pas optimale au niveau de l'espace de stockage. En effet, tous les points de la sélection sont recopiés dans un nouveau fichier. Mais l'avantage

de cette méthode est la possibilité de récupérer ultérieurement les données, même sans disposer du logiciel. En effet, les fichiers `ply` créés peuvent être lus avec n'importe quel logiciel de visualisation de nuages de points et de maillages.

Une fois la sélection effectuée avec le logiciel `CloudCompare`, l'utilisateur clique sur le bouton de la fenêtre 12d afin de l'enregistrer dans la base de données. Une fenêtre comportant un champ de texte apparaît, afin que l'utilisateur entre l'annotation qu'il souhaite. La requête peut contenir plusieurs mots, séparés par des espaces. Quand l'utilisateur valide, le fichier `ply` est enregistré dans le système de fichiers et référencé dans une nouvelle entrée de la table `Selection` contenant l'annotation associée. Si plusieurs éléments sont sélectionnés lors de la validation, plusieurs fichiers et plusieurs entrées sont créés avec la même annotation.

Recherche sémantique Il est ensuite possible d'effectuer une recherche sémantique grâce aux annotations enregistrées. Pour cela, l'utilisateur utilise la barre de recherche située dans la seconde partie de l'onglet d'annotations. Lorsqu'il a entré sa requête dans le champ approprié, il lance la recherche en pressant la touche `Entrée` ou en cliquant sur le bouton avec une image de loupe. Les données concernées par la requête sont affichées dans la fenêtre de visualisation de `CloudCompare`.

Au niveau du logiciel, la requête est tout d'abord découpée en mots. Le découpage est effectué en prenant en compte les espaces. Pour chacun de ces mots, une requête est effectuée dans la table `Selection` afin de trouver les entrées ayant dans leur annotation le mot cherché. Cette requête utilise le joker `SQL %`. Cela permet de trouver les chaînes quelconques contenant le mot désiré, à n'importe quel endroit. Chaque sélection correspondante est ensuite affichée dans la fenêtre de visualisation.

4.6 Documentations rédigées

Il a été prévu depuis le début du stage que le temps imparti n'était pas suffisant pour mener à bien l'étude bibliographique, concevoir la plateforme et développer toutes les fonctionnalités retenues. Il a donc été prévu que le travail effectué serait repris ultérieurement par une autre personne. Il était donc très important de commenter et documenter le code, afin qu'il puisse être repris facilement et que le développement puisse être poursuivi.

Au cours du développement, de nombreux commentaires ont été placés dans le code. Chaque bloc de code est documenté de manière à être compréhensible rapidement. Les passages du code les plus techniques ou complexes sont également accompagnés de commentaires plus détaillés résumant les actions effectuées. Le fichier d'en-tête contient des commentaires présentant chaque attribut et chaque fonction. Ces commentaires sont utilisés pour générer la documentation technique de manière automatique avec `Doxygen`. Cette documentation présente donc toutes les classes écrites pour le plugin avec leur hiérarchie, les variables globales, ainsi que les différentes fonctions et les slots écrits, avec leurs paramètres et valeur de retour.

Une seconde documentation a été écrite afin de faciliter la reprise du code. Cette documentation de conception vise à présenter et justifier les choix techniques qui ont été effectués. Elle permet de comprendre le but du plugin développé, les outils utilisés et les structures de données choisies. Elle explique également le rôle de chacune des classes écrites, détaille les différentes fonctions et donne un aperçu des fenêtres gérées par le plugin. Cette documentation a été écrite dans le but de permettre à une personne étrangère au projet de prendre en main le code existant et de continuer le développement le plus simplement possible. Elle présente aussi des pistes d'amélioration pour la suite du développement et propose des fonctions qui pourraient être ajoutées. Certaines de ces pistes de développement sont présentées dans la partie 6.

Le programme développé devrait par la suite être utilisé par différentes personnes, n'ayant pas forcément des compétences approfondies en informatique. La plupart des futurs utilisateurs n'a pas participé à ce projet et n'a donc aucune connaissance sur le travail réalisé. Par conséquent, il est nécessaire de leur fournir toutes les informations dont ils ont besoin afin d'utiliser facilement ce logiciel. Pour cela, une documentation utilisateur a été rédigée. Elle présente rapidement le logiciel `CloudCompare` puis explique le lancement du plugin. Après la définition des classes d'utilisateurs, elle présente la fenêtre principale du plugin. La sélection ou création d'un projet est expliquée. Les fonctions fournies par les quatre onglets sont ensuite décrites, onglet par onglet. Chaque bouton est expliqué et de nombreuses captures d'écran permettent de savoir facilement où cliquer pour effectuer une opération précise. Les explications ont été prévues de manière à être les plus claires possibles et les nombreuses images ont pour but de rendre cette documentation aussi compréhensible et simple à lire que possible.

5 Résultats

Bien que le développement ne soit pas terminé et que certaines fonctionnalités soient incomplètes ou manquantes, l'état actuel du programme a permis d'effectuer un certain nombre de tests afin de vérifier que le comportement du logiciel corresponde à ce qui était attendu.

5.1 L'état actuel du programme

Concernant la visualisation des données, la structure en octree n'a pas été utilisée comme elle aurait pu l'être. Elle pourrait permettre d'obtenir un affichage et une visualisation beaucoup plus fluides. Ces améliorations ont été laissées de côté afin de développer d'autres fonctionnalités. Le programme dans son état actuel offre donc des fonctionnalités variées répondant à de nombreux besoins, même si ces fonctionnalités ne sont pas toutes optimisées et pourraient être plus performantes. Il a été choisi de développer un plus grand nombre de fonctionnalités plutôt que de n'en garder que quelques unes en les améliorant. Cela permet d'avoir un aperçu des possibilités offertes par le plugin.

5.2 Les tests effectués

Tout au long du développement, de nombreux tests ont été effectués afin de vérifier chaque nouvelle fonction.

Au début du projet, quelques fichiers de la cathédrale d'Amiens ont été choisis comme fichiers tests. Trois nuages de points ont été convertis au format `ply` afin d'avoir des fichiers de taille réduite pour vérifier rapidement si le comportement du programme correspondait à celui attendu. Ces fichiers, de 15 kilo-octets à 5 méga-octets, contiennent de 1024 à 341621 points. Le découpage en octree a notamment été testé sur le plus gros de ces trois fichiers, afin de vérifier que les fichiers `ply` obtenus correspondent bien aux portions de nuage attendues. Les tests concernant les maillages ont été effectués sur un maillage de lapin trouvé sur internet. Ce modèle de petite dimension a permis de mettre au point le découpage des maillages, qui a posé un certain nombre de difficultés. La conservation des triangles se trouvant à la limite entre deux cellules de l'octree et la préservation des couleurs initiales ont été les deux étapes les plus problématiques. Ces quatre fichiers ont été utilisés tout au long du développement afin de tester rapidement les nouvelles fonctions développées.

Il était cependant nécessaire d'effectuer régulièrement des tests sur des données de plus gros volume afin de vérifier que la plateforme puisse les gérer. Pour cela, les données acquises à l'extérieur de la cathédrale d'Amiens en 2010 ont été utilisées. Ces nuages représentent environ 2 giga-octets de données et contiennent plus de 70 millions de points. Ces données ont permis d'avoir une idée du temps de calcul nécessaire au découpage des fichiers et au stockage des données. Pour le premier test effectué, il a fallu environ six heures afin d'effectuer le découpage des nuages, la création de l'arborescence de dossiers et l'enregistrement des fichiers `ply`.

Lorsque le développement était presque terminé, il a fallu effectuer des tests en conditions réelles, avec des données proches de celles que recevra la plateforme. Les données de la cathédrale d'Amiens n'étant pas toutes disponibles à ce moment-là, d'autres données ont été utilisées. Les données acquises à Saint-Siméon-le-Stylite ont donc servi à effectuer des tests en conditions réelles. Le rangement des données selon les monuments numérisés a facilité les tests. En effet, cela a permis d'avoir des ensembles de données complets de tailles variées. Il a donc été possible de tester le programme sur des jeux de tests assez petits afin d'effectuer certaines modifications sans avoir à attendre les résultats trop longtemps. Les plus gros dossiers de données ont permis de tester le programme sur de gros maillages pour vérifier sa capacité à gérer les gros chantiers.

Certains de ces tests ont nécessité quelques minutes, d'autres plusieurs heures. Le programme n'a pas été testé sur le plus gros monument, le martyrium, qui contient plus de 350 scans.

Ces tests finaux ont permis de corriger quelques problèmes qui n'avaient pas été identifiés lors des tests précédents. Le programme ne gérait pas les fichiers d'entrée possédant à la fois des informations de couleur et d'intensité. Certains maillages possédaient deux points de mêmes coordonnées, en raison de troncatures effectuées précédemment, et ce cas n'était pas géré par le plugin. D'autres points ont été améliorés afin de faciliter l'utilisation du logiciel. Ces tests ont aussi permis de vérifier que le programme est capable de gérer des fichiers contenant de gros maillages. En effet, les tests précédents avaient surtout été effectués sur des nuages de points.

Le temps de calcul sur les gros chantiers est important, il atteint plusieurs heures. Cependant, le programme a été prévu de manière à ne nécessiter aucune intervention de l'utilisateur durant ce temps de calcul. Toutes les opérations manuelles sont effectuées au lancement de la phase d'ajout. Il est sans doute possible de diminuer ce temps de calcul en utilisant des ordinateurs plus performants pour l'ajout des données. Il est également possible d'optimiser certaines portions du code. Des pistes d'amélioration seront présentées dans la partie 6.

Les tests ont donné des résultats concluants. Le découpage des fichiers d'entrée en fichiers `ply` selon l'octree a été vérifié. L'ajout des métadonnées et des données dans la base a également été testé. Des requêtes `SQL` effectuées directement sur la base en parallèle de l'utilisation du plugin ont permis de vérifier les lectures et ajouts dans la base. Les autres fonctionnalités du plugin, telles que la visualisation des données et la gestion des annotations ont également été testées. Les résultats de ces tests ont été positifs. La manipulation des gros volumes de données n'est cependant pas suffisamment fluide pour une utilisation pratique et efficace. L'accès direct à la base de données a également permis de vérifier l'exactitude des données affichées lors de la consultation des métadonnées. Le fonctionnement de la recherche basée sur les annotations a aussi été validé. Les messages d'erreur ont été vérifiés. Des cas problématiques ont été testés afin de vérifier leur bonne gestion par le plugin.

5.3 Comparaison avec ce qui était attendu

Depuis le début du stage, les encadrants étaient conscients de l'impossibilité de réaliser une plateforme répondant à tous les besoins répertoriés, de manière optimale. Ils savaient donc que le produit rendu à la fin ne répondrait pas à toutes leurs attentes.

Le logiciel fourni à la fin du stage propose cependant les principales fonctions qui ont été prévues, même si elles ne sont pas aussi performantes que ce qui est souhaité. Le plugin permet d'effectuer les différentes opérations qui ont été considérées comme prioritaires.

Un suivi régulier et des discussions avec les personnes concernées par le projet ont permis de redéfinir les priorités et d'effectuer des choix techniques pour le développement. Deux réunions de suivi, composées d'une présentation de l'avancement du stage et d'une phase de discussion, ont apporté des éléments importants pour la poursuite du projet. Elles ont permis de recueillir les avis de personnes intéressées par le projet, mais apportant un point de vue externe.

Les encadrants ont donc été satisfaits du travail réalisé au cours de ce stage. Ils ont trouvé que l'avancement du projet était encourageant et qu'il serait donc intéressant de poursuivre le développement afin de compléter ce logiciel et de le rendre plus performant. Le plus gros problème soulevé concerne la fluidité de la manipulation des données, qui reste insuffisante.

Mais comme cela a été dit précédemment, ce manque de fluidité est la conséquence d'un choix technique visant à privilégier le développement de multiples fonctionnalités non optimales afin de fournir une plateforme proposant divers outils et donnant un bon aperçu de ce que pourront être les possibilités offertes par le logiciel final.

6 Suite du développement

En raison de la durée limitée du stage, le développement n'a pas été terminé. Plusieurs fonctionnalités doivent être ajoutées, complétées ou améliorées.

6.1 Ajout des métadonnées dans la base

6.1.1 Informations sur les stations et les scans

Au niveau de l'ajout des métadonnées, la principale amélioration à réaliser serait une automatisation plus grande du traitement. Il faudrait mettre au point un système pour lire de manière automatique les métadonnées concernant les stations et surtout les scans. Pour l'instant, ces informations sont entrées à la main et cela peut être très long lorsque le nombre de scans est important.

Plusieurs solutions ont été proposées pour remédier à ce problème.

La première consisterait à définir une convention pour le nom des scans et à fournir les informations nécessaires dans le nom. Cependant, cela impliquerait de renommer tous les fichiers au préalable.

La seconde solution serait d'exporter les données dans un fichier spécifique lors de l'export des fichiers. Le programme lirait ensuite les informations directement dans le fichier pour remplir la base de données, sans intervention de l'utilisateur. Cela permettrait également d'avoir automatiquement les informations sur les stations.

6.1.2 Ajout de données dans un projet existant

Lors de l'ajout de données dans un projet contenant déjà des scans, les informations concernant les scans, les cellules et les fichiers sont supprimées de la base de données. Il serait possible de ne pas supprimer totalement les informations concernant les scans, afin d'éviter de devoir récupérer à nouveau ces données, surtout si l'utilisateur doit les entrer à la main.

Dans le cas où une telle modification serait apportée, une fonctionnalité de recherche par date d'ajout d'un scan dans la base pourrait être réalisée. Cette possibilité n'a pas d'intérêt pour l'instant, puisque tous les scans d'un projet sont ajoutés en même temps.

6.2 Autres formats d'entrée pour l'ajout des données

Il pourrait être envisagé de modifier le programme pour permettre l'ajout de données dans d'autres formats que le format `ply`, afin de faciliter son utilisation. L'enregistrement dans la base au format `ply` peut être conservé, mais en diversifiant les formats d'entrée. Cela rendrait le programme moins restrictif.

6.3 Recherches dans le nuage de points

6.3.1 Autres critères de sélection

Pour l'instant, la recherche dans la base de données peut être effectuée par projet, station, scan ou date d'acquisition. D'autres critères pourraient être proposés.

La recherche par date d'ajout a été mentionnée précédemment. D'autres critères peuvent être imaginés.

Il pourrait être également intéressant de proposer une recherche avec des critères multiples. Par exemple, sélectionner à la fois une station particulière et une date d'acquisition. La diversité des requêtes `SQL` permet de mettre en place de nombreuses possibilités de recherches.

6.3.2 Recherche par zone géographique

Le découpage en fichiers correspondant à une zone précise et l'utilisation d'une structure en octree pour le stockage offre la possibilité d'effectuer des recherches par zone géographique. L'utilisateur pourrait spécifier les bornes d'une boîte englobante dont il souhaiterait visualiser les points. Les attributs de la table `Cellule` concernant les bornes des cellules permettraient de faciliter ce type de recherche, en explorant uniquement les cellules contenant la boîte spécifiée.

6.4 Affichage des nuages de points et des maillages

Le problème principal du programme dans son état actuel concerne la visualisation des données. En effet, bien que `CloudCompare` soit prévu pour manipuler de gros nuages de points, l'affichage des chantiers de données laser n'est pas du tout fluide. Il convient donc de travailler sur l'aspect d'affichage des points, notamment pour permettre d'adapter la résolution du nuage affiché.

6.4.1 Création de fichiers intermédiaires sous-échantillonnés

Une solution pour permettre un affichage plus fluide serait la création de fichiers intermédiaires dans l'arborescence de fichiers. Un fichier serait créé dans chaque dossier, quel que soit le niveau. En fonction de ce niveau, le nuage enregistré dans le fichier serait plus ou moins sous-échantillonné. Comme dans la version actuelle, un fichier ne comporterait que des points appartenant à la cellule correspondante. Cette technique permettrait de choisir un niveau de l'arborescence à afficher, en fonction de la densité de points ou de la distance d'affichage.

6.4.2 Utilisation de l'octree

Une autre méthode pour améliorer l'affichage serait d'utiliser la structure de l'octree et les informations sur la proximité géographique des points. En effet, cette connaissance permet de sélectionner les zones proches de la caméra afin de les afficher à pleine résolution. Selon la distance, un nombre réduit de points serait affiché. Cela permet de réduire le nombre de points affichés tout en conservant un rendu précis des éléments les plus proches de la caméra.

6.4.3 Choix de visualisation

`CloudCompare` permet de visualiser un maillage ou uniquement le nuage de points sur lequel il s'appuie. Cependant, ce choix n'est pas immédiat. Il pourrait être pratique de proposer un outil simple pour passer d'un mode de visualisation à l'autre.

Une autre amélioration pour la visualisation serait de permettre de choisir d'afficher l'intensité acquise par le laser, ou la couleur lorsqu'elle est disponible. Par défaut, quand les deux informations sont présentes, `CloudCompare` ne conserve que la couleur. Mais selon les utilisations, il peut être préférable de visualiser l'intensité. Pour offrir une telle fonctionnalité, il faudrait modifier la fonction de chargement des données afin de conserver les deux informations lors de la lecture du fichier `ply`. Il faudrait également proposer un bouton permettant de passer d'un mode de coloration à l'autre.

6.5 Outil de sélection de points

La sélection des points s'effectue pour l'instant de manière totalement extérieure au plugin. Elle utilise uniquement des outils de base de `CloudCompare`.

Une première amélioration serait d'utiliser les outils fournis par `CloudCompare`, mais en les appelant depuis la fenêtre principale du plugin. Cela éviterait à l'utilisateur de devoir manipuler simultanément les outils du logiciel et ceux du plugin.

Il serait également intéressant par la suite de permettre de sélectionner des groupes de points de forme quelconque, ou tout du moins, différente d'une boîte englobante. Un outil spécifique pourrait alors être développé et ajouté à l'onglet de Sélection du plugin.

6.6 Adaptation pour la photogrammétrie

La version actuelle du plugin permet de charger tout nuage de points au format `ply`, qu'il provienne d'un scanner laser ou qu'il ait été généré à partir de photographies. Cependant, la structure de la base de données, avec un découpage en stations et scans, n'est pas adapté à la photogrammétrie. Il faudrait donc modifier la base de données afin de permettre l'ajout de nuages de points photogrammétriques. En effet, ces nuages seraient complémentaires de ceux acquis par scanner laser et il serait intéressant de pouvoir les traiter ensemble avec le plugin.

7 Planning

7.1 Temps consacré aux différentes parties du projet

Les six premières semaines du stage ont été consacrées à l'étude bibliographique. Comme il a été présenté en partie 4.1, cette étude a permis la découverte de la lasergrammétrie et de ses applications, l'analyse des logiciels et plateformes web existants, ainsi que la collecte de données utiles pour la définition du cahier des charges.

Lors de la septième semaine, une réunion avec d'autres personnes concernées par les données laser a permis de préciser ce cahier des charges et d'en établir une version définitive. Les discussions menées durant cette réunion, ainsi que les choix effectués ont permis de démarrer le développement. Il a alors été décidé de coder un plugin pour `CloudCompare`.

Les premiers tests de manipulation de `Qt` et de création d'interfaces graphiques ont débuté. L'étude du logiciel `CloudCompare` et de son code ont également commencé à cette période. Les premiers essais de compilation des sources du logiciel ont eu lieu au début de la huitième semaine de stage. Au début de la semaine suivante, la compilation des sources était effectuée et le développement a pu commencer. La décision d'utiliser `PostgreSQL` comme système de gestion de bases de données a été prise à ce moment là et l'installation a été effectuée. La structure de la base de données a été définie pendant la dixième semaine, après discussion avec un informaticien.

A la fin de la treizième semaine, le découpage en octree et la sauvegarde dans les différents fichiers de l'arborescence de dossiers étaient opérationnels. Les tests de manipulation de la base de données depuis le code ont commencé à cette période. Par la suite, de nouvelles fonctionnalités ont été ajoutées progressivement, jusqu'à obtenir toutes les fonctions concernant l'ajout de métadonnées et de données. Cette partie a été terminée à la fin de la semaine dix-sept.

L'affichage des données stockées a été géré durant la semaine dix-huit. La semaine suivante a été consacrée à la gestion des sélections et des annotations, ainsi qu'aux fonctions de visualisation des métadonnées.

Les deux dernières semaines ont été consacrées à l'amélioration et à l'organisation du code, à l'écriture des commentaires, et à la validation du programme par l'exécution de nombreux tests. Certains problèmes ont également été résolus à ce moment.

L'écriture de la documentation de conception a commencé assez tôt. Elle a été effectuée en parallèle du développement du plugin et des tests. La documentation utilisateur a été rédigée durant les deux dernières semaines du stage.

7.2 Comparaison avec le planning prévisionnel

La phase de bibliographie et de découverte du sujet a été longue. Le développement a été commencé assez tardivement. Il aurait peut-être été préférable de commencer à coder plus tôt, en raison de la durée limitée du stage.

Concernant le développement, une liste des fonctionnalités à coder a été définie et des dates ont été prévues pour chacune d'entre elles. Le planning établi prévoyait les fonctions à coder chaque semaine. Ceci a permis de cadrer le développement, en se focalisant sur les éléments les plus importants. Ce planning a été bien suivi dans l'ensemble. Il était difficile de prévoir à l'avance le temps nécessaire pour chaque fonctionnalité. La partie d'ajout des données dans la base a pris plus de temps que ce qui avait été envisagé, mais d'autres fonctions par la suite ont demandé moins de temps que prévu.

Les tests sur de gros volumes de données, réalisés sur Saint-Siméon-le-Stylite, auraient pu être commencé avant. Cela aurait permis d'identifier plus tôt certains problèmes.

8 Bilan personnel

8.1 Difficultés rencontrées

La première difficulté de ce stage a été la quantité et la complexité des données à étudier et traiter. En effet, l'organisation de ces données est compliquée. De plus, il existe de nombreuses sauvegardes et différentes versions des relevés effectués, ayant subi des traitements différents. Il faut donc parvenir à identifier les versions les plus intéressantes et les plus cohérentes pour la suite du projet. La quantité et la taille des données sont une autre difficulté. Le répertoire contenant le travail des quatre campagnes d'acquisition à Amiens représente environ 300 giga-octets de données. Il n'est donc pas aisé de les stocker sur un ordinateur pour les traiter. L'ordinateur utilisé pour le stage ne pouvait contenir la totalité des données et il a donc fallu commencer par travailler sur un sous-ensemble de celles-ci.

Le nombre et la variété des utilisateurs potentiels de la plateforme, ainsi que la quantité de fonctionnalités à implémenter, ont également posé quelques problèmes. Il a fallu établir des listes détaillées, puis sélectionner les informations les plus importantes afin de classer ces listes par ordre d'intérêt. Les différentes contraintes identifiées précédemment ont également dû être prises en compte.

A niveau du développement, la compilation des sources du logiciel `CloudCompare` a représenté l'une des principales difficultés. Plusieurs documentations ont été trouvées sur internet, mais les étapes de la compilation diffèrent selon les versions du logiciel et l'environnement de développement utilisé. L'aide du développeur de `CloudCompare`, M. Daniel Girardeau-Montaut, a permis de trouver une solution. Il a notamment conseillé l'utilisation de `Visual Studio`.

Par la suite, l'installation et l'utilisation de la bibliothèque offrant un accès à la base de données `PostgreSQL` depuis le code `C++` ont aussi posé quelques difficultés.

8.2 Journée type

Lors des premières semaines du stage, la répartition du travail dans la journée a été à peu près la même chaque jour. Le matin était plutôt dédié à la recherche bibliographique sur la lasergrammétrie ou le traitement des données laser. Le début d'après midi était occupé par l'étude des plateformes existantes, tandis que les dernières heures de la journée étaient utilisées afin de rédiger le pré-rapport.

Quelques journées sont sorties de l'ordinaire. Les journées de la recherche et leurs présentations sur la photogrammétrie et le traitement d'images sont venues enrichir ce stage. Une journée à Amiens, pour visiter la cathédrale et rencontrer différentes personnes liées au projet, ainsi qu'une matinée à Reims pour effectuer des prises de vue de la cathédrale, ont également apporté une dimension culturelle au projet.

Par la suite, le travail s'est concentré sur le développement du logiciel, qui a occupé la majeure partie des journées de travail. L'écriture des différentes documentations fournies et la rédaction du présent rapport ont occupé plusieurs demi-journées vers la fin du stage.

8.3 Apports personnels et techniques

Apports personnels L'essor actuel des scanners laser et l'utilisation croissante des techniques de photogrammétrie et de lasergrammétrie dans le domaine du patrimoine culturel font de ce stage un sujet d'actualité dans une discipline en plein développement.

L'aspect culturel et historique de ce stage est également un point très positif de ce projet. Le sujet d'étude, la cathédrale d'Amiens, est un monument magnifique et impressionnant, et

la possibilité de prendre part à un projet de numérisation d'un tel édifice est une opportunité exceptionnelle.

Apports techniques Au niveau technique, ce stage a offert une opportunité d'approfondir les connaissances abordées en cours de Bases de Données. En effet, les concepts étudiés dans ce cours, de manière assez théorique, ont reçu ici une illustration pratique. Toutes les étapes de la conception d'une base de données ont en effet été mises en application.

Ce stage concerne un domaine différent de ceux traités généralement à l'ENSIMAG et qui est tout à fait passionnant. La photogrammétrie et la lasergrammétrie permettent d'illustrer et de mettre en application de nombreux concepts vus à l'école. Les cours de modélisation surfacique, de traitement d'images et de vision par ordinateur trouvent ici une illustration concrète et très intéressante.

Les connaissances du langage `C++` ont aussi été améliorées. L'utilisation de la bibliothèque `Qt`, avec les interfaces graphiques et la gestion des signaux et des slots avaient été mentionnés lors d'un projet. Ce stage a offert une occasion de suivre un tutoriel internet afin de maîtriser les outils proposés par `Qt`. De nombreuses fenêtres ont été développées, ce qui a permis d'assimiler les concepts appropriés et de comprendre le fonctionnement des signaux et slots `Qt`.

Conclusion

L'essor des scanners laser a entraîné le développement de la lasergrammétrie. Cette technique est de plus en plus utilisée, notamment dans le domaine du patrimoine culturel. Les scanners sont de plus en plus performants et permettent d'obtenir des représentations tridimensionnelles fidèles à la réalité. Cependant, la rapidité croissante de l'acquisition et les niveaux de détails atteints entraînent une forte augmentation de la quantité de données acquises. Se pose alors la question de l'utilisation de ces données. En effet, il faut pouvoir traiter les données acquises, les exploiter et les rendre accessibles aux personnes qui peuvent en avoir besoin. Cependant, ce problème est bien souvent laissé de côté.

C'est dans le but de proposer une solution à cette question que le sujet de ce stage a été proposé. Il vise en effet à définir et développer un logiciel de traitement des données acquises par scanner laser. Les fonctionnalités développées concernent le stockage et l'archivage des données, leur visualisation, l'accès à certaines métadonnées, ainsi qu'une fonction d'annotations accompagnée d'un système de recherche sémantique.

Suite à une longue phase de conception, le développement du logiciel a commencé. Les fonctionnalités décrites ci-dessus ont été codées, mais ne sont pas toutes optimales. Le développement devra être poursuivi ultérieurement, afin d'améliorer ou ajouter certaines possibilités.

L'état du programme a cependant permis d'avoir une bonne idée de ses potentialités. De nombreux tests ont été menés afin de vérifier les bon fonctionnement du logiciel et de confirmer son intérêt dans le domaine de la lasergrammétrie.

Références

[AHM+07] Jean-Philippe Ast, Thomas Hauswalt, Clotilde Mohsen, Mélanie Mortier, and Julien Place. *Cahier des Charges Fonctionnel, Projet Laser VRML*. Rapport de projet SIG-Carto, École Nationale des Sciences Géographiques, 2006-2007.

[BBC+06] Roland Bellessa, Vincent Breteau, Thomas Cadoul, Bastien Dolla, and Lise Fechner. *SIG de la Chartreuse de Villeneuve-lez-Avignon*. Rapport de Projet École Nationale des Sciences Géographiques, 2006.

[BGZH13] I Bianco, M Del Giudice, M Zerbinatti, and Cultural Heritage. *A database for the architectural heritage recovery between Italy and Switzerland*. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W2, pp.103-108. 2013.

[BMa11] D Barber, J Mills, and al. *3D Laser Scanning for Heritage, Advice and guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture*, English Heritage, Londres, (2e édition), 2011.

[Dau09] Sylvain Dauriach. *Etude comparative de solutions logicielles dédiées à la lasergrammétrie*. Rapport de projet de fin d'etudes, École Nationale des Sciences Géographiques, France, 2009.

[DPB12] Alexandre Devaux, Nicolas Paparoditis, and M Brédif. *A Web-Based 3D Mapping Application using WebGL allowing Interaction with Images, Point Clouds and Models*. 20th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems (ACM SIGSPATIAL GIS 2012), Redondo Beach (CA), Etats-Unis. 6-9 novembre 2012.

[FHCS+07] S. Fournier, M. Henry-Claude, L. Stefanon, Y. Zaballos, and A. Rego. *Principes et éléments de l'architecture religieuse médiévale*. À livre ouvert. les Éd. Fragile, 2007.

[GGHQ08] José Luis Lerma Garcia, Bjorn Van Genechten, Erwin Heine, and Mario Santana Quintero. *3D Risk Mapping : Theory and Practice on Terrestrial Laser Scanning*. Universidad Politecnica de Valencia, 2008.

[GQH07] José Luis Lerma Garcia, Mario Santana Quintero, and Erwin Heine. *Application of Terrestrial Laser Scanning for Risk Mapping*. Universidad Politecnica de Valencia, 2007.

[Gre09] Adrien Gressin. *Conception et développement d'un système permettant l'intégration et la constitution des données hétérogènes dans un SGBD spatial*. Rapport de stage du cycle ingénieur 2e année, École Nationale des Sciences Géographiques, France, 2009.

[HB08] B Hervet and J Blanrue. *La Cathédrale Notre-Dame d'Amiens*. 2008.

[HCCH11] Raphaële Héno, Laure Chandelier, Fanny Clauzel, and Rémi Hanon. *Complementarity of Terrestrial Laser Scanning and DSM from Aerial Photography : The Example of the Cathedral of Amiens*, Proceedings of the 23rd CIPA Symposium, Prague, République Tchèque, 2011.

[HCS12] Raphaële Héno, Laure Chandelier, and Daniel Schelstraete. *Costless Platform for High Resolution Stereoscopic Images of a High Gothic Facade*, Proceedings of the ISPRS symposium, Melbourne, Australie, 2012.

[HHHA13] R A Haubt, Cultural Heritage, Indigenous Heritage, and Rock Art. *Virtual heritage archives : building a centralized Australian rock art archive*, ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W2. 2013.

[LGB11] Tania Landes, Pierre Grussenmeyer, and Hakim Boulaassal. *Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre : acquisition , traitement des données et applications (partie 2 / 2)*. 2011.

[Rem11] Fabio Remondino. *Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning*, Remote Sensing, vol. 3, n° 6, p. 1104-1138. 2011.

[Soc10] Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection n°196 : Photogrammétrie au service des archéologues et des architectes*, 2010.

[ST09] Jie Shan and Charles K. Toth. *Topographic Laser Ranging and Scanning : Principles and Processing*. CRC Press, 2009.

[Ste10] Chiara Stefani. *Maquettes numériques spatio-temporelles d'édifices patrimoniaux*. Thèse à l'École Nationale Supérieure des Arts et Métiers, 2010.

[VM10] George Vosselman and Hans-Gerd Maas. *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*, Whittles Publishing, Dunbeath, Ecosse, Royaume Uni. CRC Press, 2010.

A Photographies de Notre Dame d'Amiens

Figure 15 – Partie inférieure de la façade ouest

Figure 16 – Porte centrale de la façade ouest

Figure 17 – Portail de la Vierge Dorée (sud)

Figure 18 – Rosace du transept nord

Figure 19 – Rosace du transept sud

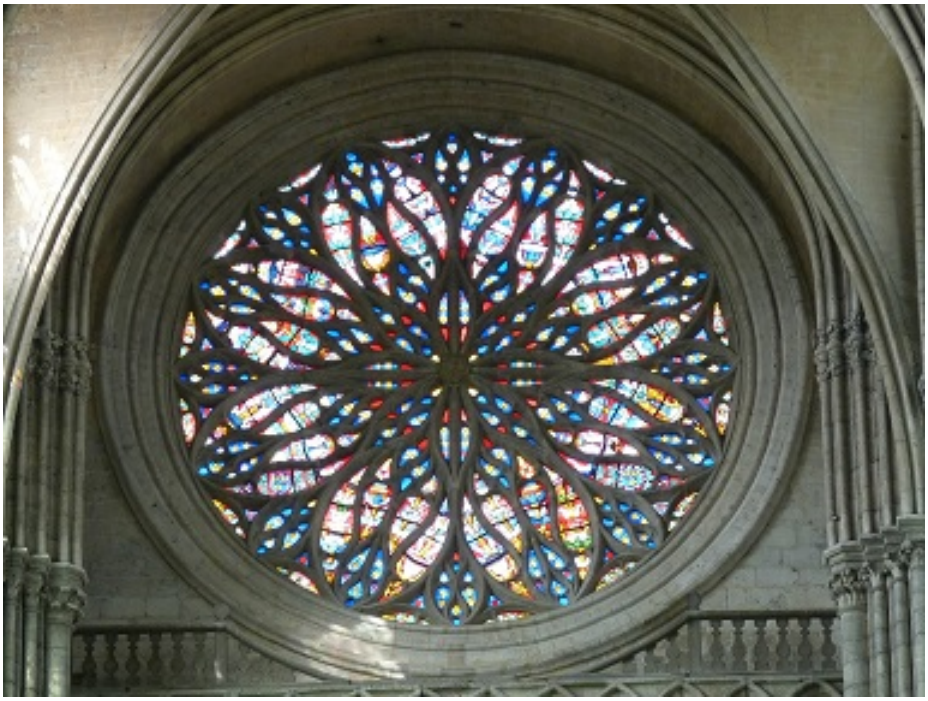


Figure 20 – Rosace de la façade principale (ouest)

Figure 21 – Rosace du collatéral nord

Figure 22 – Rosace du collatéral sud

Figure 23 – Stalles

Figure 24 – Chœur

Figure 25 – Tombeau du chanoine Guilain Lucas

B Photographies de Saint-Siméon-le-Stylite

Figure 26 – Restes de la colonne de Saint Siméon

Figure 27 – Vue oblique de l'église

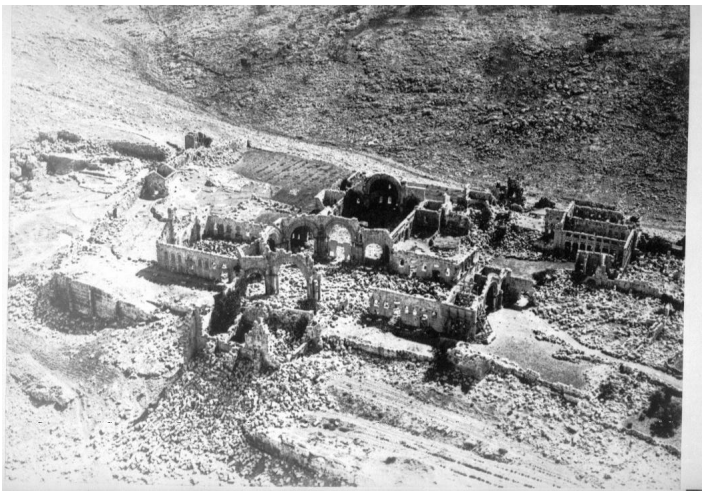


Figure 28 – Vue oblique de l'église

Figure 29 – Photographie aérienne de l'église

Figure 30 – Scanner laser pendant une acquisition

Monument	Nombre de stations	Nombre de scans
Baptistère	9	13
Citernes	13	26
Couvent nord-ouest	35	35
Couvent sud-est	54	54
Couvent sud-ouest	47	47
Église nord	8	8
Enceinte	4	30
Lapidarium	3	43
Martyrium	36	354
Monastère	11	115
Résidence	2	14

Figure 31 – Nombres de stations et de scans pour chaque monument étudié