



N° d'ordre :

École Doctorale Mathématiques, Sciences de
l'Information et de l'Ingénieur

UdS – INSA – ENGEES

THÈSE

Présentée pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Strasbourg
Discipline : Sciences de l'Ingénieur
Spécialité : Topographie-Géomatique

par

Hakim BOULAASSAL

Segmentation et modélisation géométriques de façades de bâtiments à partir de relevés laser terrestres

Soutenue publiquement le 03 février 2010

Membres du jury

Président : **M. Laurent POLIDORI**, Professeur, Titulaire de la Chaire de Géomatique du CNAM,
Directeur de l'ESGT

Rapporteur externe : **M. François GOULETTE**, Enseignant chercheur HDR, Mines ParisTech

Directeur de thèse : **M. Pierre GRUSSENMEYER**, Professeur des Universités, INSA de Strasbourg

Examineur : **Mme Tania LANDES**, Maître de Conférences, INSA de Strasbourg

MAP-PAGE

UMR-694

Remerciements

Je tiens à remercier la Région Alsace d'avoir permis le financement de cette thèse.

Mes remerciements vont également à Monsieur Pierre GRUSSENMEYER, pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire MAP-PAGE, pour son attention, son encadrement, ses conseils avisés et pour avoir accepté de diriger cette thèse.

Un grand merci à Madame Tania LANDES pour son travail d'encadrement et de correction, mené avec patience, et pour ses remarques pertinentes et constructives.

J'exprime ma reconnaissance envers les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer ce travail. Je remercie en particulier les rapporteurs de cette thèse, Monsieur Laurent POLIDORI et Monsieur François GOULETTE pour le regard critique qu'ils portent sur ce travail.

Mes vifs remerciements vont également aux membres et étudiants du laboratoire MAP-PAGE, tout particulièrement Majd, Chokri, Eva, Mostafa, Daniel, Bernard et Samuel, pour les moments passés ensemble et pour leur gentillesse.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à ma famille pour son soutien inconditionnel, ma mère pour sa confiance et ses prières tout au long de mes études ainsi que ma chère femme Anissa pour ses encouragements et son grand amour, et mes frères : Mohamed, Majid, Abel Aaziz et Tijani.

A ma nièce Ouassima et mes neveux Mohamed, Adil et Mohamed-Amine

Enfin, merci à toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Hakim BOULAASSAL

Résumé

La production de modèles 3D urbains tient une place prépondérante et grandissante dans le domaine de la photogrammétrie et de la vision par ordinateur. Les développements récents apportés aux scanners laser terrestres, tant en termes de rapidité d'acquisition qu'en termes de précision de mesure, laissent envisager de nouvelles problématiques de recherche relatives notamment à la modélisation des façades. Les données issues d'un scanner terrestre sont décrites par un ensemble de points définis dans un système de coordonnées cartésiennes en 3D.

Cette thèse propose une approche de segmentation et de modélisation géométriques de façades de bâtiments à partir de relevés laser terrestres. La chaîne de traitements répondant à cet objectif est composée d'une étape de segmentation suivie d'une étape de modélisation. Dans un premier temps, en supposant que les façades soient en général composées majoritairement de surfaces planes, une segmentation automatique procède à la décomposition du nuage de points en un ensemble de segments plans. On entend par « segment plan », un ensemble de points situés dans une zone tampon définie autour du plan. L'approche de segmentation extrait tout d'abord les segments plans à l'aide de l'algorithme RANSAC (RANdom SAMple Consensus). Comme la réalité n'est pas toujours compatible avec des modèles mathématiques, l'algorithme RANSAC a été optimisé et renforcé par un algorithme de croissance de région de façon à corriger les erreurs apparaissant lorsque des points se trouvent sur le même plan, mais qui décrivent des objets architecturaux différents.

Ensuite, à partir des résultats de segmentation, un algorithme de modélisation de façade a été développé. Celui-ci commence par extraire automatiquement les contours en s'appuyant sur le résultat d'une triangulation de Delaunay. Les contours ne sont, en réalité, que des points constituant les lignes caractéristiques esquissant les éléments de la façade. L'algorithme de modélisation s'appuie sur ces résultats pour produire un modèle vectoriel. Pour ce faire, les contours sont décomposés en arêtes droites et en arcs, en se basant sur le critère de colinéarité des points. La modélisation de l'ensemble des arêtes issues de la décomposition est réalisée grâce à l'étude de leurs caractéristiques géométriques, mais aussi de leurs relations de voisinage. À ce stade, on obtient un modèle vectoriel de chaque segment plan et des arêtes des éléments qui composent la façade.

Enfin, les résultats issus des algorithmes composant l'ensemble de la chaîne de traitements sont comparés à des données de références pour leur évaluation. Pour accéder à cette comparaison, des indices de qualité sont estimés. Il en ressort que la qualité des résultats dépend bien entendu des caractéristiques de l'objet numérisé et des données laser (degré de complexité des façades, taille des détails architecturaux, densité de points, résolution spatiale). Toutefois, les résultats obtenus sont satisfaisants et confirment la fiabilité de cette approche.

Mots clés : Nuage de points, segmentation, algorithme, façade, extraction, contours, primitive géométrique, modélisation.

Abstract

The production of 3D urban models is of high interest in the photogrammetric and computer vision fields. The recent developments made for terrestrial laser scanners, especially in terms of acquisition speed and measurement accuracy, lead to new research topics like for instance the modelling of 3D building facades. Data provided by a terrestrial laser scanner is made of points defined in a 3D Cartesian coordinate system.

This thesis proposes a geometric approach for segmentation and modelling of building facades using terrestrial laser scanner data. The processing sequence consists of a segmentation step followed by a modelling step. Firstly, by assuming that façades are mainly composed of planar surfaces, an automatic segmentation proceeds to the decomposition of the point cloud into a set of planar clusters. A “planar cluster” is a set of points located in a buffer zone around the calculated plane. The segmentation algorithm firstly extracts the planar cluster using the RANSAC algorithm (RANdom SAmple Consensus). Since reality is not always adjustable by mathematical models, the RANSAC algorithm has been optimized. So a region growing algorithm has been developed in order to correct errors occurring when points are on the same plane, but describe different architectural objects.

Then, based on the segmentation results, a façade modelling algorithm has been developed. It starts with the automatic extraction of façade contours based on the results of a Delaunay triangulation. The contours are composed by points describing the elements’ edges of the facade. Based on these results, the modelling algorithm produces a vector model of the façade. To do this, the contours are decomposed into straight and curved edges, based on the criterion of point’s collinearity. Then, the modelling of edges is performed based on the study of their geometric characteristics, as well as their topological relationships. At this level, a vector model of each planar cluster and of the edges that describe the façade elements is available.

Finally, to assess the results of the algorithms composing the entire processing sequence, they are compared to a reference. For this purpose, quality indices have been used. Obviously, the quality of the results depends on different façade types as well as point cloud characteristics (facade complexity, architectural details, size, point density, spatial resolution, etc.). The obtained results are satisfactory and confirm the reliability of the proposed approach.

Key words: Point cloud, segmentation, algorithm, façade, extraction, contours, geometric primitive, modelling.

Glossaire

Ensemble consensus : en anglais « *consensus set* », est un ensemble de points qui ajustent au mieux un plan préalablement initialisé par l'ensemble minimal composé de 3 points. Ces points appartiennent au plan avec une erreur inférieure ou égale à une tolérance prédéterminée (Fischler et Bolles, 1981).

GPS : en anglais « *Global Positioning System* », est un système mondial de positionnement par satellites. Il est composé de trois secteurs : un secteur spatial constitué d'un ensemble de satellites, un secteur de contrôle et le secteur utilisateurs (Duquenne *et al.*, 2005).

LASER : le terme laser est l'acronyme de « *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* » et signifie l'amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement. Le laser est une source exceptionnelle de rayonnement, capable de produire, dans des bandes spectrales extrêmement fines, d'intenses champs électromagnétiques cohérents dans l'intervalle spectral s'étageant de l'infrarouge lointain à l'ultraviolet (Maillet, 1984).

LIDAR : acronyme de « *Light Detection And Ranging* » détection et localisation par la lumière. C'est un dispositif qui, par la mesure du temps de propagation aller retour d'une radiation lumineuse émise par un laser, permet de déterminer la position et la distance d'une cible par rapport à l'émetteur (Paul *et al.*, 1982).

MNT : Modèle Numérique de Terrain, en anglais DTM (*Digital Terrain Model*). Il s'agit de la carte numérique du relief, constitué d'un semis de points de coordonnées tridimensionnelles connues, et éventuellement d'une loi d'interpolation (Polidori, 1997).

Modèle : « *Model* » ou « *pattern* » en anglais, est la représentation simplifiée et conceptualisée d'un ensemble de données, d'un processus, d'un système, en mode analogique ou en mode numérique (Conseil international de la langue française, 1997).

RADAR : acronyme de « *RADio Detection And Ranging* » détection et télémétrie par radioélectricité). C'est un appareil qui émet des impulsions très brèves, ou des ondes entretenues, de haute fréquence et reçoit l'écho de ces impulsions après leur réflexion sur des obstacles. La durée qui sépare l'émission de l'onde et sa réception permet de mesurer la distance entre l'antenne et la cible. L'intensité de l'écho du terrain est porteuse d'informations sur la nature des obstacles (Conseil international de la langue française, 1997).

Segment plan : en anglais « *planar cluster* », est un ensemble de points coplanaires à une tolérance près. Nous utilisons l'expression « segment plan » au lieu de « plan » étant donné qu'il est difficile, dans le contexte des plans de façades réelles et de la gestion de nuages de points, de trouver des plans au sens mathématique du terme.

Table des matières

REMERCIEMENTS	1
RESUME	2
ABSTRACT	3
GLOSSAIRE	4
TABLE DES MATIERES	5
LISTE DES FIGURES	8
LISTE DES TABLEAUX	11
INTRODUCTION	13
CONTEXTE ET CADRE DE LA THESE	13
PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS	14
ORGANISATION DU MANUSCRIT	17
1. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT DES SCANNERS LASER TERRESTRES	19
1.1 INTRODUCTION	20
1.2 BALAYAGE LASER STATIQUE.....	21
1.2.1 Principe du balayage laser	22
1.2.2 Nuage de points	23
1.3 CLASSIFICATION DES SCANNERS LASER TERRESTRES	24
1.3.1 Scanners laser à temps de vol	24
1.3.2 Scanners laser à mesure de différence de phase	26
1.3.3 Scanners laser à triangulation	28
1.4 CARACTERISTIQUES TECHNIQUES D'UN SCANNER LASER TERRESTRE.....	30
1.4.1 Résolution spatiale.....	30
1.4.2 Taille de l'empreinte laser	30
1.4.3 Portée	31
1.4.4 Vitesse de balayage	31
1.4.5 Champ de vision	31
1.4.6 Logiciel de traitements	31
1.5 PRESENTATION DU SCANNER LASER TERRESTRE TRIMBLE GX	31
1.6 CONCLUSION	32
2. SEGMENTATION ET MODELISATION DE FAÇADES A PARTIR DE DONNEES LASER TERRESTRES : ETAT DE L'ART	35
2.1 INTRODUCTION	36
2.2 CONSOLIDATION DE NUAGES DE POINTS	37
2.2.1 Principe de consolidation.....	37
2.2.2 Consolidation manuelle de nuages de points.....	38
2.2.3 Consolidation automatique de nuages de points.....	39
2.2.4 Conclusion sur la consolidation.....	43
2.3 SEGMENTATION D'UN NUAGE DE POINTS	43
2.3.1 Introduction	43

2.3.2	Segmentation basées sur le principe de fusion	45
2.3.3	Segmentation par reconnaissance de formes géométriques.....	53
2.3.4	Conclusion sur la segmentation.....	57
2.4	MODELISATION DES FAÇADES DE BATIMENTS	58
2.4.1	Principe de la modélisation par maillage.....	58
2.4.2	Principe de la modélisation géométrique.....	59
2.4.3	Etat de l'art sur l'étape de modélisation	59
2.4.4	Conclusion sur la modélisation.....	63
2.5	CONCLUSION DE L'ETAT DE L'ART	64
3.	SEGMENTATION AUTOMATIQUE DE FAÇADES DE BATIMENTS NUMERISEES PAR SCANNER LASER TERRESTRE	67
3.1	INTRODUCTION	68
3.2	DONNEES DE L'ETUDE	69
3.3	PRETRAITEMENT DU NUAGE DE POINTS	72
3.4	APPROCHE DE SEGMENTATION GEOMETRIQUE DEVELOPEE	76
3.4.1	Segmentation d'un nuage de points.....	76
3.4.2	Hypothèse de travail et formalisation	76
3.4.3	Principe et théorie du paradigme RANSAC	77
3.4.4	Extraction séquentielle des plans de façades	87
3.4.5	Critères de segmentation de façades de bâtiments.....	88
3.4.6	Connectivité des segments plans	94
3.4.7	Ajustement des paramètres du plan par les moindres carrés	97
3.5	CONCLUSION	99
4.	MODELISATION GEOMETRIQUE DES FAÇADES DE BATIMENTS	101
4.1	INTRODUCTION	102
4.2	EXTRACTION DU CONTOUR DES SEGMENTS PLANS	103
4.2.1	Calcul du plan moyen des segments plans	104
4.2.2	Triangulation de Delaunay en deux dimensions.....	105
4.2.3	Extraction des points de contours	106
4.3	VECTORISATION DES CONTOURS DES SEGMENTS PLANS.....	111
4.3.1	Classification des segments droits	111
4.3.2	Calcul des points d'intersection.....	113
4.3.3	Détermination des nœuds	114
4.4	GENERATION DES MODELES VECTORIELS 3D DES FAÇADES	118
4.4.1	Modèle 3D à partir de la combinaison des modèles vectoriels 2D.....	118
4.4.2	Modèle 3D par extrusion	121
4.5	CONCLUSION	122
5.	CONTROLE GEOMETRIQUE ET EVALUATION DES MODELES VECTORIELS 3D	125
5.1	INTRODUCTION	126
5.2	ERREURS AFFECTANT LES MESURES.....	127
5.2.1	Erreurs instrumentales	127
5.2.2	Erreurs provenant des caractéristiques de l'objet	127
5.2.3	Erreurs environnementales	128
5.2.4	Erreurs méthodologiques	128

5.3	PRECISION THEORIQUE DES MESURES ACQUISES PAR SCANNER LASER TERRESTRE	129
5.3.1	Précision angulaire	129
5.3.2	Précision de mesure de distance	129
5.3.3	Précision de mesure d'un point.....	129
5.4	PRECISION DU SCANNER LASER TERRESTRE TRIMBLE GX.....	131
5.4.1	Exactitude de la mesure de distance	131
5.4.2	Précision de mesure de distance et facteurs d'influence.....	133
5.4.3	Conclusion	135
5.5	EVALUATION DES RESULTATS DE LA SEGMENTATION	136
5.5.1	Introduction	136
5.5.2	Définition d'une référence par segmentation semi-automatique	136
5.5.3	Evaluation des résultats de la segmentation	140
5.5.4	Conclusion	147
5.6	EVALUATION DES RESULTATS DE LA MODELISATION	148
5.6.1	Introduction	148
5.6.2	Evaluation des contours.....	148
5.6.3	Evaluation du modèle vectoriel	149
5.7	CONCLUSION	163
	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	165
	CONCLUSION	165
	PERSPECTIVES	167
	BIBLIOGRAPHIE	169
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	169
	REFERENCES ISSUES D'INTERNET	177
	LISTE DES PUBLICATIONS	178
	PUBLICATION DANS DES REVUES :	178
	PUBLICATIONS DANS DES CONGRES :	178
	ANNEXES	179

Liste des figures

Figure 1.1. Principe de mesure des paramètres utiles au calcul des coordonnées 3D du point d'impact	21
Figure 1.2. Schéma explicatif du principe de balayage laser d'un objet balayé par un scanner laser stationné au sol.	22
Figure 1.3. Mode de balayage par scanner laser	23
Figure 1.4. Différences de résultats selon la densité de points choisie	23
Figure 1.5. Image et nuage de points d'une façade de l'INSA	24
Figure 1.6. Schéma des composantes d'un distancemètre à temps de vol	24
Figure 1.7. Principe de mesure de distance par mesure du temps de vol	25
Figure 1.8. Exemples de capteurs lasers terrestres à temps de vol	26
Figure 1.9. Principe de mesure de déphasage entre le signal émis et le signal reçu	27
Figure 1.10. Scanners laser à différence de phase	28
Figure 1.11. Principe de mesure de distance par triangulation	29
Figure 2.1. Processus couramment employés dans le traitement de données laser terrestres pour la modélisation tridimensionnelle	36
Figure 2.2. Relevé du lycée des Pontonniers ; chaque nuage de points issu d'une station est représenté par une couleur	38
Figure 2.3. Types de cibles employées avec le scanner Trimble GX	38
Figure 2.4. Recherche de points de correspondance sur deux courbes à consolider, à partir d'un processus ICP	40
Figure 2.5. Calcul des plans de chaque point et affectation d'une normale au plan, en chaque point	45
Figure 2.6. Schéma explicatif de la mesure de condition de coplanarité	46
Figure 2.7. Résultat de segmentation de façades d'un bâtiment après application de l'algorithme de croissance de surface.	46
Figure 2.8. Exemple de façade segmentée avec l'algorithme de croissance de région	47
Figure 2.9. Exemple de sur-segmentation	47
Figure 2.10. Résultat de l'ajout du critère de planéité globale des segments à l'algorithme de croissance de surface	48
Figure 2.11. Illustration de l'intérêt d'intégrer un critère de planéité globale	49
Figure 2.12. Séparation des profils verticaux d'une portion de façade de l'INSA de Strasbourg.	49
Figure 2.13. Segmentation de lignes de scan une segmentation possible	50
Figure 2.14. Résultat de la segmentation de données LIDAR par profils de scan	51
Figure 2.15. Deux niveaux de subdivisions selon la structure octree	52
Figure 2.16. Division du nuage de points de la façade de l'INSA de Strasbourg par un algorithme de division-fusion s'appuyant sur la structure octree	52
Figure 2.17. Cas de figure où les cubes sont voisins mais pas les plans qu'ils contiennent	53
Figure 2.18. Les deux espaces de la transformée de Hough	54
Figure 2.19. Scène industrielle composée de plans et de cylindres, segmentée à l'aide de la transformée de Hough	55
Figure 2.20. Résultat de l'extraction de plans de toit	56
Figure 2.21. Résultat d'extraction de surfaces planes avec RANSAC	57
Figure 2.22. Modélisation par maillage d'une partie de colonne	58
Figure 2.23. Exemple de modélisation géométrique	59
Figure 2.24. Extraction automatique des points composant une entité linéaire et modélisation manuelle d'une ligne caractéristique	60
Figure 2.25. Classification de points en 3 classes : les points de surface, les points des arêtes intérieures et les points des frontières	61
Figure 2.26. Génération d'un modèle numérique surfacique d'une façade de bâtiment	61
Figure 2.27. Décomposition cellulaire à l'aide des arêtes des ouvertures	62
Figure 2.28. Extraction de contours sur les images pour améliorer le niveau de modélisation des fenêtres	62

Figure 2.29. Modèle final issu d'une modélisation basée sur une décomposition cellulaire des éléments d'une façade	63
Figure 3.1. Schéma général de l'approche de segmentation développée	69
Figure 3.2. Scanner laser Trimble GX	70
Figure 3.3. Nuage de points coloré du Lycée International des Pontonniers, obtenu avec le scanner Trimble GX	71
Figure 3.4. Exemple de points indésirables : présence d'obstacles entre le scanner et la façade	73
Figure 3.5. Exemple de points fantômes situés derrière la façade	73
Figure 3.6. Résultat de la suppression manuelle des points indésirables du nuage de points brut	74
Figure 3.7. Résultats de la séparation automatique des points d'intérêt et des points indésirables	74
Figure 3.8. Zone tampon d'épaisseur ds définissant les points valables associés à un plan	82
Figure 3.9. Histogramme des fréquences et courbe de distribution statistique des distances algébriques des points au plan	83
Figure 3.10. Effets de la valeur seuil sur le nombre et la qualité des plans extraits par la méthode RANSAC	85
Figure 3.11. Segmentation de façade avec une valeur de seuil optimale ($ds= 0.025m$)	85
Figure 3.12. Organigramme présentant le principe RANSAC appliqué à la détection d'un plan à partir d'un nuage de points	86
Figure 3.13. Illustration du processus séquentiel d'extraction des plans principaux d'une façade de bâtiment	88
Figure 3.14. Profils de plans verticaux projetés sur le plan (XOY)	89
Figure 3.15. Photographie d'une portion de façade composée de plans sécants	90
Figure 3.16. Extraction de points appartenant à un même plan selon RANSAC, mais mal affectés	90
Figure 3.17. Rotation du nuage de points brut pour ramener la façade parallèle au plan OXZ	91
Figure 3.18. Détection des plans verticaux en rouge et horizontaux en bleu	92
Figure 3.19. Plans parallèles à la façade ; chaque couleur décrit un plan différent	92
Figure 3.20. Exemple d'erreur de connectivité de type surfacique pour une même façade	94
Figure 3.21. Exemple d'erreur linéaire	95
Figure 3.22. Image binaire générée à partir des points du plan	96
Figure 3.23. Image binaire segmentée en régions connectées ; une couleur correspond à une région.	96
Figure 3.24. Correction de l'extraction des plans principaux d'une façade	97
Figure 3.25. Ajustement des points au plan par les moindres carrés	98
Figure 4.1. Etapes essentielles de l'approche proposée pour la modélisation de façades de bâtiments	103
Figure 4.2. Organigramme de l'algorithme d'extraction de contours	104
Figure 4.3. Illustration d'un plan moyen calculé à partir d'un nuage de points 3D simulé	105
Figure 4.4. Triangulation de Delaunay avec représentation des cercles circonscrits	105
Figure 4.5. Superposition du diagramme de Voronoï et des triangles de Delaunay	106
Figure 4.6. Un exemple d'une façade triangulée montrant les arêtes longues	107
Figure 4.7. Graphique présentant les longueurs des arêtes des triangles de Delaunay, rangées dans l'ordre croissant.	108
Figure 4.8. Exemple de résultat de détection de contours intérieurs et extérieurs d'une façade	108
Figure 4.9. Extraction des points du contour d'un segment plan simple	109
Figure 4.10. Extraction simultanée des contours extérieurs et intérieurs sur une façade complexe	110
Figure 4.11. Extraction de contours sur une façade comportant des ornements architecturaux	110
Figure 4.12. Décomposition des contours d'un segment plan	112
Figure 4.13. Classification des segments droits selon leurs directions	112
Figure 4.14. Calcul des points d'intersection des segments droits horizontaux et verticaux	113
Figure 4.15. Segments droits horizontaux et verticaux décomposés en tronçons contigus	114
Figure 4.16. Détermination des points d'intersection entre segments droits	115
Figure 4.17. Etude de cas intervenant dans l'intersection d'un cercle et d'une droite	116
Figure 4.18. Détermination des points d'intersection d'arcs et de segments droits	117
Figure 4.19. Schéma illustrant les paramètres définissant un arc de cercle	117
Figure 4.20. Modèle vectoriel 2D des éléments d'un plan de façade	118

Figure 4.21. Résultats de la segmentation d'une série de 6 façades connectées, après application de l'approche de segmentation développée -----	119
Figure 4.22. Génération du modèle 3D des plans principaux des 6 façades segmentées par combinaison des modèles 2D de chaque plan-----	120
Figure 4.23. Modèle 3D de la façade après ajout des modèles des détails détectés, tels que des appuis de fenêtres ou la menuiserie extérieure -----	121
Figure 4.24. Résultat de l'extrusion des modèles vectoriels 2D-----	122
Figure 5.1. Position des piliers pour les tests de distances -----	132
Figure 5.2. Position des piliers pour les tests de distances effectués à l'INSA de Strasbourg-----	132
Figure 5.3. Panneau d'échantillons élaboré par l'équipe MAP-PAGE pour tester l'influence de divers matériaux sur la mesure laser-----	133
Figure 5.4. Interface graphique de segmentation semi-automatique-----	137
Figure 5.5. Exemple de fichier de points à importer dans l'interface de segmentation semi-automatique-----	138
Figure 5.6. Fichier de paramètres de 3 plans extraits semi-automatiquement -----	139
Figure 5.7. Les points restant après le retrait du premier plan du nuage de points -----	139
Figure 5.8. Exemple de résultat fourni par une segmentation semi-automatique de façade -----	140
Figure 5.9. Façade orientée sud-ouest de l'INSA de Strasbourg -----	141
Figure 5.10. Résultats de la segmentation automatique de la façade -----	142
Figure 5.11. Segmentation semi-automatique de la façade sud-ouest de l'INSA de Strasbourg-----	144
Figure 5.12. Segmentation automatique de la façade de l'INSA de Strasbourg -----	145
Figure 5.13. Extraction de points de contours automatiquement et manuellement -----	149
Figure 5.14. Superposition du nuage de points initial et du modèle vectoriel généré automatiquement-----	150
Figure 5.15. Schéma illustratif des opérations booléennes d'analyse spatiale entre deux ensembles de surfaces -----	151
Figure 5.16. Comparaison entre contours extraits automatiquement et manuellement -----	152
Figure 5.17. Superposition des points acquis avec une station totale Trimble 5600 DR au nuage de points acquis avec le scanner Trimble GX-----	154
Figure 5.18. Superposition de polygones modélisés et de référence, sur la façade du logement de fonction de l'INSA-----	155
Figure 5.19. Résolution spatiale par rapport à la détection contour-----	157
Figure 5.20. Schéma illustratif de « l'effet de masque » -----	159
Figure 5.21. Exemple de transmission d'erreurs en raison de masques, sur l'extraction de points de contours--	159
Figure 5.22. Modèle vectoriel de la façade de l'INSA généré par la modélisation des segments plans -----	160
Figure 5.23. Exemple de polygones voisins disjoints en raison de l'absence de points dans le nuage -----	161
Figure 5.24. Exemple de « matrice des 9 intersections » pour deux objets spatiaux géométriques -----	162
Figure 5.25. Exemple d'ombres dans le nuage créées par la présence d'obstacles situés entre la station et la façade du bâtiment -----	163
Figure 5.26. Fenêtres du 1 ^{er} et 2 ^{ème} étages modélisées suivant le même motif-----	163

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Comparaison des différents types de scanners _____	30
Tableau 3.1. Quelques spécifications techniques du scanner laser Trimble GX _____	70
Tableau 3.2. Résultats de l'élimination des points doubles _____	75
Tableau 3.3. Table de distribution chi-2 selon le degré de liberté et la valeur de la probabilité. ____	84
Tableau 3.4. Ecart-types obtenus pour 10 plans d'un nuage de 50 000 points _____	93
Tableau 5.1. Synthèse des imprécisions sur les distances causées par les caractéristiques de surface des objets numérisés. _____	135
Tableau 5.2. Tableau construit pour évaluer la qualité géométrique des segments plans extraits par l'algorithme de segmentation automatique. _____	143
Tableau 5.3. Tableau d'évaluation pour un échantillon de 10 segments plans. _____	145
Tableau 5.4. Paramètres de comparaison des plans extraits automatiquement et des plans de référence _____	147
Tableau 5.5. Indices de qualité utilisés pour quantifier la qualité de polygones modélisés _____	151
Tableau 5.6. Calcul des opérations ensemblistes entre les modèles de référence et automatiques __	153
Tableau 5.7. Indices de qualité obtenus sur un échantillon de 10 polygones _____	155
Tableau 5.8. Ecart entre coordonnées des sommets des polygones extraits automatiquement et ceux de référence _____	154

Introduction

Contexte et cadre de la thèse

Depuis plusieurs années, la communauté scientifique se penche sur le problème de la détection et de la reconnaissance d'objets urbains à partir de divers types de données, qu'il s'agisse d'images optiques aériennes ou satellites, de données LIDAR (de l'anglais *LIght Detection And Ranging*) ou encore d'images RADAR (*RAdio Detection And Ranging*). Un des objectifs de la détection d'objets urbains est de permettre à moyen terme l'enrichissement de bases de données gérées en général par les collectivités territoriales.

L'évolution rapide de la technologie amène les ingénieurs à réaliser des projets de plus en plus complexes et soumis à des contraintes de plus en plus sévères. Pour maîtriser ces projets, l'ingénieur a besoin de modèles qui lui permettent d'anticiper, souvent par simulation, le comportement de projets, tels que les ouvrages d'art. Après leur construction, l'ingénieur doit également être en mesure de suivre leur évolution. Dans le domaine de la modélisation 3D en milieu urbain, les données issues de LIDAR aéroportés suscitent depuis une vingtaine d'années une attention toute particulière. Elles sont en effet une source d'information précieuse non seulement pour la modélisation des toits de bâtiments, mais aussi pour la génération de modèles numériques de terrain (MNT). Néanmoins, si on considère exclusivement ces données, les bâtiments sont modélisés avec un niveau de description simplifié, surtout au niveau des façades. Pour aboutir à une description complète et pertinente des façades, les données LIDAR terrestres s'avèrent utiles. Elles participent, par le biais d'un nuage de points en 3D, d'une part au rendu réaliste et en relief de la façade et d'autre part à une meilleure compréhension de la représentation des objets urbains. Ainsi, l'information terrestre peut compléter, voire affiner les modèles issus du traitement de données laser aériennes.

Avec l'avènement des scanners laser terrestres 3D, l'accès direct à des données 3D acquises depuis le sol est facilité tant du point de vue du temps requis que du point de vue de la mise en œuvre de ces appareils. Les développements récents apportés aux scanners laser terrestres en termes de rapidité de mesure et de précision ont laissé entrevoir de nouvelles solutions liées à la modélisation des façades de bâtiments. En effet, un scanner laser permet une acquisition rapide et automatique de plusieurs milliers de points en 3D couvrant une surface large et complexe, indépendamment de son accessibilité, si les visées ne sont pas perturbées par des obstacles. Le résultat d'un balayage laser est un ensemble de points définis par leurs coordonnées 3D, appelé « un nuage de points ».

Comparée aux saisies que l'on peut qualifier de « ponctuelles » lorsque l'on utilise des appareils géodésiques conventionnels tels que des tachéomètres ou distancemètres, l'acquisition de données via un scanner laser peut être qualifiée de « surfacique ». En effet, le scanner balaye la surface de l'objet en générant une trame régulière - plus ou moins dense - de points sur l'objet. Ce balayage n'est pas guidé en général, donc un point considéré comme caractéristique sur la façade n'est pas forcément levé par le scanner. Même si la technique

semble révolutionnaire, elle ne peut remplacer aucune des méthodes topographiques conventionnelles, puisque chacune a des avantages et des inconvénients, qu'il faut savoir exploiter au mieux, en fonction des besoins exprimés dans le cahier des charges. Néanmoins, comme une façade est numérisée de façon quasi automatique avec un scanner laser, la détection automatique des contours des éléments de façade ainsi que leur modélisation est un enjeu de taille et devrait permettre de remplacer le relevé souvent plus laborieux effectué par tachéométrie.

La présente thèse a été réalisée au sein de l'équipe PAGE (Photogrammétrie Architecturale et GEomatique), adossée à la spécialité Topographie de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Strasbourg. L'équipe PAGE est l'une des cinq équipes de l'UMR 694 MAP (Modèles et simulations pour l'Architecture, l'urbanisme et le Paysage). Les problématiques abordées par l'UMR 694 MAP reposent sur l'élaboration de modèles et d'outils de simulation en architecture. Quatre thèmes sont couverts par les équipes de recherche rattachées à ce laboratoire : les outils numériques et le patrimoine architectural, le paysage comme totalité construite, les processus de production de bâtiments et le partage d'information sur Internet pour l'architecture. L'équipe du MAP-PAGE dirigée par M. Pierre Grussenmeyer, professeur des universités, est investie dans les axes de recherche portant sur la photogrammétrie et la modélisation tridimensionnelle d'objets topographiques et architecturaux. C'est dans ce dernier axe que s'inscrit le sujet de cette thèse intitulé : « Segmentation et modélisation géométriques de façades de bâtiments à partir de relevés laser terrestres ».

Problématique et objectifs

Le but de la modélisation tridimensionnelle de l'environnement urbain consiste à produire des modèles 3D complets et réalistes des objets le composant, modèles susceptibles d'être stockés et manipulés aisément, selon les besoins. La modélisation porte en général sur les espaces bâtis, notamment les bâtiments, et les espaces non bâtis tels que la végétation. La modélisation de bâtiments, à commencer par leurs toits, s'effectue par techniques de photogrammétrie ou de lasergrammétrie aérienne. Plusieurs travaux réalisés au sein du laboratoire confirment l'intérêt de ces données pour la modélisation automatique de bâtiments. Par exemple, les travaux de Tarsha-Kurdi Fayez, réalisés entre 2006 et 2008 au sein du laboratoire, ont porté sur l'extraction et la reconstruction de bâtiments en 3D à partir de relevés LIDAR aéroportés. Ils ont montré qu'une première étape indispensable consistait à segmenter automatiquement le nuage de points pour en extraire un masque de bâtiments. Ensuite, dans une deuxième étape, une chaîne de traitements a consisté à reconstruire automatiquement le bâtiment en 3D à partir de son toit. Cette chaîne de traitements aboutit à un modèle 3D de bâtiment témoignant d'un manque certain au niveau de la modélisation des façades. Longtemps, la modélisation des façades était réalisée par techniques de levés topographiques conventionnels, où seul un minimum d'éléments caractéristiques de la façade était relevé. Ensuite, des techniques de photogrammétrie terrestre ont vu le jour avant de faire place plus récemment aux scanners laser terrestres. Ces derniers présentent plusieurs

avantages comme évoqué précédemment, dont celui de fournir un nuage de points de la façade d'une manière directe et rapide.

Les données laser terrestres ne posent pas de problèmes particuliers au niveau de l'acquisition. Celle-ci est presque totalement automatisée, puisque seuls certains paramètres qui conditionnent les caractéristiques du balayage et donc des données à produire sont exigés de la part de l'opérateur. Si l'appareil peut être centré sur un point connu et orienté (exigeant alors aussi une intervention manuelle de la part de l'opérateur), le nuage pourra être géoréférencé directement. Si l'acquisition est assez aisée, la phase de traitement de ces données se révèle particulièrement délicate et nécessite de nombreuses réflexions. Il est vrai que les points numérisés constituent dans leur ensemble le modèle 3D de la surface qu'ils couvrent. Déjà au stade de nuage de points, le modèle de la façade est visualisable et analysable en 3D. Néanmoins, l'intégration et la gestion de ces données brutes dans des bases de données sont très lourdes vue l'énorme quantité de points qu'il s'agit d'importer. Pour cela, il est judicieux de prévoir des modèles alternatifs permettant de représenter aussi fidèlement que possible l'objet en question tout en réduisant la quantité de données à gérer. La modélisation géométrique du bâtiment à partir du nuage de points peut présenter une solution à ce problème dans la mesure où elle permettra le passage d'un modèle composé de points, indépendants les uns des autres, à un modèle surfacique composé d'un nombre réduit d'entités géométriques et liées entre elles par des relations topologiques. Ce modèle surfacique, plus léger et pertinent que le précédent, trouvera alors toute sa place, avec les attributs et paramètres susceptibles de le décrire, dans des systèmes d'information. Il peut ensuite être utilisé par exemple comme support pour des projets de réalité virtuelle ou comme interface d'archivage pour des données archéologiques ou architecturales. En outre, ce modèle peut venir compléter les modèles des villes en 3D issues des traitements de données LIDAR acquises par voie aérienne.

Cette thèse s'intéresse à l'aspect géométrique du modèle 3D d'une façade, celui-ci constituant un support de base pour intégrer ultérieurement d'autres informations telles que la sémantique architecturale des éléments ou la texture. Il permet d'une part de fournir des surfaces planes de la façade, et d'autre part de constituer un modèle filaire de la structure du bâtiment auquel des relevés de détails de façades peuvent être greffés. La communauté des architectes est également intéressée par la modélisation tridimensionnelle d'objets urbains patrimoniaux. Ses besoins en la matière se situent au niveau métrologique pour l'ensemble des recherches relatives à la représentation 3D du bâti, à sa conservation, à sa visualisation et à sa valorisation, mais aussi à l'inventaire et à l'archivage des informations patrimoniales architecturales.

Pour répondre à l'objectif fixé par le sujet de thèse, c'est-à-dire de développer une approche de segmentation et de modélisation géométrique tridimensionnelle de façades de bâtiments à partir de relevés effectués par scanner laser terrestre, deux questions se posent. Tout d'abord, quelle méthodologie employer pour produire un modèle géométrique d'une façade représentée par un ou plusieurs nuages de points ? Ensuite, quelle est la fiabilité de ce modèle géométrique ?

Ces questions permettent d'affiner les objectifs fixés, qui sont résumés dans les cinq points suivants :

- Proposer des opérations de prétraitements, indispensables à l'obtention de données cohérentes afin de réduire le bruit associé à la mesure et de fournir des données utiles aux prochaines étapes ;
- Développer une approche automatique de segmentation géométrique de nuages de points, afin de détecter des ensembles de segments de points partageant les mêmes caractéristiques géométriques et représentant les mêmes éléments de façade ;
- Reconstruire les lignes caractéristiques des détails architecturaux de la façade afin de fournir un modèle géométrique vectoriel de la façade ;
- Proposer des moyens d'évaluation des résultats obtenus à l'issue des différentes étapes de la chaîne de traitements ;
- Evaluer les modèles géométriques 3D de façades de bâtiments générés par l'approche développée.

Pour répondre à cette liste d'objectifs, une série d'algorithmes s'enchaînant dans un ordre bien défini a été développée. La séquence de traitements est résumée dans la Figure 1 et chaque étape fera l'objet d'explications détaillées dans ce mémoire.

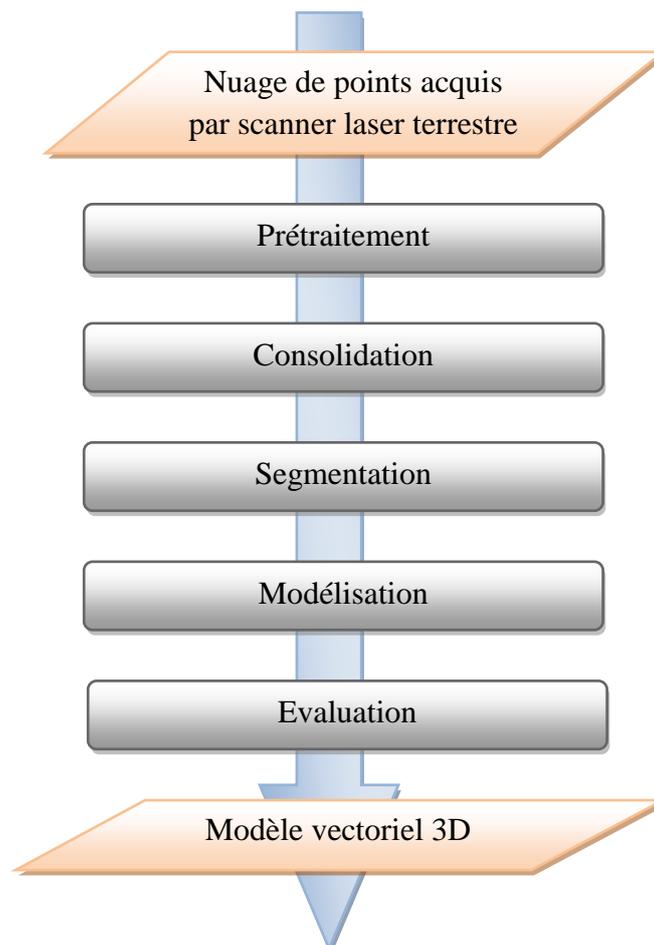


Figure 1. Etapes principales du processus menant à un modèle 3D géométrique de façades à partir de données laser terrestres

Organisation du manuscrit

Ce mémoire s'articule autour de cinq chapitres.

Le premier chapitre, axé principalement sur la phase d'acquisition, permet de rappeler des notions et de développer les concepts nécessaires à la compréhension des autres chapitres.

Le chapitre 2 est consacré à l'état de l'art qui se veut être une synthèse des travaux liés à la consolidation, à la segmentation et à la modélisation de données laser terrestres. L'ajout de texture n'est pas abordé dans cette thèse puisque seul l'aspect géométrique des modèles 3D est recherché dans un premier temps.

Le chapitre 3 aborde l'approche de segmentation géométrique proposée. Il s'agit d'une étape cruciale dans la chaîne de traitements puisqu'elle déterminera la géométrie du modèle final.

La segmentation suivie de la modélisation présentée dans le chapitre 4 constituent le cœur de cette thèse et seront donc particulièrement approfondies.

Enfin, le chapitre 5 présente l'évaluation des modèles géométriques 3D générés par les étapes précédentes. Des méthodes d'évaluation seront proposées pour chacune des phases de segmentation et de modélisation.

Enfin, une conclusion générale présentera un bilan de ces travaux et ouvrira une discussion sur des perspectives de recherche.

1

Principes de fonctionnement des scanners laser terrestres

Sommaire

1.1	INTRODUCTION	20
1.2	BALAYAGE LASER STATIQUE.....	21
1.2.1	Principe du balayage laser	22
1.2.2	Nuage de points	23
1.3	CLASSIFICATION DES SCANNERS LASER TERRESTRES	24
1.3.1	Scanners laser à temps de vol	24
1.3.2	Scanners laser à mesure de différence de phase	26
1.3.4	Scanners laser à triangulation	28
1.4	CARACTERISTIQUES TECHNIQUES D'UN SCANNER LASER TERRESTRE.....	30
1.4.1	Résolution spatiale.....	30
1.4.2	Taille de l'empreinte laser	30
1.4.3	Portée	31
1.4.4	Vitesse de balayage	31
1.4.5	Champ de vision	31
1.4.6	Logiciel de traitements	31
1.5	PRESENTATION DU SCANNER LASER TERRESTRE TRIMBLE GX	31
1.6	CONCLUSION	32

1.1 Introduction

Le balayage laser terrestre est une nouvelle technologie utilisée en géomatique pour l'acquisition de données spatiales. Elle fait parler d'elle puisqu'elle dispose d'un grand nombre d'atouts. Non seulement cette technologie permet la saisie rapide et automatique de données spatiales tridimensionnelles avec une densité très élevée, mais en plus elle ne nécessite pas de contact direct avec l'objet. Les données fournies par un scanner laser terrestre employé en mode statique ou mobile, semblent adaptées à la problématique de modélisation tridimensionnelle partielle ou totale d'objets du milieu urbain.

Malgré l'aspect révolutionnaire que veulent lui associer les constructeurs, la technique lasergrammétrique n'est pas prête à supplanter les techniques topographiques conventionnelles (levé par stations totales ou GPS par exemple), mais plutôt à les compléter. D'une manière brève et succincte, on peut situer le balayage laser terrestre 3D par rapport aux autres méthodes d'acquisition connues dans le domaine de la géodésie.

- **Techniques et méthodes topographiques classiques** : elles sont appropriées lorsqu'il s'agit d'acquérir des données avec une grande précision et que seule l'acquisition d'un nombre réduit de points est nécessaire ;
- **Techniques et méthodes de télédétection ou de photogrammétrie** : elles sont utilisées pour l'acquisition de scènes larges ou complexes lorsqu'un nombre plus important de points ou d'objets est requis. Les mesures sont faites sur la base de photographies, d'images satellites, aériennes ou terrestres ;
- **Techniques et méthodes lasergrammétriques** : elles sont utilisées pour la collecte d'un nombre conséquent de points 3D, en utilisant la lumière laser comme support d'information. Contrairement aux méthodes de topographie classique, l'acquisition signifie le balayage de surfaces entières, au lieu de l'acquisition de points individuels.

Les domaines d'application des techniques lasergrammétriques sont nombreux : conservation et restauration du patrimoine architectural et archéologique, visualisation 3D, modélisation d'équipements industriels, modélisation du milieu forestier, réalité virtuelle et augmentée, etc. L'engouement pour l'utilisation des scanners laser terrestres est essentiellement dû aux avantages qu'ils représentent par rapport aux autres techniques d'acquisition. En effet, la collecte d'information sans contact avec l'objet permet d'éviter de pénétrer dans des zones parfois dangereuses ou inaccessibles. Le rôle de l'opérateur s'en voit aussi bouleversé, puisqu'il n'est plus le guide de la mesure, mais intervient surtout en aval, une fois les données acquises. Du point de vue économique, ces appareils exigent des coûts relativement faibles pour la partie acquisition de données. En effet, en saisissant d'énormes quantités de données en un temps réduit, cela permet non seulement de gagner du temps mais aussi d'éviter des retours sur le terrain pour compléter certaines parties, comme c'est souvent le cas avec les autres techniques d'acquisition. En termes de livrables, les nuages de points peuvent servir à extraire divers types de produits (profils, coupes, MNS, MNT).

L'objectif de ce chapitre est de décrire certains éléments fondamentaux du balayage laser terrestre et de donner un aperçu des principaux systèmes présents sur le marché. Il a pour souci d'évoquer les points essentiels à la compréhension de la suite du mémoire. Pour cette raison, il ne traitera que du balayage laser terrestre effectué à partir d'une station fixe. Le lecteur se reportera à l'Annexe (A.1) pour un aperçu du principe général de l'acquisition de données laser terrestres à partir d'une plateforme mobile. Ainsi, dans la suite de ce document, on sous-entendra par balayage laser terrestre, sauf mention contraire, le balayage laser statique.

1.2 Balayage laser statique

Le balayage laser terrestre statique permet de mesurer directement, selon une trame régulière, les coordonnées tridimensionnelles des points sur des surfaces à partir d'une position terrestre statique (Pfeifer, 2007). Les scanners émettent un rayonnement laser à des fréquences élevées permettant l'acquisition de plusieurs milliers de points dans un laps de temps très court. Les mouvements nécessaires aux déplacements du rayon laser sont mesurés avec précision et permettent d'acquérir un positionnement précis dans l'espace de tous les points d'impact du laser (Figure 1.1). Ces mesures d'angles horizontaux, verticaux et de distances obliques sont effectuées respectivement à l'aide d'encodeurs angulaires et d'un distancemètre. Le scanner laser capte aussi l'intensité de chaque impulsion et si en plus il est doté d'une caméra vidéo, à chaque impulsion laser peuvent être associés des comptes numériques pour les composantes rouge, vert, bleu (RVB).

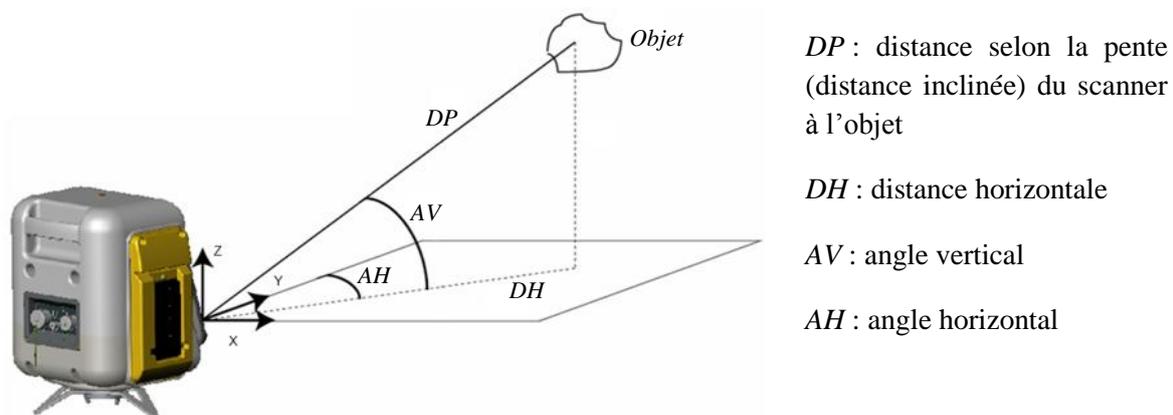


Figure 1.1. Principe de mesure des paramètres utiles au calcul des coordonnées 3D du point d'impact

La position des points d'impact sur l'objet, dans le repère du scanner, dont l'origine est définie par le centre du scanner (intersection de l'axe principal et de l'axe secondaire), est fonction des paramètres mesurés (voir Figure 1.1), selon l'équation 1.1.

$$\begin{cases} X = DP * \cos(AV) * \sin(AH) \\ Y = DP * \cos(AV) * \cos(AH) \\ Z = DP * \sin(AV) \end{cases} \quad (1.1)$$

Où : DP : distance selon la pente entre le centre du scanner et l'objet
 AV : angle vertical
 AH : angle horizontal

Comme pour d'autres appareils géodésiques tels que les distancemètres, les scanners laser se servent de la lumière laser pour mesurer les distances. Cette lumière laser est exploitée par les topographes depuis les années 1960 (Shan et Toth, 2008). Elle a été intégrée à des appareils basés sur le principe de calcul de distance par mesure du temps de vol mais aussi à des appareils procédant au calcul de déphasage. Pour les rappels théoriques relatifs à la technologie laser, le lecteur se reportera à l'Annexe (A.2). Le paragraphe ci-après explique à travers un exemple synthétique le mode de fonctionnement d'un scanner laser terrestre statique.

1.2.1 Principe du balayage laser

Afin d'illustrer le processus du balayage laser terrestre, prenons une cible composée d'un cube posée sur un plan, sur le point d'être scannée par un scanner laser stationné sur un trépied au sol. Le scanner enregistre la distance et les deux angles horizontaux et verticaux, pour ensuite calculer les coordonnées cartésiennes des points d'impact dans le repère du scanner (Figure 1.2). Seules les coordonnées des points intéressent en général l'utilisateur, mais il est possible de retrouver les observations de distances et d'angles effectivement enregistrées en fichier de mesures brutes (Alshawa *et al.*, 2009).

Le balayage s'effectue suivant un pas angulaire vertical et horizontal fixés par l'opérateur. Pour les scanners procédant à l'acquisition des données par profils verticaux tels que le Trimble GX, le pas angulaire vertical définit la distance entre deux points successifs sur un profil vertical, tandis que le pas angulaire horizontal définit la distance entre deux profils verticaux voisins. Les coordonnées polaires des points ainsi mesurés (dans le référentiel du scanner) sont enregistrées dans une matrice échantillonnée selon les pas angulaires et dont les comptes numériques représentent les distances observées (Figure 1.3). En anglais, cette matrice est appelée « *range image* » (Pfeifer, 2007).

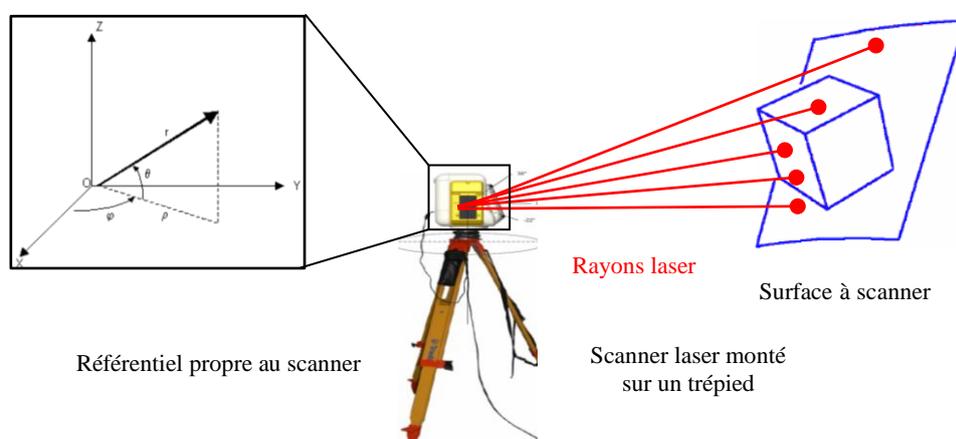


Figure 1.2. Schéma explicatif du principe de balayage laser d'un objet balayé par un scanner laser stationné au sol.

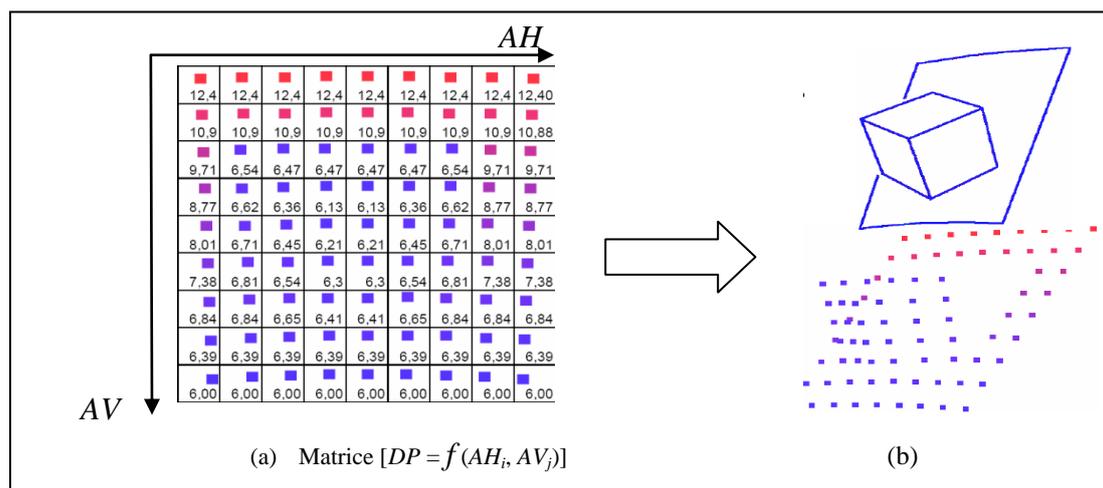


Figure 1.3. Mode de balayage par scanner laser ; a) matrice de pixels dont les comptes numériques représentent la distance station-objet ; b) résultat affiché en tant que nuage de point en 3D (Pfeifer, 2007).

Le nombre de points acquis par unité de surface définit la densité du nuage de points. Plus le pas angulaire est petit, plus la distance séparant deux points successifs est petite et donc plus la densité est forte (Figure 1.4). Ainsi, pour une même surface, plus la résolution est petite (densité forte), plus les points décrivent fidèlement l'objet scanné (Figure 1.4c).

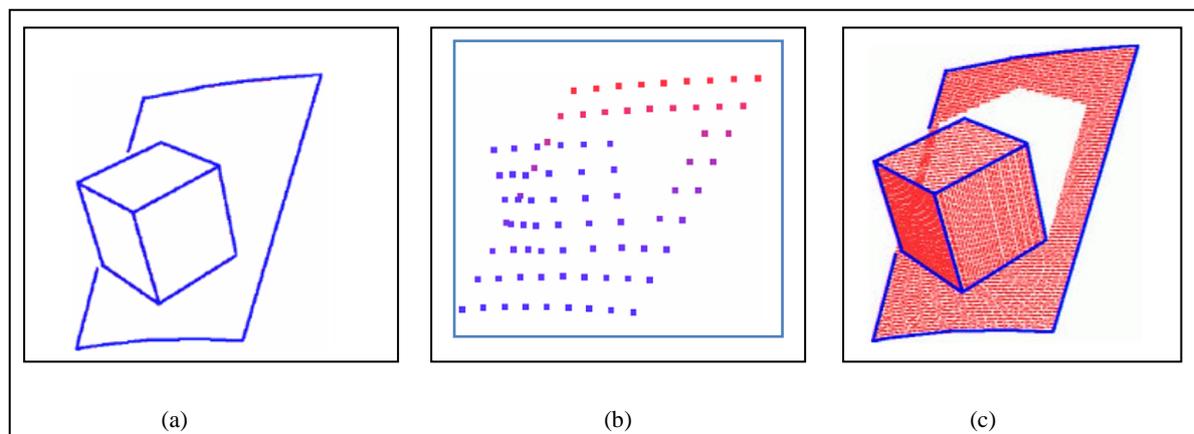


Figure 1.4. Différences de résultats selon la densité de points choisie : a) objet à scanner ; b) balayage avec faible densité de points; c) balayage avec forte densité de points (Pfeifer, 2007).

Ainsi, le niveau de détail livré par le nuage de points est directement corrélé à la résolution spatiale choisie, donc à la densité des points.

1.2.2 Nuage de points

En anglais « *point cloud* », le nuage de points désigne un ensemble tramé, représentant les points tridimensionnels mesurés par le scanner laser sur la surface de l'objet relevé. Chaque point est donc référencé par ses coordonnées (x, y, z) dans le repère du scanner. Le balayage laser terrestre permet un enregistrement de millions de points dans un laps de temps très court. Il en résulte des nuages de points très denses, mais souvent très volumineux. Si on attribue à chaque point numérisé les valeurs RVB (rouge, vert, bleu) issues d'images numériques

correctement recalées sur le nuage, ce dernier reflètera d'une manière réaliste l'objet scanné et s'apparentera à une image photographique couleurs (Figure 1.5).

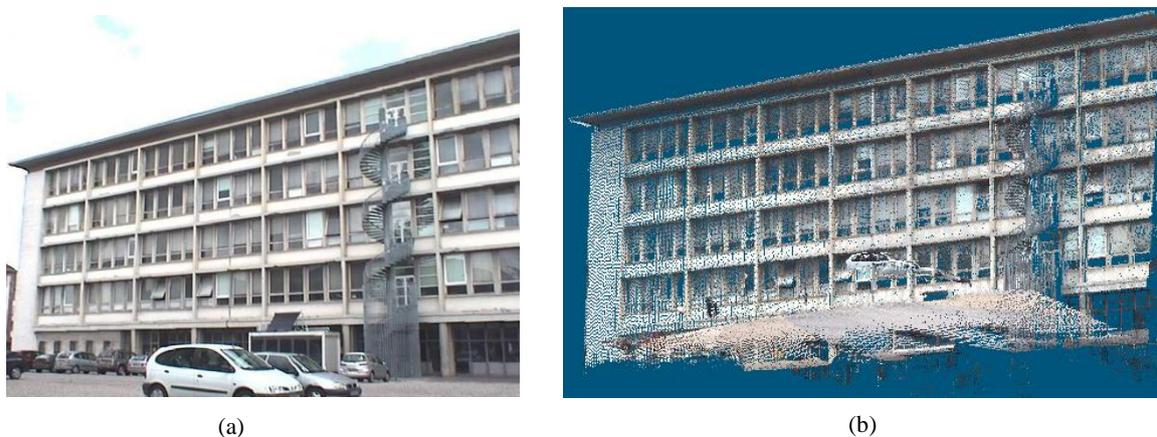


Figure 1.5. Image et nuage de points d'une façade de l'INSA : a) photographie ; b) nuage de points coloré obtenu avec le scanner laser Trimble GX

Après cette brève description du mode de fonctionnement et de mesure d'un scanner laser terrestre statique, il est intéressant de présenter les différentes technologies disponibles sur le marché.

1.3 Classification des scanners laser terrestres

Les scanners laser terrestres peuvent être classifiés selon des principes de télémétrie en trois grandes catégories : les scanners à mesure de temps de vol, à mesure de différence de phase et à triangulation.

1.3.1 Scanners laser à temps de vol

Les scanners laser à temps de vol sont équipés de distancemètres, qui emploient en général les composantes présentées dans la Figure 1.6, à savoir un émetteur laser (en général il s'agit d'un laser solide comme évoqué en Annexe (A.2)), un récepteur laser, une horloge pour mesurer le temps, un émetteur et un récepteur optique.

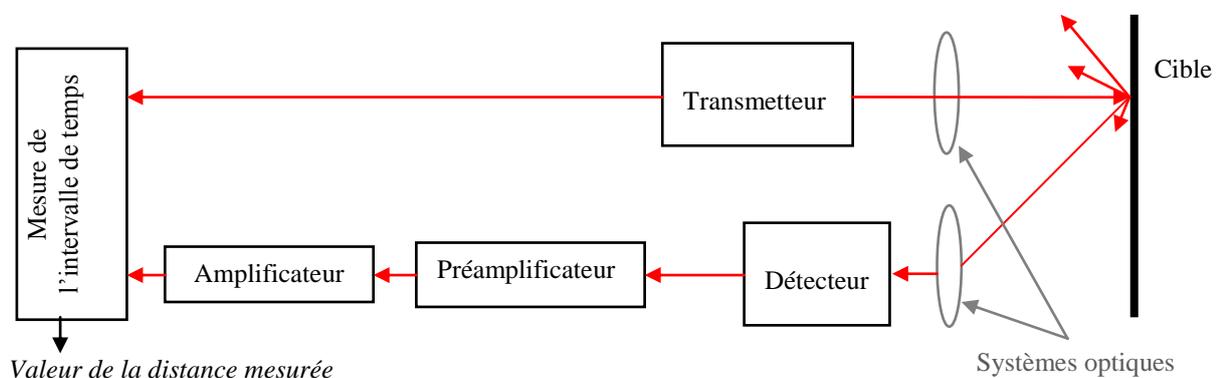


Figure 1.6. Schéma des composantes d'un distancemètre à temps de vol (Reshetyuk, 2006, modifié).

Cette technologie utilise la mesure du temps de parcours d'une impulsion laser entre le scanner et le point d'impact sur l'objet visé (Figure 1.7). Les dispositifs de mesure sont ensuite associés à un système mécanique (miroir oscillant actionné par un moteur) permettant le balayage de l'objet.

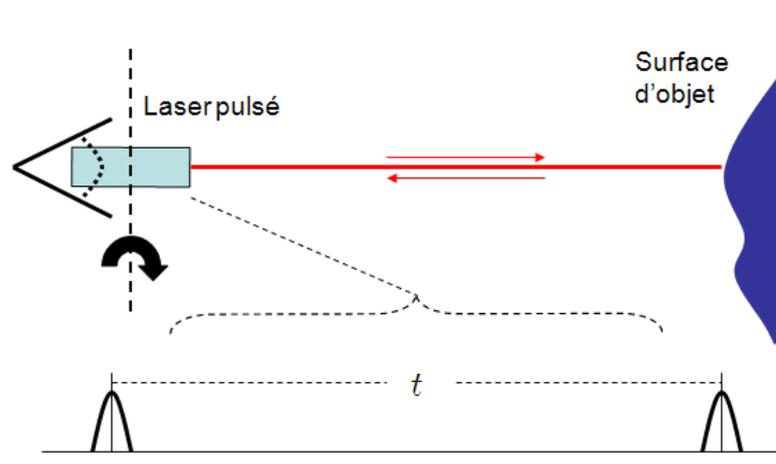


Figure 1.7. Principe de mesure de distance par mesure du temps de vol (@mensi)

Le temps de parcours émetteur-objet effectué par le rayon laser entre dans la formule du calcul de distance suivante:

$$D = v * \frac{t}{2} \quad (1.2)$$

Où :

D : distance mesurée
 v : vitesse de la lumière
 t : temps de parcours

Si l'on ne tient pas compte du fait que la taille de l'empreinte lumineuse augmente avec la distance, on peut dire que la précision de mesure de distance est quasiment indépendante de la valeur de la distance mesurée (Lerma Garcia *et al.*, 2008). Par contre elle dépend de la puissance du signal réfléchi, qui dépend à son tour de la réflectivité de l'objet.

A partir de la formule (1.2) et en considérant la vitesse de la lumière comme constante, on peut écrire que la résolution de la distance mesurée selon ce principe est dépendante de la résolution de temps. En d'autres termes, la capacité à mesurer de faibles intervalles de distances est directement dépendante de la capacité à mesurer de petits intervalles de temps (équation (1.3)), comme l'explique (Baltsavias, 1999a).

$$\Delta D = v * \frac{\Delta t}{2} \quad (1.3)$$

Où :

ΔD : variation sur la distance mesurée
 v : vitesse de la lumière
 Δt : variation sur le temps mesuré

Ainsi, la précision de la mesure de distance dépend fortement de la précision de mesure du temps. Cela représente le grand inconvénient des distancemètres à temps de vol. Par exemple, si on souhaite mesurer un écart en distance d'un millimètre, il faut disposer d'une horloge capable de mesurer une durée de :

$$t = \frac{2D}{v} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^8} = 6.7 \text{ ps.}$$

Il est difficile de mesurer avec précision un tel temps de parcours, du moins avec une technologie simple et peu coûteuse. Pour contourner ce handicap, certains constructeurs utilisent une diode laser pulsée (Trimble par exemple). L'envoi d'un grand nombre d'impulsions pour observer un même point permet de diminuer l'écart-type de la mesure de distance, en considérant la moyenne des distances observées. Par exemple, le scanner Trimble GX donne la possibilité d'effectuer plusieurs tirs par point mesuré (de 1 à 25 tirs par points). Bien évidemment, plus on augmente le nombre de tirs par point plus le temps d'acquisition est long. Par ailleurs, il faut bien sûr avoir conscience du fait que cette précision n'est pas indéfiniment améliorée avec l'augmentation du nombre de tirs, en raison des erreurs systématiques entachant forcément les observations. Des études au sein du laboratoire ont montré que le choix de 9 tirs par points permettait d'atteindre le meilleur rapport qualité/temps. La Figure 1.8 présente 3 modèles de scanners lasers terrestres basés sur des distancemètres à temps de vol.

En raison des inconvénients cités précédemment, la mesure de distance par mesure du temps de vol de l'impulsion laisse parfois la place à une autre méthode basée sur la mesure du déphasage de l'onde retour par rapport à l'onde aller.



Figure 1.8. Exemples de capteurs lasers terrestres à temps de vol : de gauche à droite : LEICA HDS2500, RIEGL LMS Z90, TRIMBLE GX (d'après @leica, @riegl et @trimble)

1.3.2 Scanners laser à mesure de différence de phase

D'après (Maillet, 1984), la mesure de distance par comparaison de phase consiste à diriger vers l'objet le faisceau d'un laser continu, de forte intensité, modulé de façon sinusoïdale, et à comparer les phases des ondes émises avec celles des ondes retour. La différence de phase entre le signal émis et le signal reçu est mesurée à l'aide d'un phasemètre numérique (Shan et Toth, 2008).

La mesure de la distance s'effectue par comparaison de la modulation émise avec celle reçue après le parcours aller-retour (Figure 1.9).

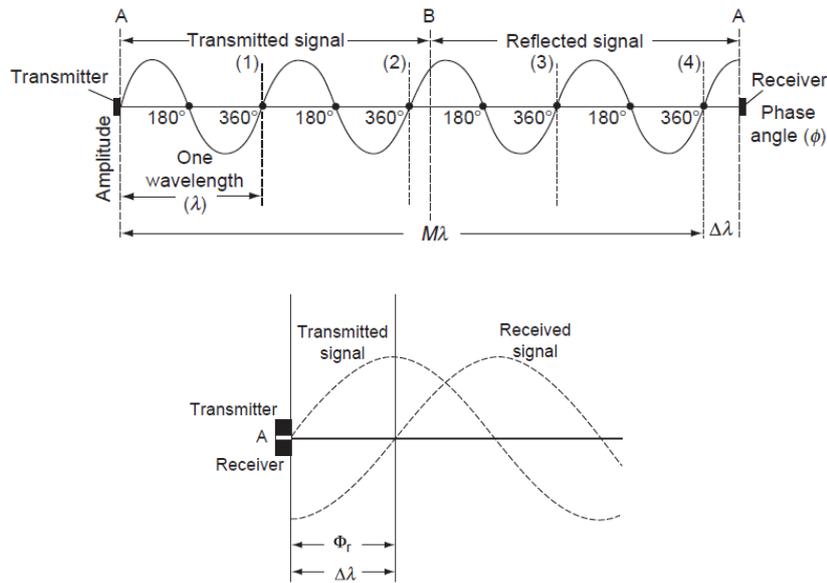


Figure 1.9. Principe de mesure de déphasage entre le signal émis et le signal reçu (Shan et Toth, 2008).

Si la modulation est réalisée à la fréquence f , on peut lui associer une longueur d'onde de modulation λ . La modulation consiste à associer, à l'onde émise appelée également onde porteuse, une onde dont on peut repérer l'état à l'émission puis à la réception ; c'est en quelque sorte un repère imprimé que la porteuse transporte avec elle (Maillet, 1984).

Lorsque le trajet total parcouru est égal à un nombre exact de longueurs d'onde λ de modulation, les ondes comparées ont la même phase. Par contre, si la distance est différente, on constate une différence de phase $\Delta\varphi$. Si on note D la distance station-objet, alors la distance parcourue par le rayon laser sera égale à $2xD$ et pourra s'écrire comme étant égale à un nombre N de longueurs d'onde plus un excédent d (équation 1.4).

$$2D = N\lambda + d \quad (1.4)$$

Dans la formule (1.4), le déphasage intervient à travers d :

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} \quad (1.5)$$

Donc la distance D séparant le scanner de l'objet pourra s'écrire :

$$D = \frac{N\lambda}{2} + \frac{\lambda\Delta\varphi}{\pi} \Leftrightarrow D = \frac{c}{f} \left(\frac{N}{2} + \frac{\Delta\varphi}{\pi} \right) \quad (1.6)$$

Avec :

$\Delta\varphi$: différence de phase mesurée par le phasemètre
 f : fréquence de l'onde modulée
 c : célérité de la lumière
 N : nombre entier de longueurs d'onde le long du trajet du rayon laser

Le problème consiste, à présent, à compter le nombre entier N de longueurs d'onde nécessaire au parcours aller-retour pour en déduire la distance D . On appelle cela « résoudre l'ambiguïté » sur la distance. A moins de connaître approximativement la distance à mesurer, une détermination unique ne permet pas de connaître la valeur de N . Pour lever cette indétermination sur N , plusieurs méthodes existent. La méthode des fréquences emboîtées s'appuie sur l'utilisation des fréquences de modulation différentes. Une autre solution consiste à émettre successivement un grand nombre de fréquences assez voisines pour que N ne change pas à chaque fois. Il s'agit de la méthode des fréquences proches. Les deux méthodes sont expliquées en Annexe (A.4). La Figure 1.10 présente deux exemples de scanners laser utilisant un distancemètre à différence de phase.



Figure 1.10. Scanners laser à différence de phase ; de gauche à droite : FARO LS (@FARO) ; Z+F IMAGER 5006i

Ce type de scanner laser est adapté aux mesures de courtes à moyennes distances (portées inférieures à 100 m) et fournissent des distances plus précises pour des courtes portées que les scanners laser à temps de vol.

La mesure de distances peut aussi être effectuée par triangulation, terme qui fait référence à la manière dont les géomètres opéraient pour résoudre un triangle et déterminer la position d'un sommet en particulier.

1.3.3 Scanners laser à triangulation

Ces scanners calculent la distance sur le principe d'une triangulation. Cette technique repose sur l'observation d'un point émis par une diode laser à l'aide d'un système optique récepteur, décalé par rapport à l'émetteur. Les trois éléments (le point d'impact (P), l'émetteur (A) et la caméra (B)) forment un triangle dont suffisamment de grandeurs sont connues pour en

déduire les inconnues (voir Figure 1.11). En effet, les caractéristiques géométriques du faisceau émis ainsi que les positions respectives de l'émetteur et du récepteur sont connues ; ajoutées à l'observation de la position du point sur l'objet mesuré, elles permettent de déterminer précisément par trigonométrie la position de ce point dans le repère du scanner.

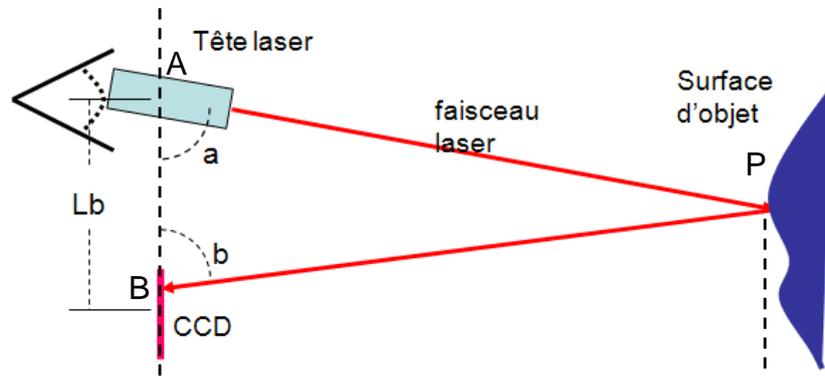


Figure 1.11. Principe de mesure de distance par triangulation (@mensi)

Le capteur fait appel à un faisceau laser de faible puissance réfléchi par un miroir mobile. Comme l'indique la Figure 1.11, une caméra avec dispositif à transfert de charge CCD (*Charge Coupled Device*) acquiert l'image du point sur l'objet. Le scanner mesure alors les deux angles de déflexion a et b et calcule la distance D_{AP} à un point P de l'objet à l'aide de la relation suivante (Maillet, 1984) :

$$D_{AP} = Lb * \frac{\sin(b)}{\sin(a+b)} \quad (1.7)$$

Avec:

D_{AP} : distance inclinée entre la source laser et le point P situé à la surface de l'objet

Lb : longueur de base séparant le rayon émis et le rayon réfléchi

a : angle entre le rayon émis et l'axe vertical

b : angle entre le rayon réfléchi et l'axe vertical

Le défaut principal de cette technique est que la précision se dégrade proportionnellement au carré de la distance. Cette spécificité retenue, nous en déduisons que les scanners laser à triangulation se destinent essentiellement à la mesure des courtes distances (jusqu'à 40 m pour le scanner laser Soisic de Mensi par exemple).

Pour conclure, le Tableau 1.1 présente une comparaison des différentes technologies de scanners présentées ci-dessus. Ce tableau a été réalisé sur la base des travaux de (Gim@ et i3mainz@).

	Précision sur les distances	Portée (en m)	Vitesse d'acquisition	Utilisation
Scanners à triangulation	1 mm à 1 m	de 1 à 50	100 à 500 points/s	pièces de petite taille principalement
Scanners à mesure de temps de vol	7 mm à 50 m 1 cm à 100	de 1 à 1200	De 100 à 7000 points/s	travaux topographiques (à longues portées)
Scanners à mesure de différence de phase	6 mm à 50 m 1 cm à 100 m	de 1 à 80	De 100 000 à 500 000 points/s	travaux topographiques (à courtes portées)

Tableau 1.1. Comparaison des différents types de scanners (d'après Gim@ et i3mainz@)

Une autre classification des scanners laser peut se faire sur la base de la surface que les scanners sont en mesure de couvrir, donc sur leur champ de vision. Elle est présentée dans l'Annexe (A.5).

1.4 Caractéristiques techniques d'un scanner laser terrestre

Les spécifications de précision indiquées par les constructeurs de scanners laser peuvent être atteintes, mais généralement dans des conditions idéales. Les expériences montrent cependant que ces précisions surestiment souvent celles atteintes dans des conditions réelles. De plus, elles varient d'un instrument à l'autre et dépendent de l'étalonnage et du soin avec lequel les instruments sont manipulés. Il est difficile d'estimer la précision de chaque point d'un levé effectué par un capteur laser. On doit donc considérer l'ensemble des caractéristiques qui peuvent influencer la qualité des données produites par les appareils utilisés. Bien entendu, les précisions sur les mesures d'angles et de distances sont des caractéristiques importantes, car elles influent sur la précision de positionnement des points du nuage. C'est pourquoi ces paramètres seront vus en détail dans le chapitre 5 consacré à l'évaluation des résultats. D'autres caractéristiques méritent toutefois d'être citées dès maintenant, telles que la résolution spatiale, la taille de l'empreinte laser, la portée, la vitesse de balayage, le champ de vision et les fonctions proposées dans les logiciels associés.

1.4.1 Résolution spatiale

Du point de vue de l'utilisateur, la résolution spatiale d'un scanner laser caractérise sa capacité à détecter de petits objets ou des détails sur l'objet. D'un point de vue technique, la résolution spatiale du scanner laser est liée à deux paramètres (Boehler et Marbs, 2005) :

- le plus petit intervalle angulaire qu'il soit capable de mesurer.
- la taille de l'empreinte laser sur l'objet.

1.4.2 Taille de l'empreinte laser

Le terme d'empreinte laser est couramment remplacé par son homologue anglais « *spot* » laser. Il représente l'empreinte du faisceau laser sur l'objet à numériser. Sa taille dépend de l'ouverture du dispositif mais aussi de la divergence du faisceau laser. Evidemment, la taille

de l’empreinte laser déterminera la taille des objets susceptibles d’être distingués dans le nuage de points. Deux détails ponctuels, situés tous deux dans la même empreinte d’un faisceau laser, ne pourront pas être résolus.

1.4.3 Portée

La portée représente la distance maximale que le scanner laser terrestre est capable de mesurer avec fiabilité. Elle dépend du type de scanner utilisé (à temps de vol, à différence de phase ou à triangulation) mais aussi de la nature de la lumière laser utilisée. Comme évoqué plus haut, les scanners déduisant la mesure de distance par triangulation ou par différence de phase sont plus appropriés pour travailler à courte portée, tandis que les scanners à temps de vol sont plus adaptés à la mesure de longues distances.

1.4.4 Vitesse de balayage

Elle se définit en nombre de points acquis en l’espace d’une seconde. On note que la vitesse des scanners laser à temps de vol (impulsions) est déterminée par la fréquence d’émission des impulsions. La vitesse de balayage dépend du système et de la technologie utilisés.

1.4.5 Champ de vision

Le champ de vision correspond à l’intervalle angulaire horizontal et/ou vertical qu’un scanner laser terrestre est capable de balayer. Les scanners « panoramiques » permettent de relever l’environnement complet autour de la station tandis que les scanners « caméras » sont limités à des champs étroits (voir Annexe A.5).

1.4.6 Logiciel de traitements

En plus des caractéristiques liées directement au scanner laser, le logiciel d’acquisition et de traitement accompagnant l’appareil est de grande importance. Si l’acquisition par scanner laser est souvent bien automatisée, ce n’est pas encore le cas pour les procédures de traitement du nuage de points. Un logiciel efficace de traitement pourra donc être considéré comme un atout supplémentaire au scanner laser terrestre.

1.5 Présentation du scanner laser terrestre Trimble GX

Les nuages de points traités au cours de cette thèse ont été acquis avec un scanner laser Trimble GX, que l’équipe MAP-PAGE a pu acquérir début 2006, grâce à une subvention de la Région Alsace. Il est important de situer ce scanner par rapport aux autres scanners de même type et au regard des caractéristiques techniques énumérées ci-dessus. La fiche technique complétée de ce scanner se trouve dans l’Annexe (A.3), mais les principales caractéristiques sont résumées ci-dessous.

Le scanner laser Trimble GX fonctionne sur le principe des distancemètres à temps de vol. Il appartient donc à la première catégorie des scanners si on considère la classification faite selon le principe de télémétrie. Il est équipé de deux miroirs rotatifs. Le premier miroir tourne selon l’axe vertical, le second selon l’axe horizontal. Des encodeurs permettent de mesurer les

angles de rotation des miroirs afin de déterminer les coordonnées 3D des points numérisés. Le laser utilisé a une longueur d'onde de 532 nm, qui correspond au domaine du vert visible. Il s'agit d'un laser de classe II, donc non nocif (cf. Annexe A.2.3).

Du point de vue du champ de vision, ce scanner appartient à la classe des scanners hybrides. En effet, il est capable d'acquérir des données selon un champ de vision de 360° dans le plan horizontal et 60° dans le plan vertical (38° au-dessus de la ligne d'horizon, et 22° en dessous). Sa vitesse de scan peut atteindre 5000 points/s, mais en situation réelle avec 9 tirs/point, on atteint en moyenne 500 points par seconde. Il est capable de fonctionner de 2 m jusqu'à 200m de l'objet, voire jusqu'à 350 m en activant un mode spécifique appelé « *overscan* ».

Le scanner est doté d'un autofocus garantissant une empreinte laser de petite taille à la surface de l'objet, quelle que soit la portée. Il faut noter que la taille de l'empreinte laser varie de 0.3 mm à une portée de 5 m à 1.5 mm à 25 m. Ces données sont cohérentes associées à une résolution spatiale de 3.2 mm à 100 m. Le constructeur Trimble GX annonce que la précision de mesure d'un point unique est de 12 mm à 100 m, sachant que la précision de mesure de distance atteint 7 mm sur des portées de 100m. La précision de mesure d'angle horizontal et vertical est située entre 12" (60 μ rad) et 14" (70 μ rad).

Une des caractéristiques très appréciables du scanner laser Trimble GX est qu'il peut être centré sur une station connue et être orienté par rapport à des points de référence. Il peut donc s'intégrer à un cheminement polygonal comme un tachéomètre. Par conséquent, ce scanner peut fournir des nuages de points directement géoréférencés, ce qui évite les procédures de consolidation entre nuages comme on le verra au chapitre 2.

En plus de la mesure laser, une caméra vidéo permet l'enregistrement de différentes vues de la scène ce qui est non seulement très utile pour définir la fenêtre d'acquisition, mais aussi pour représenter le nuage de points avec un attribut de couleur.

1.6 Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif de décrire les principes essentiels du balayage laser terrestre en mode statique. Différentes technologies, classifiées selon le mode de mesure de distance ont été présentées et leurs avantages et inconvénients ont été soulignés. Le système utilisé au cours de cette thèse, le scanner laser Trimble GX, a ensuite été positionné par rapport à ces différentes technologies. Un certain nombre de caractéristiques, entre autres la précision de mesure de distance, le champ de vision, la portée minimale et maximale, la vitesse de balayage, sont variables suivant les systèmes et doivent être prises en compte lors du choix de la technologie répondant le mieux à la problématique posée. Ces caractéristiques seront développées davantage dans le chapitre 5 lorsque les erreurs associées aux données fournies par les scanners laser terrestres seront étudiées.

Ce chapitre a montré que les scanners à temps de vol sont recommandés pour les levés à moyennes et à longues portées. Le scanner laser Trimble GX a été choisi non seulement en raison de la portée à laquelle il est capable de travailler, mais aussi en raison des possibilités de géoréférencement direct des nuages. Son champ de vision est probablement l'inconvénient

majeur pour l'acquisition de façades, car il limite l'acquisition d'objets de grande élévation ou nécessite une prise de recul importante par rapport à la façade.

Les principes fondamentaux régissant le relevé par scanner laser et les caractéristiques de ces instruments ont été décrits. A présent, il est nécessaire de se pencher sur la tâche succédant la collecte des données, à savoir celle de leur traitement et de leur exploitation. Le chapitre suivant est donc consacré à l'inventaire des expériences acquises et des investigations effectuées par la communauté scientifique, notamment pour les phases de segmentation et de modélisation de données laser terrestres.

2

Segmentation et modélisation de façades à partir de données laser terrestres : état de l'art

Sommaire

2.1	INTRODUCTION	36
2.2	CONSOLIDATION DE NUAGES DE POINTS	37
2.2.1	Principe de consolidation.....	37
2.2.2	Consolidation manuelle de nuages de points.....	38
2.2.3	Consolidation automatique de nuages de points.....	39
2.2.4	Conclusion sur la consolidation.....	43
2.3	SEGMENTATION D'UN NUAGE DE POINTS	43
2.3.1	Introduction	43
2.3.2	Segmentation basées sur le principe de fusion	45
2.3.3	Segmentation par reconnaissance de formes géométriques.....	53
2.3.4	Conclusion sur la segmentation.....	57
2.4	MODELISATION DES FAÇADES DE BATIMENTS	58
2.4.1	Principe de la modélisation par maillage.....	58
2.4.2	Principe de la modélisation géométrique.....	59
2.4.3	Etat de l'art sur l'étape de modélisation	59
2.4.4	Conclusion sur la modélisation.....	63
2.5	Conclusion de l'état de l'art	64

2.1 Introduction

Certes, les systèmes laser terrestres permettent d'acquérir des données riches en information spatiale et dans un laps de temps très court comparé aux méthodes topographiques conventionnelles. Néanmoins, le traitement manuel de ces données requiert un temps considérable, d'où la nécessité de développer des procédures automatiques permettant de tirer profit de ces données, notamment en matière de modélisation tridimensionnelle.

Vues la complexité et la forte densité des nuages de points résultant d'un balayage laser, les chercheurs ont compris très tôt que l'exploitation directe de ces données dans un objectif de modélisation était loin d'être évidente. En effet, la génération de modèles 3D à partir de données laser exige le passage par plusieurs étapes. La Figure 2.1 résumé les étapes principales composant les deux processus de traitements de données laser terrestres les plus couramment utilisés pour produire des modèles 3D de bâtiments.

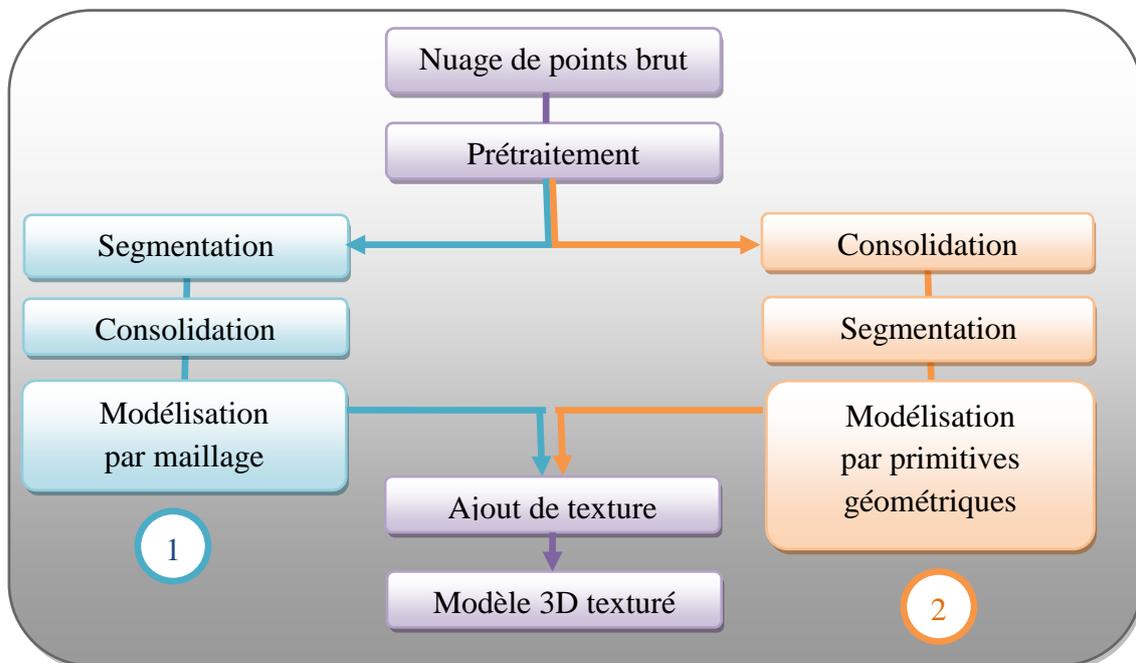


Figure 2.1. Processus couramment employés dans le traitement de données laser terrestres pour la modélisation tridimensionnelle ; 1) modélisation par maillage ; 2) modélisation par primitives

Le premier processus consiste à trianguler les points dans l'objectif de construire des facettes esquissant l'allure générale de la surface scannée. Cette opération est appelée « maillage ». Sa finalité consiste à passer d'un espace discontinu, le nuage de points, en un espace continu, la surface maillée. Le deuxième processus, quant à lui, essaie de décomposer le nuage de points selon des propriétés de similitude formant des sous-groupes de points homogènes avant de passer à leur modélisation via des primitives géométriques. On peut citer un troisième processus, que l'on peut qualifier d'« hybride » et qui combine les deux précédents, pour profiter des avantages associés à chacun d'eux.

Ce chapitre est consacré à l'établissement d'un état de l'art relatif aux étapes menant à la modélisation tridimensionnelle d'objets de type façade, à partir de données laser terrestres, en mode statique. Chaque étape de l'organigramme présenté dans la Figure 2.1 constitue un sujet de recherche en soi, c'est pourquoi le second processus composé de l'étape de consolidation, segmentation et modélisation par primitives a été choisi, car il est en concordance avec les objectifs fixés dans cette thèse. Cet état de l'art se veut faire une synthèse des travaux ayant permis de mettre en place l'approche développée dans ce travail. L'étape de la consolidation automatique de nuages de points n'est pas étudiée dans cette thèse, néanmoins une recherche bibliographique a été menée sur ce sujet. L'état de l'art sera donc décomposé en trois parties. La première fera une synthèse bibliographique des travaux de consolidation, la seconde traitera en profondeur le sujet de la segmentation, et enfin, la dernière analysera les travaux existant dans le domaine de la modélisation tridimensionnelle. La question de l'ajout de textures sera évoquée dans les perspectives.

Avant d'entamer l'état de l'art relatif à l'opération de consolidation, il est utile de présenter brièvement l'intérêt d'une consolidation ainsi que les techniques de consolidation déjà commercialisées.

2.2 Consolidation de nuages de points

2.2.1 Principe de consolidation

Il arrive souvent qu'un objet ne puisse pas être numérisé à partir d'une seule station. En effet, pour le couvrir sous toutes ses faces, plusieurs points de vue différents sont nécessaires. Ceci est dû à des raisons multiples. Soit le champ de vision du scanner est limité, soit l'objet est de dimension importante, soit il est d'architecture complexe, ou encore, il se peut que des obstacles empêchent la visée directe et génèrent des masques sur la surface à scanner. Les nuages de points résultant de ces stations multiples sont définis chacun dans un repère relatif au scanner laser. Il faut donc regrouper dans un même système de coordonnées l'ensemble des nuages de points acquis depuis les différentes stations. Cette opération est désignée par le terme de « consolidation » (« *registration* » en anglais). C'est une opération qui peut être réalisée de manière manuelle ou automatique.

La Figure 2.2 illustre les nuages de points colorés selon les stations et couvrant une partie du bâtiment principal du lycée des Pontonniers de Strasbourg. La couverture de l'objet et le recouvrement entre les différents nuages acquis à partir de différentes stations sont ainsi mis en évidence.

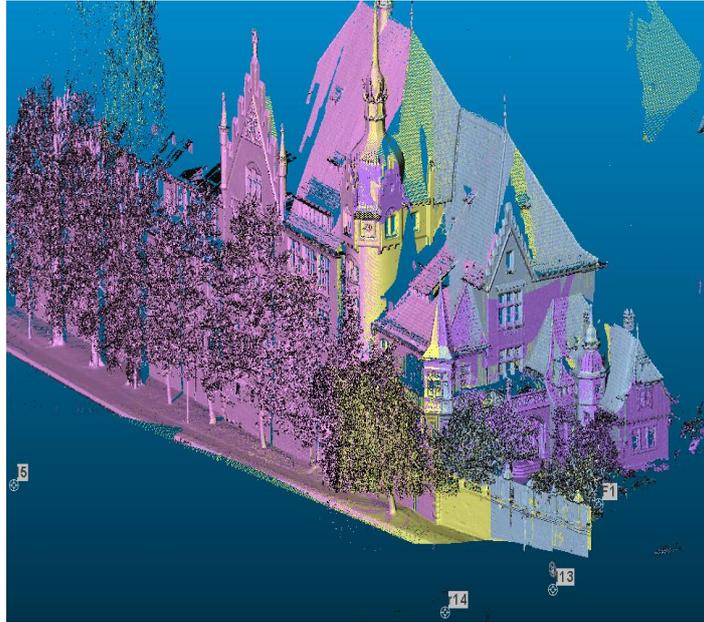


Figure 2.2. Relevé du lycée des Pontonniers ; chaque nuage de points issu d'une station est représenté par une couleur (Queste, 2006).

2.2.2 Consolidation manuelle de nuages de points

La consolidation peut se faire par l'identification de points homologues dans les deux nuages de points à consolider. Pour cela, l'opérateur doit sélectionner au minimum trois paires de points homologues dans les deux nuages de points à consolider. Ensuite, les valeurs compensées des paramètres de la transformation peuvent être calculées. L'erreur de consolidation représente la distance moyenne subsistant entre les deux nuages de points. La plupart des logiciels commerciaux mettent à disposition un module de consolidation. Les points homologues peuvent être des éléments remarquables de la scène scannée, ou plus communément des cibles réfléchissantes aux caractéristiques physiques bien identifiées par le logiciel de traitement des données. Les Figures 2.3a et 2.3b présente les deux types de cibles associées au scanner Trimble GX.

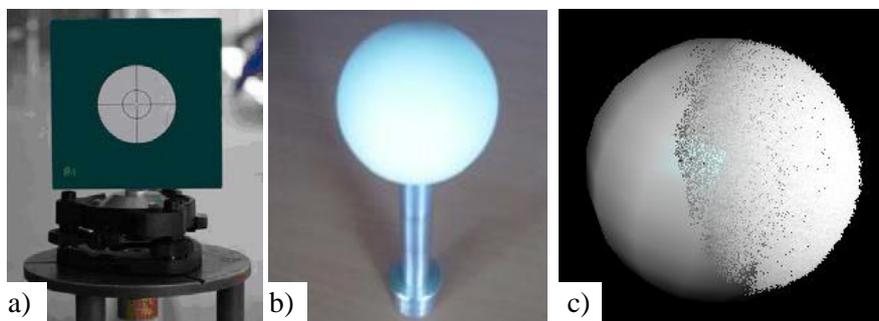


Figure 2.3. Types de cibles employées avec le scanner Trimble GX ; a) cible plane ; b) sphère ; c) sphère modélisée sur la base du nuage de points la couvrant

Pour les deux cibles, le logiciel d'acquisition du nuage identifie leurs centres qu'il utilise ensuite comme points de correspondance entre les nuages à consolider. Lors de l'acquisition, on veillera à ce qu'il y ait au moins trois cibles visibles depuis deux stations à consolider. Un nombre plus élevé de cibles est cependant souhaitable pour pallier d'éventuelles erreurs de mesure.

Une autre méthode de consolidation consiste à mesurer avec grande précision des points caractéristiques apparaissant dans le nuage de points, à l'aide d'un tachéomètre par exemple. Ces points de référence serviront de base à la consolidation. La précision de mesure des cibles et la répartition de ces cibles dans l'espace influenceront la précision de consolidation des nuages de points.

En parallèle à la consolidation manuelle, il existe des méthodes de consolidation automatique.

2.2.3 Consolidation automatique de nuages de points

Dans un souci d'automatisation, les chercheurs tentent de concevoir des algorithmes répondant à la question de consolidation sans avoir recours à l'intervention humaine. Le principe de la consolidation automatique (ou consolidation 3D/3D) consiste à trouver automatiquement un certain nombre de points « homologues » dans les nuages de points que l'on envisage de consolider. A partir de ces points, les valeurs compensées des paramètres de transformation (rotation et translation) sont calculables. Pour des raisons de redondance et de gain de précision, il convient de prendre en compte plus de points communs, voire tous les points de l'objet présentant des formes géométriques caractéristiques.

Les premières méthodes furent proposées dès 1992 par (Chen et Medioni, 1992). Ils suggèrent l'utilisation de surfaces tangentes pour réaliser la consolidation. (Besl et McKay, 1992) proposent une méthode plus efficace que la précédente. Elle permet de considérer des points, des lignes, des courbes comme éléments homologues, grâce à leur algorithme connu sous le sigle « ICP » (*Iterative Closest Point*). Depuis, plusieurs variantes de cet algorithme ont été publiées. Ainsi, on peut considérer deux familles de méthodes destinées à consolider un nuage : les méthodes procédant par correspondance entre points et celles basées sur la correspondance entre entités géométriques.

2.2.3.1 Méthodes basées sur la correspondance entre points

Parmi les méthodes basées sur la correspondance entre points, on peut citer les deux plus courantes qui sont la méthode ICP et la méthode DARCES.

2.2.3.1.1 Méthode ICP

La méthode ICP (*Iterative Closest Point*), proposée par (Besl et McKay, 1992), est probablement la méthode la plus fréquemment employée par les logiciels permettant de réaliser une consolidation automatique entre deux modèles de données géométriques. Par cette méthode, la consolidation est possible quelle que soit la nature des données géométriques (points, courbes de degrés différents, surfaces). Elle cherche à minimiser la distance entre deux nuages, point à point, par itérations successives. De la même manière

qu'en photogrammétrie, la consolidation exige de connaître des points « homologues » dans les différents nuages. Cependant, trouver des points « homologues » n'est pas possible si l'on considère des nuages de points (données discrètes). On préférera parler de « points de correspondance ». Si l'algorithme ne les trouve pas, il tente de remplacer le point de correspondance par le point le plus proche, d'où le nom de la méthode. La Figure 2.4 montre un exemple de recherche de points de correspondance entre deux courbes.

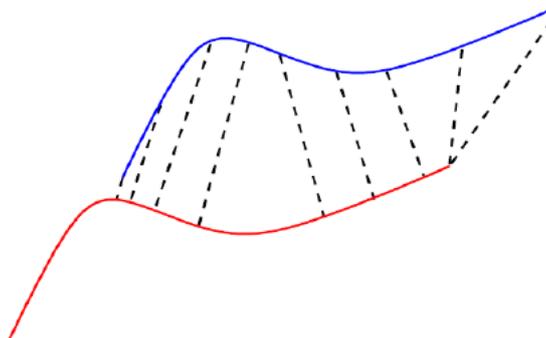


Figure 2.4. Recherche de points de correspondance sur deux courbes à consolider, à partir d'un processus ICP (les correspondances sont présentées en traits pointillés)

(Besl et McKay, 1992) ont étudié les relations mathématiques nécessaires pour définir le point le plus proche spatialement (appartenant à un ensemble géométrique) d'un autre point connu. Par exemple, ils considèrent que la distance entre un point et un ensemble de points est définie par la distance minimale entre ce point et chaque point de l'ensemble. Le point de l'ensemble qui permet le calcul de ce minimum sera considéré comme étant le plus proche.

Supposons que R soit la matrice de rotation et que T soit le vecteur de translation. La fonction f à minimiser est décrite par l'équation 2.1 (Besl et McKay, 1992).

$$f(R, T) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \|x_i - R \cdot p_i - T\|^2 \quad (2.1)$$

Avec :

R : matrice de rotation

T : vecteur de translation

N_p : nombre de points du nuage le moins dense, situés dans la zone de recouvrement

x_i : un point du nuage « modèle »¹

p_i : son homologue dans le nuage « observé »²

Une fois ces paramètres calculés, le nuage « observé » sera transformé, et on peut réappliquer les étapes précédentes de manière itérative jusqu'à ce que les distances ne dépassent plus un

¹ Le nuage « modèle » est le nuage de référence considéré comme fixe pendant les transformations de l'ICP

² Le nuage « observé » est le nuage qui subit les transformations de l'ICP (rotation+translation) pour s'aligner avec le nuage modèle.

certain seuil. Pour pouvoir résoudre, par les moindres carrés, le système surdéterminé que représente l'équation 2.1, on procède tout d'abord à la linéarisation de cette équation puis on applique le principe des moindres carrés. Pour cela il est possible d'utiliser la minimisation non linéaire de Levenberg-Marquardt (Fitzgibbon, 2001) ou bien la technique de décomposition en valeurs singulière (SVD pour *Singular Value Decomposition*) proposée par (Arun *et al.*, 1987) ou encore celle des quaternions (Horn, 1987).

Les inconvénients principaux de la méthode de l'ICP dans sa forme originale sont d'une part qu'elle converge vers un minimum qui risque d'être faux, surtout lorsqu'il existe beaucoup de bruit dans les données. D'autre part, un grand nombre d'itérations est nécessaire à la convergence du modèle. Plusieurs solutions constituant les variantes de l'ICP ont été mises en œuvre pour surmonter ces inconvénients. (Gefland *et al.*, 2003) ont critiqué le fait de prendre en compte tous les points de correspondance car cela n'améliore pas les résultats. Alors ils ont proposé une solution consistant à ré-échantillonner le nuage, ce qui accentue la complexité géométrique de la scène et par conséquent accélère la convergence et affine l'alignement entre les deux nuages de points.

(Krebs *et al.*, 1996) ont reconstruit la méthode ICP fondée sur la logique floue, en introduisant à chaque itération une fonction d'appartenance basée sur le calcul des distances des points à transformer par rapport aux points du nuage « modèle ». Cette fonction fonctionne de façon idéale lorsqu'il s'agit de reconnaître un objet de forme connue dans un nuage de points. On trouve encore des méthodes qui adoptent le même principe que l'algorithme ICP mais en améliorant les fonctions à minimiser (Mitra *et al.*, 2004 ; Li et Wang, 2008).

En dépit de toutes les études qui essaient de trouver automatiquement les valeurs initiales de l'algorithme ICP et d'accélérer sa convergence, sa variante répandue en milieu industriel reste encore semi-automatique, en laissant la main à l'utilisateur pour sélectionner trois points homologues dans deux nuages à consolider. Avec ces points de départ, il est possible de calculer une transformation rigide initiale pour ensuite démarrer les itérations.

2.2.3.1.2 Méthode DARCES

Cette méthode connue sous le nom de DARCES (*Data-Aligned Rigidity-Constrained Exhaustive Search*) est proposée par (Chen *et al.*, 1999). Elle est destinée particulièrement aux traitements des données 3D pour lesquelles le recouvrement est partiel. Pour chercher les points de correspondance dans les deux nuages, cette méthode profite des avantages de l'algorithme RANSAC. En effet, cet algorithme commence par le choix aléatoire d'un triplet de points dans le nuage « observé ». Il calcule les paramètres de la sphère passant par ces trois points. Ensuite, il cherche les points, dans le nuage « modèle », qui appartiennent à la même sphère.

Lorsque ce triplet est déterminé, on peut calculer les paramètres de la transformation et chercher par la suite le nombre de points qui appartiennent au nuage « modèle ». Ce nombre est appelé le nombre de chevauchement (*overlapping number*) et doit atteindre un maximum au cours de la procédure itérative de l'algorithme. C'est le seul indice sur lequel on puisse s'appuyer pour valider la transformation. L'algorithme cesse donc les itérations lorsque ce

critère atteint son maximum. Bien entendu, les points du triplet ne doivent être ni trop proches ni trop espacés l'un de l'autre. Le choix aléatoire du triplet de points et du nombre d'itérations permettant de juger que les deux nuages sont bien consolidés est assuré par l'algorithme RANSAC dont le principe est détaillé dans le chapitre 3. L'avantage majeur de cet algorithme est qu'il permet une consolidation 3D en intégrant des contraintes géométriques dans un intervalle de temps réduit comparé aux autres méthodes.

La méthode DARCES repose sur l'hypothèse qu'il y a toujours des triplets de points de correspondance dans les deux nuages considérés. Or, cela n'est pas toujours le cas, notamment si l'on acquiert des nuages avec des résolutions spatiales et angulaires différentes. C'est pourquoi il est souvent nécessaire de fixer une tolérance d'appartenance assez large, ce qui peut conduire à des résultats imprécis. Néanmoins, s'ils manquent de précision, ces résultats peuvent tout de même être utilisés comme une première approximation des inconnues pour d'autres algorithmes (comme l'ICP vue précédemment).

En parallèle aux méthodes recherchant des points de correspondance dans les nuages à consolider, la littérature regorge aussi d'exemples d'algorithmes qui appuient leur consolidation sur la recherche d'entités géométriques homologues.

2.2.3.2 Méthodes basées sur la recherche d'entités géométriques

Les méthodes basées sur les entités géométriques ont pour objectif de chercher non plus des points, mais des entités géométriques homologues dans deux nuages à consolider, de type sphères, cylindres, droites par exemple. Ces méthodes supposent une reconnaissance préalable des entités géométriques de l'objet ou de l'ouvrage scanné. Cette reconnaissance doit être assez précise car la qualité de la consolidation automatique en dépendra par la suite.

Il faut rappeler que ces méthodes ne sont pas indépendantes de celles basées sur la reconnaissance de points de correspondance. En effet, la recherche de points de correspondance se fait souvent après avoir extrait les entités géométriques recherchées. C'est pourquoi, on peut considérer ces méthodes comme une extension des méthodes mentionnées ci-dessus.

L'avantage principal des méthodes basées sur les entités géométriques est qu'elles permettent de créer plus de paramètres facilitant l'établissement et le calcul des inconnues de la transformation. Un autre avantage réside dans le fait que ces méthodes n'exigent pas de valeurs approchées pour initialiser la transformation. Toutefois, leur handicap peut se révéler lors du manque de détails locaux proéminents ou saillants. S'ajoute à cet inconvénient celui du temps de traitement nécessaire pour extraire les entités et pour les sauvegarder.

On peut distinguer les méthodes qui se basent sur des surfaces de celles qui se basent sur des arêtes. Les Annexes (B.1) et (B.2) proposent une synthèse de ces méthodes.

2.2.4 Conclusion sur la consolidation

La consolidation est une étape importante dans le processus menant à la modélisation. Selon les approches adoptées, elle peut soit être effectuée au début du processus de modélisation, soit après l'opération de segmentation, comme vu dans la Figure 2.1. L'avantage de procéder à la consolidation avant la segmentation réside dans le fait que l'on évite de transmettre les erreurs provenant de la segmentation à l'étape de consolidation. Mais dans le cas où les données sont très bruitées, la segmentation préalable à la consolidation peut grandement faciliter le calcul des paramètres de transformation nécessaires à la consolidation.

Selon (Chen *et al.*, 1999), les limites principales des techniques de consolidation automatique des nuages de points 3D à recouvrement partiel peuvent être résumées en trois points :

- Ces techniques ne peuvent pas toujours garantir une solution correcte même en absence de bruit ;
- Ces techniques requièrent souvent une bonne estimation initiale des paramètres de transformation entre les deux nuages de points à consolider ;
- Ces techniques ne peuvent être utilisées que s'il y a suffisamment d'indices locaux (*local features*) permettant le calcul des paramètres de transformations.

La phase de consolidation des nuages peut être contournée s'il est possible de rattacher quasiment en temps réel les différents nuages de points à un seul et même système de référence. Le scanner Trimble GX employé dans ce projet est en mesure de fournir les nuages directement géoréférencés. En effet, d'une manière analogue aux appareils topographiques conventionnels, ce scanner permet d'orienter le nuage de points en observant des points de référence et en le mettant en station sur un point connu dans le système local. Ainsi, les nuages de points résultant des différentes stations sont géoréférencés directement et sont donc visualisables dans le même système de coordonnées.

Après consolidation suit l'étape de segmentation comme le présentait la Figure 2.1.

2.3 Segmentation d'un nuage de points

2.3.1 Introduction

La segmentation est une étape incontournable dans le processus menant à la modélisation tridimensionnelle des bâtiments. Elle a pour objectif la séparation des objets présents dans une scène en fonction de caractéristiques « homogènes » au regard d'un certain nombre de critères (Deveau, 2006). Cette opération est très connue dans le domaine du traitement d'images en particulier dans le domaine de la télédétection satellitaire. Elle constitue également une étape importante dans le traitement et l'analyse des données laser. En traitement d'images, le critère d'homogénéité peut se rapporter à la radiométrie de l'image. Dans le cas des données laser, l'homogénéité se rapporte en général à la position des points en 3D. Un critère d'homogénéité pourrait ainsi être la courbure ou la planéité décrite par un ensemble de points.

Dans le domaine du traitement d'images, trois grandes familles de méthodes de segmentation peuvent être distinguées : la segmentation par seuillage, par frontières et par régions (Gonzalez *et al.*, 2004, Caloz et Collet, 2001).

La segmentation par seuillage consiste à segmenter une image en plusieurs zones, sur la base uniquement de l'histogramme des comptes numériques la composant. A chaque population de l'histogramme uni ou multi-dimensionnel est ensuite associée une classe. Le terme de segmentation laisse alors sa place au terme de classification.

La segmentation par frontières consiste à localiser de fortes variations radiométriques dans l'image, par l'intermédiaire du calcul des maximums locaux (calcul du gradient par exemple). Ces fortes variations correspondent aux frontières séparant les régions.

Enfin, la segmentation par région est réalisée sur la base d'un critère d'homogénéité, du type niveau de gris ou variation de niveau de gris (par exemple "tous les pixels sont du même niveau de gris" ou "la variation de niveau de gris n'excède pas n niveaux"). Parmi les méthodes entrant dans cette famille, on peut citer l'algorithme de croissance de région proposé par (Besl et Jain, 1988) ou encore la segmentation par division et fusion (Horowitz et Pavlidis, 1976).

Au cours des dernières années, un grand nombre de méthodes de segmentation des données laser a été proposé. La plupart de ces techniques ont été développées initialement sur des données LIDAR aériennes. Ces données sont acquises en 2.5D, ce qui donne la possibilité de les transformer en image sans risquer une perte importante d'information (Masaharu et Hasegawa, 2000 ; Geibel et Stilla, 2000). Une fois converties en image, ces données peuvent être traitées avec les mêmes méthodes que celles citées précédemment.

Les nuages de points obtenus par scanner laser terrestre sont, quant à eux, acquis en 3D (Vosselman *et al.*, 2004). La conversion de ces nuages de points en une grille 2D causerait une grande perte d'information spatiale (Axelsson, 1999; Gamba et Casella, 2000). C'est pourquoi, les algorithmes de segmentation d'images ont été étendus et adaptés à cette nouvelle donnée, en tenant compte de l'aspect 3D des nuages de points laser terrestres.

Les travaux de (Pu et Vosselman, 2006; Stamos et Allen, 2002) utilisent des extensions de l'algorithme de croissance de région pour extraire des éléments plans des façades de bâtiments numérisées avec des scanners laser terrestres. On parle d'algorithmes de croissance de surface. Dans le même contexte, (Wang et Tseng, 2004; Schnabel *et al.*, 2007) proposent des approches de segmentation basées sur l'algorithme de division-fusion (*split-and-merge*) en utilisant une structure *octree* (équivalente de *quadtree* sur les images).

Les travaux de la littérature traitant de segmentation de données laser, y compris ceux cités à l'instant, peuvent finalement être regroupés en deux grandes familles. La première famille de segmentation est basée sur le principe de fusion (ou agrégation) et la seconde sur la reconnaissance automatique de formes géométriques.

2.3.2 Segmentation basée sur le principe de fusion

Cette famille regroupe les méthodes adoptant la technique de fusion pour segmenter le nuage de points, ce qui peut sembler contradictoire puisque la segmentation est censée séparer les ensembles de points homogènes. Parmi elles, trois algorithmes méritent d'être détaillés : la croissance de surface, la segmentation par profil de balayage et l'algorithme de division-fusion.

2.3.2.1 Segmentation par croissance de surface

La croissance de surface pour les nuages de points est équivalente à la croissance de région pour les images. Pour l'appliquer, il est nécessaire d'identifier les « surfaces graines » (*seed surfaces* en anglais) et les critères permettant leur croissance vers les points voisins. (Stamos et Allen, 2002) ont adopté la segmentation par croissance de surface pour détecter les plans présents dans une scène, par agrégation progressive des points. Dans un premier temps, un plan est calculé sur un voisinage de n points pour chaque point 3D (Figure 2.5).

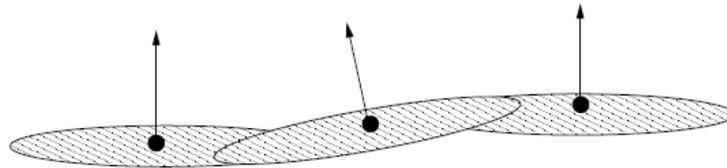


Figure 2.5. Calcul des plans de chaque point et affectation d'une normale au plan, en chaque point (Stamos, 2001).

La plus petite des valeurs propres de la matrice de variance-covariance calculé sur les n points exprime la déviation des points par rapport au plan. Cette valeur permet de discriminer les points coplanaires des points non coplanaires dans l'environnement direct du point. Ensuite, les points considérés comme localement coplanaires sont regroupés dans un plan connexe. L'agrégation a lieu lorsque deux critères sont respectés simultanément : le critère de co-normalité et le critère de coplanarité.

Critère de co-normalité : Les normales \mathbf{n}_1 et \mathbf{n}_2 des deux surfaces à fusionner doivent former un angle α inférieur à un certain seuil t_{seuil} selon l'équation 2.2.

$$\alpha = \arccos(\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2) \leq t_{seuil} \quad (2.2)$$

Critère de coplanarité : les deux surfaces doivent être coplanaires. La distance d entre elles est définie par l'équation 2.3 et elle doit être inférieure à une tolérance d_s .

$$d = \max(|r_{12} \cdot \mathbf{n}_1|, |r_{12} \cdot \mathbf{n}_2|) \leq d_s \quad (2.3)$$

Dans cette équation, r_{12} est le vecteur joignant les points P'1 et P'2, qui sont les projections des deux points P1 et P2 sur leurs surfaces locales (voir Figure 2.6).

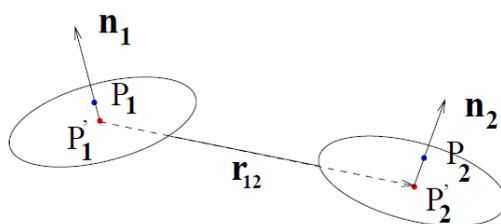


Figure 2.6. Schéma explicatif de la mesure de condition de coplanarité (Stamos., 2001).

La Figure 2.7 montre le résultat d'une segmentation de façades de bâtiments obtenue en utilisant un algorithme de croissance de surface développé par (Stamos, 2001).

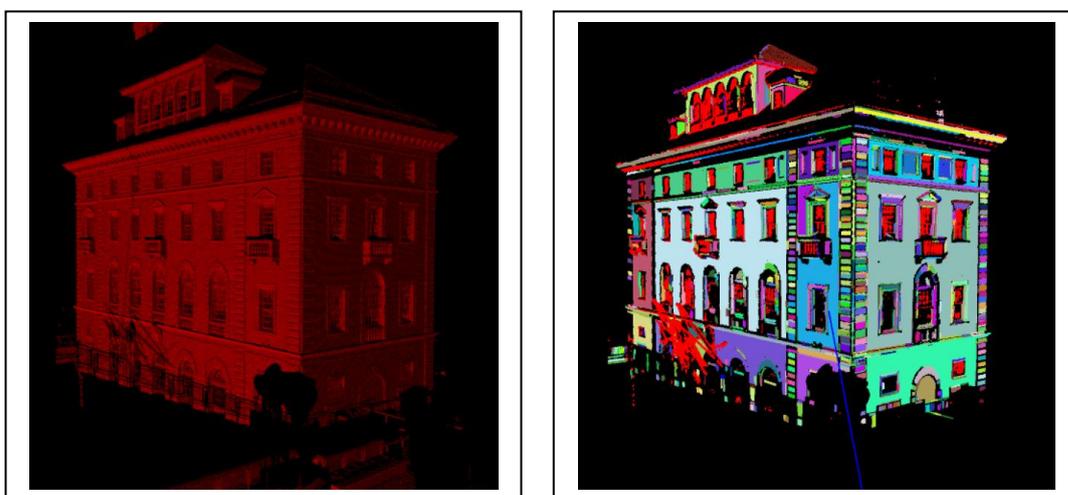


Figure 2.7. Résultat de segmentation de façades d'un bâtiment après application de l'algorithme de croissance de surface (Stamos, 2001).

(Vosselman *et al.*, 2004) utilisent également un algorithme de croissance de surface pour segmenter les façades de bâtiments. Plusieurs variantes de cet algorithme sont disponibles dans (Hoover *et al.*, 1996), cependant le principe reste le même et consiste toujours à identifier tout d'abord les surfaces de départ appelées « surfaces graines » et les faire croître ensuite vers les points voisins. Les variantes se distinguent surtout sur la manière de choisir les graines de départ et parfois sur les critères de croissance. Concernant les critères de croissance, (Vosselman *et al.*, 2004) se sont appuyés sur les mêmes conditions que celles employées par (Stamos et Allen, 2002).

Pour le choix de surfaces graines, (Vosselman *et al.*, 2004) proposent d'ajuster plusieurs ensembles de points par un plan et d'analyser les résidus. Ainsi, l'ensemble de points du plan ayant le plus petit écart-type (écart-type simultanément inférieur à une certaine tolérance) constitue la surface graine recherchée. Cela suppose qu'il existe au moins une portion de points coplanaires dans les données. En présence de bruit, l'erreur moyenne quadratique associée au plan ajusté risque d'être assez élevée. Ce qui implique parfois un échec dans la

détection de la surface graine. Dans ce cas, des algorithmes plus robustes et plus résistants au bruit, tels que RANSAC et la transformée de Hough peuvent constituer une alternative. (Pu et Vosselman, 2006) utilisent également cet algorithme pour segmenter la façade d'un bâtiment simple, en vue d'extraire ses éléments architecturaux (Figure 2.8).

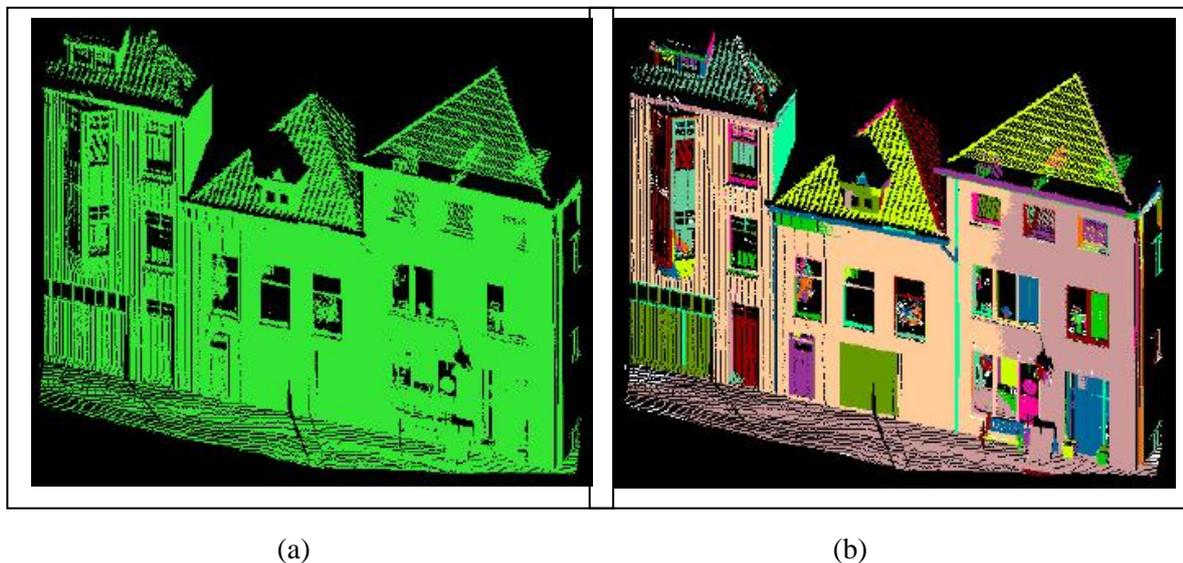


Figure 2.8. Exemple de façade segmentée avec l'algorithme de croissance de région ; a) façade numérisée par scanner laser terrestre ; b) résultat de la segmentation par le biais de l'algorithme de croissance de surface (Pu et Vosselman, 2006).

Les auteurs précisent que la segmentation n'est pas réussie à 100%. Ils désignent trois cas d'erreurs possibles : l'erreur de « sur-segmentation », l'erreur de « sous-segmentation » et l'erreur de « non segmentation ». La Figure 2.9 montre un exemple de sur-segmentation.

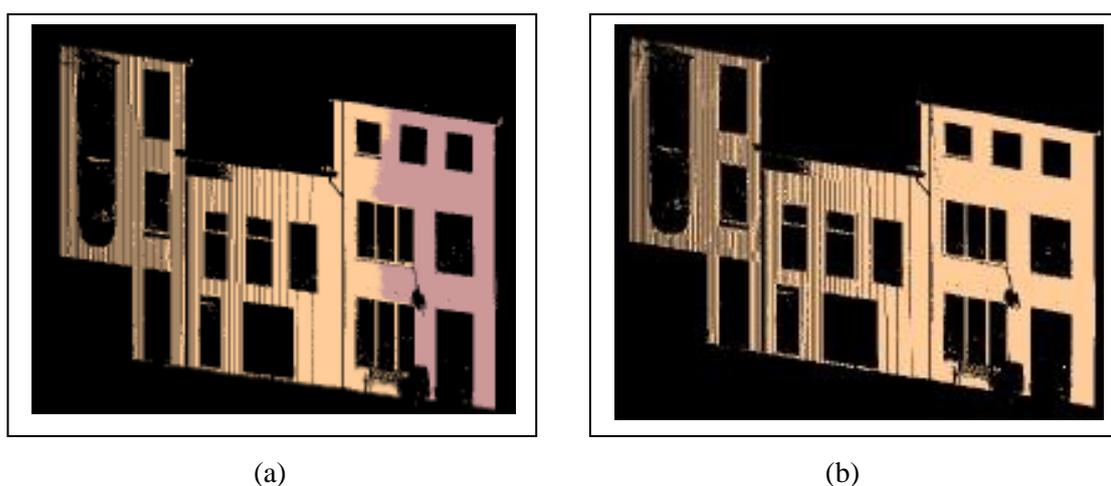


Figure 2.9. Exemple de sur-segmentation : a) mur plat segmenté en deux segments (sur-segmentation) ; b) fusion de deux segments en post-traitement (Pu et Vosselman, 2006).

L'algorithme de croissance de région ou de surface est fréquemment utilisé dans le cas de scènes larges. Les chercheurs (Besl et Jain, 1988 ; Hoover *et al.*, 1996 ; Chen et Stamos, 2007) confirment qu'il présente des avantages en termes de rapidité et de facilité d'implémentation.

En général, les inconvénients des algorithmes de croissance de surface sont d'une part la grande influence qu'ont les graines de départ sur les résultats finaux. En outre, il est souvent difficile de prédire si une région peut ou non s'accroître, en particulier dans le cas où les données sont bruitées. Pour réduire l'influence des graines de départ, (Leonardis, 1995) a proposé une solution consistant à considérer plusieurs graines de départ à la fois. Ces graines s'accroissent d'une manière indépendante. (Gotardo *et al.*, 2004), quant à eux, s'appuient sur des calculs statistiques robustes pour extraire ces graines.

De plus, (Yu *et al.*, 2008) affirment que le problème des algorithmes de croissance de surface est qu'ils ne produisent pas de segments correctement plans, car le processus de croissance est conduit uniquement par la condition de planéité locale. Dès lors, rien ne garantit que le segment final sera plan dans sa globalité. Pour surmonter cette difficulté, les auteurs ont suggéré une méthode qui tient compte de la planéité globale des segments. Elle est composée d'une phase d'agrégation (*clustering phase*) suivie d'une phase d'amélioration. La phase d'agrégation consiste à regrouper les points s'ils sont coplanaires. Les équations de plans ainsi obtenus sont affinées en utilisant une variante de l'algorithme de regroupement *K-means* et en imposant une condition de planéité à la phase finale (Cohen-Steiner *et al.*, 2004). Les figures ci-après montrent l'importance d'intégrer le critère de planéité globale des segments (Figures 2.10 et 2.11).

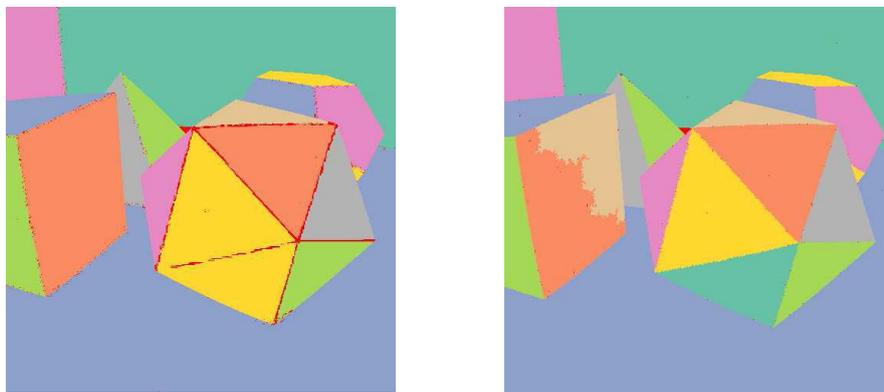


Figure 2.10. Résultat de l'ajout du critère de planéité globale des segments à l'algorithme de croissance de surface ; à gauche : avant intégration ; à droite : après intégration (Yu *et al.*, 2008)

La Figure 2.10 montre qu'avant amélioration, l'algorithme de croissance de région a commis une erreur de sous-segmentation en regroupant deux plans voisins (en jaune) pourtant différents. Le nouvel algorithme a bien réussi à distinguer les deux plans, mais il a commis une erreur de sur-segmentation sur une facette du cube en la segmentant en deux plans au lieu d'un seul. Appliqué aux données laser terrestres réelles, l'algorithme de croissance de région amélioré par le critère de planéité globale est capable de fournir des résultats satisfaisants (Figure 2.11) selon (Yu *et al.*, 2008).

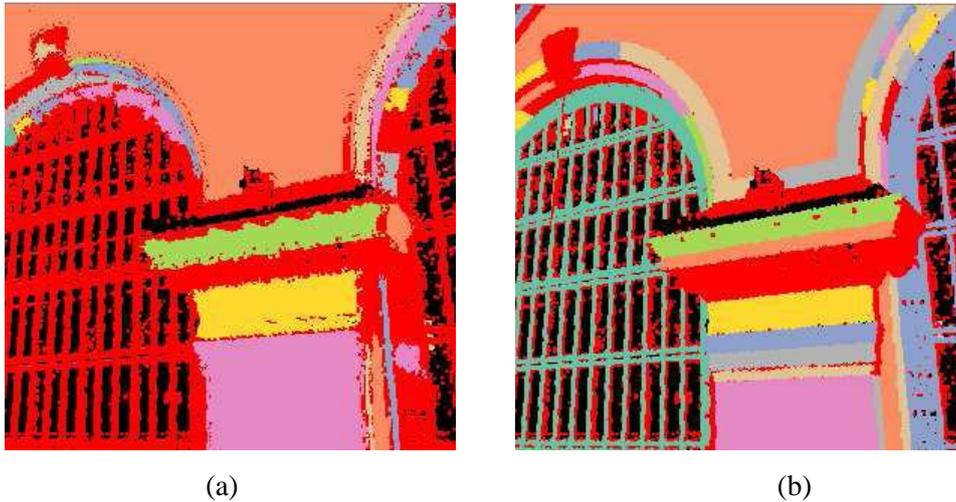


Figure 2.11. Illustration de l'intérêt d'intégrer un critère de planéité globale ; a) portion de façade segmentée avec l'algorithme de croissance de surface ; b) résultat après intégration du critère de planéité (Yu *et al.*, 2008)

Pour diminuer l'influence du choix des graines de départ sur le résultat final, certains chercheurs comme (Jiang et Bunke, 1994) par exemple, cherchent les graines de départ dans des profils de balayage. Ce second algorithme mérite d'être évoqué.

2.3.2.2 Segmentation par profils de balayage

Cette méthode part de l'idée que les points d'une ligne du nuage (ou « profil » du nuage) appartenant à une surface plane constituent des droites en 3D (Jiang et Bunke, 1994). Ainsi, cette segmentation démarre par la séparation des profils verticaux du nuage. Celle-ci peut être réalisée soit en connaissant le temps de l'acquisition de chaque point, soit en profitant du mode de balayage du scanner. Par exemple, avec le scanner laser terrestre Trimble GX, le balayage s'effectue par profils verticaux en incrémentant, entre deux lignes, l'angle horizontal d'une constante spécifique. La Figure 2.12 montre une portion de façade de l'INSA de Strasbourg après séparation des profils verticaux (une couleur par profil).

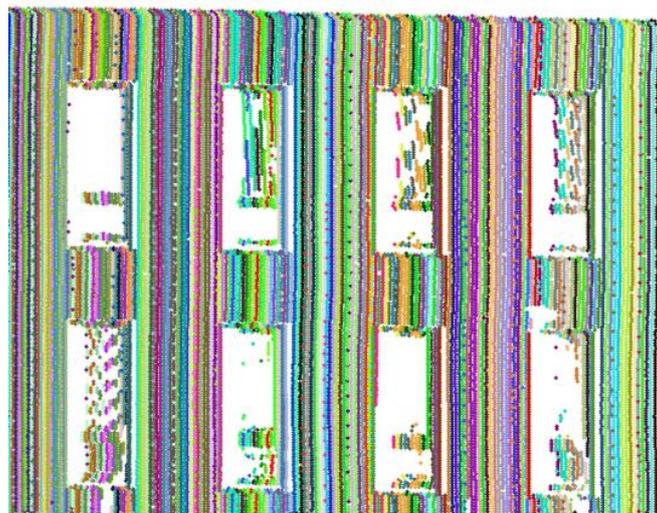


Figure 2.12. Séparation des profils verticaux d'une portion de façade de l'INSA de Strasbourg.

Ensuite, chaque profil est subdivisé en segments droits, par un processus itératif. La colinéarité des points des segments est contrôlée par le calcul des distances orthogonales des points à la droite d'affectation. Un segment est considéré droit si la distance maximale entre le point le plus éloigné et la droite est inférieure à une valeur seuil prédéterminée. Enfin, les segments droits sont comparés à ceux des profils voisins. Et si les segments voisins sont dans le même plan, ils seront fusionnés selon les mêmes critères que ceux employés dans l'algorithme de croissance de surface. Ce mode opératoire permet de regrouper des points proches ayant les mêmes propriétés (même direction du vecteur normal calculé avec les plus proches voisins), comme l'illustre la Figure 2.13.

En fait, on peut considérer que cette méthode est une nouvelle variante de l'algorithme de croissance de région, puisqu'on peut considérer ici que les graines de départ sont des lignes et non pas des surfaces. Les étapes principales de l'algorithme de segmentation par profil de scan sont présentées en Annexe (B.3).

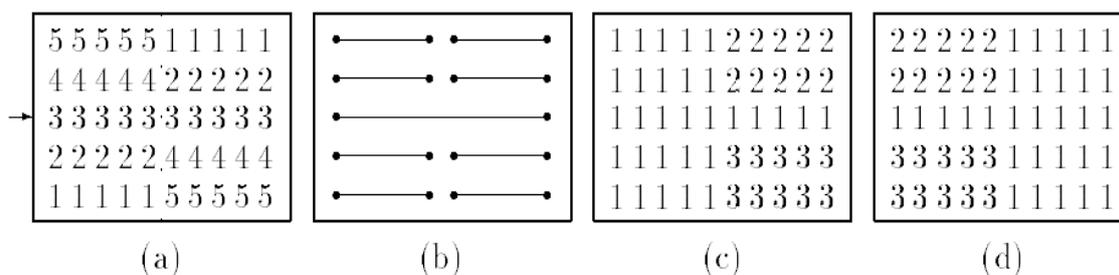


Figure 2.13. Segmentation de lignes de scan : a) matrice de départ ; b) segments droits ; c) une segmentation possible ; d) une autre segmentation possible (Jiang et Bunke, 1994)

Cette méthode a été reprise par (Sithole et Vosselman, 2004) pour segmenter les données issues d'un LIDAR aéroporté. Ils ont amélioré la séparation des profils en ajoutant comme critère de segmentation l'information sur l'orientation des lignes de scan. Ainsi, ils ont décomposé le fichier de points en lignes de scan de même orientation puis les ont classifiées. Si les segments de droites orientés Nord-Sud (N-S) ou Est-Ouest (E-O) présentent un certain nombre de points communs, ils sont alors fusionnés et assignés à une même région (Figure 2.14).

Le principe de diviser pour mieux regrouper n'est pas récent. En effet, (Horowitz et Pavlidis, 1976) avaient déjà proposé ce fameux algorithme de segmentation d'image connu sous le nom division-fusion (*split and merge*, en anglais). Ce principe mérite d'être revu dans le paragraphe suivant.

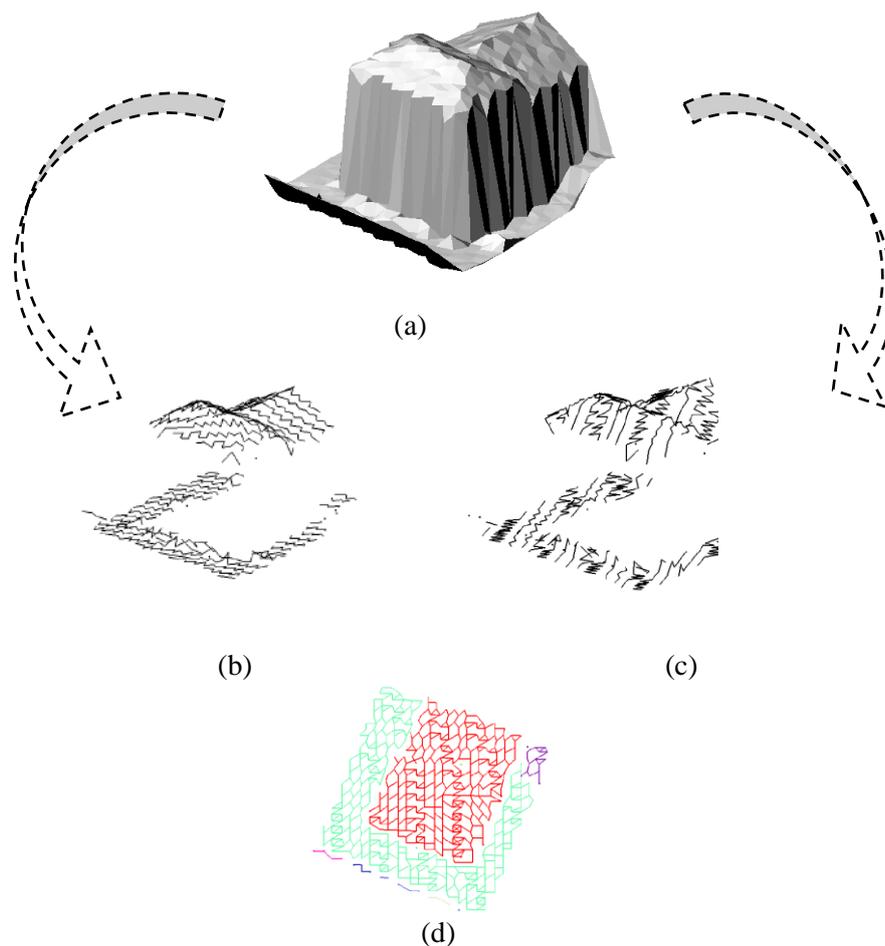


Figure 2.14. Résultat de la segmentation de données LIDAR par profils de scan : a) données brutes ; b) lignes de scan orientées E-O ; c) lignes de scan orientées N-S; d) résultat de la fusion (Vosselman *et al.*, 2004).

2.3.2.3 Segmentation par division-fusion

Les algorithmes de segmentation par division-fusion procèdent par éclatement et regroupement de régions, organisées suivant un graphe d'adjacence (Horowitz et Pavlidis, 1976). Une hypothèse de cohésion (homogénéité) est testée pour chaque cellule considérée. La non vérification de cette hypothèse entraîne la division de la région en deux sous-ensembles complémentaires. Lorsque toutes les régions répondent au critère choisi, la segmentation n'est toutefois pas achevée. En effet, il est encore possible, par le fait de la géométrie de la division, de séparer une région homogène en plusieurs éléments. Il faut dès lors réunir les portions scindées à tort. Intervient alors la phase de fusion.

(Wang et Tseng, 2004) ont développé un tel algorithme pour segmenter les données laser aériennes et terrestres. Le nuage de points est subdivisé itérativement selon la structure *octree* dans l'optique d'extraire des surfaces planes (Figure 2.15). Ainsi, au cours de la subdivision, la coplanarité des points d'une cellule (un cube) est testée à chaque niveau. Si le test est positif, la subdivision s'arrête, sinon celle-ci continue jusqu'à ce que tous les cubes contiennent des points coplanaires ou soient vides.

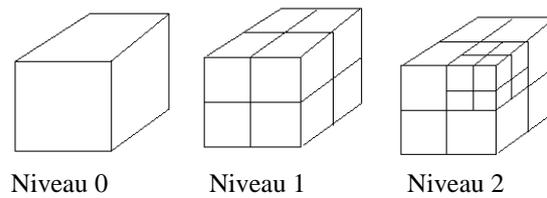


Figure 2.15. Deux niveaux de subdivisions selon la structure *octree*

Initialement, on part du niveau 0, c'est-à-dire d'un cube contenant tous les points du nuage. Ce cube est alors subdivisé en 8 sous-cubes (niveau 1). Si les points d'un cube ne sont pas coplanaires, ce cube-là est à nouveau subdivisé en 8 sous-cubes. Le processus s'arrête lorsque l'on obtient des cubes remplis de points coplanaires ou, à l'extrême, des cubes vides. La Figure 2.16 montre le résultat d'un tel algorithme appliqué à un nuage de points laser terrestres couvrant une façade de l'INSA de Strasbourg.

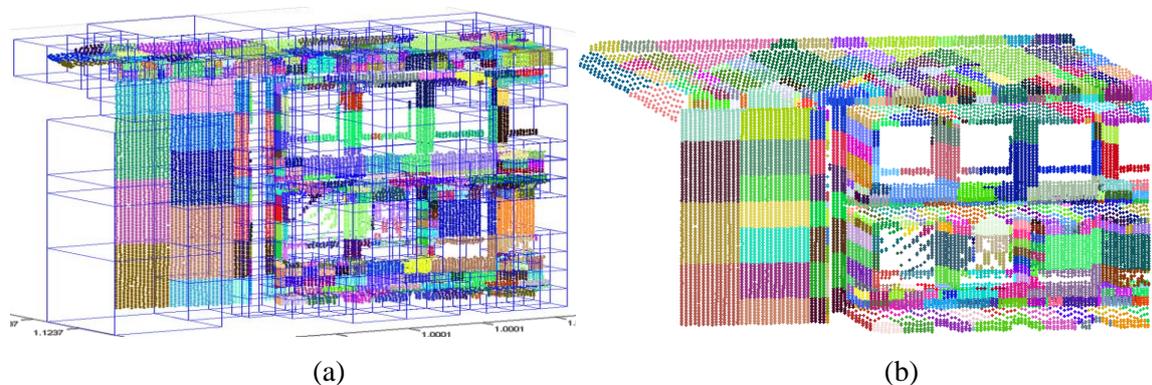


Figure 2.16. Division du nuage de points de la façade de l'INSA de Strasbourg par un algorithme de division-fusion s'appuyant sur la structure *octree* : a) cubes ayant servi à la division ; b) résultat final de la division. Chaque couleur correspond à une surface plane.

Une fois le nuage de points subdivisé en segments plans (Figure 2.16b), l'opération de fusion peut commencer. Deux critères déterminent la fusion : la proximité et la coplanarité. Ainsi, deux segments plans seront fusionnés si et seulement si ils sont voisins et que l'angle entre leurs normales respectives est inférieur à un seuil prédéfini.

(Samet, 1990) précise que la structure *octree* facilite grandement l'étude des relations de voisinage entre les différents segments plans. En effet, pour que deux plans soient voisins, il faut absolument que leurs cubes soient voisins. C'est une condition nécessaire, mais elle n'est pas suffisante. La Figure 2.17 montre les situations dans lesquelles les cubes sont voisins mais pas les plans qu'ils contiennent.

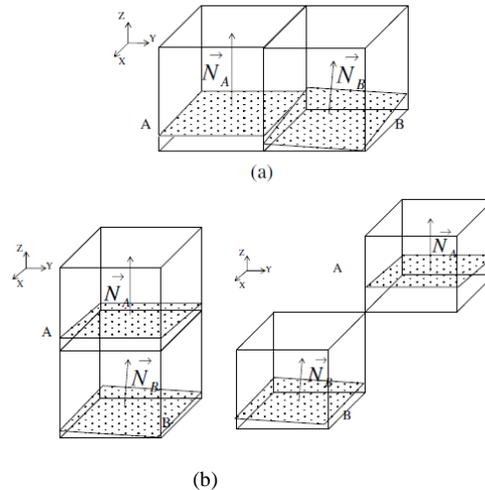


Figure 2.17. Cas de figure où les cubes sont voisins mais pas les plans qu'ils contiennent ; a) les deux segments plans A et B peuvent être fusionnés; b) les deux segments plans ne peuvent pas être fusionnés, pourtant leurs cubes sont voisins (Wang et Tseng, 2004).

Cet algorithme est généralement utilisé et efficace pour segmenter des objets qui sont réellement en 3D. Ainsi, (Gorte et Pfeifer, 2004) l'emploie dans le domaine d'étude des structures des arbres de forêts scannés par laser terrestre. Cela permet d'esquisser le squelette d'un arbre et par conséquent d'envisager sa modélisation.

Diverses philosophies d'implémentation du principe de fusion-division ont été évoquées. L'avantage majeur de ces segmentations par fusion-division réside non seulement dans leur capacité à gérer des données volumineuses et complexes avec une grande rapidité, mais aussi dans l'aisance à implémenter ce genre d'algorithmes. Leur inconvénient principal reste leur sensibilité au bruit des données. Pour faire face à ce problème, une autre approche de segmentation basée sur des algorithmes robustes vis-à-vis du bruit est apparue. Elle est basée sur l'extraction de formes géométriques.

2.3.3 Segmentation par reconnaissance de formes géométriques

Cette segmentation est basée sur la reconnaissance de formes géométriques dans les données. Deux algorithmes issus du domaine de la vision par ordinateur seront cités, car ils sont largement utilisés lorsqu'il s'agit d'extraire des formes géométriques à partir de données bruitées. Il s'agit du paradigme RANSAC (Fischler et Bolles, 1981) et de la transformée de Hough (Hough, 1962). Ces deux techniques ont fait leur preuve pour la détection automatique de primitives géométriques, même en présence d'une forte proportion de valeurs aberrantes.

2.3.3.1 Transformée de Hough

La transformée de Hough est un outil classique employé en analyse d'images. Elle permet de détecter la présence de courbes ayant une forme paramétrique (droite, conique...) connue. Pour comprendre son principe, elle sera appliquée au cas particulier et simple de la droite mais son extension à d'autres primitives géométriques ne pose pas de problème mathématique. L'idée sous-jacente à la transformée de Hough est que chaque droite dans

l'espace euclidien (O, x, y) peut être présentée par un point dans l'espace des paramètres (O', a, b) . Une droite est décrite dans le plan (O, x, y) par l'équation suivante (2.4).

$$y = ax + b \quad (2.4)$$

Où :

a : pente de la droite

b : ordonnée à l'origine

L'idée de la transformée consiste à détecter les droites à l'aide des points du plan (x, y) . Il faut donc calculer pour chaque point de coordonnées $M_i(x_i, y_i)$, l'ensemble des paramètres (a, b) qui vérifient l'équation $y_i = ax_i + b$ avec b fixé. Evidemment, pour chaque point $M_i(x_i, y_i)$, il y a un ensemble de valeurs possibles pour les paramètres a et b . Cet ensemble forme une droite d'équation $b_i = -xa + y$ dans l'espace des paramètres (O', a, b) appelé également « espace de Hough ». Ainsi, deux points $P_i(x_i, y_i)$ et $P_j(x_j, y_j)$ appartenant à la même droite, formeront des droites dans l'espace des paramètres qui se couperont en un point de coordonnées (a', b') . Inversement, tous les points qui appartiennent à la même droite dans l'espace des paramètres se coupent en un même point dans l'espace euclidien. La Figure 2.18 illustre ce concept.

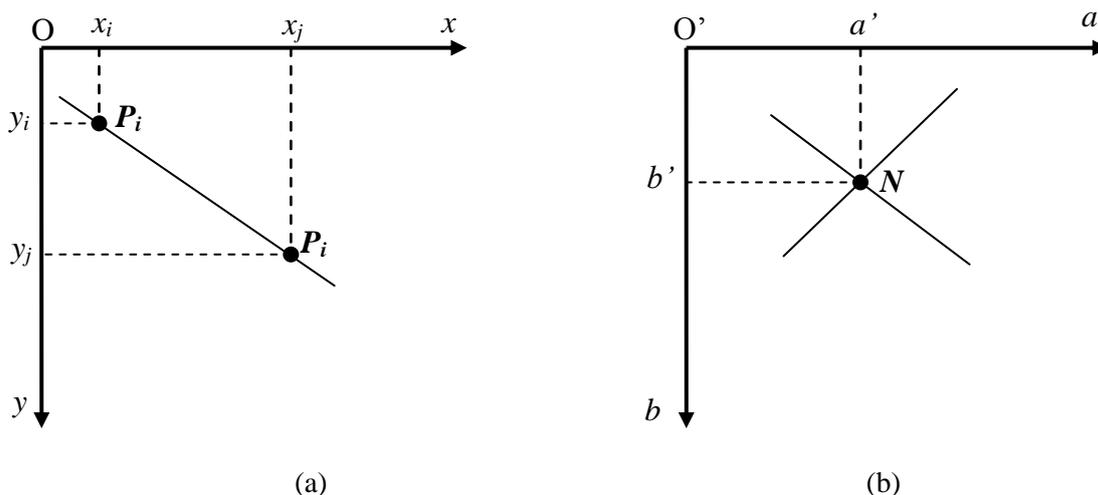


Figure 2.18. Les deux espaces de la transformée de Hough : a) espace euclidien (cartésien) ; b) espace des paramètres ou « espace de Hough ».

Dans un objectif de segmentation de données laser, cette méthode a été étendue à la transformée de Hough 3D en utilisant exclusivement les nuages de points 3D (Maas et Vosselman, 1999 ; Vosselman et Dijkman, 2001 ; Vosselman *et al.*, 2004). Les travaux de (Vosselman *et al.*, 2004) présentent la transformée de Hough 3D en l'appliquant à la segmentation de données laser terrestres acquises sur des équipements industriels. Ce sujet d'étude s'y prête bien, car les équipements industriels sont généralement composés de plans, de sphères et surtout de cylindres (Figure 2.19).

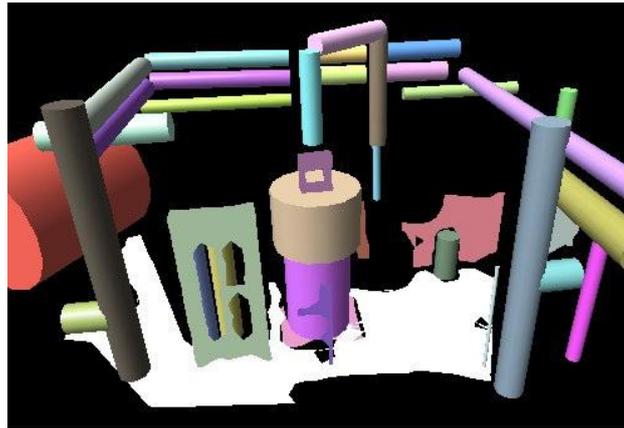


Figure 2.19. Scène industrielle composée de plans et de cylindres, segmentée à l'aide de la transformée de Hough (Vosselman *et al.*, 2004).

Si la transformée de Hough aboutit à des résultats en général très encourageants, elle requiert cependant un temps de calcul important et un large espace mémoire sur l'ordinateur. C'est pourquoi elle est appliquée principalement lorsque le nombre de paramètres à déterminer est assez limité. Ce nombre dépend évidemment du nombre de points à gérer et donc de la taille de la scène en question.

(Tarsha-Kurdi *et al.*, 2007) ont réalisé une étude comparative entre les algorithmes de Hough et RANSAC, dans un objectif de détection automatique de plans de toits à partir de données laser aéroportées. Il en ressort que RANSAC est plus adapté que Hough au traitement de données laser aériennes en termes de temps de traitement et d'insensibilité au bruit affectant les nuages de points. C'est pourquoi un intérêt tout particulier sera porté à cet algorithme.

2.3.3.2 RANSAC (RANDOM SAMPLE CONSENSUS)

L'algorithme RANSAC est largement utilisé comme estimateur robuste de paramètres de modèles mathématiques décrivant des données expérimentales souvent entachées d'erreurs (Matas *et al.*, 2002). RANSAC est un algorithme venu du domaine de la vision par ordinateur. Il est appliqué abondamment et décrit comme étant un estimateur robuste des paramètres de courbes paramétriques. Ainsi, il est fréquemment utilisé dans le cadre d'opérations d'appariement en photogrammétrie, pour trouver les points homologues d'un couple d'images (Chum et Matas, 2002 ; Torr et Zisserman, 2000), mais aussi dans le cadre d'opérations de consolidation de nuages de points (Chen *et al.*, 1999).

RANSAC est utilisé également comme algorithme de segmentation géométrique en raison de sa capacité à reconnaître automatiquement les formes à travers des données, malgré le bruit les affectant. Ainsi, (Bauer *et al.*, 2005) l'ont utilisé avec succès pour extraire des plans de façades à partir d'un nuage de points 3D très dense. Néanmoins, ce nuage de points a été obtenu par appariement d'images et non pas par scanner laser. (Schnabel *et al.*, 2007) ont également utilisé RANSAC avec succès pour détecter des formes géométriques diverses, telles que des plans, des cylindres, des sphères et des tores à partir de nuages de points 3D. Dans les adaptations de RANSAC aux différentes formes géométriques, ils se sont servis des normales locales affectées aux points. En effet, avec l'information apportée par les normales,

le nombre de points nécessaires à la détermination des paramètres d'une primitive diminue. Par exemple, seulement deux points accompagnés de leurs normales sont nécessaires pour déterminer le centre et le rayon d'une sphère, alors qu'il en faut quatre si l'on considère les points uniquement.

Récemment, avec l'avènement des données laser dans le domaine de la topographie, RANSAC génère un intérêt grandissant. (Durupt et Taillandier, 2006) ont eu l'idée d'utiliser le paradigme RANSAC pour extraire des plans des façades directement à partir des limites cadastrales des bâtiments et du modèle numérique d'élévation de la zone urbaine étudiée. Les auteurs confirment que les résultats d'une évaluation réalisée sur 620 bâtiments sont prometteurs aussi bien au niveau qualitatif que quantitatif.

Comme évoqué en introduction à cette section, (Tarsha-Kurdi *et al.*, 2007) ont publié une étude comparative entre l'algorithme RANSAC et la transformée de Hough. Leur objectif portait sur l'extraction de plans de toit à partir de données LIDAR. Il ressort de cette analyse que RANSAC est mieux adapté à une telle problématique surtout sur une large scène (Figure 2.20).

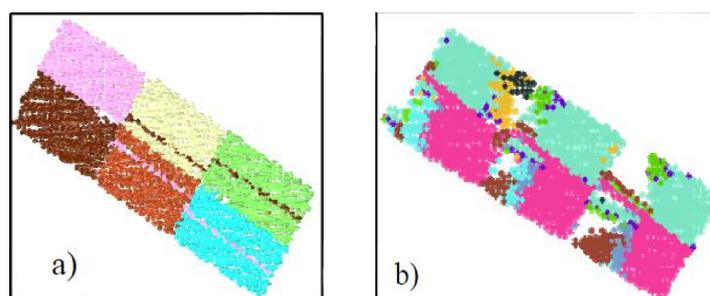


Figure 2.20. Résultat de l'extraction de plans de toit : a) par le paradigme RANSAC ; b) par la transformée de Hough (Tarsha-Kurdi *et al.*, 2007). A chaque plan est associée une couleur

Par ailleurs, les auteurs ont tenu à adapter l'approche RANSAC à la segmentation de nuages de points LIDAR acquis sur les toits, en proposant une version étendue (Tarsha-Kurdi *et al.*, 2008). Les extensions ont porté sur plusieurs niveaux de la chaîne de traitements. Tout d'abord une densification du nuage de points est faite en amont. Ensuite des contraintes géométriques ont été intégrées, en plus de l'utilisation de critères statistiques supplémentaires dans l'étape de validation d'un plan.

Au niveau des données laser terrestres, RANSAC produit également des résultats prometteurs. Néanmoins, les façades de bâtiments sont composées d'une multitude de plans proches les uns aux autres et qui parfois se chevauchent. Par conséquent la tâche s'annonce plus compliquée avec des données laser terrestres qu'avec des données LIDAR aériennes. (Deveau, 2006) a testé l'algorithme RANSAC pour segmenter une portion de façade (encadrée en rouge sur la Figure 2.21a) numérisée par un scanner laser terrestre. La Figure 2.21b montre les résultats de cette segmentation.

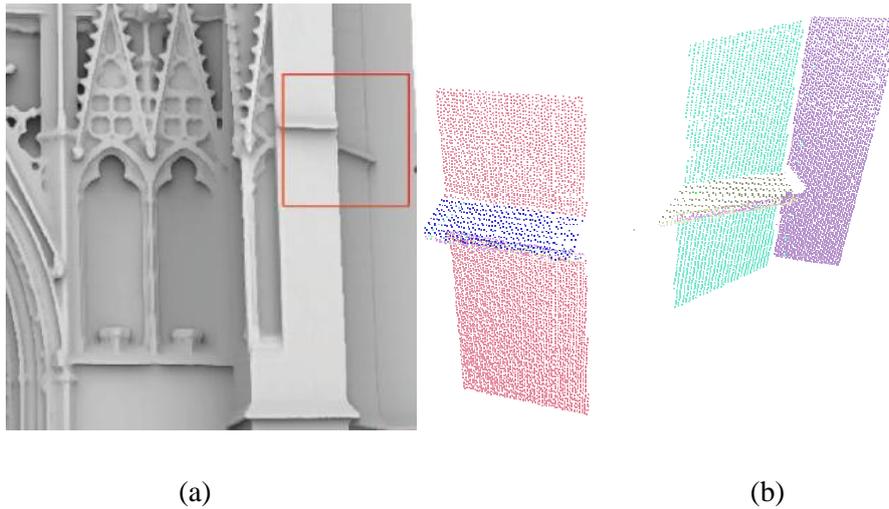


Figure 2.21. Résultat d'extraction de surfaces planes avec RANSAC; a) photo avec zone de test encadrée ; b) plans correspondants dans le nuage (Deveau, 2006).

2.3.4 Conclusion sur la segmentation

La segmentation est une étape cruciale dans la chaîne menant à la modélisation tridimensionnelle, puisque la qualité du modèle final dépend étroitement de la qualité de la segmentation. C'est pourquoi une multitude d'études et d'expérimentations consacrées à cette tâche alimentent la bibliographie.

L'état de l'art relatif à la segmentation a permis de mettre en évidence deux grandes familles d'approches. La première utilise des relations de proximité et de similitudes pour subdiviser le nuage de points. Il s'agit essentiellement des algorithmes de croissance de région et des algorithmes de division-fusion, appliqués au domaine de la lasergrammétrie. La deuxième grande famille d'approches appuie la segmentation sur des opérations de reconnaissance automatique de courbes paramétriques. La plupart de ces techniques relèvent du domaine de la vision par ordinateur. On retiendra de cette seconde famille essentiellement le paradigme RANSAC et la transformée de Hough.

Une nouvelle approche de segmentation est proposée dans cette thèse et sera exposée en détails dans le chapitre 3. Cette approche exploite les avantages des deux grandes familles évoquées dans cet état de l'art. En effet, elle profite de la définition rigoureuse des plans globaux d'une façade, exploitée dans la deuxième famille d'approches. Comme la réalité n'est pas toujours compatible avec des modèles mathématiques, l'algorithme RANSAC sera optimisé et renforcé par l'algorithme de croissance de région de façon à corriger les erreurs apparaissant lorsque des points se trouvent sur le même plan, mais qu'ils décrivent des objets architecturaux différents. Ces deux grands avantages ont été intégrés dans un esprit de complémentarité pour segmenter les façades de bâtiments à partir de données laser terrestres.

Comme présenté dans l'organigramme de la Figure 2.1 présentée en introduction, la prochaine étape dans la chaîne de traitements amenant à des modèles 3D de façades de bâtiments est l'étape de modélisation. Elle consiste à traduire et à transformer les résultats de

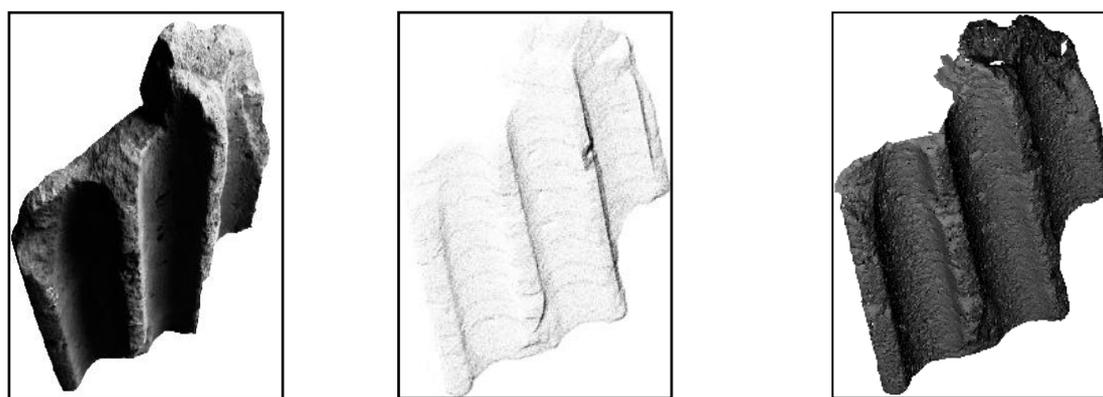
segmentation en modèles vectoriels ou surfaciques. Le paragraphe suivant est consacré à l'étude bibliographique traitant des techniques de modélisation à partir de données laser.

2.4 Modélisation des façades de bâtiments

Le but de la modélisation est de construire et de créer des liens entre des points caractéristiques afin de construire un tout, qui peut être un bâtiment, une façade ou tout autre objet. Avant d'entamer l'état de l'art relatif à cette opération, il paraît important de présenter brièvement les techniques de modélisation couramment utilisées et bien entrées dans les mœurs, puisque intégrées aux logiciels de traitements de nuages de points les plus répandus sur le marché. On retrouve généralement les méthodes de modélisation par maillage et les méthodes de modélisation géométrique.

2.4.1 Principe de la modélisation par maillage

La modélisation par maillage est utilisée généralement pour modéliser des objets complexes, c'est-à-dire difficiles à paramétrer du point de vue mathématique. Les algorithmes utilisés dans ce contexte sont en général des algorithmes de triangulation et la méthode des éléments finis (George et Borouchaki, 1997). Des facettes sont ainsi construites entre les différents points du nuage par triangulation de Delaunay. Son avantage est qu'elle permet d'aboutir à des modèles très fidèles à l'objet relevé, en esquissant son allure par des facettes triangulaires. En pratique, les modélisations par maillage sont souvent recommandées pour modéliser des objets à l'échelle de statues, ou à l'échelle d'édifices lorsque ceux-ci contiennent beaucoup d'ornements architecturaux. La Figure 2.22 montre un exemple de modélisation par maillage d'un objet numérisé par scanner laser terrestre.



(a) (b) (c)
Figure 2.22. Modélisation par maillage d'une partie de colonne : a) photographie ; b) nuage de points ; c) modèle maillé (Begrliche, 2003).

Par contre, l'inconvénient de cette méthode réside dans la lourdeur des fichiers finaux qu'elle génère. En effet, les données ne sont pas optimisées, dans le sens où même les surfaces de l'objet à géométrie simple telle que des plans, comportent une densité de points semblable aux

surfaces complexes. Pour optimiser le nuage, cette méthode exige donc des post-traitements permettant de combler les trous et de simplifier les zones où les facettes sont trop nombreuses. C'est pourquoi il est parfois judicieux d'avoir recours aux techniques de modélisation géométrique.

2.4.2 Principe de la modélisation géométrique

La modélisation géométrique est basée sur la construction des éléments identifiables et descriptibles d'un point de vue mathématique dans le nuage de points. Il s'agit de construire le modèle à l'aide de primitives géométriques (plan, cylindre, sphère,...) que l'algorithme tente de faire correspondre au nuage de points. Puis ces primitives géométriques subissent des opérations d'ordre topologique, pour épouser le mieux possible le nuage de points en question. L'objet de la Figure 2.23 est modélisé à l'aide de deux primitives géométriques : le plan et le cylindre.

Cette méthode présente donc un gros avantage lié au fait que l'ensemble du nuage est réduit à de simples formes géométriques décrites par quelques paramètres, ce qui génère des fichiers bien plus légers que pour le maillage.

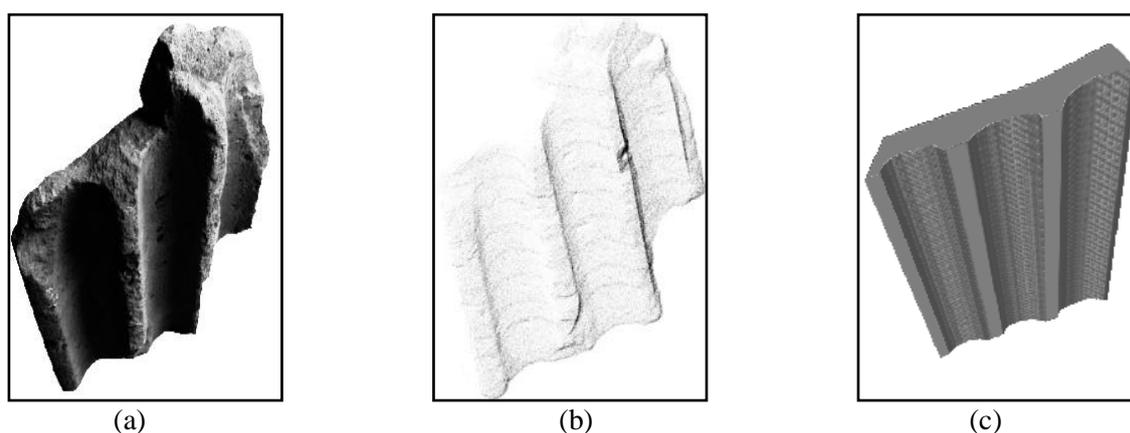


Figure 2.23. Exemple de modélisation géométrique : a) photographie ; b) nuage de points ; c) modèle géométrique (Begrliche, 2003).

Par ailleurs, contrairement à la modélisation par maillage, le modèle résultant de la modélisation géométrique est plus sobre au niveau esthétique. Il représente l'objet sous une forme géométrique parfaite « tel que conçu », sans les dégradations qu'il a pu subir au fil du temps.

2.4.3 Etat de l'art sur l'étape de modélisation

Plusieurs travaux traitent de la modélisation des toits de bâtiments à partir de données laser aériennes. En général, deux grandes familles de méthodes se profilent dans la littérature : la modélisation paramétrique et la modélisation non paramétrique d'un bâtiment (Rottensteiner et Briese, 2002 ; Maas et Vosselman, 1999). En revanche, rares sont les publications traitant de l'étape spécifique de modélisation des façades à partir de données laser terrestres. Ceci

s'explique probablement par l'ordre chronologique de l'apparition des deux types de données laser. Une autre explication à ce phénomène peut provenir du fait qu'on s'intéresse aux toits de bâtiments (petite échelle) avant de s'intéresser au détail des façades (grande échelle), tout comme la cartographie à l'échelle d'une ville prédomine par rapport à la cartographie des façades.

Néanmoins, la modélisation des façades à partir de données laser terrestres attire de plus en plus de chercheurs. Les travaux de (Briese et Pfeifer, 2008) proposent une méthode de modélisation basée essentiellement sur la détection des entités linéaires présentes dans les données laser terrestres. L'approche se décline en deux étapes. Dans la première étape, les entités linéaires (les droites avec leurs directions) sont détectées d'une manière automatique. Dans l'étape suivante, ces lignes sont reconstruites d'une manière semi-automatique. Les points composant les lignes sont détectés et reliés entre eux de façon automatique. La Figure 2.24 présente un exemple d'entité linéaire reconstruite par application de cette méthode.

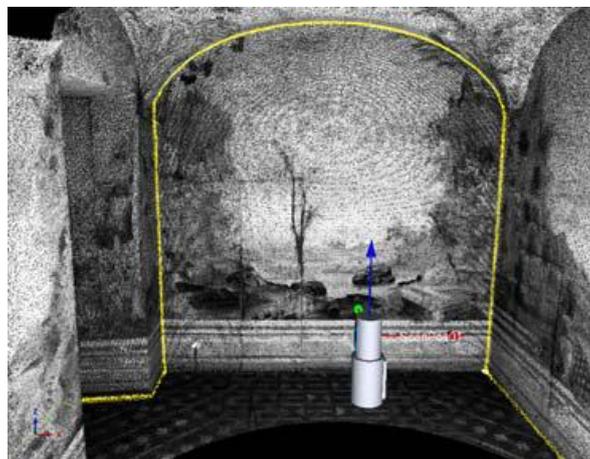


Figure 2.24. Extraction automatique des points composant une entité linéaire et modélisation manuelle d'une ligne caractéristique (en jaune) (Briese et Pfeifer, 2008).

L'extraction de lignes caractéristiques donc d'entités linéaires se fait d'habitude à partir de modèles maillés comme le proposent (Hubeli et Gross, 2001). Mais il est intéressant d'évoquer une méthode moins connue et efficace, publiée par (Belton et Lichti, 2006). Leur approche consiste à classifier les points en analysant des paramètres statistiques locaux des points en calculant la matrice de variance-covariance à partir des points voisins du point d'intérêt. Ensuite, ils calculent les vecteurs propres de la matrice de variance-covariance à partir desquels ils déduisent l'orientation de chaque point. En se basant sur ces orientations ainsi que sur les courbures approximatives, ils arrivent à ordonner les points en 3 classes : les points de frontières (*boundary points*) qui peuvent être définis par l'intersection de deux ou plus de surfaces, les points des arêtes intérieures de surface (*edge points*) et les points de surface (*surface points*). La Figure 2.25 présente un résultat issu de cette classification.

La modélisation directe de façades à partir d'une extraction de lignes n'est pas souvent facile à maîtriser, tant au niveau de l'automatisation qu'au niveau de la qualité des résultats. Pour surmonter ces difficultés (Pu et Vosselman, 2009) ont proposé une approche globale de

modélisation semi-automatique de façades par combinaison de données laser terrestres et d'images. Ils montrent que l'apport des données sémantiques facilite l'extraction des surfaces planes de la façade ainsi que leur modélisation. Les auteurs ont ainsi procédé à l'extraction de contours à partir d'images et emploient ce résultat pour améliorer les arêtes du modèle préalablement extrait à partir des nuages de points. L'organigramme de cette approche de modélisation est présenté en Annexe (B.4).

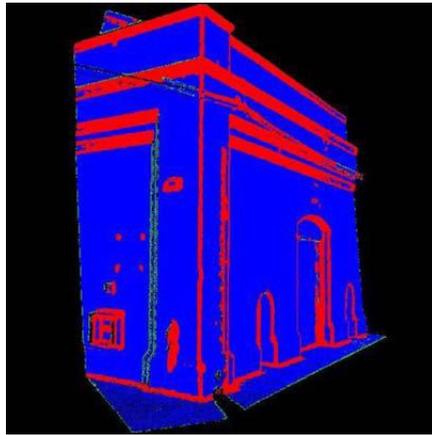


Figure 2.25. Classification de points en 3 classes : les points de surface (en bleu) ; les points des arêtes intérieures (en vert) et les points des frontières (en rouge).

(Böhm *et al.*, 2007) se sont également servis des données laser terrestres et d'images pour affiner le modèle grossier préalablement généré à partir de données laser aériennes. Au départ, le nuage de points est converti en un modèle numérique de surface (MNS), comme l'illustre la Figure 2.26. L'intérêt de créer un MNS est de calculer les normales des points qui servent par la suite à l'extraction des surfaces planes. Ces modèles 2.5D conservent pratiquement tous les détails de la façade et sont souvent employés pour la visualisation. Les images terrestres des façades servent à affiner le modèle grossier issu des données laser terrestres.

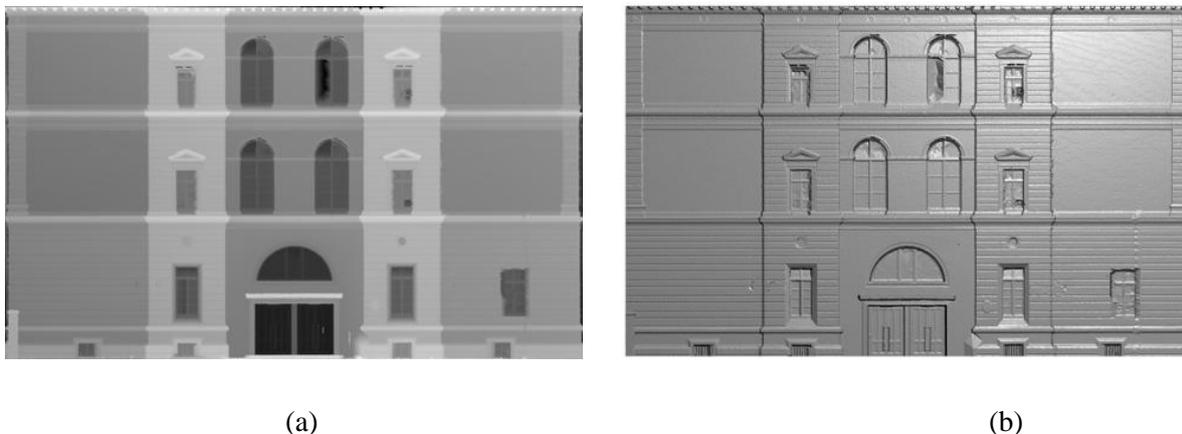


Figure 2.26. Génération d'un modèle numérique surfacique d'une façade de bâtiment ; a) MNS de la façade issu des données laser terrestre; b) mise en évidence du relief de la façade (Böhm *et al.*, 2007).

Les ouvertures (fenêtres et portes) sont reconstruites par un processus de décomposition cellulaire permettant d'extraire les arêtes suivant leur direction. D'abord, les points constituant les contours des fenêtres sont détectés et classifiés en arêtes horizontales et verticales. Puis la façade est décomposée de façon à ce que chacune des cellules contienne soit une partie homogène de la façade (mur) soit une ouverture (fenêtre ou porte). La distinction entre les types d'ouvertures est basée sur la présence ou non de points au sein des cellules. En effet, en raison de la transparence des vitres, le signal laser n'est pas renvoyé vers la station, donc très peu de points sont enregistrés sur ces surfaces (Figure 2.27).

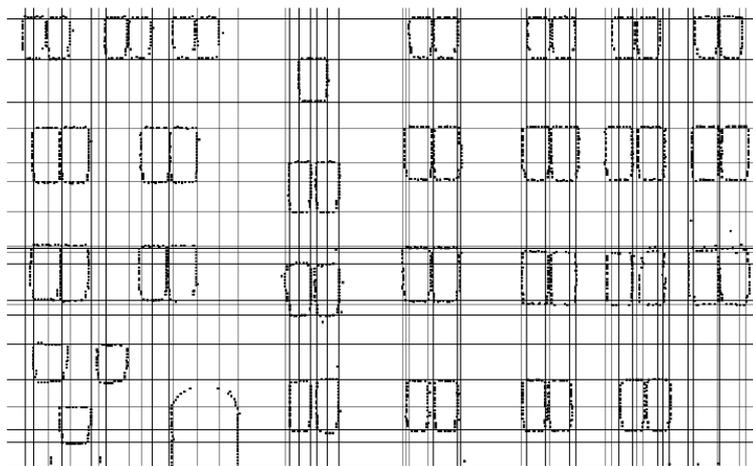


Figure 2.27. Décomposition cellulaire à l'aide des arêtes des ouvertures (Haala *et al.*, 2006).

Ensuite, leurs bordures sont affinées par l'utilisation de photographies de façades notamment au niveau de la menuiserie (Figure 2.28).



Figure 2.28. Extraction de contours sur les images pour améliorer le niveau de modélisation des fenêtres (Böhm *et al.*, 2007).

Enfin le modèle entier est reconstruit en regroupant le modèle grossier du bâtiment (issu du traitement de données LIDAR aériennes) et les modèles des ouvertures extraits des données laser terrestres et des photographies. Les épaisseurs de murs et profondeurs des ouvertures sont mesurées au niveau des traverses des fenêtres, dans le nuage de points laser terrestre (Figure 2.29).

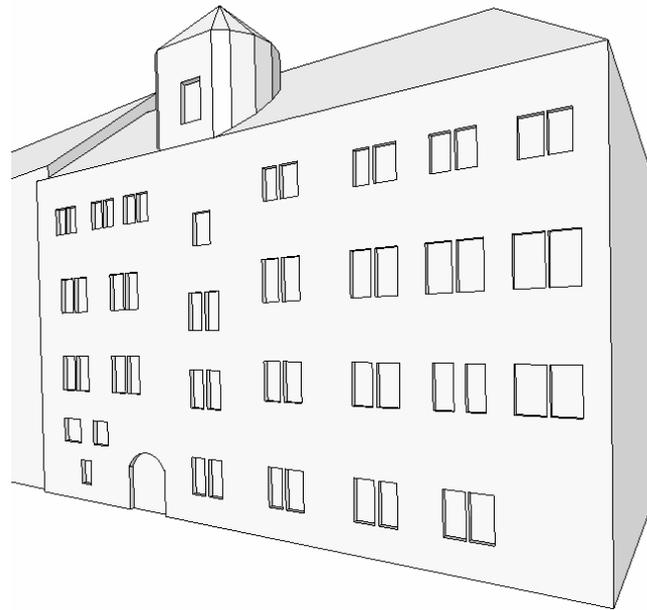


Figure 2.29. Modèle final issu d'une modélisation basée sur une décomposition cellulaire des éléments d'une façade (Böhm et al., 2007).

Dans le même contexte, (Deveau *et al.*, 2006) proposent une stratégie de modélisation des éléments architecturaux de façade à partir de nuages de points et d'images. Cette stratégie commence par l'orientation des images, appuyée sur les nuages de points, suivie d'une étape de segmentation semi-automatique et pour finir d'une étape de modélisation. Mais ces approches exigent une orientation relative pertinente entre les nuages de points en 3D et les images qui sont en 2D.

2.4.4 Conclusion sur la modélisation

A travers l'étude bibliographique présentée ici, deux remarques sont à formuler. D'une part, les études menées dans le but de reconstruire une façade ont été publiées récemment, ce qui montre que le sujet reste d'actualité et n'est pas encore maîtrisé. Par ailleurs, elles montrent aussi que la modélisation 3D de façades se fait souvent par association des données laser terrestres et d'autres données, généralement des images. Néanmoins, afin d'exploiter au maximum le contenu informationnel des données laser seules, il a été décidé ici de ne pas profiter de données complémentaires dans un premier temps.

2.5 Conclusion de l'état de l'art

Dans ce chapitre, une étude bibliographique des travaux réalisés dans l'objectif de modéliser des façades en 3D a été menée. Ces travaux ont montré que pour aboutir à un tel produit, un passage par un ensemble d'étapes (d'ailleurs fortement dépendantes les unes des autres) est impératif, en l'occurrence l'étape de consolidation, de segmentation et l'étape de modélisation proprement dite (voir l'organigramme de la Figure 2.1). C'est pourquoi cette étude bibliographique a été décomposée en trois parties également.

La consolidation a pour objectif le référencement des nuages de points issus de différentes stations dans un seul et même référentiel. Deux visions s'opposent quant à l'ordre dans lequel les processus de consolidation et de segmentation doivent être abordés. Certains chercheurs préconisent la consolidation avant la segmentation, arguant que les segments ne seront ni complets ni fiables s'ils ne résultent pas de la totalité du nuage. Ces chercheurs adoptent souvent les techniques de consolidation par recherche de points de correspondance. Pour ceux adoptant les techniques de consolidation basées sur la recherche de primitives géométriques, la segmentation doit être faite, d'après eux, sur chaque nuage de point à part. Ensuite les paramètres des transformations permettant la consolidation des nuages seront déduits des transformations entre primitives détectées. Deux grandes familles de techniques de consolidation sont disponibles. L'une se lance dans la recherche de points de correspondance dans la zone de recouvrement des nuages à consolider. La seconde se base sur la reconnaissance de formes géométriques dans la zone de recouvrement, avant d'en déduire les points de correspondance. Dans cette thèse, la consolidation était superflue car le scanner employé permettait le géoréférencement direct des nuages de points.

Concernant la segmentation des nuages de points acquis par les scanners laser terrestres, deux grandes familles de méthodes ont été citées : les algorithmes agissant sur le principe de fusion-division et les algorithmes réduisant la segmentation à l'extraction automatique de formes géométriques. La première famille d'algorithmes est fondée sur l'utilisation de relations de proximité et de similitudes pour subdiviser le nuage de points. La deuxième famille d'algorithmes aboutit à une segmentation dite géométrique, car les segments qui en résultent sont des ensembles de points ajustés par la primitive géométrique considérée. La plupart de ces techniques relèvent du domaine de la vision par ordinateur.

Chaque famille d'algorithmes présente évidemment des avantages et des inconvénients. C'est pourquoi, l'idée de tirer profit des avantages de chacune d'elles semble être une piste de recherche encourageante. L'approche de segmentation développée dans cette thèse tente de concilier d'une part, le caractère global lié à la détermination géométrique de surfaces planes (deuxième familles d'algorithmes) et d'autre par les spécificités locales des éléments architecturaux d'une façade pris en compte par la première famille d'algorithmes. D'une part, elle est basée sur l'algorithme RANSAC pour une définition rigoureuse des plans globaux d'une façade. D'autre part, les résultats de RANSAC sont optimisés et renforcés par l'algorithme de croissance de région de façon à extraire des surfaces planes représentant des

détails de la façade. Le chapitre 3 est consacré au développement de cette nouvelle approche de segmentation.

Concernant la modélisation de façades à partir des données laser terrestres, peu d'études ont été publiées sur le sujet. Récemment des chercheurs ont tenté de modéliser des façades en proposant des démarches combinant les données laser terrestres et d'autres données complémentaires, en particulier les images. Du point de vue technique, ils favorisent l'utilisation de primitives géométriques dans le processus de modélisation des détails architecturaux de la façade. La primitive « plan » occupe le cœur de la plupart des approches proposées. Cela se justifie par le fait que les façades de bâtiments sont composées, en général, par des éléments plans. Le chapitre 4 est consacré à la description de l'approche de modélisation développée dans cette thèse.

Afin d'exploiter au maximum les données laser, il a été décidé de n'intégrer, du moins dans un premier temps, aucune donnée additionnelle à celle constituée par les données laser. L'approche ainsi développée permettra de confirmer l'intérêt et la pertinence des données laser terrestres pour la production de modèles 3D de façades de bâtiments. L'ensemble de la chaîne de traitements menant à des modèles 3D à partir de données laser terrestres a été développé sous MATLAB (@matlab).

3

Segmentation automatique de façades de bâtiments numérisées par scanner laser terrestre

Sommaire

3.1 INTRODUCTION	68
3.2 DONNEES DE L'ETUDE	69
3.3 PRETRAITEMENT DU NUAGE DE POINTS	72
3.4 APPROCHE DE SEGMENTATION GEOMETRIQUE DEVELOPPEE.....	76
3.4.1 SEGMENTATION D'UN NUAGE DE POINTS	76
3.4.2 HYPOTHESE DE TRAVAIL ET FORMALISATION.....	76
3.4.3 PRINCIPE ET THEORIE DU PARADIGME RANSAC.....	77
3.4.3.1 Explications et définitions.....	78
3.4.3.2 Nombre d'itérations dans la version originale de RANSAC.....	79
3.4.3.3 Nombre d'itérations dans la version adaptative de RANSAC	80
3.4.3.4 Initialisation de la primitive géométrique « plan ».....	80
3.4.3.5 Détermination des points « valables » composant un plan.....	81
3.4.3.6 Distribution statique des distances à un plan.....	82
3.4.4 EXTRACTION SEQUENTIELLE DES PLANS DE FAÇADES	87
3.4.5 CRITERES DE SEGMENTATION DE FAÇADES DE BATIMENTS	88
3.4.5.1 Cardinal d'un segment plan.....	88
3.4.5.2 Contraintes géométriques et ordre de détection des plans.....	90
3.4.5.3 Ecart-type des distances	93
3.4.6 CONNECTIVITE DES SEGMENTS PLANS	94
3.4.6.1 Problématique.....	94
3.4.6.2 Erreurs surfaciques	94
3.4.6.3 Erreurs linéaires.....	95
3.4.6.4 Détection par croissance de région des segments plans connectés	95
3.4.7 AJUSTEMENT DES PARAMETRES DU PLAN PAR LES MOINDRES CARRES	97
3.5 CONCLUSION	99

3.1 Introduction

Comme le montre l'état de l'art précédent, la modélisation de façades à partir de relevés effectués au scanner laser terrestre est loin d'être triviale. Non seulement le sujet est récent, mais en plus, le volume important de données généré par ces instruments exige plusieurs étapes de traitement avant de pouvoir se pencher sur la question de la modélisation en tant que telle. Il ressort aussi de l'état de l'art que les étapes de la chaîne de traitements menant à un modèle tridimensionnel construit à partir de données laser terrestres sont interdépendantes.

La segmentation est une des étapes principales de cette chaîne de traitement. En effet, cette opération permet de réduire la complexité de modélisation en subdivisant les données en sous-ensembles plus faciles à traiter. Ainsi, pour modéliser un objet complexe, composé par exemple d'une sphère, d'un cylindre, d'un cône et d'un plan, il est plus facile de modéliser chaque forme géométrique à part et de regrouper ensuite l'ensemble pour obtenir le modèle final. Dans ce cas, la segmentation se fait via la reconnaissance et l'ajustement automatiques des formes géométriques présentes dans les données.

Comme l'a évoqué l'état de l'art, deux grandes familles de méthodes automatiques de segmentation méritent d'être citées :

- a) les méthodes basées sur la croissance de région selon des critères d'homogénéité prédéfinis
- b) les méthodes basées sur la reconnaissance de formes géométriques et l'estimation robuste de leurs paramètres

L'approche de segmentation de façades développée dans cette thèse s'inspire de ces deux familles de méthodes. En effet, par l'intégration de l'algorithme RANSAC (*RANdom SAmple Consensus*), elle profitera des avantages de la seconde famille de méthodes, c'est-à-dire la détermination rigoureuse des paramètres des plans extraits. D'autre part, par le développement d'un algorithme de croissance de région, elle profitera des avantages de la première famille de méthodes, c'est-à-dire des propriétés locales communes des points constituant les segments plans, telles que la connectivité qui sera détaillée ci-dessous.

Après l'étape de prétraitement indispensable à la préparation des données, l'accent sera mis sur la théorie des deux algorithmes et leurs contributions à la segmentation de façades de bâtiments numérisées par scanner laser terrestre. La Figure 3.1 présente l'organigramme général des étapes principales de traitement composant l'approche développée.

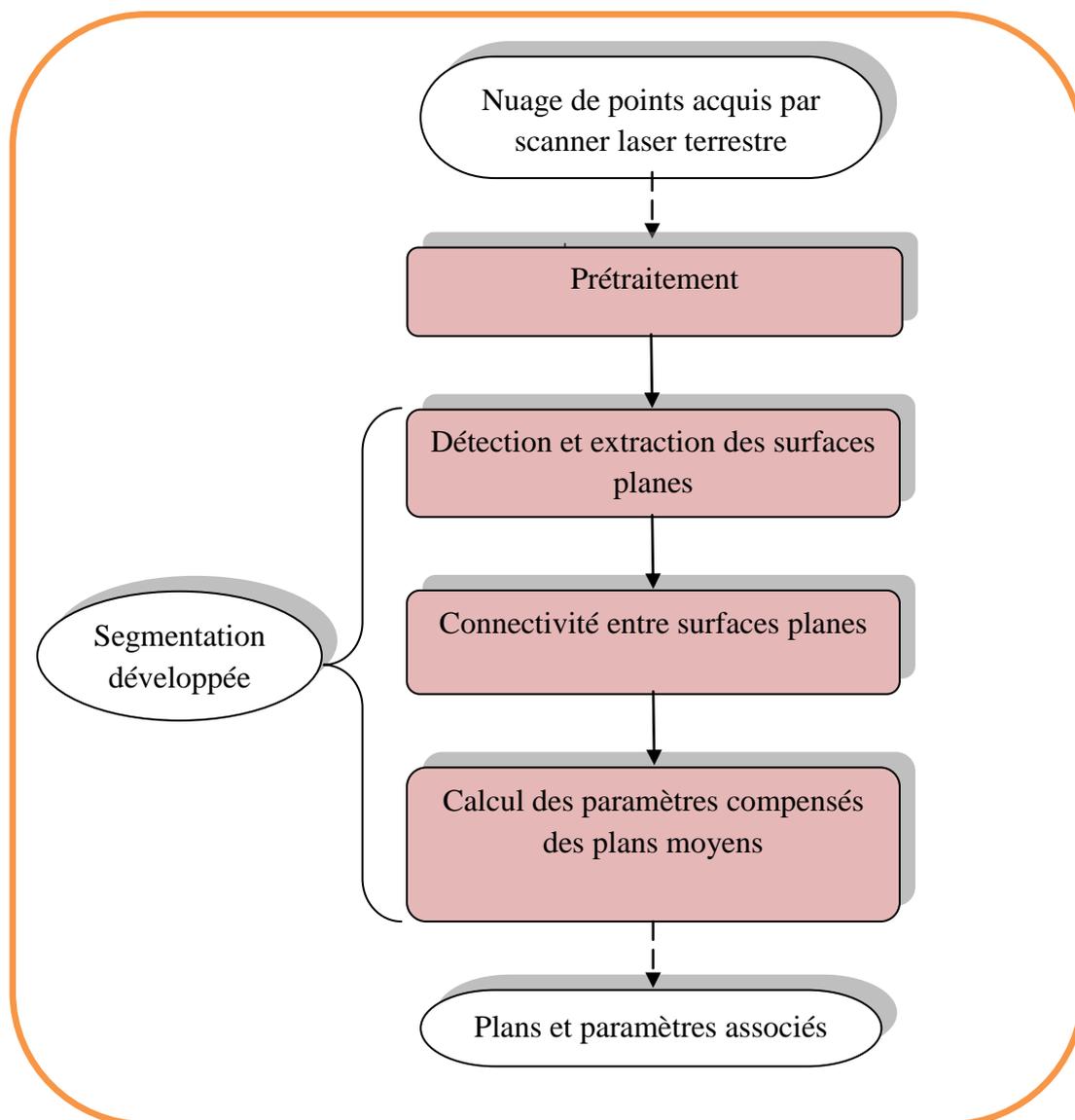


Figure 3.1. Schéma général de l'approche de segmentation développée

Dans les sections suivantes, le fondement théorique ainsi que la mise en œuvre de chaque étape du schéma présenté ci-dessus (Figure 3.1) seront exposés. Mais, avant de se lancer dans l'explication des différentes étapes, il est judicieux de décrire les données de départ.

3.2 Données de l'étude

Le scanner utilisé dans cette étude pour générer des nuages de points couvrant des façades est le scanner laser Trimble GX (Trimble) présenté dans la Figure 3.2. Il fonctionne sur le principe de mesure du temps de vol de l'onde (cf. chapitre 1). Cette série de scanners permet la mesure des coordonnées 3D de points, à raison d'environ 5 000 points par seconde (d'après le constructeur). Cette cadence est fonction de divers critères comme notamment du nombre de tirs associés à l'acquisition d'un point.



Figure 3.2. Scanner laser Trimble GX

L'Annexe (A.3) présente l'ensemble des caractéristiques techniques du scanner laser Trimble GX. Les critères déterminants pour cette étude sont présentés dans le Tableau 3.1:

Scanner laser Trimble GX	
Précision de mesure de distance	7 mm à 100 m
Précision de positionnement des points	12 mm à 100 m
Résolution horizontale	3.2 mm à 100 m
Résolution verticale	1.6 mm à 100 m
Taille du spot lumineux	3 mm à 50 m

Tableau 3.1. Quelques spécifications techniques du scanner laser Trimble GX (données constructeur).

Ces caractéristiques sont très importantes, car elles conditionnent la qualité du nuage de points et par conséquent celle des modèles finaux. Bien évidemment, il ne faut pas perdre de vue que ces valeurs sont annoncées par le constructeur et qu'elles ont été obtenues dans des conditions de levé idéales.

Un des atouts du scanner Trimble GX est qu'il peut être mis en station sur un point connu, au même titre qu'un théodolite et être orienté à partir de références. Il peut donc être intégré à un cheminement polygonal. Les nuages de points obtenus au niveau des stations composant le cheminement sont donc facilement orientables les uns par rapport aux autres, ce qui permet d'éviter la fastidieuse tâche de consolidation. En plus de la mesure laser, une caméra vidéo permet la prise de vues de la scène. Ces prises de vues sont ensuite employées pour associer une information RVB à chaque point du nuage. On parle communément de « nuage de points coloré ». Différents projets de l'équipe ont toutefois montré que la qualité de ces images reste décevante voire inexploitable dans l'objectif d'un rendu de qualité. La Figure 3.3 montre un

exemple de nuage de points obtenu sur le projet du Lycée des Pontonniers à Strasbourg. Le levé a été réalisé depuis une vingtaine de stations composant les sommets d'un cheminement polygonal. Ainsi, un nuage d'environ 20 000 000 de points a pu être acquis et géoréférencé sur place (Queste, 2006).

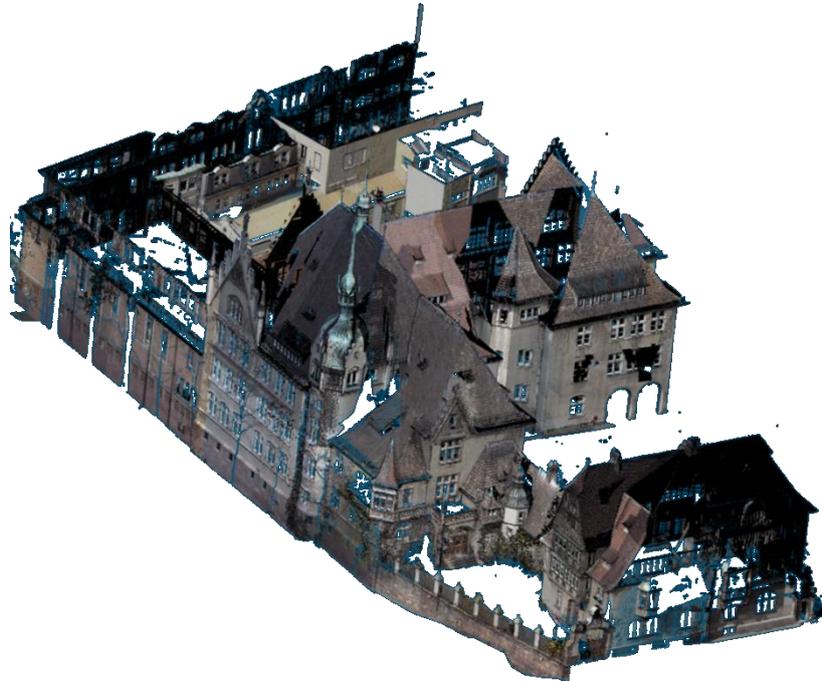


Figure 3.3. Nuage de points coloré du Lycée International des Pontonniers (Strasbourg), obtenu avec le scanner Trimble GX (fusion de 20 nuages).

Pour obtenir un nuage de points de qualité et optimiser le temps d'acquisition, il est nécessaire de définir la position des stations de numérisation, de telle sorte que les points de vue se complètent et permettent de couvrir toutes les parties de l'objet, en évitant les masques.

Comme vu au chapitre 1, en plus des coordonnées $[x, y, z]$ dans le repère du laser, d'autres informations sont associées à chaque point du nuage : l'intensité du signal renvoyé par la cible (i), les composantes de couleur $[r \ v \ b]$ du pixel de l'image couvrant la cible et les composantes des normales locales $[n_x \ n_y \ n_z]$ de chaque point. Un tel nuage de points peut être présenté comme une matrice (PTS) de 10 colonnes et d'un nombre de lignes égal au nombre total de points. L'équation (3.1) décrit la matrice contenant les données.

$$PTS = [x, y, z, i, n_x, n_y, n_z, r, v, b]_{m,10} \quad (3.1)$$

Où :

$[x \ y \ z]$: coordonnées cartésiennes des points définis dans un repère 3D orthonormé

i : intensité du signal retour, affectée au point correspondant dans le nuage

m : nombre de lignes de la matrice, égal au nombre de points du nuage

$[n_x n_y n_z]$: composantes de la normale de chaque point, définies à partir de la surface locale voisine de chaque point

$[r v b]$: les composantes (rouge, vert et bleu) associées au pixel de la prise de vue couvrant ce point.

Des points sont considérés, dans cette étude, comme indésirables lorsqu'ils n'appartiennent pas à la surface de la façade. Se débarrasser de ces points dans une étape de prétraitement s'avère indispensable avant de se pencher sur la question de la segmentation.

3.3 Prétraitement du nuage de points

La phase de prétraitement est souvent une étape nécessaire à l'obtention de données cohérentes. Son objectif est de réduire le bruit en appliquant un processus de correction et/ou de suppression de points faux et indésirables dans le nuage, afin de ne conserver que les points supposés d'intérêt. En plus du bruit inhérent aux mesures et qui sera étudié lors de l'évaluation des résultats, des points indésirables sont relevés lorsque des objets sont situés soit entre la station et la façade, soit à l'arrière de celle-ci. Ainsi, on rencontre des points indésirables en présence d'obstacles occultant la façade, tels que les véhicules, les arbres, les piétons (cf. Figure 3.4). D'autre part, en scannant une façade ayant des ouvertures transparentes telles que les portes vitrées et les fenêtres, le faisceau laser pénètre dans les pièces et génère des points situés à l'intérieur des locaux (cf. Figure 3.5). Ces points « intérieurs » sont moins difficiles à écarter que les points provenant d'obstacles. En effet, les points couvrant les obstacles (arbres, voitures) d'une part gênent le traitement des données laser, mais surtout provoquent des ombres laser (trous) dans le nuage de la façade, donc une discontinuité dans la densité de points qui agira négativement sur les résultats ultérieurs. On parle de l'ombre laser par analogie à l'ombre radar³. Elle caractérise la zone de la surface balayée, dépourvue de points. Ce problème peut être partiellement contourné par la multiplication des stations, à condition que l'obstacle ne soit pas attenant à la façade.

Si la multiplication des stations s'avère indispensable pour contourner les masques, elle soulève un autre problème. En effet, à cause des recouvrements entre nuages, plusieurs points sont susceptibles d'être enregistrés plus d'une fois. Cela crée une redondance de points qui alourdit encore davantage le nuage de points. La série d'opérations permettant de remédier à ce problème est présentée un peu plus loin.

³ Une ombre radar correspond à la zone de l'image dépourvue d'information radiométrique, correspondant aux points du terrain non illuminé ou invisibles du capteur (Polidori, 1997).

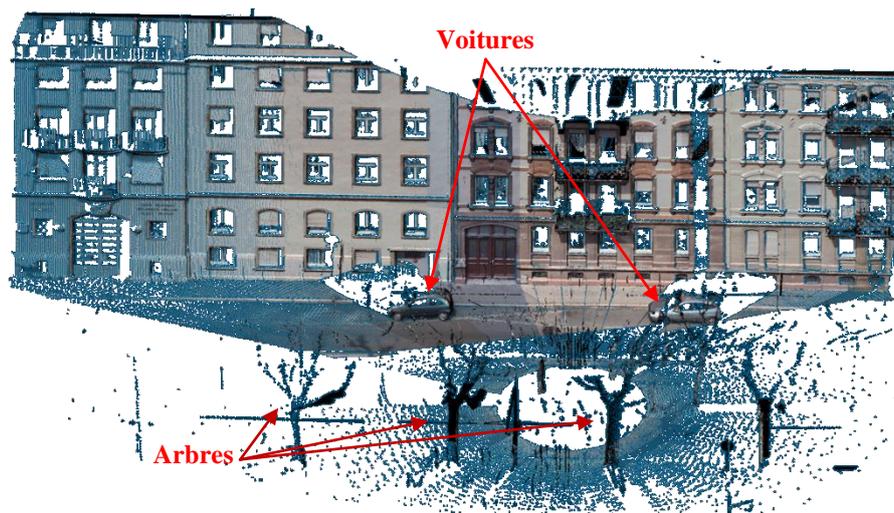


Figure 3.4. Exemple de points indésirables : présence d'obstacles entre le scanner et la façade (vue en perspective)

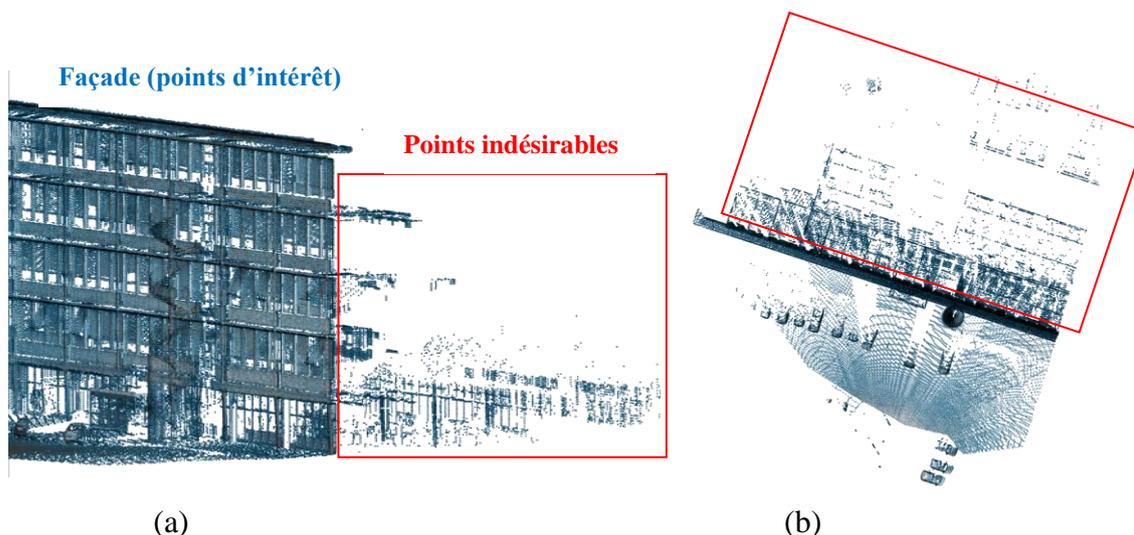


Figure 3.5. Exemple de points fantômes (encadrés en rouge) situés derrière la façade ; a) vue latérale ; b) vue d'en haut

L'élimination des points indésirables peut être effectuée manuellement ou automatiquement. Dans le premier cas, l'opérateur peut se servir d'un logiciel de traitement proposant des outils interactifs de visualisation et de sélection de points. Dans le cadre de cette étude, il s'agissait du logiciel RealWorks (Trimble). Ce logiciel permet de sélectionner et de supprimer manuellement la partie du nuage contenant les points indésirables, à l'aide d'un outil de segmentation interactif. La Figure 3.6 présente la façade de la Figure 3.4 après avoir éliminé les points indésirables situés devant et derrière la façade. Cette opération manuelle est simple et rapide à effectuer. Néanmoins, dans un souci de rendement et de production de masse, les processus automatiques sont préconisés.



Figure 3.6. Résultat de la suppression manuelle des points indésirables du nuage de points brut de la Figure 3.4 (à l'aide du logiciel RealWorks de Trimble)

Les points d'intérêts peuvent être séparés de façon automatique des points indésirables, en tenant compte d'un certain nombre de critères. D'abord, les points d'intérêt appartiennent à la surface de la façade, supposée verticale. De plus, ces points forment la plus grande entité de points dans le plan vertical (points rouges de la Figure 3.7). Il s'agit donc de déterminer les parties du nuage répondant à ces deux critères. L'algorithme distingue ainsi deux classes de points : la classe des points d'intérêt (points rouges) et la classe des points indésirables (points bleus) comme l'illustre la Figure 3.7.

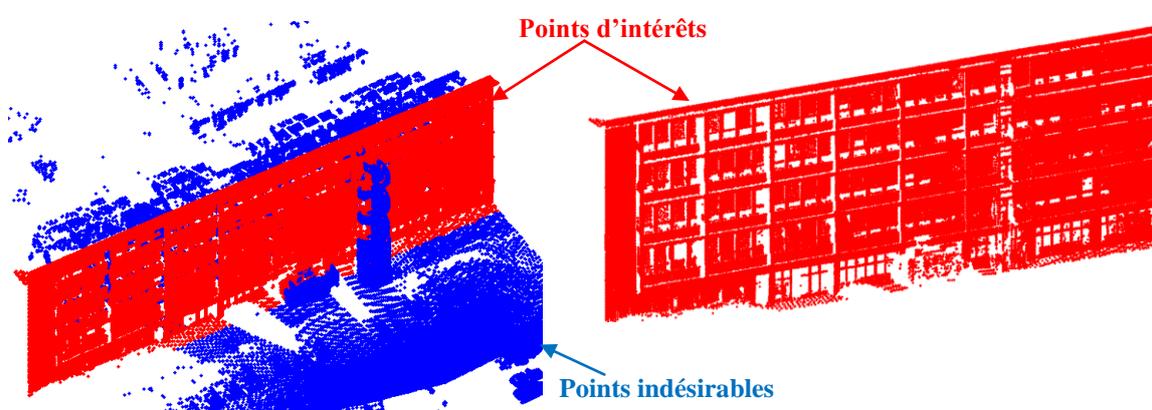


Figure 3.7. Résultats de la séparation automatique des points d'intérêt (points rouges) et des points indésirables (points bleus)

Une fois que les points d'intérêt sont identifiés, il est important de procéder à leur analyse. Une analyse primordiale des nuages de points consiste à étudier la présence ou non de points doubles dans le nuage global et de réduire la taille du nuage de points d'un facteur important. Par conséquent, le temps de calcul ainsi que le volume de données à stocker n'en seront que plus réduits.

On appelle « points doubles » des points qui ont les mêmes coordonnées au dixième de millimètre près. Ils proviennent du fait qu'un même objet peut être balayé depuis plusieurs stations. Pour ne disposer que d'une seule et unique représentation géométrique pour chaque

point, il suffit, à partir de la matrice *PTS* des données (cf. équation 3.1), d'extraire les doublons en recherchant les points de coordonnées identiques au dixième de millimètre près.

$$NPTS = \{p \in PTS; i \neq j \in \{1, \dots, m\}, x_i \neq x_j \text{ et } y_i \neq y_j \text{ et } z_i \neq z_j\} \quad (3.2)$$

Où :

NPTS : nouveau nuage de points sans points doubles

p : point du nuage de points brut *PTS* parmi les *m* points qui composent le nuage

Le Tableau 3.2 montre le gain en termes de volume de données suite à la suppression des points doubles. Le nombre de ces points dépend non seulement de la taille de l'échantillon, mais aussi et surtout du nombre de stations de balayage ayant permis de couvrir la façade toute entière. Il arrive même d'avoir des nuages entiers de points doubles, comme c'est le cas pour les nuages 5 et 6. Dans ce cas, on pourrait présumer que les deux nuages ont été numérisés deux fois à partir des mêmes stations (balayage repris). Dans les conditions normales, il faut compter avec un pourcentage moyen de 10% environ de points doubles, ce qui peut représenter des centaines de milliers de points (par exemple, 156 085 points doubles ont été trouvés dans le nuage 10). Cela justifie grandement la nécessité de cette opération avant toute autre.

N° Nuage	Nombre de points du nuage initial (PTS)	Nombre de points du nuage NPTS	NPTS - PTS	Pourcentage de réduction (%)
Nuage 1	302 069	280 044	220 25	7
Nuage 2	730 6170	688 1147	425 023	6
Nuage 3	132 477	114 827	176 50	13
Nuage 4	654 519	554 864	996 55	15
Nuage 5	166 4481	677 387	987 094	59
Nuage 6	938 493	392 517	545 976	58
Nuage 7	706295	587 825	118 470	17
Nuage 8	800 0000	784 5200	154 800	2
Nuage 9	530 912	445 785	851 27	16
Nuage 10	116 3729	100 7644	156 085	13

Tableau 3.2. Résultats de l'élimination des points doubles dans le cas de 10 échantillons de différentes tailles.

Une fois que les points d'intérêt sont isolés et les points doubles supprimés, il est temps de passer à l'étape suivante : la segmentation. Les paragraphes suivants décrivent l'approche développée dans cette thèse.

Dans la suite du document, sauf mention contraire, seules les coordonnées cartésiennes des points sont utilisées. Autrement dit, seules les trois premières colonnes $[x, y, z]$ de la matrice $NPTS$ sont considérées. L'intérêt et l'utilisation des normales locales sera évoquée en Annexe (C.1) pour la simple raison que les normales ne sont pas toujours fournies par les systèmes d'acquisitions.

3.4 Approche de segmentation géométrique développée

Avant d'entrer dans le vif du sujet, il est important de préciser certaines définitions et notations.

3.4.1 Segmentation d'un nuage de points

La segmentation d'un nuage de points peut être définie d'une manière analogue à la segmentation d'images. Dès lors, on entend par segmentation d'un nuage de point le partage de l'ensemble des points de la scène numérisée en sous-ensembles de points homogènes et de taille maximale. Un sous-ensemble est appelé un « segment ».

Comme indiqué dans l'organigramme de la Figure 3.1, la segmentation des données laser terrestres développée dans cette thèse se déroule en trois étapes principales. La première procède à l'extraction automatique des plans principaux de la façade. La deuxième s'assure de la connectivité des surfaces de telle sorte qu'elles correspondent aux détails architecturaux de la façade. Enfin, la dernière étape consiste à recalculer les paramètres les plus probables des plans à partir des points qui les composent.

3.4.2 Hypothèse de travail et formalisation

L'homogénéité des segments est une des propriétés intrinsèques définissant une opération de segmentation. Etant donné que les façades sont composées majoritairement de surfaces planes, la coplanarité des points pourrait être un des critères d'homogénéité permettant de segmenter les façades de bâtiments en un ensemble de segments. Ce critère d'homogénéité affecte aux segments un attribut supplémentaire intéressant, à savoir leur surface. Dès lors, l'hypothèse de travail peut être formulée de la manière suivante : « Les façades des bâtiments numérisées par un scanner laser terrestre peuvent être segmentées en régions homogènes au regard de la coplanarité des points qui les composent ». Ces régions seront appelées des « segments plans ».

Partant de cette hypothèse, on peut expliciter la définition formelle et générale de la segmentation d'un nuage de points $NPTS = \{p_1, \dots, p_m\}$ en segments plans $\{PL_0, PL_1, \dots, PL_k\}$ de la manière suivante :

- 1) Les points de chaque segment plan $PL_i, i \geq 1$ doivent vérifier la propriété de coplanarité.
- 2) Chaque segment plan $PL_i, i \geq 1$ doit représenter un ensemble de points constituant une entité. Cette entité correspond à une surface plane décrivant un détail architectural de la façade considérée.

- 3) Les segments plans sont deux à deux disjoints, c'est-à-dire que $PL_i \cap PL_j = \emptyset, \forall i, j: i \neq j$, cela veut dire qu'un point ne peut appartenir qu'à un seul segment plan.
- 4) La taille d'un segment en termes de superficie doit être supérieure à une valeur seuil introduite par l'opérateur selon la nature de la façade et des données.
- 5) Le segment spécial B_0 correspond à l'ensemble des points qui n'appartiennent à aucune surface de la façade et qui sont qualifiés de points de « bruit ». Ce segment est le seul à ne pas être plan.

Etant donné que les données laser terrestres sont souvent assez bruitées, l'approche commence par l'application d'un algorithme d'estimation robuste. Le principe, la théorie et les adaptations de cet algorithme à la détection de la primitive géométrique « plan » sont détaillés dans le paragraphe suivant.

3.4.3 Principe et théorie du paradigme RANSAC

Comme déjà évoqué, RANSAC est l'acronyme de « *RAN*dom *SAM*ple *CON*sensus » introduit par (Fischler and Bolles, 1981). Il s'agit à la fois d'un estimateur robuste et d'un outil de segmentation.

D'une part, cet algorithme, dans sa forme basique, permet d'estimer les paramètres d'un modèle mathématique à partir de mesures expérimentales souvent affectées d'observations aberrantes. C'est pourquoi on parle de méthode « robuste », car RANSAC permet de trouver des solutions justes, même en présence d'un grand nombre de mesures fausses. Cette caractéristique rend cette méthode particulièrement intéressante pour traiter des données laser terrestres, car celles-ci n'échappent pas au problème du bruit de mesure et de mesures aberrantes.

D'autre part, comme évoqué dans l'état de l'art, RANSAC peut être utilisé dans le contexte de la segmentation géométrique pour extraire des primitives géométriques dont les modèles mathématiques sont connus, telles que le plan, la sphère, le cylindre.

Son principe de fonctionnement est le suivant : l'algorithme effectue, de façon itérative, un tirage aléatoire d'un échantillon dont la taille est suffisante pour estimer les paramètres d'un modèle mathématique. Après estimation du modèle, le nombre de points « proches » du modèle, c'est-à-dire situés dans un intervalle de tolérance prédéfini, est comptabilisé. On parlera de points « valables » dans ce cas (*inliers* en anglais). Le modèle ayant le plus grand nombre de points valables est choisi et considéré comme étant le meilleur modèle présent dans le jeu de données.

La taille de l'échantillon correspond au nombre de points minimum requis pour initialiser le modèle. Par exemple, pour pouvoir définir les paramètres d'un plan, l'échantillon doit contenir au minimum 3 points. Ensuite, l'ensemble des points valables est déterminé via le calcul de la distance qui sépare chaque point du plan modélisé. Tout point se trouvant à une

distance inférieure à une tolérance donnée du modèle initialisé est considéré comme un point valable.

Pour faciliter la compréhension de l'algorithme RANSAC, il est utile de définir et d'expliquer les formules mathématiques auxquelles il fait appel.

3.4.3.1 Explications et définitions

Comme évoqué plus haut, les seules données employées dans cette étude sont les coordonnées cartésiennes des N points du nuage. Donc la formule (3.1) devient :

$$NPTS = [x, y, z]_{N,3} \quad (3.4)$$

On désigne par $S = \{p_1, \dots, p_k\}$ l'échantillon de départ, composé du nombre minimal de points nécessaires au calcul des paramètres d'un modèle mathématique \mathcal{M} défini comme suit:

$$\mathcal{M}(a) = \{a \in pr : \mathcal{F}_{\mathcal{M}}(p; a) = 0\} \quad (3.5)$$

Où:

$pr = \{a_1, \dots, a_n\}$: vecteur des paramètres du modèle à estimer

$p \in S$: ensemble des points du nuage permettant le calcul des paramètres pr

$\mathcal{F}_{\mathcal{M}}$: fonction décrivant le modèle mathématique.

Pour mieux comprendre ces définitions, prenons l'exemple d'un plan dans l'espace $3D$. Un plan est défini par un nombre minimum de 3 points $S = \{p_1, p_2, p_3\}$, à partir desquels on peut calculer son vecteur à 4 paramètres $pr = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$. Le modèle mathématique du plan est donc défini comme suit :

$$\mathcal{M}(a) = \{a_{1 \leq i \leq 4} \in pr : \mathcal{F}_{\mathcal{M}}(p; a) = a_1x + a_2y + a_3z + a_4 = 0\} \quad (3.6)$$

Où :

$[a_1, a_2, a_3]$: composantes de la normale du plan

a_4 : distance du plan à l'origine du repère

Il est nécessaire à présent de définir certaines expressions intervenant dans l'algorithme RANSAC.

Ensemble Consensus : On appelle « Ensemble Consensus de points » (en anglais *Consensus Set*) et que l'on note (EC) , l'ensemble de points qui ajuste au mieux le modèle préalablement initialisé par l'échantillon S . Ces points appartiennent au modèle mathématique $\mathcal{M}(a)$, avec une erreur inférieure ou égale à une tolérance prédéfinie τ . L'équation (3.7) définit cet « Ensemble Consensus de points ». On note $\text{Card}(EC)$ le cardinal de l'Ensemble Consensus, c'est-à-dire le nombre de points composant le plan en question.

$$EC(a) = \{p \in NPTS: e(p, \mathcal{M}(a)) \leq \tau\} \quad (3.7)$$

Où :

τ : écart tolérable en-dessous duquel un point est considéré comme appartenant à l'EC.

$e(p, \mathcal{M}(a))$: erreur du point p par rapport au modèle $\mathcal{M}(a)$.

Dans l'équation (3.7), l'écart entre le point p et le modèle $\mathcal{M}(a)$ se calcule selon la formule (3.8).

$$\begin{aligned} e(p, \mathcal{M}(a)) &= \min_{p^* \in \mathcal{M}(a)} (dist(p, p^*)) \\ &= \min_{p^* \in \mathcal{M}(a)} \left(\sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - p_i^*)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - p_i^*)^2} \right) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Où p_i^* : projection orthogonale du point p_i sur le modèle $\mathcal{M}(a)$.

Outre les modifications et adaptations apportées dans le cadre de ce travail, l'algorithme RANSAC reste composé de deux phases essentielles appliquées de façon itérative :

- l'initialisation du modèle par un choix aléatoire des données de départ et
- le test de l'appartenance de données à l'Ensemble Consensus du modèle.

Le tirage des échantillons nécessaires à initialiser le modèle est réalisé de façon aléatoire et itérative. Cela amène à se poser la question suivante : au bout de combien d'itérations extraira-t-on le plan recherché, c'est-à-dire le plan comportant le plus grand nombre de points valables ? Pour répondre à cette question, l'algorithme RANSAC prévoit une optimisation du nombre d'itérations nécessaires en adoptant une approche probabiliste.

3.4.3.2 Nombre d'itérations dans la version originale de RANSAC

L'algorithme RANSAC veille à déterminer le nombre optimal de tirages d'échantillons nécessaires pour trouver le bon modèle recherché, avec une probabilité donnée P . Si on désigne par W la probabilité de choisir à chaque itération un point valable et que les 3 points nécessaires à définir un plan sont sélectionnés de façon indépendante, dans ce cas, la probabilité pour que les 3 points soient tous des points valables est de $W*W*W = W^3$. Donc il y a une probabilité égale à $(1 - W^3)$ qu'au moins un de ces points ne fasse pas partie des points valables à chaque tirage. Par conséquent, après N tirages, cette probabilité est multipliée N fois. Elle correspond à la probabilité pour que l'algorithme ne sélectionne aucun échantillon de 3 points valables à la fois. Elle est alors égale à $(1-P)$, d'où l'égalité suivante :

$$(1 - W^3)^N = 1 - P \quad (3.9)$$

Où :

P : probabilité de tirer l'échantillon initialisant le bon plan recherché

W : probabilité de choisir un point valable à chaque itération

Cette probabilité W de choisir un point valable à chaque itération est exprimée par :

$$W = \frac{\text{nombre de points valables}}{\text{nombre total de points}} = \frac{\text{Card}(EC)}{\text{Card}(NPTS)} \quad (3.10)$$

Où :

$\text{Card}(EC)$: nombre de points de l'ensemble consensus

$\text{Card}(NPTS)$: le nombre total de points du nuage de points

Donc le nombre d'itérations nécessaires est donné par la formule suivante:

$$N = \frac{\log(1-p)}{\log(1-w^3)} \quad (3.11)$$

Généralement, le nombre d'itérations est lié à la proportion de bruit présent dans les données, mais aussi au nombre minimum de points nécessaires pour initialiser le modèle. Dans l'équation (3.11), il reste à renseigner les valeurs de P et W pour pouvoir calculer ce nombre d'itérations. Le choix des valeurs affectées à ces deux paramètres est choisi d'une manière empirique. Ainsi la valeur de P est souvent choisie assez élevée ($0.95 \leq P \leq 0.99$) de telle sorte que le plan extrait soit associé à une forte probabilité. Cependant, pour W , il arrive souvent qu'on ne connaisse pas le nombre de points valables subsistant dans les données. Dans ce cas, l'algorithme est initialisé en utilisant une estimation grossière de la valeur de W , ce qui risque de fausser le calcul du nombre d'itérations. Pour surmonter ce problème, une approche adaptative de RANSAC inspirée de (Hartley et Zisserman, 2003) a été développée.

3.4.3.3 Nombre d'itérations dans la version adaptative de RANSAC

La solution apportée au problème cité ci-dessus consiste à adapter la fausse estimation de W au fur et à mesure que les différents « Ensembles Consensus » sont déterminés. Cette idée d'adaptation de la valeur W à travers les ECs trouvés peut être appliquée répétitivement pour déterminer la valeur du nombre d'itérations N avant le démarrage de la prochaine itération. Ainsi, le nombre d'itérations final sera déterminé par la valeur de W issue de l' EC du meilleur plan. Un autre avantage de cette adaptation est qu'elle permet de réduire le nombre d'itérations nécessaires.

Le pseudo-code, présenté en Annexe (C.2), illustre le calcul adaptatif du nombre d'itérations nécessaires N .

3.4.3.4 Initialisation de la primitive géométrique « plan »

Dans cette phase, l'algorithme procède à l'initialisation des paramètres du plan à partir de 3 points. Initialiser un plan signifie déterminer sa normale et sa distance par rapport à l'origine du repère. Algébriquement parlant, un plan est un sous-espace de dimension 2 d'un espace vectoriel sur un corps \mathbb{K} . On parle aussi dans ce cas d'un plan vectoriel. Un plan est toujours défini par deux vecteurs \vec{u} et \vec{v} non colinéaires. De la sorte, un vecteur appartient au plan si et seulement si il est une combinaison linéaire de \vec{u} et \vec{v} .

Il y a trois possibilités de définir un plan selon les grandeurs disponibles :

- par combinaison linéaire des deux vecteurs directeurs du plan,
- par la définition d'un vecteur normal et d'un point
- par la définition de 3 points (coplanaires) non colinéaires.

Etant donné que les plans sont déterminés par des points coplanaires définis par leurs coordonnées cartésiennes, c'est la troisième possibilité qui est mise en œuvre. L'utilisation des deux autres possibilités est développée en Annexe (C.3).

Le processus de définition d'un plan (*PL*) est le suivant : On sélectionne trois points non colinéaires $M_1(x_1; y_1; z_1)$, $M_2(x_2; y_2; z_2)$ et $M_3(x_3; y_3; z_3)$. Donc, pour qu'un point quelconque $M(x; y; z)$ appartienne au même plan que celui passant par les trois points M_1 , M_2 et M_3 , les trois vecteurs $(\overrightarrow{M_1M}, \overrightarrow{M_1M_2}, \overrightarrow{M_1M_3})$ doivent être coplanaires, c'est-à-dire que leur déterminant doit être nul, comme l'exprime l'équation (3.12).

$$\det(\overrightarrow{M_1M}, \overrightarrow{M_1M_2}, \overrightarrow{M_1M_3}) = \begin{vmatrix} x - x_1 & x_2 - x_1 & x_3 - x_1 \\ y - y_1 & y_2 - y_1 & y_3 - y_1 \\ z - z_1 & z_2 - z_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (3.12)$$

Ainsi le plan (*PL*) s'écrit :

$$(PL): (x - x_1) \begin{vmatrix} y_2 - y_1 & y_3 - y_1 \\ z_2 - z_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} + (y - y_1) \begin{vmatrix} x_3 - x_1 & x_2 - x_1 \\ z_3 - z_1 & z_2 - z_1 \end{vmatrix} + (z - z_1) \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & x_3 - x_1 \\ y_2 - y_1 & y_3 - y_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (3.13)$$

$$\text{Ou encore l'équation du plan peut s'écrire : } ax + by + cz + d = 0 \quad (3.14)$$

Avec :

$$a = \begin{vmatrix} y_2 - y_1 & y_3 - y_1 \\ z_2 - z_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix}, b = \begin{vmatrix} x_3 - x_1 & x_2 - x_1 \\ z_3 - z_1 & z_2 - z_1 \end{vmatrix}, c = \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & x_3 - x_1 \\ y_2 - y_1 & y_3 - y_1 \end{vmatrix} \text{ et } d = -x_1a - y_1b - z_1c$$

Où : (a, b, c) : normale au (*PL*)

d : distance par rapport à l'origine du repère

Une fois que les paramètres initiaux d'un plan sont déterminés, on peut chercher les points du nuage lui appartenant ou s'en rapprochant.

3.4.3.5 Détermination des points « valables » composant un plan

L'objectif de cette phase est de déterminer les points susceptibles d'appartenir ou de représenter le plan, dont les paramètres ont été définis dans l'initialisation précédente. Pour ce faire, la distance euclidienne de chaque point $M(x_0, y_0, z_0)$ du nuage au plan (*PL*) est calculée par la formule (3.15).

$$\text{dist}(M, PL) = \frac{|ax_0 + by_0 + cz_0 + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (3.15)$$

Cette équation donne l'écart entre un point et un plan, écart qui peut ensuite être confronté à la tolérance τ de l'Ensemble Consensus (cf. équation 3.7). Les distances des points

appartenant effectivement au plan (PL) sont théoriquement nulles. On peut donc écrire leur ensemble comme suit :

$$E_0 = \{M \in NPTS : / \text{dist}(p, PL) = 0 \} \quad (3.16)$$

Où $\text{dist}(p, PL)$: distance du point p au plan PL

En réalité, les données acquises par le biais d'un scanner laser terrestre ne sont pas immédiatement ajustables par des modèles mathématiques. Non seulement dans la réalité les murs ne sont pas parfaitement plans, mais en plus, les nuages ont habituellement une épaisseur non négligeable. Le bruit provient de l'état de surface et de la couleur de l'objet, mais aussi de l'opération de consolidation. C'est pourquoi une certaine souplesse dans l'ajustement par des modèles mathématiques doit être instaurée.

Dans notre cas, cette souplesse se traduira par l'utilisation d'une valeur seuil (tolérance) permettant de définir l'épaisseur d'une zone tampon autour du plan moyen théorique considéré. On appellera « points valables » l'ensemble des points situés à l'intérieur de cette zone tampon (Figure 3.8).

Evidemment, la qualité et la précision des plans détectés dépendront fortement de la tolérance choisie au départ. (Hartley et Zisserman, 2003) affirment que cette valeur peut être calculée si l'on suppose que l'erreur de mesure suit une distribution normale. C'est pourquoi, la distribution statistique des écarts au plan a été analysée.

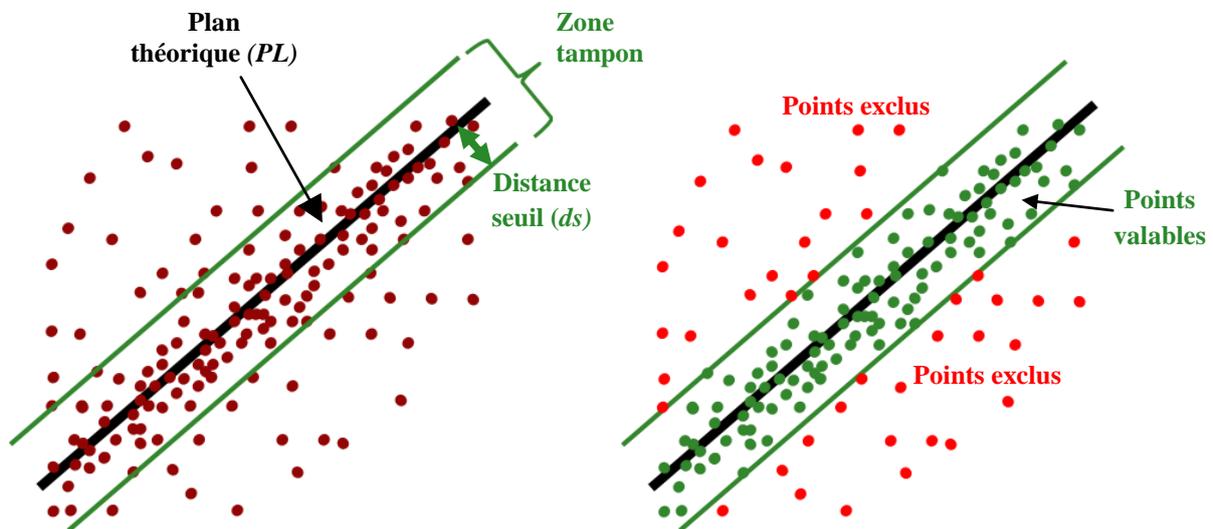


Figure 3.8. Zone tampon d'épaisseur ds définissant les points valables associés à un plan (vue de profil)

3.4.3.6 Distribution statique des distances à un plan

Pour s'assurer de la normalité de la distribution des distances séparant les points du plan théorique, il faut vérifier que les caractéristiques d'une distribution normale sont vérifiées, à

savoir la symétrie par rapport à l'axe $x = m$, deux points d'inflexion aux points d'abscisses $m \pm \sigma$, un aplatissement fonction de σ et une probabilité de 1, égale à l'aire comprise entre la courbe et l'axe des abscisses.

La Figure 3.9 montre un histogramme présentant des écarts qui suivent une distribution gaussienne comme cela a été confirmé par (Hartley et Zisserman, 2003). En effet, la distribution est bien symétrique par rapport à la valeur zéro (dans cet exemple, on a $\mu = -4.1569 * 10^{-10} \simeq 0$ et $\sigma = 0.0025$ donc $dist \sim \mathcal{N}(0, \sigma)$).

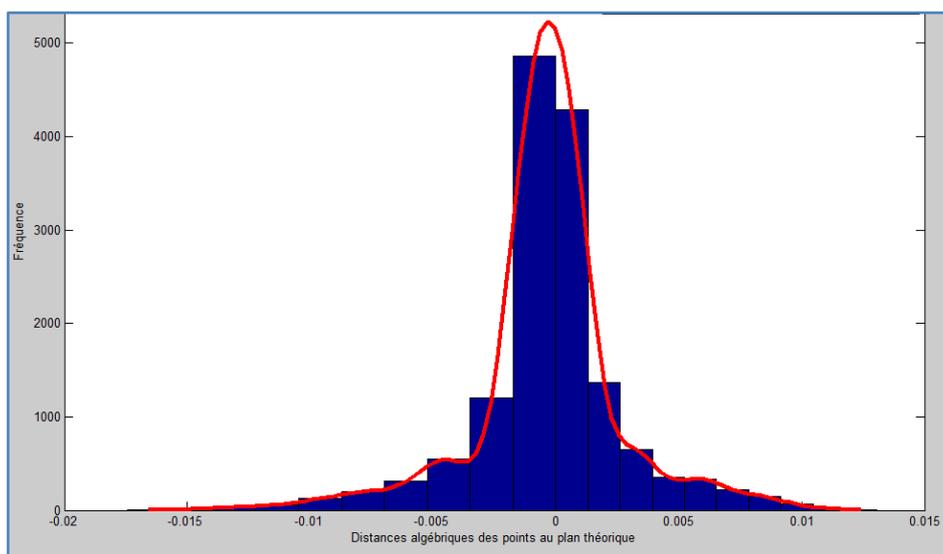


Figure 3.9. Distribution statistique des distances algébriques des points au plan (en bleu, l'histogramme des fréquences sous forme de barres de fréquences ; en rouge la courbe de densité de probabilité)

La variance permet de décrire la dispersion des observations d'un échantillon autour de la valeur la plus probable (la moyenne ici). C'est donc tout naturellement que l'on est amené à s'intéresser, dans le cas de la distribution normale, à la distribution de la somme des carrés des écarts des observations de l'échantillon à la moyenne. Si on suppose que les observations ne sont pas entachées d'erreurs systématiques, on peut utiliser l'estimateur sans biais de la variance de la distribution exprimée par l'équation 3.17.

$$V^2 = \frac{\sum_i (X_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad (3.17)$$

Dans ce cas on a, d'après (Hartley et Zisserman, 2003), l'expression précédente multipliée par $\frac{n-1}{\sigma^2}$ suit la distribution du chi-2.

$$\frac{(n-1)V^2}{\sigma^2} \sim \chi_{n-1}^2 \quad (3.18)$$

Où : σ est l'écart-type des (n-1) distances des points au plan.

Les carrés de ces distances suivent une distribution du χ_m^2 (chi-2) avec m degrés de liberté. Le degré de liberté est égal à la « co-dimension » du modèle considéré. Pour une droite, la co-

dimension est égale 1, car seule la distance perpendiculaire à la droite est mesurée. Si le modèle est un plan (comme dans notre cas), la co-dimension est égale à 2.

D'après (Hartley et Zisserman, 2003), si on suppose que tous les points suivent une distribution normale autour de leur plan moyen, la valeur seuil ds déterminant si un point appartient ou non, avec une probabilité p , à la zone tampon peut se calculer par la relation (3.19).

$$ds^2 = F_{\chi_2^2}^{-1}(p)\sigma^2 \quad (3.19)$$

Où : ds : valeur seuil (tolérance) de distance (zone tampon des points valables)

p : probabilité considérée

F : Fonction de répartition des distances point-plan, au carré.

La valeur de la fonction réciproque de la fonction de distribution est déduite de la table de la loi du χ_2^2 . Par conséquent, le test statistique peut se faire de la manière suivante :

$$\begin{cases} \text{si } dist^2 < ds^2 : \text{point valable (dans zone tampon)} \\ \text{si } dist^2 \geq ds^2 : \text{point non valable (hors tolérance)} \end{cases} \quad (3.20)$$

Donc pour une valeur de probabilité élevée ($p = 0.99$), un point peut être considéré comme un point valable si l'écart au carré entre ce point et le plan est inférieur à ds^2 selon la formule (3.21).

$$ds^2 = F_{\chi_2^2}^{-1}(0.99)\sigma^2 = 9.21\sigma^2 \quad (3.21)$$

Où $F_{\chi_2^2}^{-1}(0.99) = 9.21$ (voir table de la loi du χ_2^2 Tableau 3.3)

σ : écart-type des distances calculées par rapport au plan

Les détails sur la distribution du χ_2^2 ainsi que la table associée à cette distribution selon le degré de liberté et la probabilité considérée sont présentés dans le Tableau 3.3.

Degré de liberté	$F_{\chi_2^2}^{-1}(p = 0.95)$	$F_{\chi_2^2}^{-1}(p = 0.99)$
1	3.84	6.63
2	5.99	9.21
3	7.81	11.34
4	9.49	13.28

Tableau 3.3. Table de distribution χ_2^2 selon le degré de liberté et la valeur de la probabilité (Hartley et Zisserman, 2003)

La majorité des utilisateurs de RANSAC préfèrent déterminer la valeur seuil ds d'une manière empirique. En effet, une bonne connaissance des données (et de leur degré de bruitage) permet d'estimer une valeur optimale du seuil tout en répondant aux objectifs fixés.

Ce paramètre ds est bien entendu très important dans le sens où la qualité des résultats en dépend fortement. En effet, une faible valeur seuil implique que les plans obtenus sont proches des plans théoriques. Ainsi, une surface plane dans la réalité – ou considérée comme plane architecturalement parlant – risque d'être décomposée en sous-parties planes (Figure 3.10a), alors qu'en réalité il ne s'agit que d'un seul plan.

D'autre part, la valeur seuil ne doit pas être trop élevée. Sinon, plusieurs plans parallèles et adjacents risquent d'être fusionnés en un seul plan. Dans la Figure 3.10b, on remarque que les bordurettes des fenêtres sont fusionnées avec le plan principal de la façade. Donc, pour obtenir des résultats satisfaisants, il est indispensable de choisir une valeur adaptée au niveau de détail recherché ainsi qu'au degré de bruitage des données. Cette valeur devra garantir que le nombre de plans principaux extraits par l'algorithme sera égal au nombre effectif de plans constituant la façade considérée. Dans la Figure 3.11, les plans principaux (mur, bordurettes des fenêtres, menuiseries des fenêtres) sont bien extraits. La valeur de la tolérance (ds) a généralement tendance à être égale à l'épaisseur du nuage de points brut.

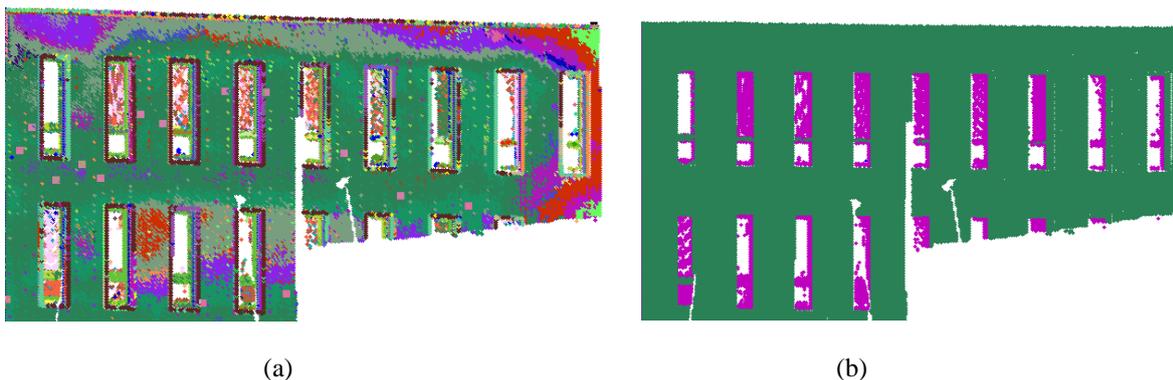


Figure 3.10. Effets de la valeur seuil sur le nombre et la qualité des plans extraits par la méthode RANSAC ; a) segmentation avec une valeur de seuil faible ($ds=0.005m$) ; b) segmentation avec une valeur de seuil élevée ($ds=0.15m$). Une couleur correspond à un segment plan.

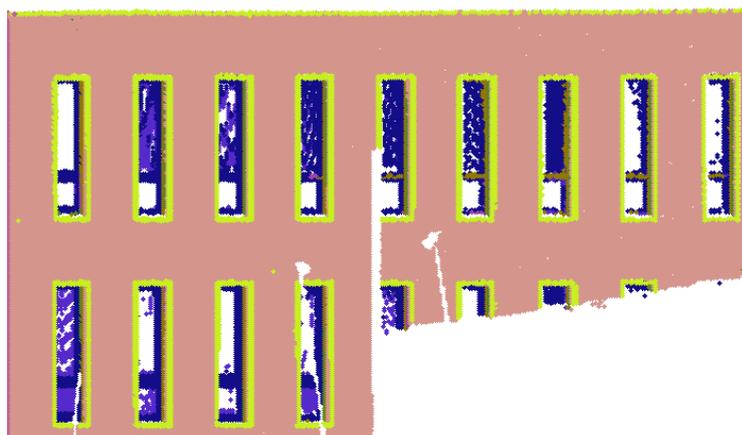


Figure 3.11. Segmentation de façade avec une valeur de seuil optimale ($ds=0.025m$)

La Figure 3.11 montre que la façade est composée de plusieurs plans. Dans sa forme originale, RANSAC est en mesure de fournir un plan pour l'ensemble du nuage considéré. La Figure 3.12 résume, sous la forme d'un organigramme, le processus de détection d'un plan par la méthode RANSAC.

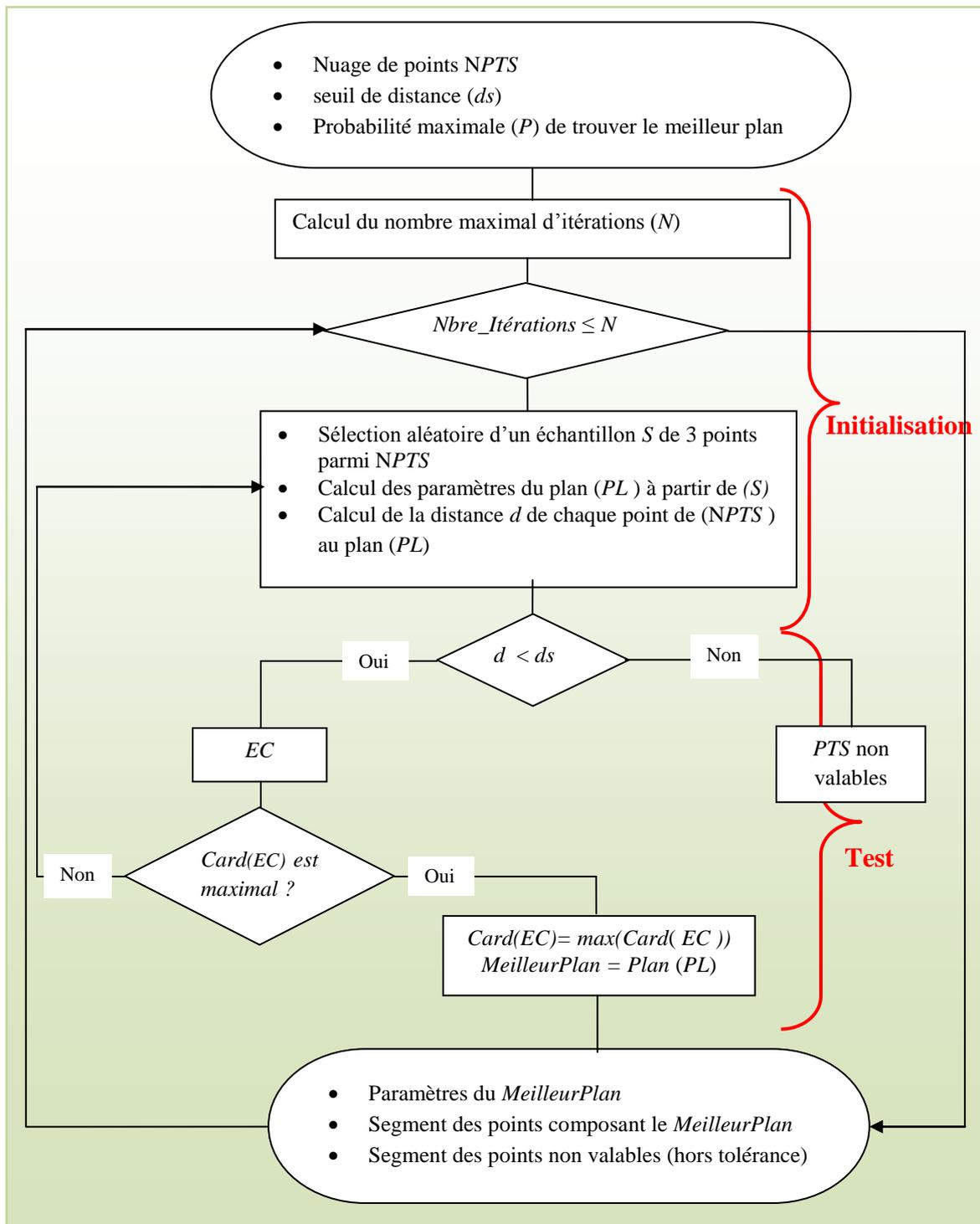


Figure 3.12. Organigramme présentant le principe RANSAC appliqué à la détection d'un plan à partir d'un nuage de points

Dans cet organigramme, on appelle « meilleur plan », le plan extrait à partir d'un nuage de points après avoir effectué le nombre d'itérations nécessaire (N). Ce plan est caractérisé par un Ensemble Consensus dont le cardinal est maximal. Autrement dit, il s'agit du plan comportant le plus grand nombre de points valables validé dans l'étape « Test ».

Pour pouvoir extraire tous les plans de la façade présents dans un même nuage de points, RANSAC a été amélioré en y intégrant un processus itératif d'extraction séquentielle de plans.

3.4.4 Extraction séquentielle des plans de façades

RANSAC dans sa version classique permet de détecter le meilleur plan en termes de nombre de points. Rapporté à un bâtiment, il s'agit souvent du plan principal d'une façade. Or, dans l'objectif d'extraire tous les plans présents dans le jeu de données, l'algorithme a dû être amélioré.

L'idée intégrée dans le processus consiste, après la détection du meilleur plan, à retirer les points valables du nuage de points. Le processus est réappliqué de nouveau sur le nuage de points restant, afin de déterminer un autre « meilleur » plan. Ainsi, on réapplique le même principe dans un mode séquentiel, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de points dans le nuage ou jusqu'à ce que la probabilité de trouver un bon plan soit inférieure à un seuil prédéterminé. De cette manière, on obtient tous les plans principaux constituant la façade.

La Figure 3.13 illustre le mécanisme de ce processus séquentiel.

Une caractéristique essentielle de la détection séquentielle des plans est que les segments plans détectés l'un à la suite de l'autre sont deux à deux disjoints. Ce qui correspond à la troisième propriété imposée à notre segmentation (« les segments plans sont deux à deux disjoints », cf. § 3.4.2).

Malheureusement, ce processus séquentiel présente un inconvénient. Il instaure un ordre de détection de plans en favorisant les plus consistants au détriment des plus petits. Ainsi, les plans contenant plus de points valables sont détectés bien avant les autres, ce qui peut causer des problèmes, puisque des points sont exclus au fur et à mesure. Par conséquent, d'autres critères devront être considérés pour contrecarrer le caractère aléatoire de RANSAC. La section ci-après décrit les critères de segmentation de façades introduits pour améliorer le processus de segmentation à ce niveau.

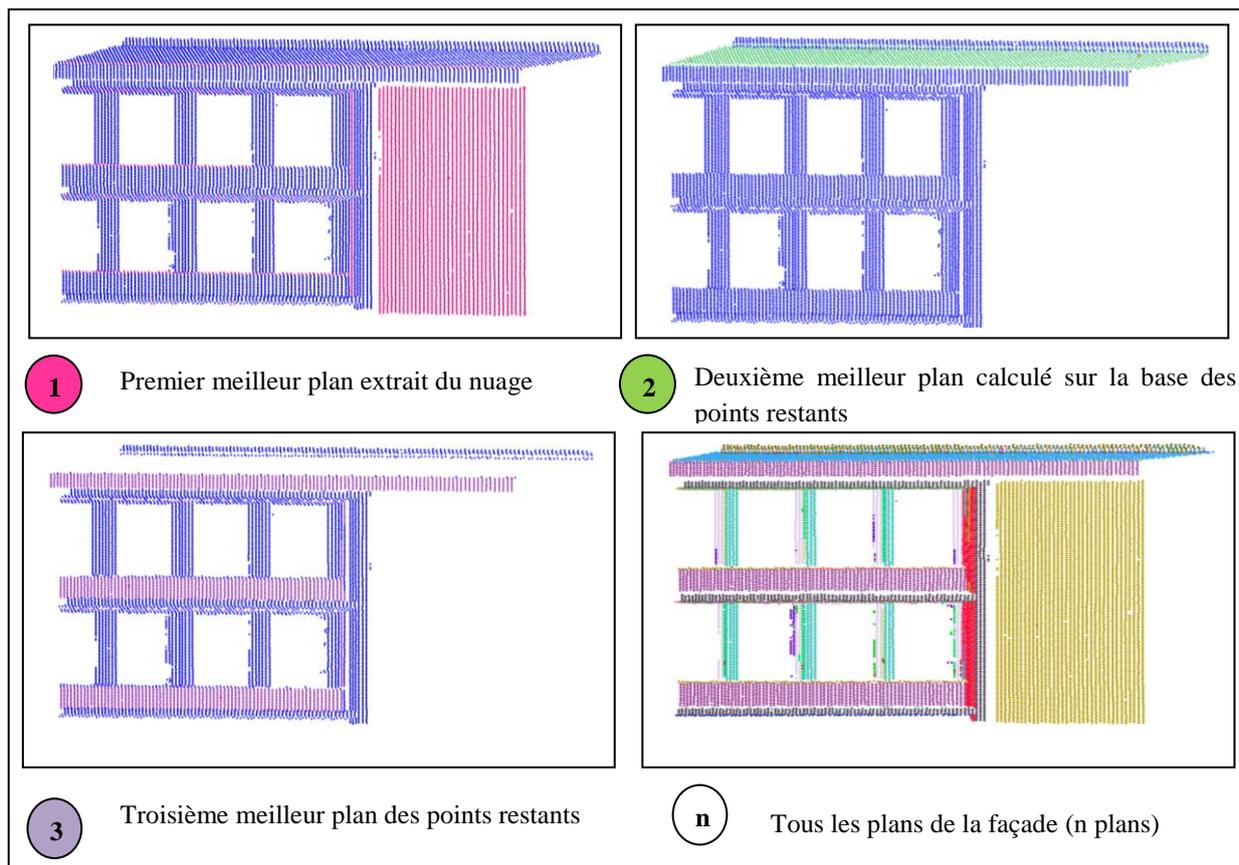


Figure 3.13. Illustration du processus séquentiel d'extraction des plans principaux d'une façade de bâtiment

3.4.5 Critères de segmentation de façades de bâtiments

L'algorithme RANSAC adopte le « cardinal » comme seul critère de décision pour définir les segments plans. Or, ce critère n'est pas toujours suffisant, comme va le montrer le paragraphe suivant, ce qui va exiger l'introduction de critères supplémentaires.

3.4.5.1 Cardinal d'un segment plan

Le but de ce paragraphe est d'étudier l'influence du critère du cardinal sur le résultat de la segmentation. Pour cela, dans un premier temps, seul ce critère est utilisé dans le processus de détection de plans par RANSAC. Un des problèmes que l'on peut rencontrer est qu'il est possible de trouver des segments plans dans le nuage de points sans qu'ils représentent des détails architecturaux plans de la façade considérée. La Figure 3.14 illustre un tel cas.

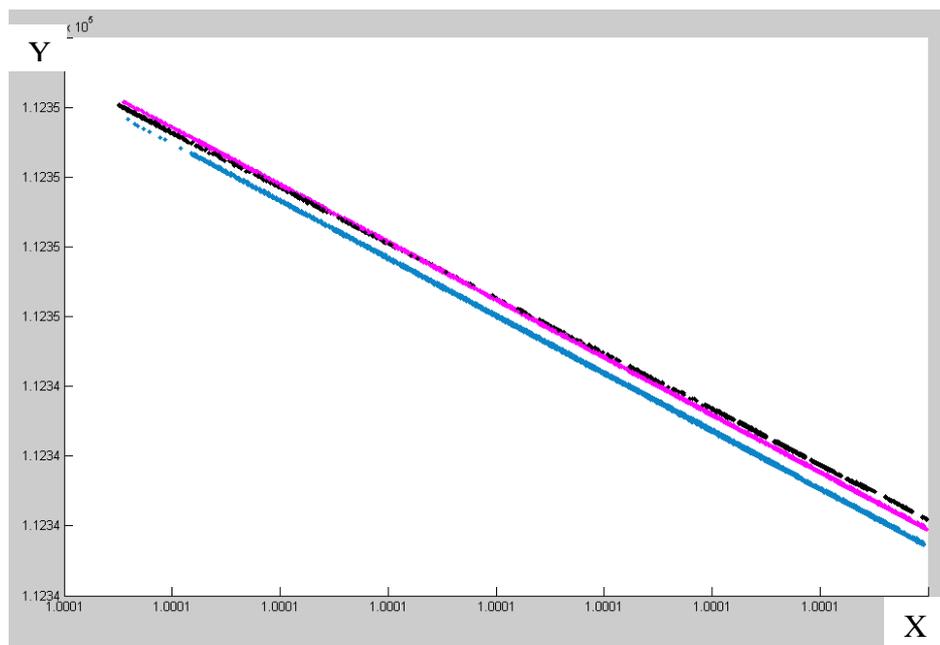


Figure 3.14. Profils de plans verticaux projetés sur le plan (XOY). Ces plans devraient être parallèles.

Les deux plans en rose et noir dans cette figure (présentés ici sous forme de droites car projetés dans le plan horizontal), semblent être sécants. Mais dans la réalité, ces deux plans sont parallèles. Cela montre une défaillance de RANSAC lorsqu'il est basé uniquement sur le critère du cardinal.

D'autre part, l'extraction de plans basée uniquement sur le critère du cardinal, engendre un autre problème. En effet, il existe, sur une façade, des plans de plusieurs tailles. L'un des défauts majeurs de RANSAC est qu'il détecte en priorité les plans les plus grands, donc souvent au détriment des plus petits. Cet inconvénient nous contraint à considérer un ordre de détection de plans. En effet, après l'extraction d'un plan, les points qui lui sont associés sont retirés du nuage et l'algorithme poursuit la détection des plans suivants. Mais rien ne garantit que parmi ces points, certains ne fassent pas partie d'un autre plan plus petit. Ainsi, il se peut, qu'à cause de l'ordre de détection, certains plans soient partiellement dépouillés de leurs points. Ce problème est particulièrement présent dans le cas de façades composées d'éléments plans sécants, comme par exemple les murs pleins et les poteaux de structure (Figure 3.15).

La Figure 3.16 montre le résultat d'une segmentation s'appuyant uniquement sur le critère du cardinal des segments plans. Le nuage de points correspond à la façade de la Figure 3.15. Dans cet exemple, le mur plein (en rouge) a été extrait en premier lieu, parce qu'il contient le plus grand nombre de points. Malencontreusement, les points attribués à ce plan rouge appartiennent, pour certains, à d'autres plans. On constate en effet la présence de points rouges sur le plan décrivant la corniche (plan en bleu) et sur les plans des poteaux de structure (en noir). Cette fausse classification risque de nuire à la précision de détermination des plans de plus petite taille, puisque ceux-ci se verront privés de plusieurs points.

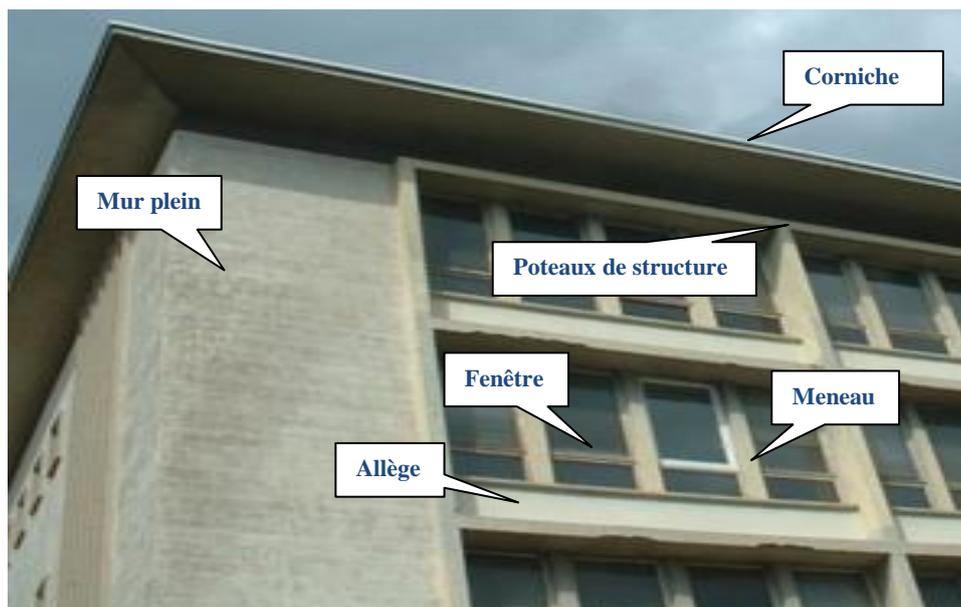


Figure 3.15. Photographie d'une portion de façade composée de plans sécants (mur plein, poteaux, bandeaux, meneaux, allège ...)

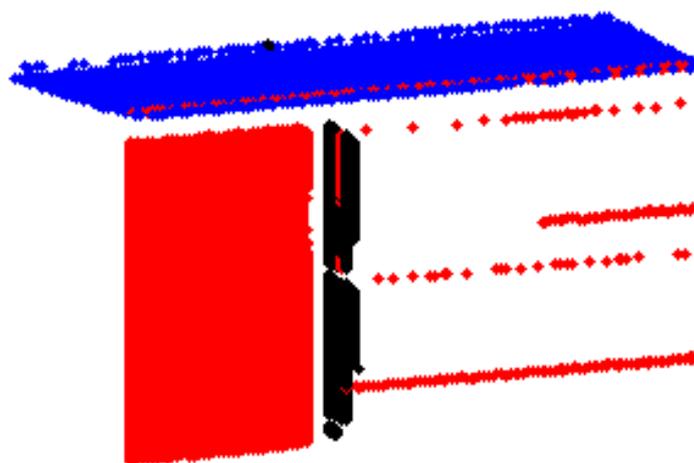


Figure 3.16. Extraction de points appartenant à un même plan selon RANSAC, mais mal affectés (problème des plans sécants).

Pour résoudre ces problèmes, deux critères supplémentaires ont été intégrés à l'algorithme de segmentation : des contraintes d'ordre géométrique et la fixation d'un ordre de détection des plans selon leur orientation.

3.4.5.2 Contraintes géométriques et ordre de détection des plans

En prenant pour exemple la façade précédente, on peut faire le constat suivant : les plans de plus grande taille, contenant en général un grand nombre de points, sont situés dans le plan de la façade. Les autres plans, en général plus petits (contenant par conséquent moins de points), sont généralement perpendiculaires au plan de la façade. Pour éviter qu'ils ne soient dépouillés de leurs points en raison de détections préalables, il serait donc judicieux de détecter en priorité ces derniers plans.

Par ailleurs, l'orientation du plan a également un effet sur le nombre de points le composant. Pour le cas particulier de la façade étudiée ici, du fait de la position du scanner par rapport à la façade, on constate que les plans verticaux contiennent moins de points que les plans horizontaux, c'est pourquoi ils devront être détectés en priorité. Pour résumer, l'idée consiste donc à détecter en premier lieu les plans de petite taille et en dernier lieu seulement, les plans principaux, souvent parallèles à la façade. D'où le choix de l'ordre de détection ci-dessous :

- 1) Détection des plans verticaux et perpendiculaires à la façade, dont l'équation est :

$$ax + by + cz = d \text{ avec } b \text{ et } c \text{ proches de } 0 \quad (3.22)$$

- 2) Détection des plans horizontaux et perpendiculaires à la façade, dont l'équation est :

$$ax + by + cz = d \text{ avec } a \text{ et } b \text{ proches de } 0 \quad (3.23)$$

- 3) Détection des plans inclinés, dont l'équation est :

$$ax + by + cz = d \text{ avec } a, b \text{ et } c \text{ différents de } 0 \quad (3.24)$$

- 4) Détection des plans parallèles au plan principal de la façade, dont l'équation est :

$$ax + by + cz = d \text{ avec } a \text{ et } c \text{ proches de } 0 \quad (3.25)$$

Avec a, b, c : paramètres de la normale au plan
 d : distance du plan à l'origine du repère.

Pour pouvoir facilement imposer des contraintes relatives à l'orientation des plans, il est utile, tout d'abord, de faire subir au nuage de points une rotation automatique de manière à ce que le plan de la façade soit parallèle au plan OXZ (Figure 3.17).

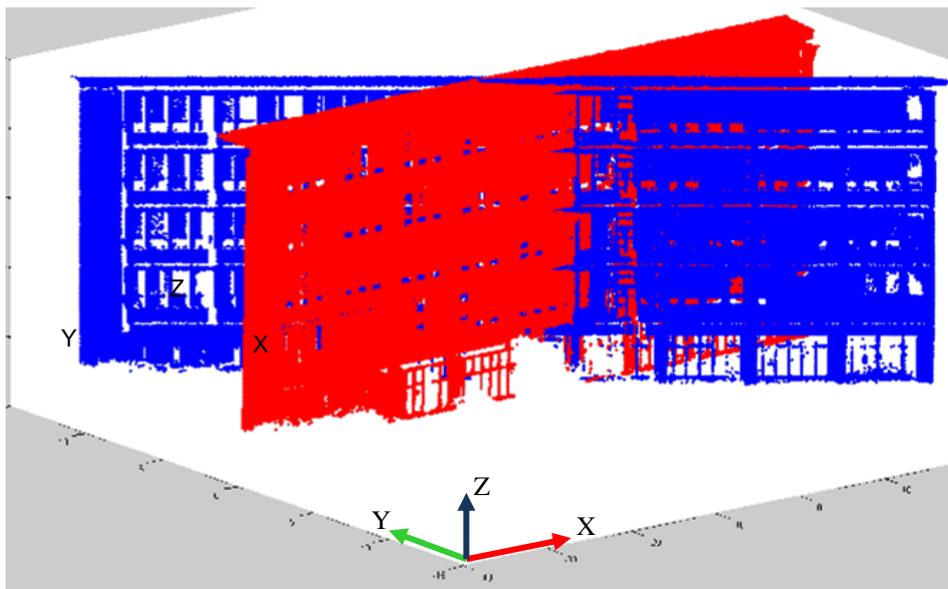


Figure 3.17. Rotation du nuage de points brut (en bleu) pour ramener la façade parallèle au plan OXZ (en rouge).

En pratique, aucun plan n'est strictement parallèle aux axes ne serait-ce que du fait des erreurs accidentelles et du bruit de mesure. On tolèrera, après avoir effectué des tests, une imprécision sur les directions des plans de l'ordre de 1 degré.

Dans la Figure 3.18, tous les plans perpendiculaires à la façade ont été détectés, à commencer d'abord par les plans verticaux (en rouge), puis les plans horizontaux (en bleu). Cela correspond aux étapes de détection (1) et (2) citées ci-dessus. Ensuite, les plans parallèles au plan principal de la façade ont été détectés (étape (4)), comme l'illustre la Figure 3.19. L'étape (3) a été écartée, car cette façade ne comportait pas de plans inclinés. D'ailleurs ce type de plans se retrouve rarement sur des façades de bâtiments.

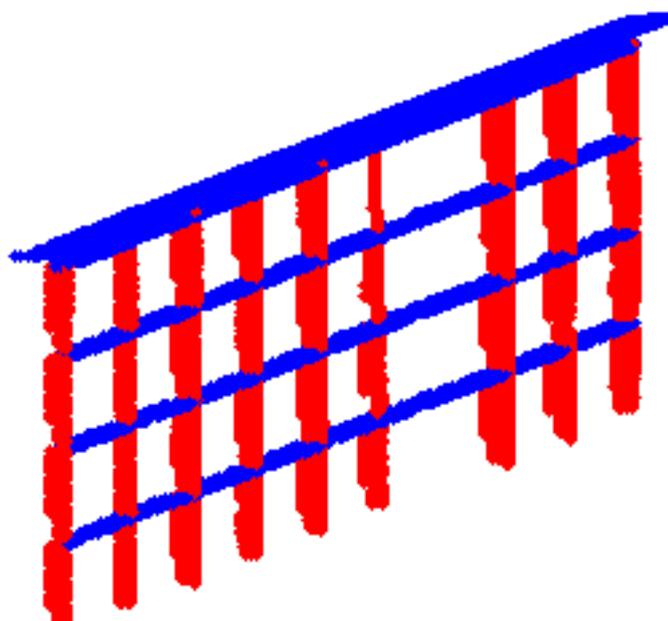


Figure 3.18. Détection des plans verticaux en rouge (poteaux de structure) et horizontaux en bleu (corniche et bandeaux).

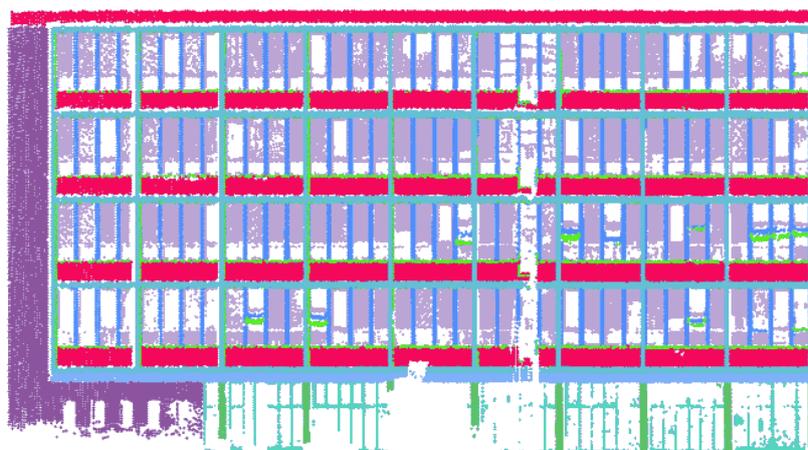


Figure 3.19. Plans parallèles à la façade ; chaque couleur décrit un plan différent

Les résultats obtenus en respectant cet ordre de détection sont intéressants. D'abord, les plans perpendiculaires à la façade sont détectés de façon satisfaisante, aussi bien en nombre qu'en qualité. D'autre part, cette classification préalable en plans horizontaux et verticaux donne plus de liberté à l'utilisateur, puisqu'il va pouvoir définir le degré d'importance des plans en choisissant l'ordre de détection le plus adapté.

Malheureusement, le temps d'exécution s'avère plus long que lorsque cet ordre de détection n'était pas imposé. Mais, ce phénomène était prévisible. Il s'agit simplement d'un effet secondaire à l'introduction de contraintes de détection. Lorsque l'on fixe un ordre de détection qui est en plus dépendant de l'orientation des plans, on réduit la probabilité de détection d'un plan acceptable, puisque l'on rejette les plans ne répondant pas aux nouveaux critères fixés. Il faut donc augmenter le nombre d'itérations jusqu'à obtenir le résultat escompté.

Un autre critère mérite d'être étudié, toujours dans le souci d'améliorer la qualité des segments plans extraits par le processus de segmentation. Il s'agit de l'écart-type des distances des points au plan moyen.

3.4.5.3 Ecart-type des distances

Dans le but d'imposer plus de rigueur à la détection des segments plans, il semble logique d'étudier l'effet de l'écart-type des distances au plan moyen sur la qualité des plans extraits. Pour ce faire, on a procédé au calcul des écarts-types des distances des points aux plans extraits pour plusieurs échantillons. Le Tableau 3.4 suivant montre les valeurs des écarts-types obtenus sur un échantillon de 10 plans extraits dans un nuage de 50 000 points avec une même valeur seuil ($ds = 2.5 \text{ cm}$).

Segment plan n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ecart-type (mm)	6	8	8	8	6	8	8	9	8	6
Ecart-type moyen (mm)	7									

Tableau 3.4. Ecarts-types obtenus pour 10 plans d'un nuage de 50 000 points

Les valeurs des écarts-types obtenus se situent entre 6 et 9 mm. Cela signifie que la dispersion des points par rapport au plan moyen n'est pas aussi importante que l'on pouvait le supposer. Par conséquent, on peut dire que dans le cas des données laser terrestres, ce critère ne représente pas une forte valeur ajoutée. Par contre, il a une influence considérable dans le cas des données laser aériennes (Tarsha-Kurdi, 2008).

Les critères discutés ci-dessus vont tout de même intervenir, dans le but d'améliorer l'aspect mathématique du plan. Le paragraphe suivant exposera l'analyse, la problématique et la solution proposée pour garantir la connectivité des plans détectés.

3.4.6 Connectivité des segments plans

3.4.6.1 Problématique

S'il est incontestable que l'algorithme RANSAC est un estimateur robuste des modèles mathématiques même en présence d'un pourcentage considérable de bruit dans les données, le modèle considéré n'est toutefois défini que de son point de vue mathématique. Un plan, par exemple, est une entité géométrique à deux dimensions et son étendue est infinie. Or, les plans susceptibles de composer les façades de bâtiments n'ont pas forcément ces deux caractéristiques.

D'une part, ils n'ont pas vraiment deux dimensions mais plutôt trois, à cause de l'épaisseur du nuage de points produit par le scanner laser. D'autre part, les composantes d'une façade quelconque ont des limites bien définies, contrairement aux plans définis mathématiquement (via RANSAC).

Le critère de connectivité des segments plans est primordial dans le sens où ceux-ci doivent représenter des entités esquissant des composantes architecturales spécifiques de la façade traitée. On entend par « connectivité de surface » sa continuité spatiale. C'est-à-dire que la surface doit constituer une entité contigüe et non pas un ensemble de surfaces séparées par des vides comme le montre la Figure 3.20. RANSAC génère des erreurs de connectivités de deux types, à savoir des erreurs surfaciques et des erreurs linéaires.

3.4.6.2 Erreurs surfaciques

Ces erreurs surviennent lorsque l'algorithme a détecté des parties surfaciques éparpillées autour de la surface plane recherchée. Elles appartiennent en réalité à d'autres détails architecturaux. La Figure 3.20 montre un segment plan, représentant en fait deux plans distincts du point de vue sémantique et topologique. Cela illustre le problème de connectivité de type surfacique.

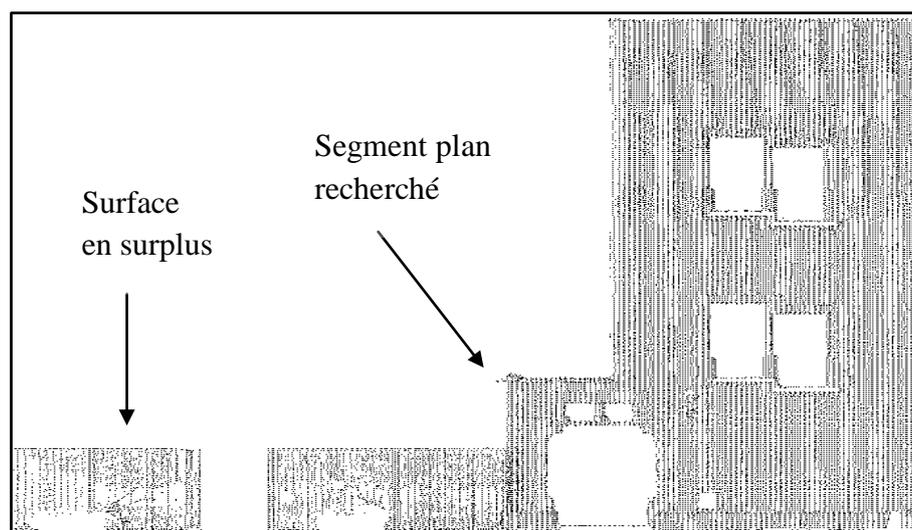


Figure 3.20. Exemple d'erreur de connectivité de type surfacique pour une même façade ; un seul segment plan mais deux surfaces non connectées

Ces bouts de surfaces ont des conséquences fâcheuses sur les résultats finaux. En effet, non seulement le plan recherché contiendra un surplus de points, mais en plus les plans détectés ultérieurement seront privés d'un ensemble de points. Ce problème peut nuire considérablement à la qualité des résultats et poser problème notamment lors du processus de modélisation. Des propositions d'améliorations seront évoquées en fin de mémoire.

3.4.6.3 Erreurs linéaires

D'autres erreurs de non-connectivité des surfaces surviennent en présence de points rangés dans des séquences linéaires (Figure 3.21).

Il est vrai que le critère du cardinal et de l'orientation des plans permet la détection des petits plans et évite qu'ils soient dépouillés de points. Mais l'inverse peut également se produire. Ainsi, réciproquement, les plus petits plans peuvent aussi prendre des points aux plus grands plans. Même si l'effet n'est pas aussi critique, il est judicieux de corriger ce petit défaut. Pour ce faire, il faut noter que les points concernés par ces exclusions sont souvent situés sur les arêtes, c'est-à-dire sur des lignes d'intersections entre plans sécants. Or, ces points peuvent servir à l'étude topologique entre plans.



Figure 3.21. Exemple d'erreur linéaire : seul le bloc de points encadré en rouge doit être extrait et non pas les points hors cadre, bien qu'ils appartiennent au même plan mathématique (façade de l'INSA)

Pour résoudre ces problèmes de connectivité, un algorithme de croissance de région a été développé. Dans le paragraphe suivant, la mise en œuvre et l'application de cet algorithme seront détaillées.

3.4.6.4 Détection par croissance de région des segments plans connectés

Les segments plans doivent posséder les mêmes caractéristiques que les surfaces qu'ils représentent. Dès lors, ils doivent comporter des entités connectées. Pour faciliter la tâche, il est plus judicieux de transformer le segment plan en une image puis de la segmenter ensuite en régions connectées. La région couvrant la plus grande aire correspondra au plan recherché. Ainsi, en extrayant les points de la plus grande région, le reste des points sont réinjectés dans le jeu de données afin qu'ils participent à la détermination des autres plans.

Pour passer d'un nuage de points à une image, les points du segment plan sont projetés sur le plan moyen des points, calculé au sens des moindres carrés. Ensuite, ce plan est subdivisé en un ensemble de pixels dont la résolution spatiale est définie par l'utilisateur. Enfin, on affecte la valeur 1 aux pixels contenant au moins un point et la valeur 0 aux pixels vides, pour obtenir une image binaire du plan détecté. La Figure 3.22 montre le résultat, sous forme d'image, du plan décrit par des points dans la Figure 3.21.

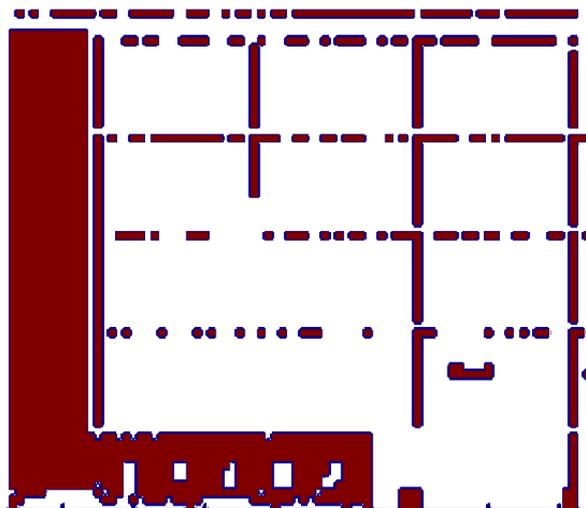


Figure 3.22. Image binaire générée à partir des points du plan de la Figure 3.21

Pour séparer le plan principal des éléments secondaires, on est parti de l'idée de segmenter l'image en régions et de garder uniquement la région la plus substantielle en termes de surface. Le critère utilisé pour séparer les différentes régions consiste à calculer la différence entre les valeurs numériques des pixels voisins. Ainsi, si cette différence est nulle, les pixels voisins sont fusionnés dans la même région, sinon ils sont affectés à des régions différentes. Cette procédure permet de séparer les surfaces connectées et d'affecter une étiquette à chacune d'elles (Figure 3.23).

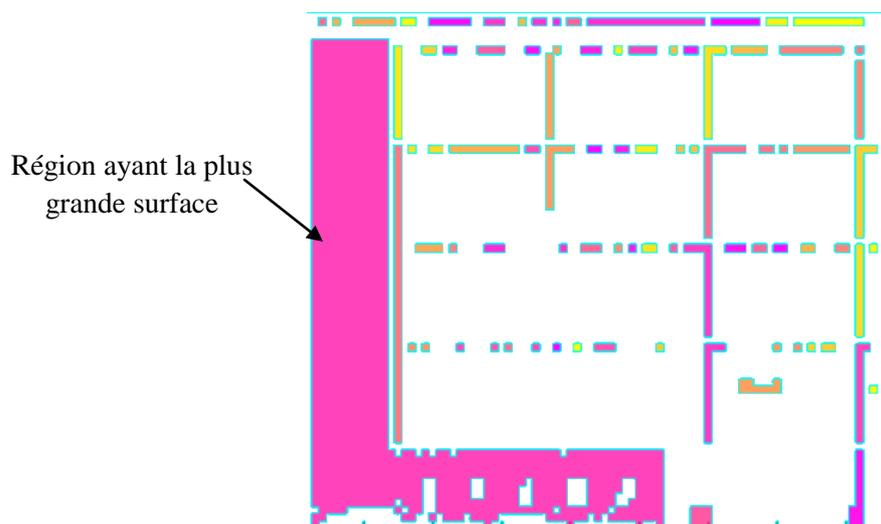


Figure 3.23. Image binaire segmentée en régions connectées ; une couleur correspond à une région.

Les surfaces sont ensuite calculées et comparées les unes aux autres. La région de plus grande surface est considérée comme la partie du plan qui correspond à la surface architecturale recherchée (voir Figure 3.23). On revient ensuite au niveau du nuage, pour récupérer les points associés à cette plus grande région. Ces points sont alors sauvegardés en tant que segment plan répondant aux critères de segmentation définis au § 3.4.2. Les points des autres régions, quant à eux, sont réinjectés dans le nuage de points global pour participer à la définition des plans ultérieurs. Ainsi le plan extrait initialement par RANSAC est corrigé à présent, comme l'illustre la Figure 3.24.

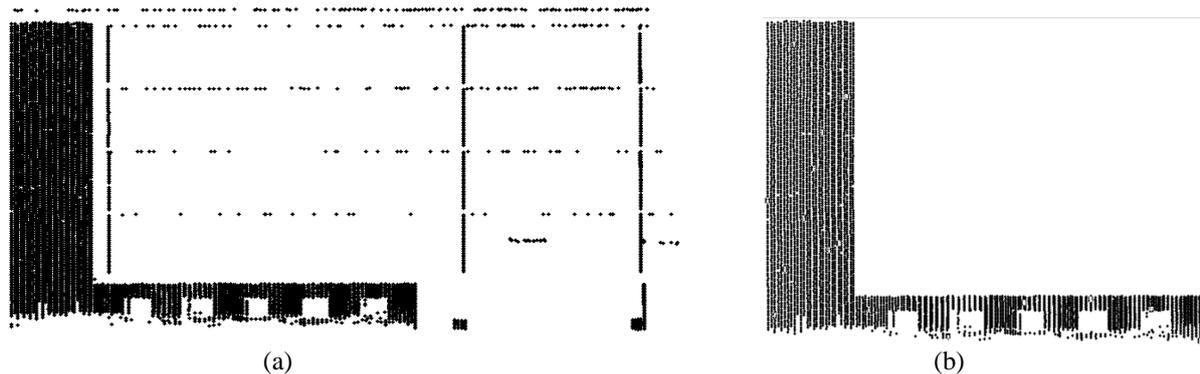


Figure 3.24. Correction de l'extraction des plans principaux d'une façade ;
 a) plan extrait par RANSAC, avec quelques points non caractéristiques du plan ;
 b) plan corrigé après intégration du critère de connectivité.

La dernière étape de cette approche consiste bien évidemment à calculer les valeurs compensées des paramètres des segments plans issus des deux algorithmes précédents, que sont RANSAC et la croissance de région, appliqués successivement.

3.4.7 Ajustement des paramètres du plan par les moindres carrés

La méthode des moindres carrés ne convient pas toujours à l'élimination des grosses erreurs dans les données, surtout lorsque l'échantillon de données est assez réduit. Mais en l'absence de fautes ou erreurs grossières, cette méthode reste sans conteste la plus répandue et fiable pour calculer les paramètres les plus probables d'un modèle mathématique. Ici, il s'agit de calculer les paramètres finaux du plan recherché.

On sait que les segments plans issus de RANSAC sont dépouillés de points aberrants. Les paramètres de ces plans sont donc calculés au début à partir de 3 points seulement (échantillon initial). Pour calculer l'espérance mathématique de ces paramètres, donc la position la plus probable du plan dans l'espace, il semble plus juste d'utiliser l'ensemble des points composant le segment plan. Les paramètres d'un plan sont sa normale et sa distance par rapport à l'origine du repère. Pour les calculer au sens des moindres carrés, on se sert des valeurs propres et des vecteurs propres de la matrice de variance-covariance du nuage de points (Lay, 2004). Dans un premier temps, la moyenne M des coordonnées des points est calculée par la formule (3.26).

$$M = (X_M, Y_M, Z_M) = \frac{1}{m} (\sum_{i=1}^m X_i, \sum_{i=1}^m Y_i, \sum_{i=1}^m Z_i) \quad (3.26)$$

Ensuite les coordonnées des points sont réduites à la moyenne M , donc les nouvelles coordonnées seront :

$$M' = (X'_i = X_i - X_M; Y'_i = Y_i - Y_M \text{ et } Z'_i = Z_i - Z_M) \text{ avec } i \in [1, \dots, N] \quad (3.27)$$

On calcule ensuite la matrice de variance-covariance (MVC) du nouveau nuage de points M' :

$$MVC_{3 \times 3} = cov(M'_i)_{1 \leq i \leq m} \quad (3.28)$$

Etant donné que le segment plan a une certaine épaisseur, les coordonnées des points sont en 3D. Elles varient, donc, dans les 3 directions de l'espace. Chacune de ces directions est dirigée par un vecteur propre de la matrice de variance-covariance $MVC_{3 \times 3}$. Donc, pour chaque segment plan, on peut constituer une base orthonormée avec les vecteurs propres $(\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3)$. Ces vecteurs propres sont associés aux trois valeurs propres $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ de $MVC_{3 \times 3}$. Le degré de variation des coordonnées des points selon les trois directions est proportionnel aux valeurs propres. Autrement dit, la variation des données est plus importante dans la direction du vecteur propre associé à la plus grande valeur propre et vice versa. Ainsi, si on ordonne les valeurs propres de telle sorte que $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$, alors les deux vecteurs propres (\vec{v}_1, \vec{v}_2) associés aux deux plus grandes valeurs propres λ_1 et λ_2 constituent la base du plan moyen recherché passant par le point M ; le troisième vecteur associé à la plus petite valeur propre (λ_3) constitue quant à lui sa normale. La Figure 3.25 présente un exemple d'un plan moyen calculé par la méthode des moindres carrés, basée sur le calcul des valeurs propres.

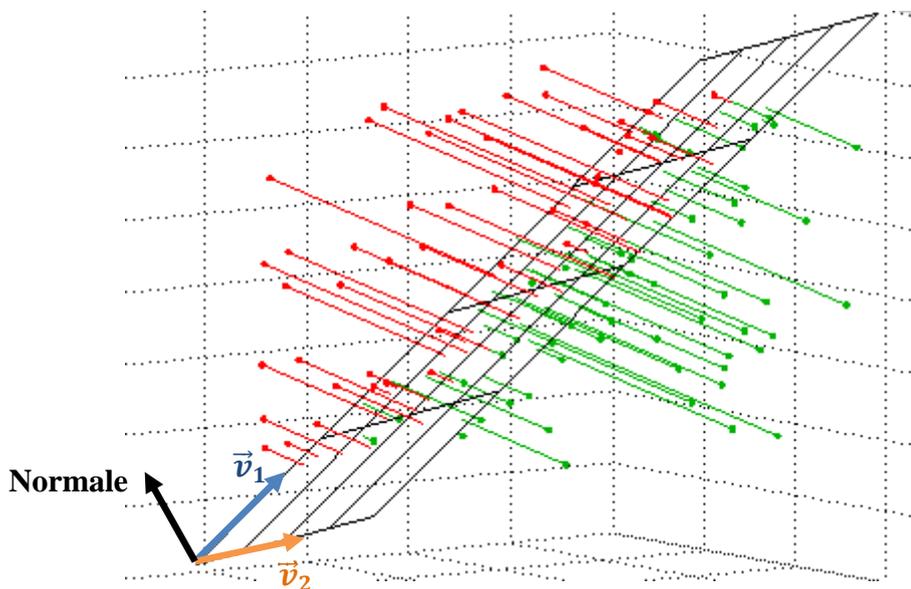


Figure 3.25. Ajustement des points au plan par les moindres carrés ; repère composé des vecteurs propres. Les vecteurs rouges et verts représentent les écarts des points situés au-dessus du plan (rouges) et les points en-dessous (verts)

A la sortie de l'algorithme, nous récupérons les segments plans et les paramètres du plan moyen calculé au sens des moindres carrés. Ces paramètres définissent chaque plan et seront utilisés dans une étape ultérieure, lors de la modélisation. Les points des segments plans, quant à eux, seront utiles pour déterminer les contours des plans qui définissent les limites de chaque surface plane de la façade.

3.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté l'approche de segmentation développée dans cette thèse pour segmenter les façades, levées par scanners lasers terrestres, sous forme de plans. Comme il a été évoqué en introduction à ce chapitre, cette approche est basée sur l'algorithme RANSAC et l'algorithme de croissance de région.

Dans un premier temps, les plans sont extraits par l'algorithme RANSAC. Son application sous forme de processus séquentiel permet d'extraire tous les plans principaux constituant la façade. Ce processus séquentiel est indispensable à la segmentation de façade, mais soulève avec lui quelques problèmes. Le premier est la conséquence de l'ordre de détection de plans en favorisant les plus consistants au détriment des plus petits. Le deuxième problème que l'on peut rencontrer est qu'il est possible de trouver des segments plans dans le nuage de points qui ne coïncident pas géométriquement avec les surfaces planes d'un élément architectural de la façade.

Pour surmonter ces inconvénients, un critère supplémentaire a été intégré à l'algorithme de l'approche de segmentation développée : inverser l'ordre de détection en commençant par les plans les plus petits. Dans ce cas, le degré d'influence des petits plans sur les grands et inversement des grands plans sur les petits n'est pas le même. En effet, le nombre de points que les petits plans sont susceptibles de « prendre » aux grands reste négligeable par rapport au nombre de points dont les grands plans sont composés. Ce qui n'est pas le cas pour les petits plans, car si les petits plans perdent davantage de points, il est fort probable qu'ils ne soient plus détectés par la suite. Pour implémenter cet ordre, des contraintes géométriques ont été imposées dans la définition des plans. Ainsi, on arrive non seulement à favoriser les petits plans (en général les plans perpendiculaires à la façade), mais aussi à faire correspondre géométriquement ces plans à des éléments architecturaux de la façade.

Malgré ces améliorations, les plans ainsi détectés ne coïncident pas toujours avec les éléments architecturaux de la façade du point de vue sémantique. En effet, les éléments de la façade sont délimités par des frontières données. Il a donc fallu intégrer une contrainte que nous avons appelé la connectivité entre les parties composant un segment plan. C'est dans ce contexte que l'algorithme de croissance de région a été développé et que les plans issus de l'approche de segmentation ont pu être corrigés de façon à être compatibles avec les composantes architecturales des façades. Le processus s'achève par le calcul des paramètres les plus probables des plans, en respectant le principe des moindres carrés.

A présent que l'approche de segmentation a été décrite, l'approche de modélisation peut être présentée. Elle s'appuiera évidemment sur les segments plans que l'approche de segmentation a générés.

4

Modélisation géométrique des façades de bâtiments

Sommaire

4.1 INTRODUCTION	102
4.2 EXTRACTION DU CONTOUR DES SEGMENTS PLANS.....	103
4.2.1 CALCUL DU PLAN MOYEN DES SEGMENTS PLANS	104
4.2.2 TRIANGULATION DE DELAUNAY EN DEUX DIMENSIONS	105
4.2.3 EXTRACTION DES POINTS DE CONTOURS	106
4.3 VECTORISATION DES CONTOURS DES SEGMENTS PLANS	111
4.3.1 CLASSIFICATION DES SEGMENTS DROITS	111
4.3.2 CALCUL DES POINTS D'INTERSECTION	113
4.3.3 DETERMINATION DES NŒUDS.....	114
4.4 GENERATION DES MODELES VECTORIELS 3D DES FAÇADES	118
4.4.1 MODELE 3D A PARTIR DE LA COMBINAISON DES MODELES VECTORIELS 2D.....	118
4.4.2 MODELE 3D PAR EXTRUSION	121
4.5 CONCLUSION	122

4.1 Introduction

La segmentation de données laser terrestres étudiée dans le chapitre 3 n'est pas un objectif en soi. Elle s'inscrit dans un processus de traitement dont la finalité est de produire un modèle tridimensionnel de la façade considérée.

Le prétraitement et la segmentation des données laser terrestres étant effectués, la phase de modélisation peut prendre le relais. Le chapitre 2 a fait un tour d'horizon des différentes techniques et solutions envisageables pour modéliser un objet en trois dimensions. Il en ressort que quelle que soit la manière adoptée pour modéliser des objets en 3D, une problématique générale consiste à pouvoir décrire des objets complexes sous la forme de combinaisons d'objets plus simples.

La modélisation est employée ici dans le sens de la reconstruction d'une façade et des éléments qui la composent, sous une forme vectorielle. Ainsi, le modèle filaire a été choisi, car ce modèle ne conserve que les coordonnées des sommets et les arêtes les joignant. C'est donc un modèle très simple qui nécessite un minimum de puissance de calcul et de place mémoire sur un ordinateur. De plus, les autres types de modèles, tels que les modèles surfaciques (exemples : modèle B-Rep *Boundary Representation*) ou volumiques (exemple : modèle CSG *Constructive Solid Geometry*) peuvent s'appuyer sur le modèle filaire ainsi obtenu.

Ce quatrième chapitre est consacré à la présentation d'une nouvelle approche de modélisation automatique de façades de bâtiments. Les données sur lesquelles se base cette méthodologie sont simplement les segments plans issus de l'opération de segmentation précédente.

La méthodologie de modélisation proposée se décompose en quatre phases essentielles, comme résumées dans la Figure 4.1. Tout d'abord, il faut détecter et extraire les contours des segments plans. Puis, les arêtes doivent être classifiées selon leur courbure. Ensuite, les nœuds sont obtenus par le calcul des points d'intersection entre les différents segments droits et les arcs. Enfin, les éléments de façade sont reconstruits en 2D. Finalement, le passage du modèle 2D au modèle 3D est abordé en proposant deux solutions.

Chacune des phases citées dans l'organigramme sera expliquée en détail dans ce chapitre.

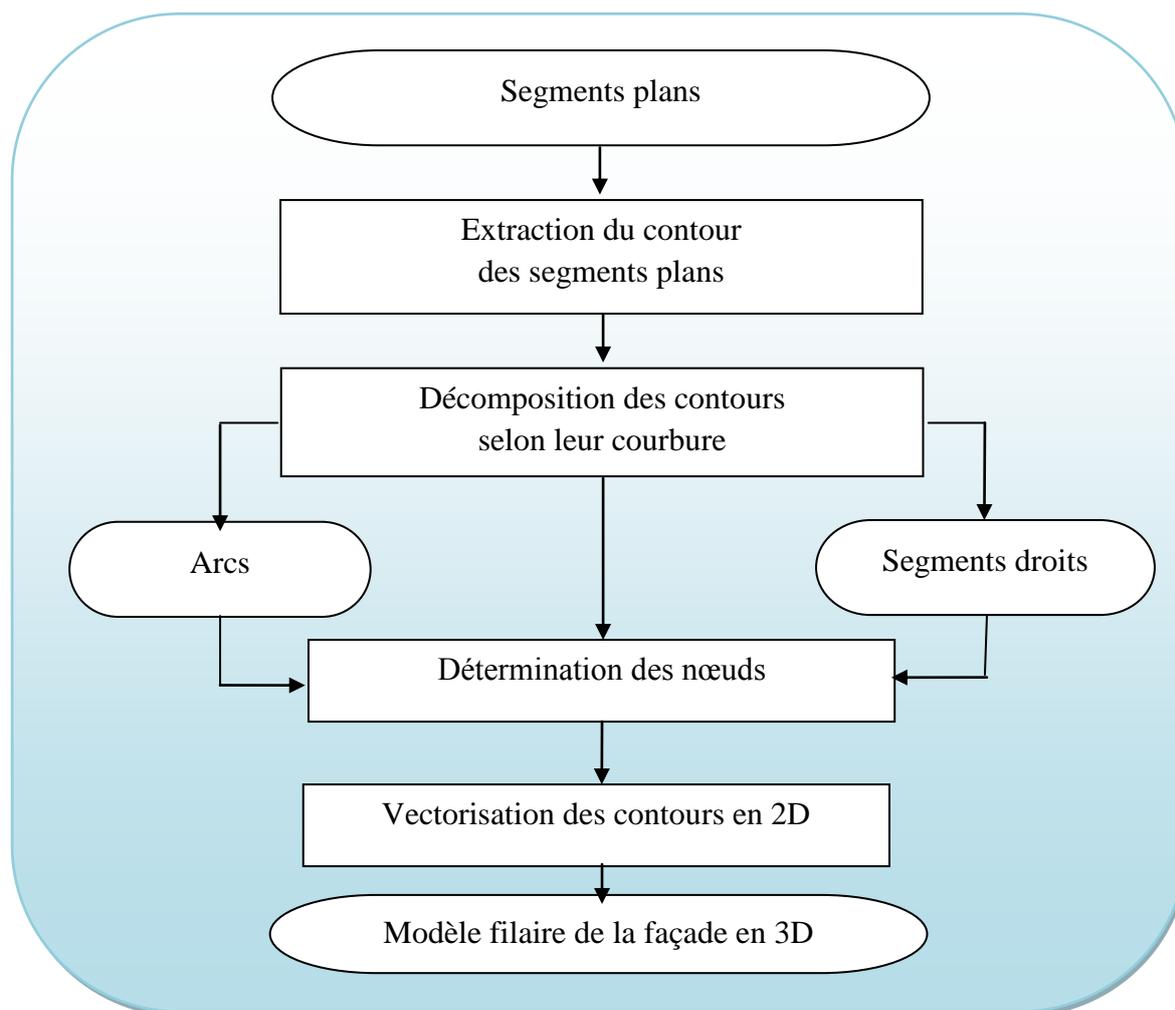


Figure 4.1. Etapes essentielles de l'approche proposée pour la modélisation de façades de bâtiments.

Le processus de production du modèle vectoriel débute par l'extraction des contours des segments plans.

4.2 Extraction du contour des segments plans

Les segments plans ont été extraits lors de l'étape de segmentation (cf. chapitre 3). Il s'agit à présent d'en extraire le contour. Il est important de préciser que l'on appelle « contours » l'ensemble des points du nuage constituant les arêtes extérieures ou intérieures d'un élément architectural situé sur la façade d'un bâtiment. La Figure 4.2 résume les étapes composant l'algorithme d'extraction de contours. Pour extraire les contours des segments plans, l'algorithme commence par calculer les paramètres du plan moyen à partir de l'ensemble des points qui le composent. Ensuite, en s'appuyant sur les résultats d'une triangulation de Delaunay effectuée dans ce plan moyen, les points disposés sur le contour peuvent être repérés.

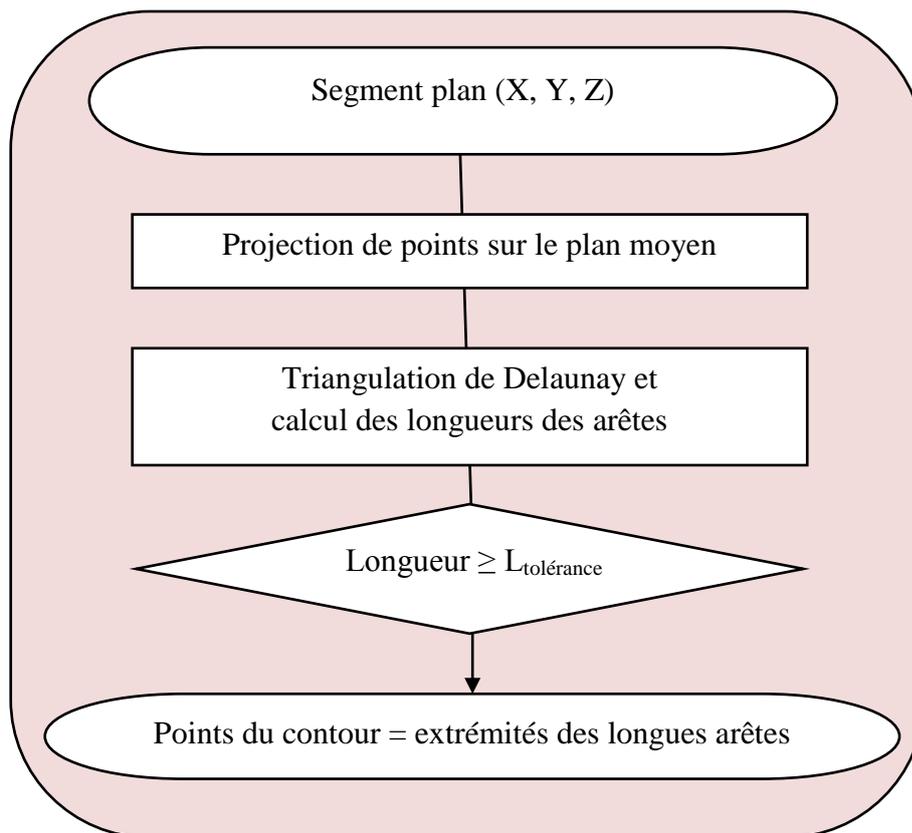


Figure 4.2. Organigramme de l'algorithme d'extraction de contours

4.2.1 Calcul du plan moyen des segments plans

Comme expliqué dans le chapitre 3, le calcul du plan moyen s'appuie sur une méthode algébrique consistant à calculer des vecteurs propres qui sont en réalité des composantes principales interprétant la variation des points du segment plan. Ces composantes principales constituent une base orthonormée que l'on note $[e_1, e_2, e_3]$, de telle sorte que les deux premières composantes principales $[e_1, e_2]$ définissent la base du plan moyen passant par le barycentre de l'ensemble des points. La troisième composante $[e_3]$ est perpendiculaire aux deux premières et définit ainsi le vecteur normal du plan moyen. Ensuite, les coordonnées des points sont calculées dans la base $[e_1, e_2]$. La Figure 4.3 montre les points du plan moyen (points rouges) obtenu à l'aide de cet algorithme à partir d'un nuage de point 3D simulé (points bleus).

A présent, les points du plan moyen sont connus en coordonnées. Pour déterminer quels points sont situés sur le contour de l'élément que décrit le plan, il a semblé judicieux de s'appuyer sur les caractéristiques des triangles issus d'une triangulation de Delaunay. Cette triangulation s'opère en 2D, dans le repère formé par les deux premières composantes principales $[e_1, e_2]$. La définition ainsi qu'une brève présentation théorique de cette méthode sont données dans le paragraphe suivant.

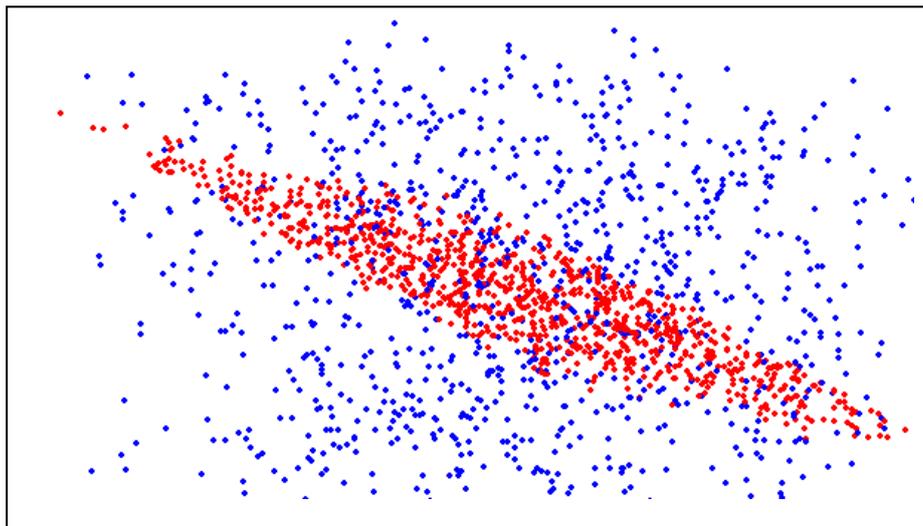


Figure 4.3. Illustration d'un plan moyen (points projetés en rouge) calculé à partir d'un nuage de points 3D simulé (en bleu)

4.2.2 Triangulation de Delaunay en deux dimensions

La triangulation de Delaunay appliquée à un ensemble de points d'un plan impose pour condition qu'aucun point de cet ensemble ne soit à l'intérieur du cercle circonscrit d'un des triangles (Figure 4.4). Les triangulations de Delaunay maximisent le plus petit angle de l'ensemble des angles des triangles, évitant ainsi les triangles "allongés". Cette triangulation a été inventée par le mathématicien russe Boris Delone (1890 - 1980) en 1934, comme le rappellent (George et Borouchaki, 1997).

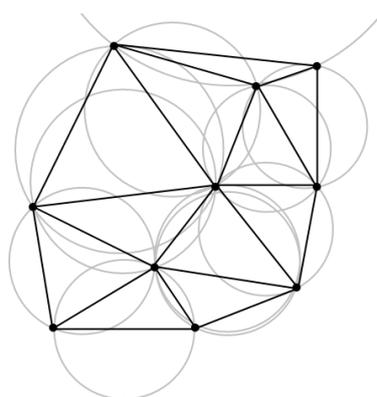


Figure 4.4. Triangulation de Delaunay avec représentation des cercles circonscrits

Parler de triangulation de Delaunay, nous amène à parler du diagramme de Voronoï, car les deux algorithmes sont liés.

Soit PTS un nuage de points. La construction de la triangulation de Delaunay peut s'établir en utilisant le fait que celle-ci est le graphe dual du diagramme de Voronoï construit sur l'enveloppe de PTS . Le diagramme de Voronoï est composé d'un ensemble de cellules V_i , définies mathématiquement par la relation suivante (George et Borouchaki, 1997) :

$$V_i = \{Pt \in (PTS) \text{ tel que } d(Pt, P_i) \leq d(Pt, P_j), \text{ pour tout } j \neq i\} \quad (4.1)$$

Où d est la distance euclidienne entre deux points.

Une cellule V_i , est donc le lieu des points les plus proches de P_i parmi les points de (PTS) . Les V_i sont des polygones fermés convexes. Les cellules ainsi obtenues recouvrent l'espace sans chevauchement. A chaque cellule du diagramme de Voronoï est associé un sommet dans la triangulation de Delaunay. Ces sommets sont reliés entre eux par une arête si les cellules sont voisines. En deux dimensions, les côtés des cellules ne sont autres que les médiatrices des arêtes des triangles de Delaunay. Autrement dit, si on joint les sommets de (PTS) appartenant à deux cellules adjacentes, on retrouve la triangulation de Delaunay comme le montre la Figure 4.5. Il y a, ainsi, une propriété d'orthogonalité entre les cellules de Voronoï et la triangulation de Delaunay.

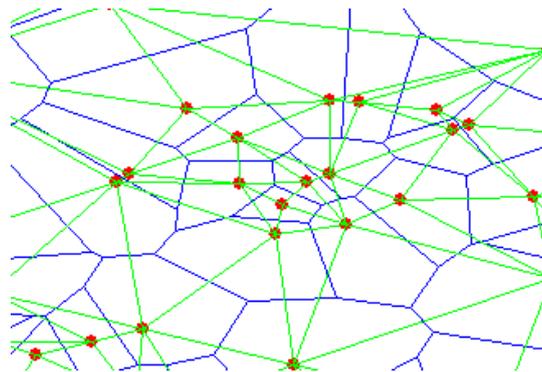


Figure 4.5. Superposition du diagramme de Voronoï (cellules en bleu) et des triangles de Delaunay (triangles en vert).

La triangulation de Delaunay en 2D a été utilisée ici dans le but d'extraire les points composant le contour des segments plans, qui eux-mêmes décrivent les éléments architecturaux des façades.

4.2.3 Extraction des points de contours

Si on considère la triangulation comme étant un graphe, on peut définir les relations de voisinage entre triangles et par voie de conséquence, les relations de voisinage entre arêtes. Ainsi, le voisin d'un triangle donné, s'il existe, est le triangle qui partage une arête avec ce triangle. Dans le cas où une arête est une frontière, c'est-à-dire située en limite du nuage, il n'a pas de voisin ayant la même arête. De cette manière on peut distinguer les arêtes frontières des autres arêtes et par conséquent on peut identifier les points situés sur un contour. Cela semble facile pour les points en 2D. Or, les points des segments plans sont en 3D. Certes, leur projection sur le plan moyen permet d'obtenir leurs coordonnées en 2D, cependant leurs relations de voisinage ne sont pas forcément conservées en revenant à la 3D.

C'est pourquoi, une autre solution plus simple ne faisant pas appel à l'étude de voisinage est proposée dans cette étude. La solution consiste à s'appuyer uniquement sur les longueurs des arêtes des triangles. En effet, les points de contours sont les extrémités des plus longues arêtes des triangles de Delaunay.

La Figure 4.6 montre un segment plan dont les points sont triangulés à l'aide de l'algorithme de triangulation de Delaunay développé. Les points sont colorés en bleu tandis que les arêtes sont en rouge.

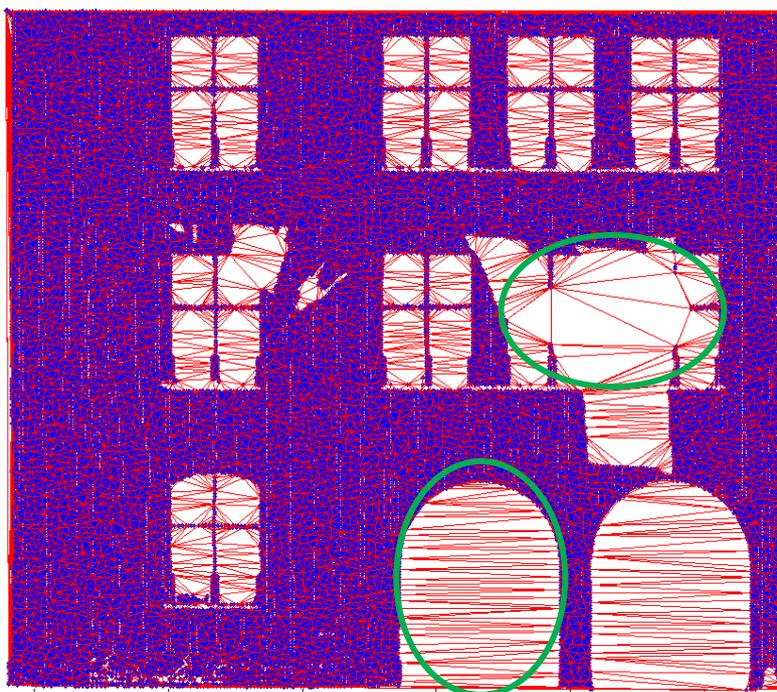


Figure 4.6. Un exemple d'une façade triangulée montrant les arêtes longues (par exemple les arêtes encerclées en vert)

Cet algorithme réussit alors à détecter aussi bien les contours extérieurs des plans (arêtes principales de la façade) que les contours intérieurs (ouvertures, telles que fenêtres ou portes). On entend par contours extérieurs, les points délimitant le plan considéré. Les contours intérieurs désignent, quant à eux, les points des contours des « trous » (zones vides de points) situés à l'intérieur du plan. Ces trous peuvent représenter des éléments de façades tels que des fenêtres ou des portes ou bien encore des ombres causées par des masques situés sur la trajectoire du faisceau laser.

Les longueurs des arêtes constituant le réseau triangulé sont calculées et triées dans un ordre croissant comme le montre la Figure 4.7. Il reste alors à déterminer un seuil à partir duquel on considère que les arêtes sont longues. Dans cet exemple le seuil a été fixé à 30 cm (flèche bleue). Généralement, la valeur du seuil peut être déterminée autour du point marquant le changement de pente de la courbe. Il s'agit de l'endroit où la longueur des arêtes change brusquement (voir Figure 4.7, flèche rouge). Cette valeur permet d'identifier les longs côtés

des triangles qui représentent les « arêtes frontières ». Par conséquent on peut extraire les points situés aux extrémités de ces arêtes et qui ne sont autres que les points des contours.

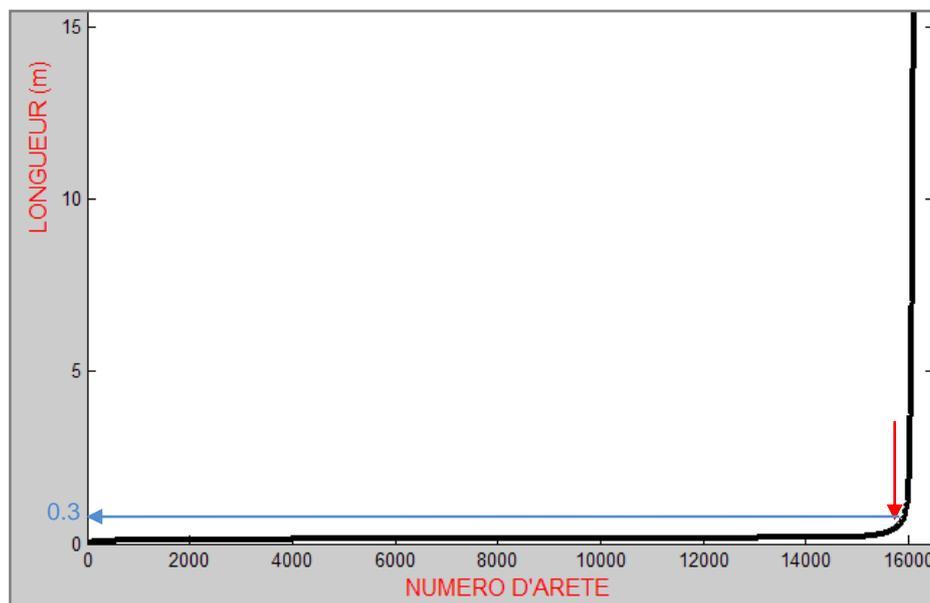


Figure 4.7. Graphique présentant les longueurs des arêtes des triangles de Delaunay, rangées dans l'ordre croissant. La flèche rouge indique le changement de pente ; la flèche bleue le seuil choisi.

Une fois les extrémités extraites, on obtient un nuage de points réduit aux points décrivant le contour des plans. La Figure 4.8 montre les contours intérieurs et extérieurs extraits du segment plan de la Figure 4.6.

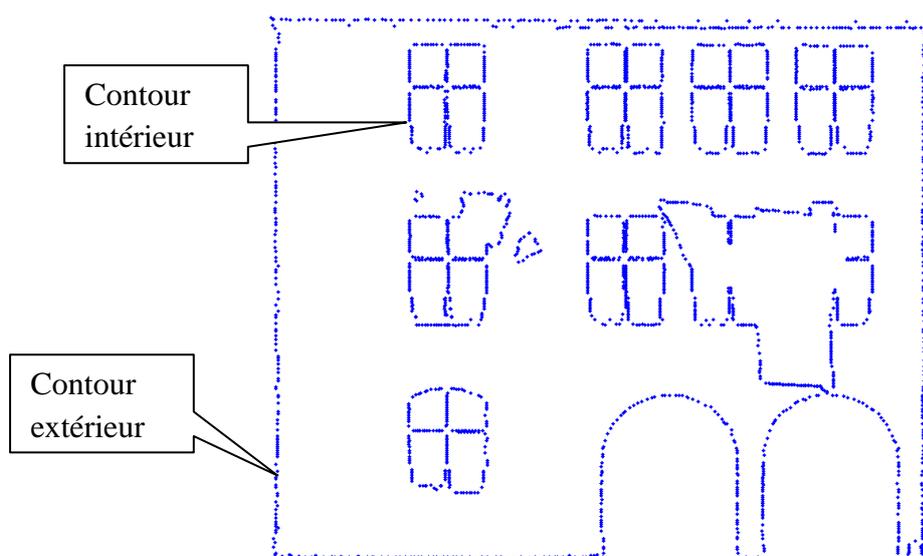


Figure 4.8. Exemple de résultat de détection de contours intérieurs et extérieurs d'une façade

Ces contours ne sont, en réalité, que des points constituant les lignes caractéristiques esquissant l'allure générale de la façade et des éléments la composant. En effet, ils ne représentent pas exactement les arêtes des éléments de façade, car il est difficile de scanner précisément l'arête d'objets, en raison de la diffraction que subit le faisceau à cet endroit. Les points du nuage seront d'autant plus proches de l'arête que la résolution spatiale choisie pour effectuer le balayage est petite (fine).

Parmi les avantages importants de cette approche, on peut noter sa capacité à extraire les contours dans tous les cas de figures qui peuvent se présenter sur les façades de bâtiments. En effet, elle donne des résultats satisfaisants dans des cas simples, comme par exemple un simple segment plan avec seulement des contours extérieurs (Figure 4.9).

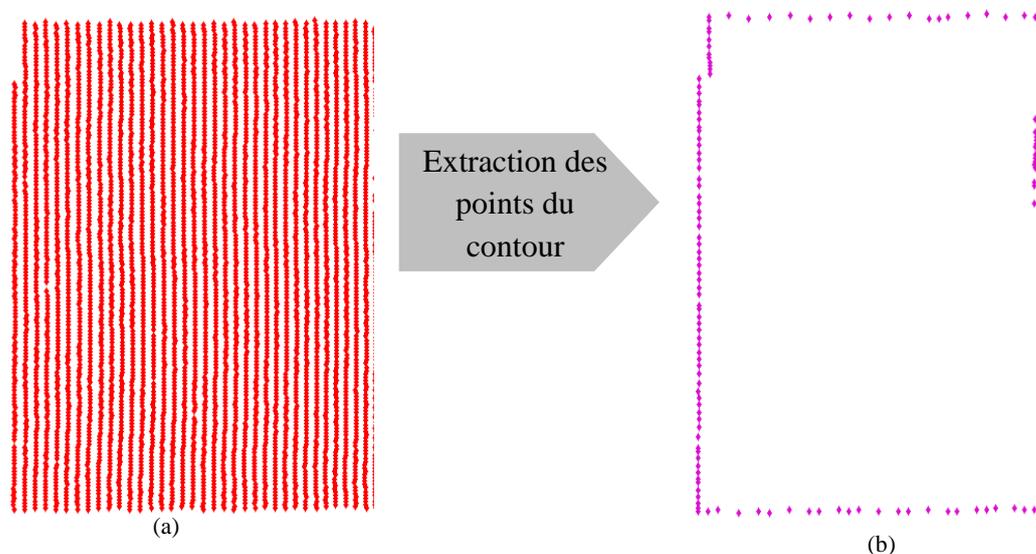


Figure 4.9. Extraction des points du contour d'un segment plan simple;
a) segment plan fourni par l'algorithme de segmentation; b) points
du contour fournis par l'algorithme

D'autre part, et contrairement aux algorithmes basés sur l'étude de voisinage, cet algorithme donne également des résultats satisfaisants sur des façades plus complexes en permettant de détecter et d'extraire les points des contours extérieurs aussi bien qu'intérieurs sans distinction, et ce de façon simultanée. La Figure 4.10 montre un exemple de résultat d'extraction de contours sur une façade complexe.

On peut remarquer également la capacité de cet algorithme à détecter les contours des éléments aussi fins soient-ils. Tel est le cas des minces bandeaux ou des traverses présentes sur la façade de bâtiment traitée dans la Figure 4.10b (encadrés en vert).

Comme le montre la Figure 4.11, même les ornements architecturaux de taille minimale peuvent être détectés grâce à cet algorithme d'extraction de points de contours.

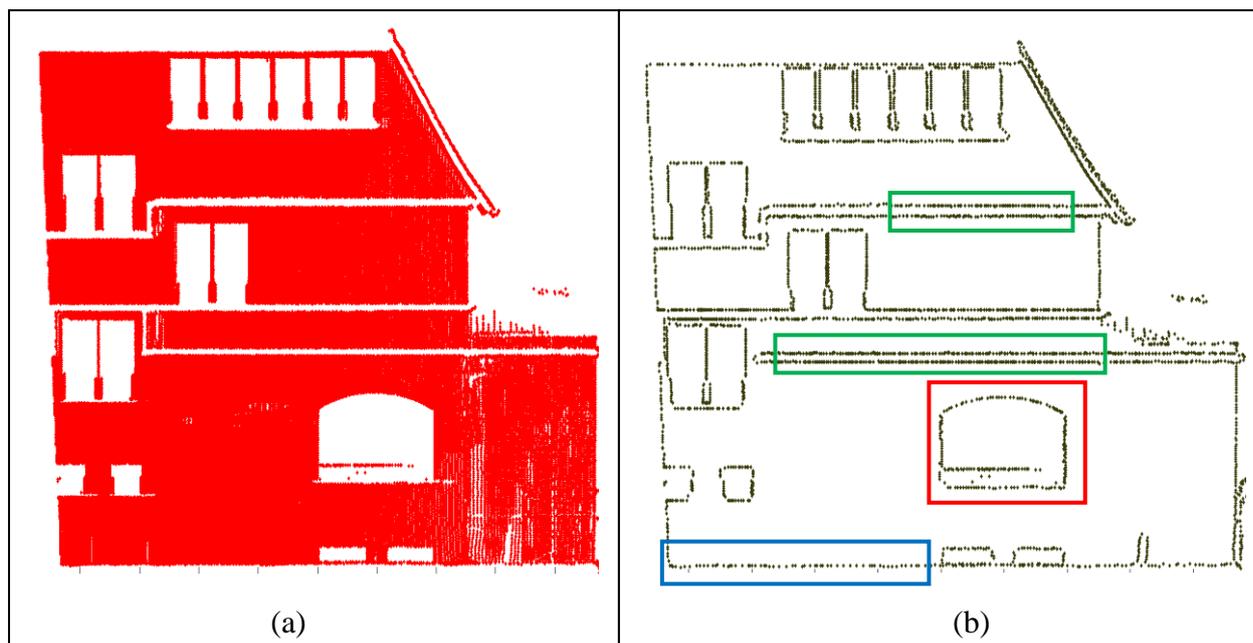


Figure 4.10. Extraction simultanée des contours extérieurs et intérieurs sur une façade complexe : a) segment plan de façade extrait par segmentation ; b) points de contours extraits. Contours intérieurs encadrés en rouge et vert ; contours extérieurs encadrés en bleu

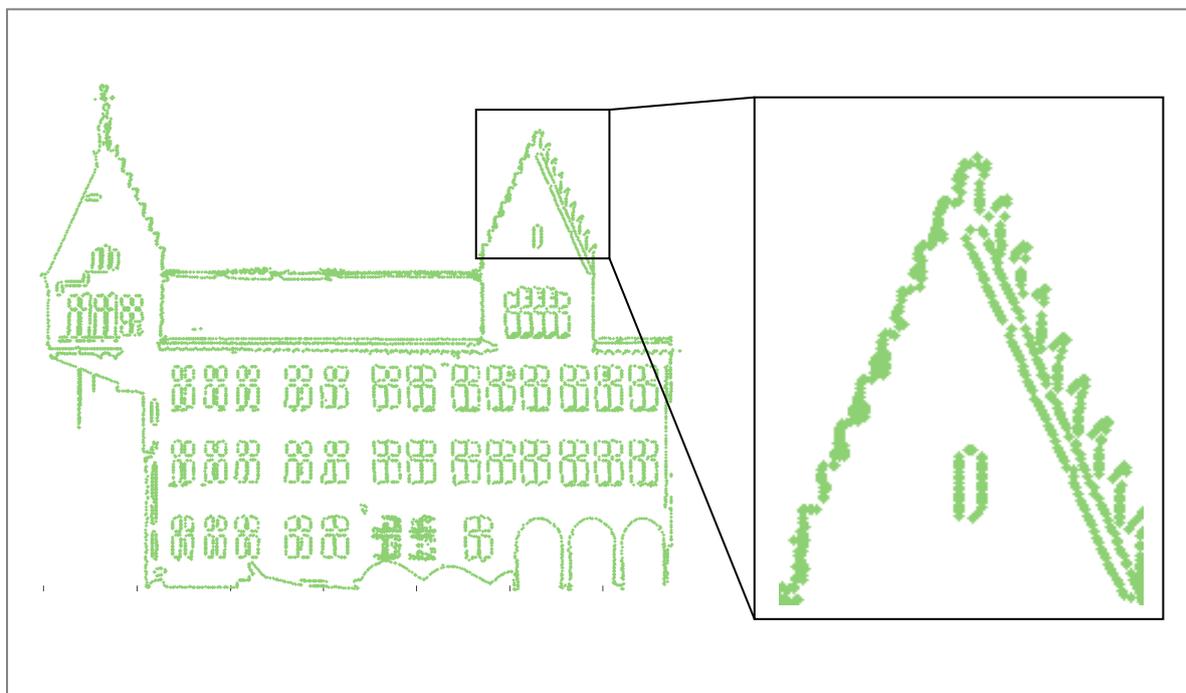


Figure 4.11. Extraction de contours sur une façade comportant des ornements architecturaux : Agrandissement sur les contours des ornements extraits par l'algorithme

A ce stade, les résultats sont encourageants pour continuer le processus de modélisation. D'une part, les lignes caractéristiques esquissant l'allure et les détails de la façade sont mises en exergue, ce qui n'est pas le cas lorsque l'on visualise les données laser brutes. D'autre part, le nombre de points à gérer a forcément été considérablement réduit, ce qui allège fortement la gestion du nuage et les traitements ultérieurs. Ces résultats pourraient être exploités pour produire directement des modèles vectoriels des façades de bâtiments. La méthode la plus simple et la plus sûre consisterait à dessiner les contours manuellement en reliant les points les composant.

Cependant, un des objectifs fixés dès le début de cette thèse était de réfléchir et d'aboutir à une méthode automatique de vectorisation. Une approche de construction automatique de contours a ainsi été développée. Le principe, les étapes et les résultats seront présentés dans les paragraphes suivants.

4.3 Vectorisation des contours des segments plans

4.3.1 Classification des segments droits

On souhaite générer un modèle vectoriel à partir des points de contours extraits précédemment. Pour ce faire, une méthode basée sur l'extraction des éléments géométriques simples est proposée.

Les points de contours extraits (Figure 4.12a) sont dans un premier temps décomposés en arêtes droites et courbes (Figure 4.12b). Cette décomposition se base sur le critère de colinéarité des points. Les points représentant des arêtes droites sont extraits à l'aide de l'algorithme RANSAC appliqué à la primitive géométrique « droite », tandis que les points restants forment la catégorie des arêtes courbes.

Ensuite, on distingue trois catégories de segments droits, classifiés selon leurs directions : les segments droits verticaux, les segments droits horizontaux et les segments droits inclinés. Même si ces derniers sont peu occurrence sur les façades, le cas a été prévu dans le développement de l'algorithme.

La Figure 4.13 montre les contours présentés dans la Figure 4.12a, après classification des segments droits verticaux et horizontaux.

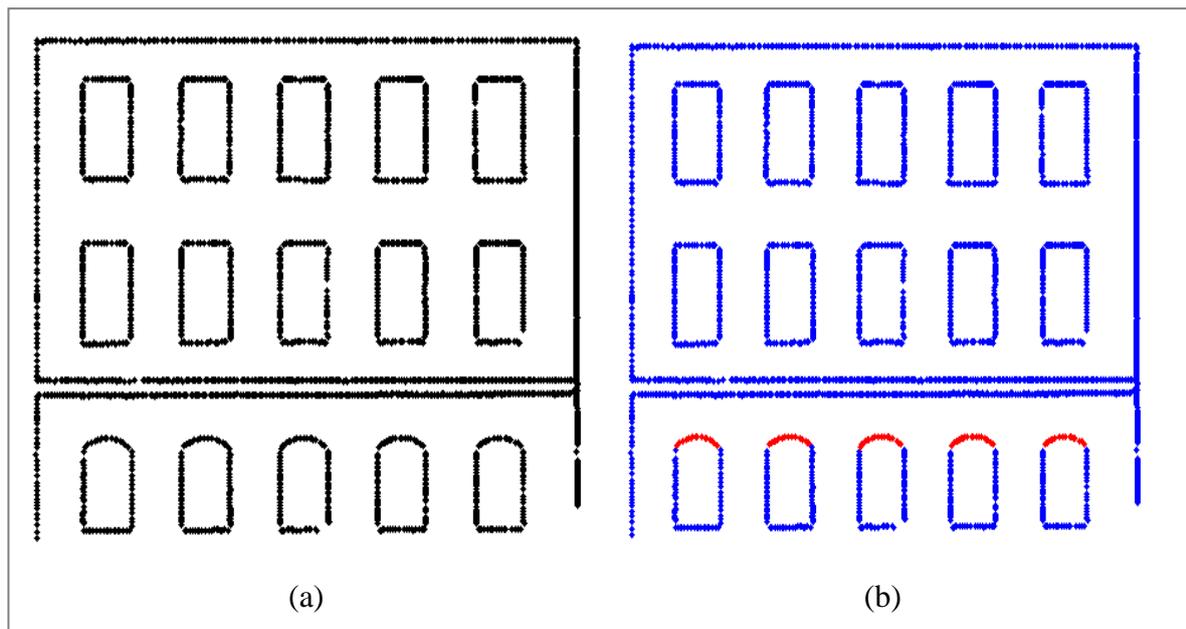


Figure 4.12. Décomposition des contours d'un segment plan ; a) points de contours des détails du segment plan ; b) classification des contours en segments droits (bleu) et arcs (rouge)

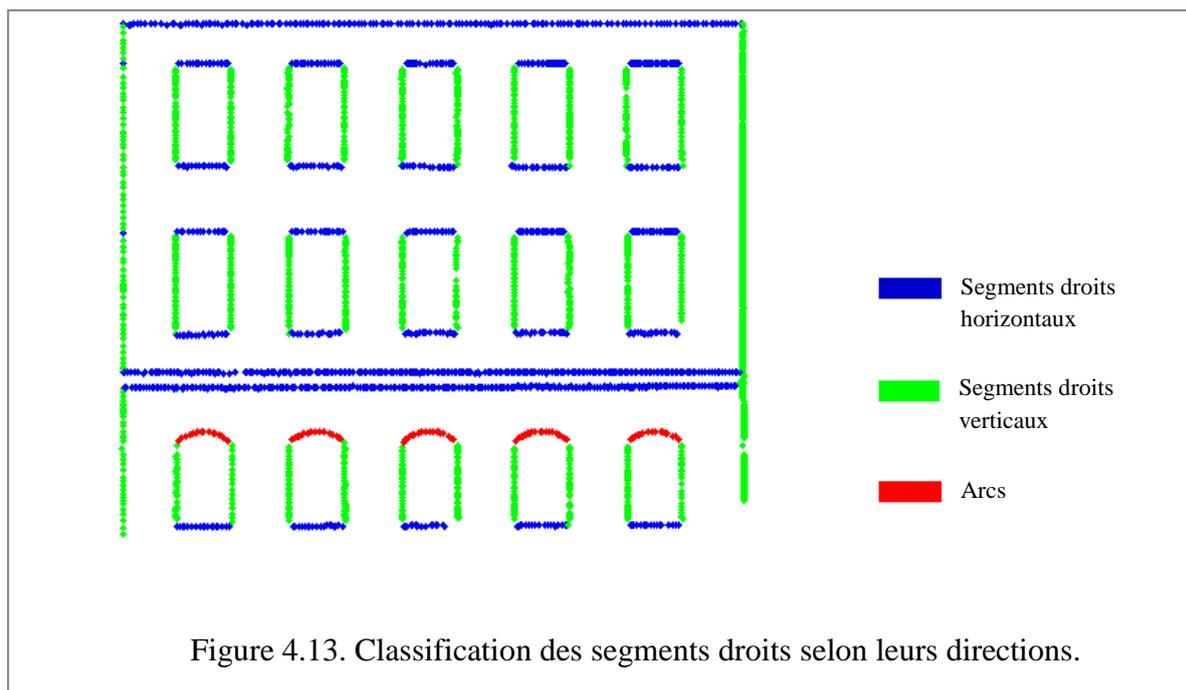


Figure 4.13. Classification des segments droits selon leurs directions.

Une fois les contours décomposés et classifiés selon leurs directions, il faut déterminer précisément les points d'intersection de ces droites ou courbes décrivant un élément de façade (exemple : coins de fenêtres). Ces points constitueront plus tard les nœuds sur lesquels pourra se greffer le modèle vectoriel 2D.

4.3.2 Calcul des points d'intersection

L'objectif est d'identifier les points d'intersection entre les différents segments droits et/ou courbes. Pour ce faire, un algorithme calculant les intersections entre les éléments a été développé. Cet algorithme assure l'intersection de deux courbes en deux dimensions. Dans un premier temps, il calcule l'intersection entre les segments droits horizontaux et verticaux (Figure 4.14). Ensuite, il procède au calcul d'intersection entre droites et arcs.

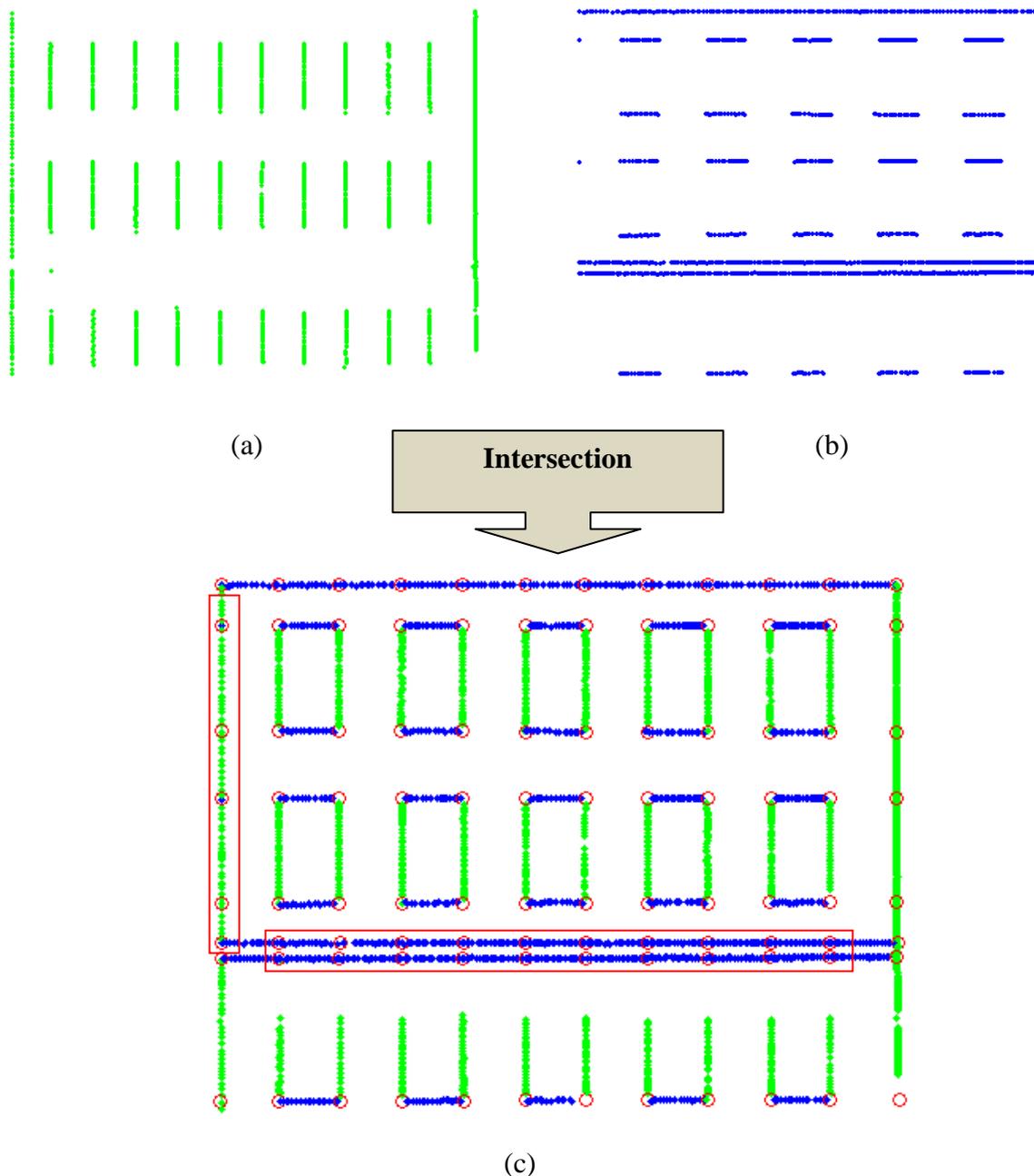


Figure 4.14. Calcul des points d'intersection des segments droits horizontaux et verticaux. Les points d'intersection sont situés au centre des cercles rouges. (a) segments droits verticaux ; (b) segments droits horizontaux ; (c) détermination des points d'intersection

On remarque dans la Figure 4.14, que les points d'intersection sont calculés entre toutes les lignes horizontales et toutes lignes verticales d'une manière purement géométrique. Cela a permis la détermination de tous les points d'intersection possibles entre les droites horizontales et verticales. Parmi ces points, il y a les nœuds que l'on souhaite obtenir comme par exemple les points d'intersection situés aux coins des fenêtres. Mais il y a également des points d'intersection inutiles pour décrire les éléments de façade, comme par exemple les points situés à l'intérieur des deux cadres rouges dans la Figure 4.14. Ces points sont indésirables dans l'opération de construction du modèle vectoriel du plan, car ils ne représentent pas de points de jonction entre les entités géométriques. C'est pourquoi, seuls les points d'intersection représentant des nœuds servant à produire le modèle vectoriel doivent être conservés. Ces points permettront le passage des points de contours à des segments de droites et d'arcs bien connectés.

4.3.3 Détermination des nœuds

Des contraintes d'ordre topologique ont été intégrées dans l'algorithme pour prendre en considération les relations de voisinage. En effet, avant de calculer l'intersection de deux segments droits de directions différentes, il faut s'assurer qu'ils sont effectivement voisins. On procède, pour cela, à la décomposition de chaque élément géométrique en tronçons contigus. Cette décomposition a lieu lorsque deux points successifs composant le segment sont espacés l'un de l'autre d'une distance supérieure à un seuil de tolérance prédéterminé par l'opérateur.

La Figure 4.15 montre le résultat de la décomposition des segments droits horizontaux et verticaux en tronçons présentés chacun par une couleur différente. Si on analyse ce résultat, on constate que les droites sont décomposées en petits tronçons représentant les bordures (mentons) des fenêtres.

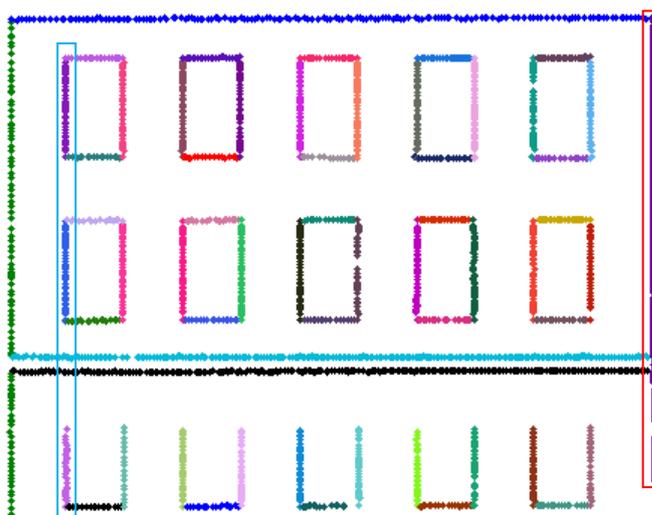
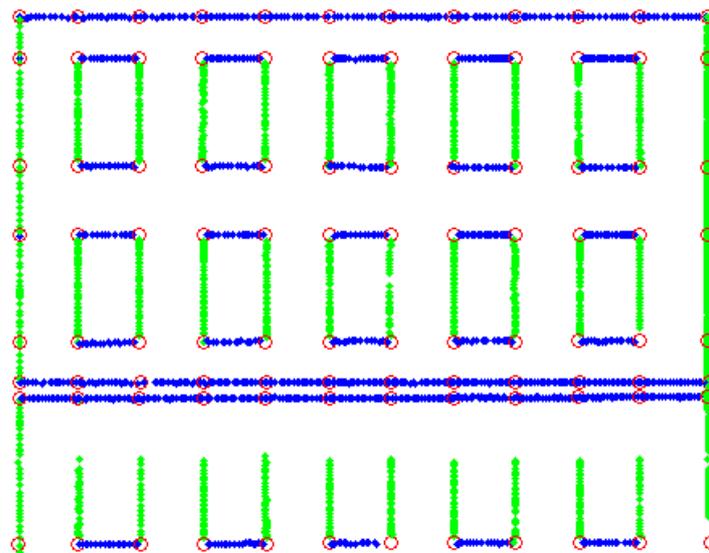


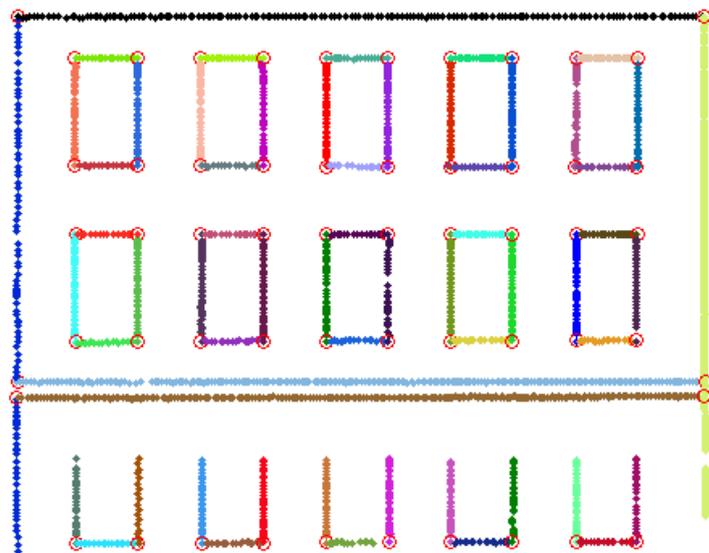
Figure 4.15. Segments droits horizontaux et verticaux présentés dans la Figure 4.14 et décomposés en tronçons contigus. Chaque tronçon est présenté avec une couleur différente.

On peut observer aussi que certains segments droits n'ont subi aucune décomposition, comme les contours de murs par exemple (voir segments droits encadrés en bleu). Par contre, les autres segments droits constitués d'un ensemble de bordures de fenêtres sont décomposés en petits tronçons, car la distance séparant deux points successifs est supérieure au seuil de tolérance fixé (voir cadre rouge).

La Figure 4.16 montre le résultat avant et après décomposition en tronçons des contours du plan de la façade de la Figure 4.12a.



(a)



(b)

Figure 4.16. Détermination des points d'intersection entre segments droits : a) points d'intersection calculés avant l'opération de décomposition en tronçons ; b) points d'intersection après décomposition.

Comme on peut le voir, les points d'intersection indésirables ont été éliminés automatiquement. Les points d'intersection restant dans la Figure 4.16b constituent l'ensemble des nœuds, qui permettront ultérieurement de lier entre eux les différents segments droits du plan de façade considéré.

Il reste à se pencher sur les points d'intersection entre segments droits et segments courbes. Les courbes fréquemment rencontrées sur les façades de bâtiments sont en général des arcs de cercles. C'est pourquoi, on se limitera à la présentation de l'étude de l'intersection entre un arc et une droite. Pour réaliser cette tâche, il est nécessaire de connaître la position exacte de la droite par rapport au centre du cercle contenant l'arc en question, afin de déterminer le nombre de points d'intersection possibles. Dans la Figure 4.17, notons \mathcal{C} le cercle de centre O et de rayon r non nul, situé dans le plan en 2D. Soit (D) une droite du plan et H la projection orthogonale de O sur (D) . Trois cas peuvent alors se présenter :

- Si $OH > r$, alors l'intersection du cercle \mathcal{C} et de la droite (D) est vide.
- Si $OH = r$, cette intersection se réduit au seul point de tangence H et (D) devient alors une tangente au cercle \mathcal{C} .
- Si $OH < r$, alors l'intersection entre le cercle et la droite est constituée de deux points distincts A et B .

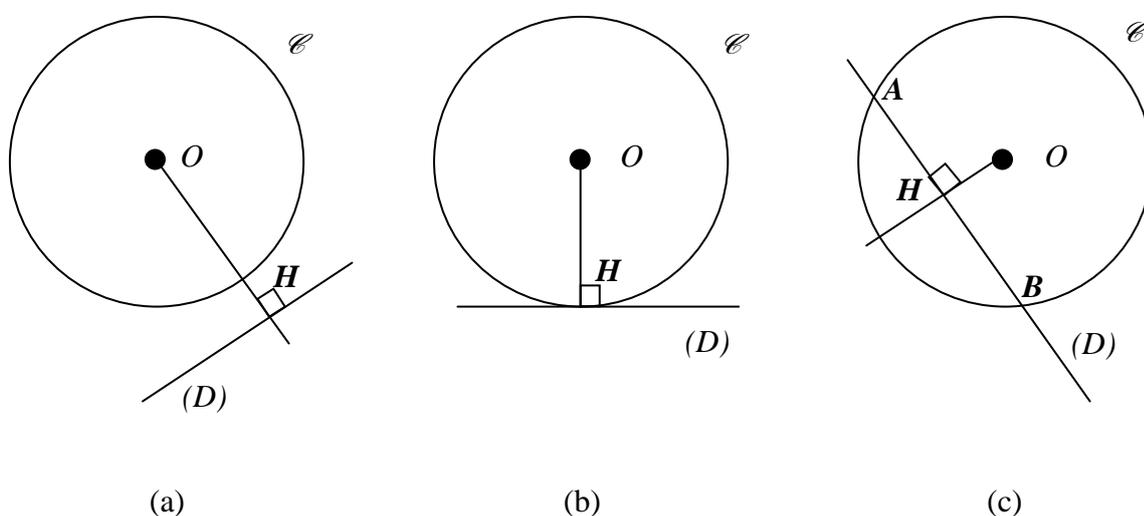


Figure 4.17. Etude de cas intervenant dans l'intersection d'un cercle et d'une droite ; a) intersection vide ; b) point d'intersection unique (point de tangence) ; c) deux points d'intersection

Dans le troisième cas (Figure 4.17c), deux points d'intersection sont à considérer, tandis qu'un seul est acceptable. Bien évidemment, il s'agit du point le plus proche des points composant l'arc, comme l'illustrent les points noirs dans la Figure 4.18.

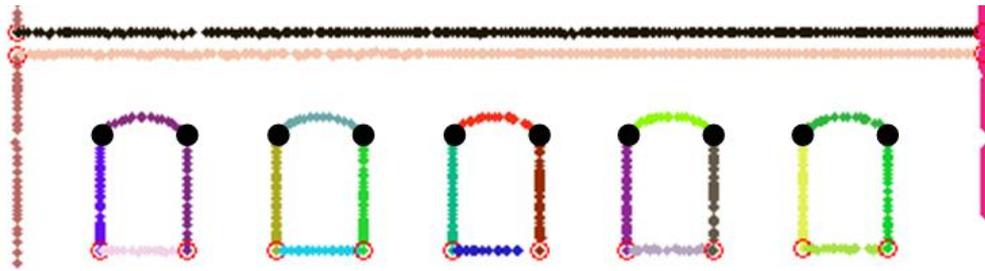


Figure 4.18. Détermination des points d'intersection d'arcs et de segments droits (points noirs)

Chaque arc peut être défini par ses deux extrémités (points noirs) et sa flèche. La flèche représente la distance entre le milieu du segment reliant les deux extrémités et l'arc, la distance étant mesurée le long de la médiatrice du segment $[AB]$ (Figure 4.19). La détermination de ces paramètres est nécessaire pour pouvoir dessiner ces arcs.

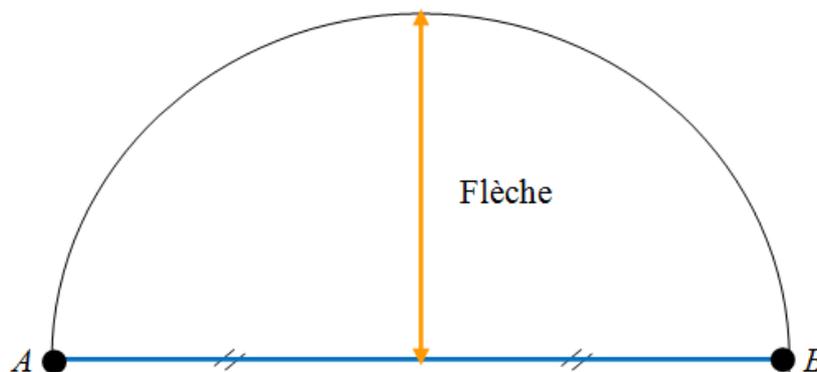


Figure 4.19. Schéma illustrant les paramètres définissant un arc de cercle (deux extrémités et une flèche).

A ce stade, les nœuds du plan à modéliser sont déterminés. Il reste à présent à relier les nœuds entre eux. Cela permet de produire un modèle vectoriel des éléments du plan considéré.

Le processus composé de l'extraction de contours, de décomposition en tronçons, de calcul de nœuds et de vectorisation est appliqué à tous les segments plans issus du processus de segmentation. Donc, le modèle vectoriel 2D est généré à présent.

La Figure 4.20b montre le modèle vectoriel généré à partir des points contours présentés dans la Figure 4.20a.

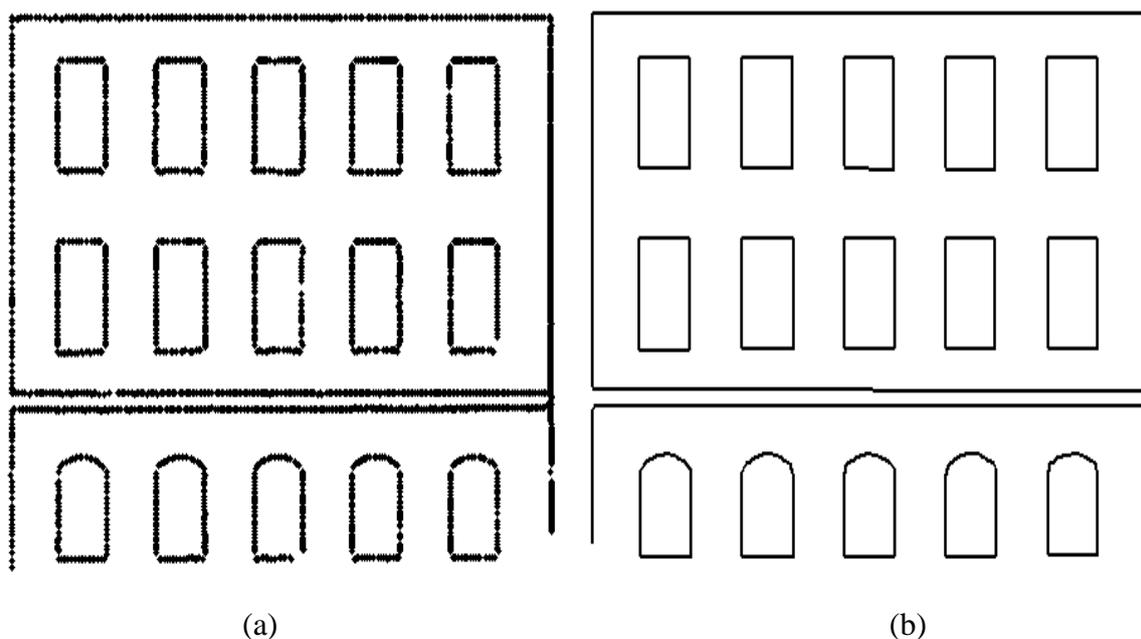


Figure 4.20. Modèle vectoriel 2D des éléments d'un plan de façade ; a) points de contours des détails du plan ; b) modèle vectoriel généré à partir des nœuds calculés.

La dernière étape consiste à étudier le passage de la 2D à la 3D.

4.4 Génération des modèles vectoriels 3D des façades

Deux solutions sont envisageables pour générer un modèle 3D de la façade. La première consiste à regrouper les modèles 2D de chaque plan après avoir modélisé ses éléments architecturaux selon la procédure développée ici. Cette solution fournit un modèle 3D complet, puisque constitué des détails de tous les plans composant la façade. La deuxième solution est plus rapide, mais se limitera à tracer l'allure générale de la façade, en opérant par extrusions à partir du plan principal de la façade uniquement.

4.4.1 Modèle 3D à partir de la combinaison des modèles vectoriels 2D

Dans cette méthode, les modèles vectoriels 2D de tous les plans préalablement modélisés sont combinés pour générer le modèle 3D de la façade. Rappelons que les segments plans issus de la segmentation représentent des éléments architecturaux de la même façade. Ces éléments occupent des positions bien déterminées les uns par rapport aux autres. Par exemple, le mur de la façade est considéré comme étant le plan principal de la façade, auquel sont « rattachés » tous les détails en relief. Ainsi, en regroupant ces modèles 2D on obtiendra le modèle 3D de la façade.

La Figure 4.21 présente les résultats de la segmentation d'un ensemble de façades d'une partie du lycée des Pontonniers de Strasbourg.

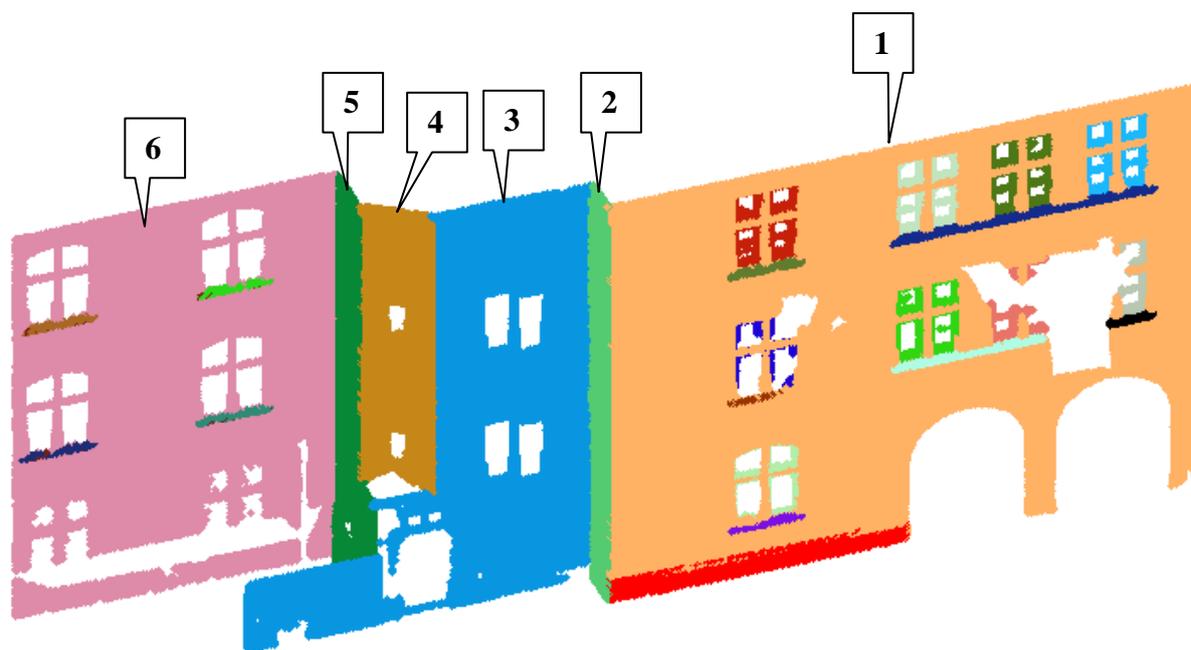


Figure 4.21. Résultats de la segmentation d'une série de 6 façades connectées, après application de l'approche de segmentation développée

Chacune des 6 façades dans la Figure 4.21 est composée d'un ensemble de segments plans, décrivant des éléments de différents niveaux de détail (plans principaux, ouvertures, appuis de fenêtres, sous-bassement, fenêtres, vitres, etc.).

Après modélisation des contours de tous les segments plans, les modèles vectoriels de ces plans 2D sont dans le même référentiel que celui dans lequel ont été détectés les segments plans. Ces façades sont ainsi modélisées individuellement, mais sans sortir du référentiel initial, commun à toutes les façades. De cette manière, les relations topologiques liant les différents segments plans entre eux sont conservées et transposées vers leurs modèles 2D. Par exemple, le modèle 2D de la façade n° 2 sera voisin des modèles correspondant à la façade n° 1 et 3.

La Figure 4.22 montre le résultat de la modélisation des murs principaux des façades segmentées dans la Figure 4.21, après regroupement. Le résultat de ce regroupement est le modèle vectoriel 3D des plans principaux de la façade toute entière.

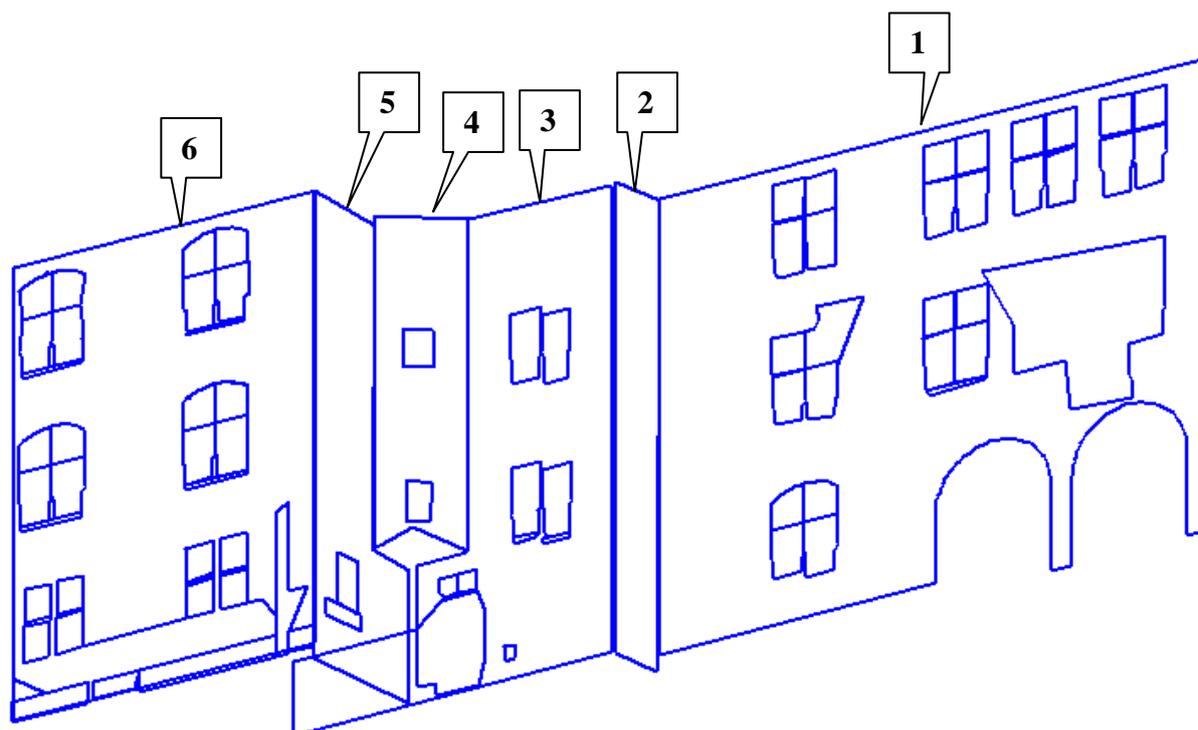


Figure 4.22. Génération du modèle 3D des plans principaux des 6 façades segmentées dans la Figure 4.21, par combinaison des modèles 2D de chaque plan.

A ces plans principaux de façades, on peut alors greffer les modèles 2D des autres éléments architecturaux si nécessaire.

Par exemple, dans la Figure 4.21, on remarque que pour la façade n°1, les appuis des fenêtres et même la menuiserie de la fenêtre au rez-de-chaussée ont été extraits et détectés par l'approche de segmentation. S'ils n'apparaissent pas dans la Figure 4.22, ce n'est pas lié au fait que ces détails ont été perdus. Ils sont simplement enregistrés dans un autre fichier de modèle de plan, puisque, rappelons-le, dans l'approche de segmentation développée, chaque plan est détecté puis modélisé à part. Ainsi, si on rajoute leurs modèles vectoriels 2D à ceux des plans principaux présentés dans la Figure 4.22, on obtient le résultat présenté dans la Figure 4.23. Les éléments architecturaux que la segmentation a réussi à détecter et que l'approche de modélisation a réussi à modéliser, sont représentés en vert et rouge pour distinguer les éléments situés respectivement à l'arrière et à l'avant de la façade principale (menuiseries, appuis de fenêtres, autres éléments saillants).

Le modèle présenté dans la Figure 4.23 présente donc le modèle 3D final de la façade, obtenu par le regroupement de tous les modèles 2D des segments plans générés par l'approche développée ici.

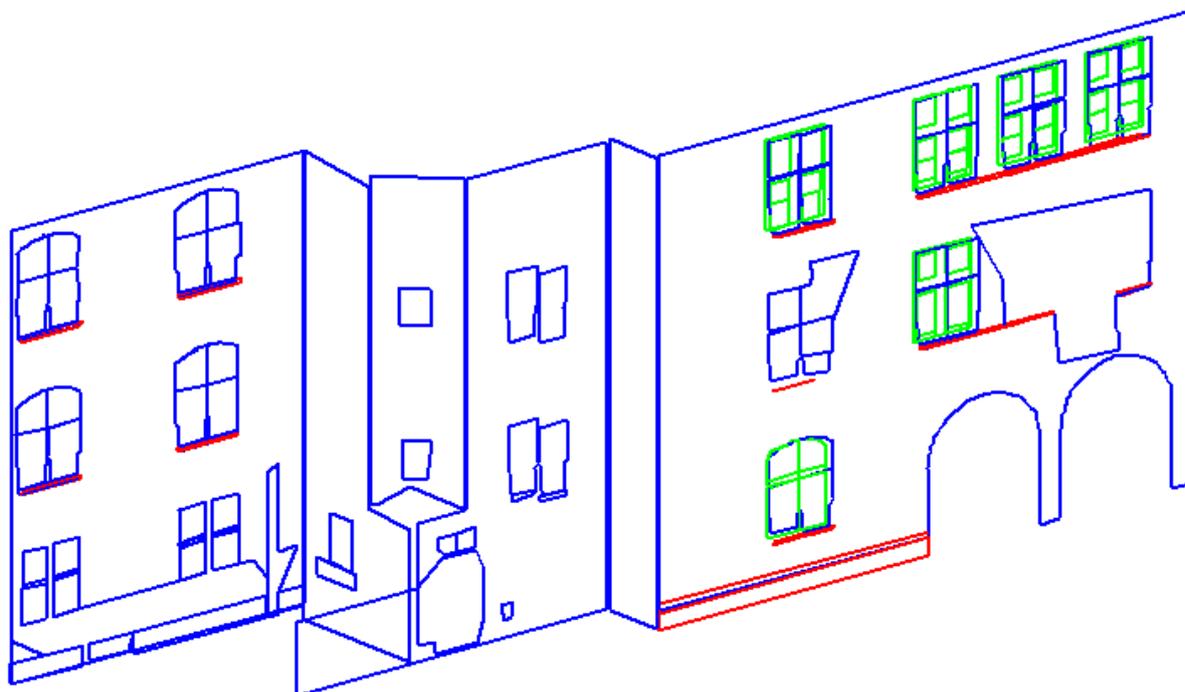


Figure 4.23. Modèle 3D de la façade de la Figure 4.21 après ajout des modèles des détails détectés, tels que des appuis de fenêtres ou la menuiserie extérieure

Les modèles vectoriels sont fidèles aux données disponibles. Evidemment, s'il y a un manque de données sur une façade, cela se répercutera sur son modèle vectoriel final. C'est le cas des trous sur la face n°1 créés par la présence d'arbres entre le scanner et la façade. Ce problème est discuté et partiellement résolu dans le chapitre 5.

La deuxième solution pour générer des modèles vectoriels 3D consiste à se contenter des façades principales et de les extruder dans une direction précise.

4.4.2 Modèle 3D par extrusion

On s'intéresse dans cette modélisation uniquement aux plans principaux de la façade. La direction de l'extrusion est fixée par celle de la normale au plan calculée préalablement, et son sens part de l'extérieur vers l'intérieur du bâtiment. La valeur de l'épaisseur de l'extrusion peut être extraite du nuage de points, au niveau des ouvertures. Dans notre cas la valeur de l'épaisseur est définie par la distance entre les plans des murs et les plans de la menuiserie des fenêtres.

La Figure 4.24 présente le modèle vectoriel 3D obtenu par l'extrusion des modèles vectoriels 2D des 6 faces de la façade présentée dans la Figure 4.21.

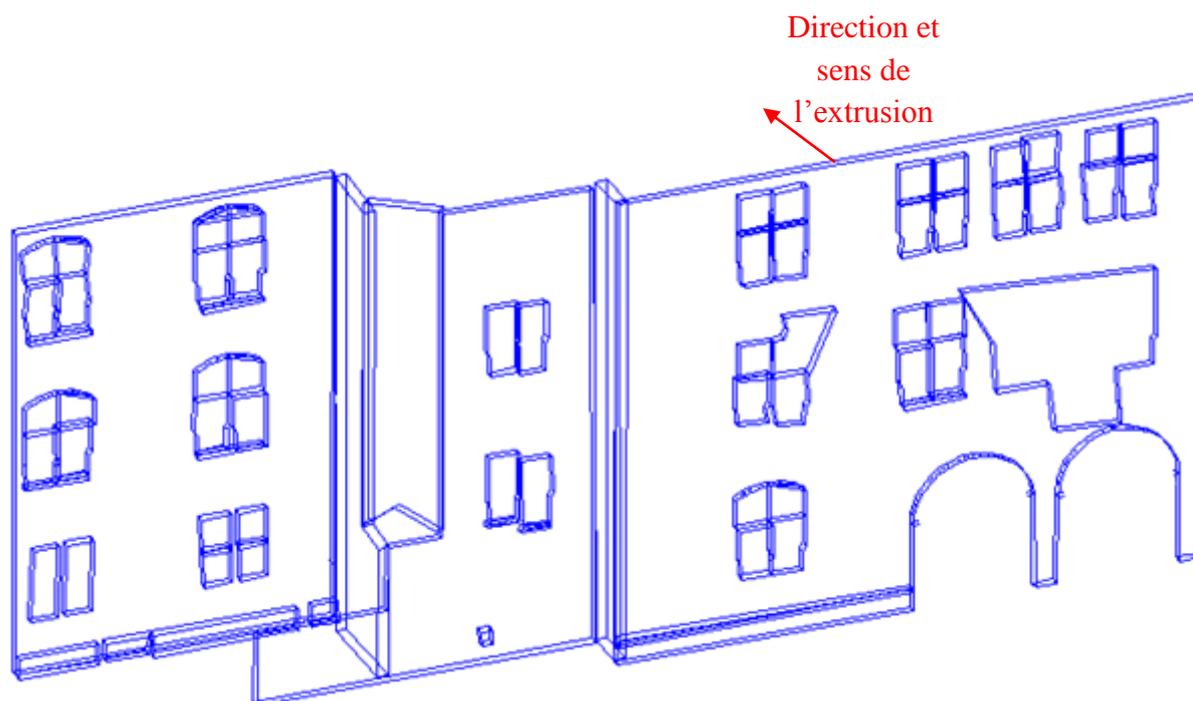


Figure 4.24. Résultat de l'extrusion des modèles vectoriels 2D de la Figure 4.22

L'avantage principal des modèles extrudés est de pouvoir produire facilement et rapidement le modèle 3D de la façade à partir uniquement des plans principaux de la façade en leur attribuant une épaisseur. Dans ce cas, il n'y a pas besoin de modéliser individuellement tous les segments plans issus du processus de segmentation. Par conséquent, plusieurs étapes de calcul sont gagnées et donc moins de temps de traitement est nécessaire. Cependant, l'inconvénient majeur est que cette méthode n'a de sens que dans le cas de façades simples sans détails proéminents ou éléments en saillie. Les modèles ainsi produits sont donc grossiers et moins détaillés du point de vue architectural que les modèles précédents faisant intervenir tous les segments plans.

4.5 Conclusion

Ce chapitre a décrit la seconde étape importante du processus menant à un modèle 3D de façades. Il s'agit de la phase de modélisation des éléments architecturaux de la façade.

L'approche de modélisation géométrique développée dans cette thèse démarre par la caractérisation des éléments principaux de la façade. Pour extraire automatiquement les points constituant les contours des segments plans, une solution efficace basée sur la triangulation de Delaunay a été mise en œuvre. L'algorithme réussit de cette manière à détecter aussi bien les contours extérieurs des plans (arêtes de la façade) que les contours intérieurs (ouvertures, telles que fenêtres ou portes).

A ce stade, les contours ne sont, en réalité, que des points constituant les lignes caractéristiques esquissant l'allure générale de la façade et des éléments la composant. Mais déjà ce modèle présente des avantages puisqu'il est un support précieux pour la digitalisation même manuelle des éléments de la façade, soit pour la corriger, soit pour la compléter aux endroits où le nuage de points n'est pas assez dense pour une extraction automatique fiable des contours.

Ensuite, afin de créer les contours géométriques des éléments, il a été nécessaire de classifier les points de contours en segments droits et arcs. Cette décomposition a permis de calculer les points d'intersection entre segments et de mettre en évidence les nœuds, éléments fondamentaux pour le calcul des modèles vectoriels des éléments de façade.

Enfin, le passage de la 2D à la 3D a été opéré en exposant deux solutions. La première consiste à combiner les modèles vecteurs 2D obtenus individuellement pour chaque segment plan détecté, et à les regrouper pour reconstruire le modèle vectoriel 3D complet de la façade. La seconde solution consiste à effectuer une extrusion à partir du plan principal, ce qui permet de produire des modèles plus rapidement, mais de façon grossière du point de vue architectural. La première solution, bien que plus gourmande en temps de traitement, fournit un résultat plus proche de la réalité et a donc été adoptée dans ce travail.

Les modèles vectoriels produits à l'issue des étapes de segmentation et de modélisation d'éléments de façades doivent à présent être évalués. Le chapitre suivant envisage cette évaluation non seulement au niveau de ces deux étapes primordiales, mais aussi au niveau de la qualité des données laser terrestres.

5

Contrôle géométrique et évaluation des modèles vectoriels 3D

Sommaire

5.1	INTRODUCTION	126
5.2	ERREURS AFFECTANT LES MESURES	127
5.2.1	ERREURS INSTRUMENTALES	127
5.2.2	ERREURS PROVENANT DES CARACTERISTIQUES DE L'OBJET	127
5.2.3	ERREURS ENVIRONNEMENTALES	128
5.2.4	ERREURS METHODOLOGIQUES	128
5.3	PRECISION THEORIQUE DES MESURES ACQUISES PAR SCANNER LASER TERRESTRE.....	129
5.3.1	PRECISION ANGULAIRE.....	129
5.3.2	PRECISION DE MESURE DE DISTANCE	129
5.3.3	PRECISION DE MESURE D'UN POINT.....	129
5.4	PRECISION DU SCANNER LASER TERRESTRE TRIMBLE GX	131
5.4.1	EXACTITUDE DE LA MESURE DE DISTANCE	131
5.4.2	PRECISION DE MESURE DE DISTANCE ET FACTEURS D'INFLUENCE	133
5.4.3	CONCLUSION	135
5.5	EVALUATION DES RESULTATS DE LA SEGMENTATION	136
5.5.1	INTRODUCTION	136
5.5.2	DEFINITION D'UNE REFERENCE PAR SEGMENTATION SEMI-AUTOMATIQUE.....	136
5.5.2.1	Interface graphique.....	136
5.5.2.2	Approche de segmentation semi-automatique de façades.....	139
5.5.3	EVALUATION DES RESULTATS DE LA SEGMENTATION	140
5.5.3.1	Evaluation qualitative des résultats de segmentation	141
5.5.3.2	Evaluation quantitative des résultats de la segmentation	143
5.5.4	CONCLUSION	147
5.6	EVALUATION DES RESULTATS DE LA MODELISATION	148
5.6.1	INTRODUCTION	148
5.6.2	EVALUATION DES CONTOURS	148
5.6.3	EVALUATION DU MODELE VECTORIEL	149
5.6.3.1	Evaluation qualitative.....	150
5.6.3.2	Evaluation quantitative.....	150
5.6.3.3	Relations spatiales et topologiques entre composants du modèle vectoriel 3D	160
5.6.3.4	Modélisation par motif	162
5.7	CONCLUSION	163

5.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'évaluation des résultats fournis par la chaîne de traitements développée dans cette thèse et menant à des modèles 3D de façades. Une étude succincte des différentes sources d'erreurs affectant les données laser terrestres est nécessaire avant d'aborder l'évaluation des résultats fournis par la segmentation et la modélisation géométriques, vu que la qualité de ces derniers est tributaire entre autres de la qualité des données acquises.

Etant donné que les scanners laser terrestres numérisent les surfaces avec une énorme quantité de points, des techniques de compensation d'observations sont souvent intégrées, à divers stades, dans les processus menant à des modèles 3D. La précision des modèles finaux s'en voit améliorée, néanmoins il ne faut pas surestimer cette amélioration. Car, même si les algorithmes de modélisation sont bien conçus, on ne peut pas produire de modèles de grande qualité si la précision des données est mauvaise dès le départ (Blais, 2003). C'est pourquoi, avant de discuter de la qualité des produits finaux, il est indispensable d'évoquer l'évaluation de la qualité des observations. Une bonne connaissance des sources d'erreurs et une bonne compréhension des relations qui les lient sont nécessaires pour établir un modèle mathématique les décrivant. Ensuite seulement la précision a priori des coordonnées des points numérisés pourra être estimée, avant d'être confrontée à la précision effective des observations.

Afin d'évaluer les résultats de la segmentation, c'est-à-dire la qualité de détection des plans, il faut disposer d'un jeu de données de référence. Pour cela, un ensemble d'algorithmes, assurant une segmentation semi-automatique des nuages de points ont été développés. De plus, des outils d'évaluation sont proposés afin de confronter le modèle obtenu au modèle de référence, sur la base de critères aussi bien qualitatifs que quantitatifs.

En ce qui concerne l'évaluation de la modélisation, elle commence par évaluer les contours issus de l'algorithme de détection des points de contours. Ensuite, il s'agit d'évaluer la qualité des polygones finaux reconstruits, évaluation qui sera déterminante puisqu'elle sera affectée par toutes les erreurs décelées dans les étapes précédentes. Ces résultats donneront une indication sur la qualité des résultats fournis par l'approche proposée, dans sa globalité.

Deux types d'évaluations ont été envisagés : une évaluation relative et une évaluation absolue. L'évaluation relative a pour objectif d'évaluer les performances des algorithmes constituant l'approche présentée, en comparant les résultats fournis automatiquement par ces algorithmes avec ceux produits manuellement. L'évaluation absolue ou globale, quant à elle, analyse à la fois la qualité des données, la qualité de la segmentation et la qualité de la modélisation. Etant donné que le modèle 3D est généralement le produit final issu du nuage de points, on peut définir l'exactitude des modèles finaux en les comparant à des modèles de référence obtenus avec des techniques a priori plus précises. L'exactitude rapportée aux modèles 3D reflètera alors le niveau de conformité entre le modèle et le monde réel (Iavarone, 2002).

5.2 Erreurs affectant les mesures

L'investigation des sources d'erreurs dans les mesures effectuées à partir de scanners laser terrestres est plutôt compliquée en raison du grand nombre de facteurs – pour certains interdépendants – qui interviennent dans ce bilan (Baltsavias, 1999a). La complexité est accrue par le fait que les erreurs dépendent aussi de la technologie adoptée, c'est-à-dire du principe de mesure, de la longueur d'onde employée, des types de déflecteurs du rayon laser. En outre, le fait que le géoréférencement soit direct ou indirect influe aussi sur la précision des résultats. Ce paragraphe est consacré plus particulièrement aux différentes erreurs affectant les mesures des scanners à temps de vol.

(Staiger, 2003) ou encore (Reshetyuk, 2006) proposent de regrouper les erreurs selon leur source, en distinguant quatre classes d'erreurs : les erreurs instrumentales, les erreurs liées à l'objet numérisé, les erreurs environnementales et les erreurs méthodologiques. Dans la mesure du possible, les modèles mathématiques permettant la modélisation de ces erreurs seront évoqués en même temps que leur source dans l'Annexe D.

5.2.1 Erreurs instrumentales

Ces erreurs sont dues à la conception du scanner et à ses caractéristiques techniques. Selon (Hébert et Krotkov, 1992), on peut distinguer les erreurs liées à la nature physique du matériel utilisé (par exemple le type de laser) et qui ne peuvent pas être corrigées ou éliminées par des modes opératoires. Les autres erreurs instrumentales sont causées par l'état mécanique du scanner (par exemple les erreurs d'axes). Ces erreurs peuvent éventuellement être supprimées ou minimisées par l'amélioration de la conception du système, ou par son étalonnage.

5.2.2 Erreurs provenant des caractéristiques de l'objet

Les scanners effectuent des mesures sans réflecteur. Donc la réflectance des objets joue un rôle important dans le bilan des erreurs, puisqu'elle agira sur les résultats de mesures de distance. La réflectance est définie comme le rapport entre le rayonnement du laser réfléchi et le rayonnement laser incident.

D'après (Lichti et Harvey, 2002; Ingensand, 2006, Vögtle *et al.*, 2008, Landes et Vögtle, 2009), elle dépend principalement des facteurs suivants :

- la couleur de la surface ;
- les propriétés des matériaux composant l'objet (permittivité électrique, magnétique, perméabilité, conductivité) ;
- l'orientation de la surface par rapport au faisceau incident ;
- la luminosité ambiante ;
- la température de la surface ;
- l'humidité de la surface ;
- la rugosité de la surface, qui dépend à son tour de la longueur d'onde employée et de l'angle d'incidence.

La relation de proportionnalité entre l'intensité du laser réfléchi et de la réflectance de surface est souvent décrite par le modèle de réflectance lambertien (Hancock, 1999) :

$$I \propto \frac{\rho \cos^4(\beta)}{R^2} \quad (5.1)$$

Où

- I : intensité du faisceau laser réfléchi
- ρ : coefficient de réflexion de la surface
- β : angle d'incidence du faisceau
- R : distance du scanner à l'objet
- \propto : symbole signifiant « proportionnel à... »

Cette équation montre que l'intensité dépend de l'angle d'incidence du rayon laser avec la surface numérisée. Ainsi, en fixant la distance et le coefficient de réflexion de la surface, on peut constater que la valeur de l'intensité est maximale pour des angles d'incidences nuls, c'est-à-dire pour des rayons perpendiculaires à la surface numérisée. D'autre part, la valeur d'intensité est inversement proportionnelle au carré de la distance séparant le scanner et la surface, ce qui explique les faibles intensités enregistrées sur des longues distances.

5.2.3 Erreurs environnementales

Les facteurs environnementaux, tels que la température ambiante, la pression, l'humidité relative, l'éclairage, les vibrations du scanner sont des facteurs qui ne sont pas toujours négligeables lorsque l'on effectue des mesures avec un scanner laser terrestre. D'après (Reshetyuk, 2006), la propagation du signal dans l'atmosphère reste la source principale d'erreurs environnementales sur les mesures d'un scanner laser terrestre.

5.2.4 Erreurs méthodologiques

L'opération de balayage laser terrestre est dotée d'un niveau d'automatisme assez élevé comparé aux mesures tachéométriques par exemple. Par conséquent, l'erreur provenant des manipulations de l'opérateur est quasiment nulle au niveau de l'acquisition. Une fois le scanner en place et calé, son intervention peut se résumer au choix des paramètres de résolution du scan. Les erreurs peuvent plutôt surgir lors de la phase de géoréférencement direct ou indirect des nuages de points.

L'ensemble de ces erreurs agissent de façon plus ou moins importante sur la mesure effectuée. Il est important de savoir les formuler puis les estimer, de façon à pouvoir associer un critère de précision aux observations fournies par un scanner laser.

5.3 Précision théorique des mesures acquises par scanner laser terrestre

La précision d'une série de mesures est décrite par l'écart-type, indice caractérisant la dispersion des résultats obtenus dans une série de mesures de la même valeur d'une grandeur mesurée (@AFT). L'écart-type est donc un critère de précision représentant la dispersion des mesures autour de leur espérance. L'erreur moyenne quadratique d'une mesure représente, quant à elle, la dispersion des mesures autour de leur valeur vraie. Elle qualifie donc l'exactitude d'une série de mesures par rapport à une valeur vraie.

Il est possible de vérifier l'exactitude des distances mesurées par un scanner en comparant celles-ci à des distances de référence, observées par tachéométrie par exemple.

D'après (Iavarone, 2002), la précision de mesure d'un scanner laser dépend de la précision avec laquelle travaillent ses différents composants, à savoir le distancemètre laser et le déflecteur du rayon laser. Il faut donc considérer respectivement la précision de mesure de distance et la précision de mesure d'angles.

5.3.1 Précision angulaire

La précision angulaire exprime le degré d'erreur du résultat d'une mesure d'angle. Ces erreurs peuvent être estimées en mesurant de courtes distances horizontales et verticales entre des objets (par exemple des sphères) qui sont situées à la même portée du scanner laser. On les compare ensuite aux mesures faites sur les mêmes objets avec des techniques topographiques plus précises (Iavarone, 2002).

5.3.2 Précision de mesure de distance

Cette précision exprime le degré d'erreur du résultat d'une mesure de distance. La précision des distances acquises par des scanners dépend en premier lieu du principe de mesure adopté (temps de vol, différence de phase, triangulation). Des ordres de grandeurs de précisions sur les distances atteintes par ces différentes technologies (précisions constructeurs) ont été donnés dans le Tableau 1.1 (chapitre 1).

Si les précisions de mesure de distance et d'angles sont essentielles, elles ne sont toutefois pas parlantes pour l'utilisateur, celui-ci s'intéressant communément à la précision des observations fournies, donc de la position des points du nuage.

5.3.3 Précision de mesure d'un point

Les précisions angulaire et en distance évoquées à l'instant peuvent entrer dans une composition quadratique pour en déduire la précision à attendre sur la position du point en 3D. (Baltsavias, 1999b) propose une expression dans laquelle il fait découler la précision de mesure d'un point en X, Y, Z dans le système local de la précision associée à n facteurs d'influence supposés indépendants les uns des autres (équation 5.2)

$$\sigma_{point\ 3D} = \sqrt{\sigma^2_1 + \sigma^2_2 + \dots + \sigma^2_i + \dots + \sigma^2_n} \quad (5.2)$$

Où σ_i est l'écart-type associé au facteur d'erreur i .

En faisant intervenir les écart-types sur les coordonnées X, Y, et Z, la précision d'un point 3D peut s'exprimer par la matrice de variance-covariance suivante :

$$C_{point\ 3D} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_z^2 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Cette matrice peut être obtenue en appliquant la théorie de propagation des erreurs individuelles aux facteurs d'erreurs qui influencent la mesure (Lichti et Gordon, 2004).

Il est très difficile, voire impossible, d'estimer tous les écarts-types des facteurs d'erreurs pour pouvoir appliquer les deux équations (5.2) et (5.3). Par contre, il est possible de calculer la précision de mesure d'un point en se basant sur les précisions des paramètres observés. En effet, comme on a déjà vu dans le chapitre 1, les coordonnées (X, Y, Z) des points d'impact du faisceau sur l'objet, dans le repère du scanner, sont fonction de la distance, de l'angle vertical et de l'angle horizontal (d, v, h).

$$\begin{cases} X = d * \cos(v) * \sin(h) \\ Y = d * \cos(v) * \cos(h) \\ Z = d * \sin(v) \end{cases} \quad (5.4)$$

Où d : distance inclinée entre le centre du scanner et l'objet
 v : angle vertical
 h : angle horizontal

Si on suppose que les paramètres observés (la distance et les deux angles) ne sont pas corrélés, on peut appliquer la théorie de propagation des erreurs pour en déduire la précision sur les coordonnées comme suit :

$$\begin{cases} \sigma_X^2 = (\cos(v) * \sin(h))^2 * \sigma_d^2 + (d * \sin(v) * \sin(h))^2 * \sigma_v^2 + (d * \cos(v) * \cos(h))^2 * \sigma_h^2 \\ \sigma_Y^2 = (\cos(v) * \cos(h))^2 * \sigma_d^2 + (d * \sin(v) * \cos(h))^2 * \sigma_v^2 + (d * \cos(v) * \sin(h))^2 * \sigma_h^2 \\ \sigma_Z^2 = (\cos(v))^2 * \sigma_d^2 + (d * \cos(v))^2 * \sigma_v^2 \end{cases} \quad (5.5)$$

L'équation (5.5) permet d'estimer une précision théorique que l'on peut s'attendre à obtenir sur les coordonnées des points mesurés, suivant l'équation (5.6).

$$\sigma_{XYZ} = \sqrt{\sigma^2_X + \sigma^2_Y + \sigma^2_Z} \quad (5.6)$$

Pour chiffrer cette précision, il faut connaître les précisions sur les distances et les angles mesurés par le scanner. La quantification théorique de ces erreurs s'avère délicate, car elle

suppose que l'on dispose d'informations que les constructeurs ne sont pas toujours en mesure de diffuser sur les distancemètres et déflecteurs. On est donc obligé d'accepter les précisions annoncées par le fournisseur, sachant qu'elles sont souvent contestées par les chercheurs dans ce domaine (Boehler et Marbs, 2005). En effet, elles sont généralement le résultat de tests effectués en laboratoire et dans des conditions d'observations optimales, ce qui est assez loin de la réalité du terrain (Iavarone, 2002).

Si l'on se contente des précisions annoncées par le constructeur (Trimble en l'occurrence), les angles horizontaux sont déterminés avec une précision de 60 μ rad (3.8 mgon), les angles verticaux avec une précision de 70 μ rad (4.5 mgon) et la distance avec une précision de 7 mm à 100m. Par l'application des équations (5.5) et (5.6) on obtient une précision sur les points de l'ordre de 12 mm pour une portée de 100 m. Ce résultat confirme la valeur annoncée par le constructeur Trimble (12 mm à 100m, voir Annexe (A.3)). Il faut noter toutefois que, dans cette précision, on ne tient pas compte des influences mises en évidence précédemment et qui sont fonction des caractéristiques de l'objet, de son environnement ou aux traitements ultérieurs (consolidation, géoréférencement).

C'est pourquoi, la précision effective et l'exactitude des mesures sont finalement plus importantes que la précision théorique, car non seulement elles reflèteront la réalité des résultats, mais aussi elles tiendront compte de l'influence des facteurs environnementaux et propres aux objets.

5.4 Précision du scanner laser terrestre Trimble GX

Le laboratoire MAP-PAGE a réalisé des tests sur son scanner Trimble GX dans le but de quantifier l'influence des multiples facteurs agissant sur les mesures. Ces tests ont fait l'objet de plusieurs publications (Hanke *et al.*, 2006; Vögtle *et al.*, 2008; Landes et Vögtle, 2009). Ils ont surtout porté sur la précision et sur l'exactitude de mesure de distance, car la mesure angulaire est difficile à contrôler, à moins de pouvoir guider l'instrument.

5.4.1 Exactitude de la mesure de distance

Comme seule l'exactitude de mesure de distance peut être évaluée, les observations ont été faites en laboratoire et les objets visés étaient des réflecteurs parfaits, fournis par le constructeur. Dans (Hanke *et al.*, 2006), les mesures de distances du scanner laser Trimble GX ont été évaluées via une base d'étalonnage connue (Figure 5.1), composée de 9 piliers équipés d'un système de centrage forcé. Toutes les combinaisons de distances, entre les colonnes P1, P2, P3, P4 et P5 ont été mesurées avec le scanner laser. Les distances entre piliers sont connues avec une précision d'environ 1 mm et ont été obtenues par observations tachéométriques.

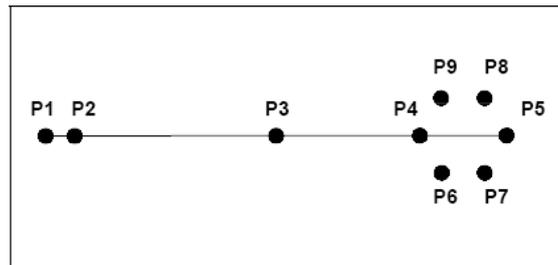


Figure 5.1. Position des piliers pour les tests de distances effectués par (Hanke et *al.*, 2006)

L'ajustement des mesures effectuées sur le réseau des lignes de base montre qu'un écart constant de $-7.8 \text{ mm} (\pm 0.5 \text{ mm})$ existe entre les longueurs fournies par le scanner et les longueurs vraies. La constante additive est donc fortement significative et devra être considérée pour corriger les mesures de distances (les distances mesurées sont plus longues de 7.8 mm qu'elles ne devraient l'être). Avec le même modèle de scanner, l'équipe MAP-PAGE de Strasbourg a effectué une étude similaire. Ainsi 4 piliers alignés et d'écartement connu ont été utilisés (Figure 5.2). Ici aussi, les distances entre piliers sont connues avec une précision de 1 mm et ont été obtenues par observations tachéométriques. La portée de l'appareil à ces piliers variait de 7 m à 31 m . Après le traitement et l'analyse de ces mesures, une erreur systématique de $+8 \text{ mm}$ a été mise en évidence également. Contrairement aux résultats obtenus précédemment, cette constante additive est cette fois-ci de signe positif !



Figure 5.2. Position des piliers pour les tests de distances effectués à l'INSA de Strasbourg

Au vu de ces résultats, on peut conclure que la précision des distances observées par les scanners dépend non seulement du modèle de scanner mais aussi de son numéro de série ! Ces anomalies doivent être corrigées par le constructeur afin d'harmoniser les précisions des appareils au sein d'un même modèle.

Les hypothèses émises pour expliquer la différence de signe entre les deux campagnes de mesures est que d'une part les cibles utilisées n'étaient pas du même type (sphères contre réflecteurs plats), et d'autre part que les scanners n'ont pas été étalonnés préalablement à leur utilisation, pour corriger les éventuelles erreurs systématiques. Cette erreur systématique sur la distance est non négligeable. Suite à ce constat, les deux scanners ont été repris par le constructeur et réétalonnés.

Si l'on souhaite disposer d'une information sur la précision de mesure de distance, il est nécessaire de tenir compte des autres paramètres susceptibles d'affecter la mesure de distance tels que les effets liés à l'objet et à l'environnement.

5.4.2 Précision de mesure de distance et facteurs d'influence

Pour étudier les effets des différentes caractéristiques de surface sur la mesure de distance effectuée via le scanner Trimble GX, (Vögtle *et al.*, 2008 et Landes et Vögtle, 2009) ont utilisé des échantillons susceptibles d'être présents sur des façades de bâtiments. Ainsi, différents matériaux ont été numérisés à plusieurs reprises, de jour comme de nuit. Les facteurs étudiés étaient la couleur de l'objet, sa nature (bois, métal, film transparent, crépis, papier, verre), sa rugosité (crépis avec différents grains) et son humidité. Non seulement la mesure de distance, mais également la valeur de l'intensité retour ont été analysées. Ces échantillons ont été fixés sur une planche, de façon à pouvoir réitérer les tests avec d'autres scanners (voir Figure 5.3).

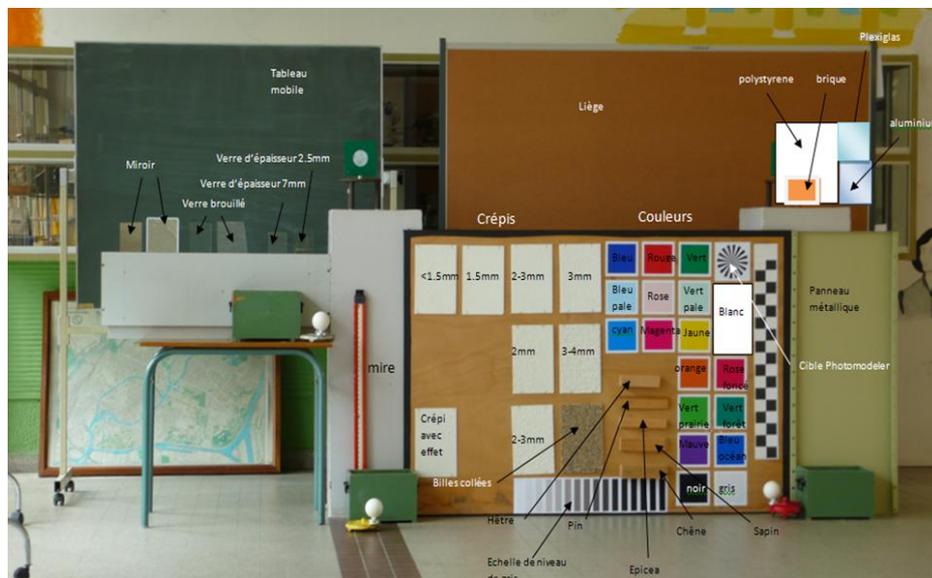


Figure 5.3. Panneau d'échantillons élaboré par l'équipe MAP-PAGE pour tester l'influence de divers matériaux sur la mesure laser

Le scanner a été positionné à une dizaine de mètres de l'objet. Le scannage de ces échantillons a été réalisé en laboratoire avec une résolution spatiale fixée à 2 mm sur le plan de l'objet. Pour analyser la précision de mesure de distance, un plan approximant les points laser situés sur un même échantillon a été calculé selon le principe des moindres carrés. Ainsi, l'écart-type dérivé des distances séparant les points de ce plan moyen a pu être calculé et est devenu le critère de précision sur lequel se base l'analyse de précision (équation 5.7) :

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{\sum (d_i)^2}{n-1}} \quad (5.7)$$

Où d_i : distance euclidienne d'un point M_i au plan moyen calculé à partir des points
 n : nombre de points composant le plan

Les résultats principaux obtenus montrent une forte dépendance entre la couleur de l'objet et la précision de mesure de distance. La dispersion des mesures de distances est plus grande pour les planches de papier noir ($\sigma_d = 2.3$ mm) que pour les planches de papier vert ($\sigma_d = 1.4$ mm), le noir absorbant le rayonnement du visible. Si le vert permet des mesures de distances plus précises, il faut le rapporter au fait que le faisceau laser utilisé est émis dans le domaine de longueur d'onde du vert visible. En observant la réflectance des planches de niveaux de gris, on a constaté que les mesures de distances sur les surfaces claires étaient plus précises ($\sigma_d = 1.6$ mm) que pour les surfaces sombres ($\sigma_d = 2.3$ mm). Cela traduit la présence de bruit dans les mesures pour des surfaces lisses et sombres. Ces résultats reflètent la capacité des objets à réfléchir, absorber ou transmettre l'onde électromagnétique incidente suivant leur couleur.

Concernant la nature des objets, l'essence de bois n'a pas montré d'influence particulière sur la mesure de distance. En effet, les plages de valeurs dans lesquelles évolue la précision sur la mesure de distance sont pour ainsi dire les mêmes (1.6 à 1.8mm), quelles que soient les échantillons de bois (pin, sapin, hêtre, chêne ou épicéa). Leur couleur est similaire, ce qui montre que le facteur couleur reste dominant.

Afin d'analyser l'effet de différents niveaux de rugosité, des échantillons de crépi blanc ont été élaborés avec des tailles de grains différentes (3 mm, 2 mm, 1.5 et moins de 1.5 mm). Il a été constaté que les précisions calculées sur les distances sont fonction de la taille de grain, donc de la rugosité, selon une dépendance linéaire. Les mesures effectuées de nuit soulignent encore davantage cette dépendance, allant de 1.3 mm à 1.7 mm. D'après le constructeur, la taille de l'empreinte laser est de 3 mm à 50 m, soit 1 mm à 15 m, ce qui reste inférieur à la taille de la plus petite granulométrie testée. Il semble toutefois nécessaire de rester prudent quant aux conclusions à tirer de cette expérience, en raison du bruit de mesure toujours présent.

Pour tester la dépendance entre la précision de mesure de distance et l'angle d'incidence du faisceau, une plaque métallique a été positionnée perpendiculairement à la direction de scan. Ensuite, la plaque a été tournée dans le sens des aiguilles d'une montre autour de son axe vertical, avec un pas de 10 grades. Les résultats montrent que lorsque l'angle d'incidence est nul, l'écart-type est de 7 mm, ce qui est supérieur à ce qui est annoncé par le constructeur. L'épaisseur du nuage est assez importante et décroît lorsque l'angle d'incidence augmente. En même temps, le nombre de points sur lequel s'appuient ces statistiques diminue également avec l'angle d'incidence, ce qui décrit l'effet de la réflexion spéculaire.

Le Tableau 5.1 résume l'ensemble des erreurs discutées ci-dessus. Ces résultats montrent que les facteurs influençant la précision de mesure de distance sont principalement la couleur et l'orientation de la surface de l'objet par rapport au faisceau incident. Il sera également conseillé de travailler dans la pénombre plutôt qu'en plein soleil, en raison de l'influence importante de la lumière ambiante. On retiendra de ces expérimentations que la précision de mesure de distance peut varier de 1 à 7 mm suivant les matériaux et son orientation, à une portée de 10 m.

Facteur d'influence	σ_d (mm)
Couleur (papier)	de 1.4 à 2.3
Niveau de gris (clair à sombre)	de 1.6 à 2.3
Bois (essences diverses)	1.6 à 1.8
Crépis (grains de 1.5mm à 3 mm)	1.3 à 1.6
Angle d'incidence (0 à 90 gon)	7 à 1
Lumière ambiante (jour/ nuit)	1.3 à 1.7

Tableau 5.1. Synthèse des imprécisions sur les distances causées par les caractéristiques de surface des objets numérisés (Landes et Vögtle, 2009).

Comme évoqué en introduction à ces études, la précision des mesures angulaires est moins fréquemment étudiée que la précision de mesure de distance. (Boehler et Marbs, 2005) ont tenté de l'estimer en comparant les observations angulaires faites par leur scanner aux angles observés par le biais d'instruments géodésiques a priori plus précis. Ils suggèrent de détecter les erreurs d'angles par la détermination d'une courte distance entre deux sphères situées à des distances égales par rapport au scanner laser. Il ressort de leurs travaux que les erreurs angulaires sont toutefois moins importantes que les erreurs sur la mesure de distance.

5.4.3 Conclusion

Il est indispensable de connaître la précision a priori des données avant de les utiliser dans les calculs, car la précision du produit final est directement corrélée à celle des données. L'utilisateur des appareils conventionnels de topographie (théodolites, distancemètres, tachéomètres, etc.) connaît en général la précision de mesure qu'il peut attendre de ses appareils. Il sait également apporter les corrections nécessaires à ses mesures et mettre en œuvre des modes opératoires lui permettant de s'affranchir d'erreurs systématiques. Malheureusement, la conception mécanique des scanners laser est différente de celle des appareils conventionnels. La plupart des investigations effectuées sur les instruments topographiques conventionnels ne peuvent donc pas simplement être appliquées aux scanners laser.

Les investigations portant sur la quantification des erreurs susceptibles d'entacher les observations effectuées à l'aide de scanners laser terrestres ne sont pas très nombreuses, notamment en ce qui concerne la précision des mesures angulaires effectuées par ces appareils. Une raison expliquant ce manque est que le scanner laser est toujours encore considéré comme une nouvelle technologie, car assez peu adopté par les géomètres. Donc l'exactitude des résultats qu'un scanner est en mesure de fournir n'est pas encore totalement maîtrisée ni par les constructeurs ni par les utilisateurs. D'autre part, cette nouvelle technologie oblige le géomètre à aborder la mesure d'objets avec une autre philosophie. En effet, le balayage laser permet d'effectuer le relevé d'une façade d'un point de vue surfacique (trame régulière de points) et non plus par le choix et la mesure de points caractéristiques comme c'est le cas avec l'emploi de tachéomètres.

Dans ce chapitre, un tour d'horizon a été fait concernant les sources et la modélisation des erreurs provenant de la mesure par scanner laser terrestre. Les précisions annoncées par le

constructeur peuvent être injectées dans les formules citées, afin de quantifier la précision de positionnement des points du nuage. Pour cela il faut être capable de quantifier au préalable la précision sur la distance et les angles mesurés. Pour le scanner utilisé dans cette thèse, seule la précision de la distance a été testée, car l'estimation de la précision des angles est difficile à mettre en œuvre. C'est pourquoi, on a accepté les précisions (en particulier angulaires) annoncées par le constructeur sachant qu'elles sont parfois contestées par les chercheurs dans ce domaine.

Pour des applications exigeant une précision sub-millimétrique, il est souhaitable de tester le scanner en situation réelle, et d'écarter les erreurs systématiques par étalonnage. Par ailleurs, étant donnée l'influence des caractéristiques des objets scannés et de leur environnement, des tests de sensibilité comme ceux effectués au laboratoire sont utiles. Ils auront montré que l'influence de la réflectance des objets et de leur orientation par rapport au faisceau incident étaient loin d'être négligeables, tout comme l'influence de la luminosité ambiante. Ainsi, la précision de positionnement d'un point s'en voit dégradée.

Après avoir discuté de la précision des nuages de points, données de base de l'étude, il est temps d'évaluer les résultats des différents algorithmes composant la chaîne de traitements menant à la production de modèles vectoriels de façades.

5.5 Evaluation des résultats de la segmentation

5.5.1 Introduction

L'approche de segmentation développée dans cette thèse est présentée dans le chapitre 3. Il s'agit à présent d'évaluer les résultats qu'elle fournit, c'est-à-dire d'évaluer les segments plans issus de la segmentation des façades de bâtiments. Pour disposer d'un jeu de données de référence, une solution consiste à réaliser une segmentation manuelle à l'aide d'un logiciel de traitement de données laser terrestres. Néanmoins, cette opération est longue et fastidieuse. De plus, segmenter manuellement suppose un soin particulier apporté de la part de l'opérateur pour extraire exactement les éléments recherchés au travers d'une multitude de points de signification parfois ambiguë.

Dans l'objectif de surmonter ces difficultés et d'accélérer l'opération de segmentation manuelle, une segmentation semi-automatique de nuages de points a été implémentée. Il s'agit d'un outil permettant à l'utilisateur de sélectionner quelques points d'une manière interactive, via une interface conviviale. Ces points serviront à calculer les paramètres des surfaces qu'ils initialisent, sachant que trois primitives géométriques sont disponibles à travers cet outil : le plan, la sphère et le cylindre.

5.5.2 Définition d'une référence par segmentation semi-automatique

5.5.2.1 Interface graphique

Une interface graphique a été développée sous MATLAB, dans l'objectif de faciliter la prise en main de l'outil de segmentation semi-automatique. Etant donné que la segmentation

automatique de façades est faite selon la primitive « plan », seule cette primitive géométrique est considérée dans ce chapitre. Néanmoins, le lecteur se reportera à l'Annexe (E.1) pour constater que l'outil développé a été étendu à d'autres primitives telles que le cylindre et la sphère, susceptibles d'apparaître dans des levés industriels.

L'extraction semi-automatique des plans de la façade diffère à deux niveaux de celle développée dans l'approche automatique.

D'une part, l'initialisation des paramètres du plan se fait d'une manière interactive. En effet, l'opérateur est invité à sélectionner au moins trois points qu'il considère comme appartenant à une surface plane. Ensuite, les paramètres du plan, la normale et sa distance à l'origine du repère sont calculés sur la base des coordonnées de ces points. Les points affectés au plan initial sont déterminés par le biais du calcul de la distance séparant ces points du plan. Si cette distance est inférieure à une tolérance prédéfinie, les points sont considérés comme appartenant à la surface en question. Puis le calcul des paramètres est effectué en respectant le principe des moindres carrés.

La deuxième différence réside dans la délimitation des primitives géométriques. Ainsi, l'opérateur doit choisir des points limitant la surface plane en question (en général, pas plus de 4 points).

L'interface graphique développée pour utiliser les programmes de segmentation semi-automatique est illustrée par la Figure 5.4.

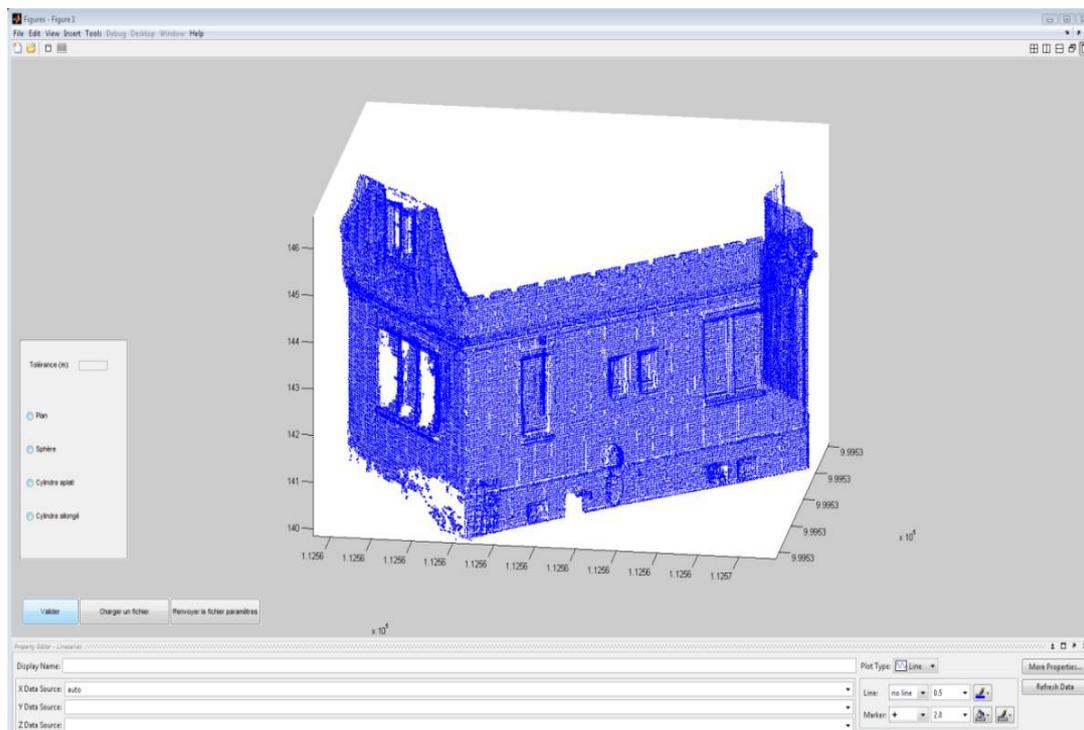
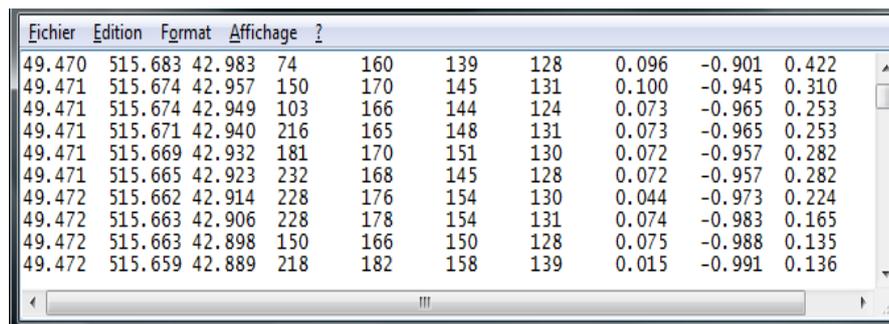


Figure 5.4. Interface graphique de segmentation semi-automatique

Cet outil permet de charger un fichier de points en format texte (Figure 5.5), qui doit respecter le format suivant :

- ✓ colonnes 1 à 3 : coordonnées (X, Y, Z) du point
- ✓ colonnes 4 : intensité
- ✓ colonnes 5 à 7 : comptes numériques du pixel dans les bandes du rouge, vert et bleu visibles
- ✓ colonnes 8 à 10 : composantes du vecteur normal selon les 3 axes



Fichier	Edition	Format	Affichage ?						
49.470	515.683	42.983	74	160	139	128	0.096	-0.901	0.422
49.471	515.674	42.957	150	170	145	131	0.100	-0.945	0.310
49.471	515.674	42.949	103	166	144	124	0.073	-0.965	0.253
49.471	515.671	42.940	216	165	148	131	0.073	-0.965	0.253
49.471	515.669	42.932	181	170	151	130	0.072	-0.957	0.282
49.471	515.665	42.923	232	168	145	128	0.072	-0.957	0.282
49.472	515.662	42.914	228	176	154	130	0.044	-0.973	0.224
49.472	515.663	42.906	228	178	154	131	0.074	-0.983	0.165
49.472	515.663	42.898	150	166	150	128	0.075	-0.988	0.135
49.472	515.659	42.889	218	182	158	139	0.015	-0.991	0.136

Figure 5.5. Exemple de fichier de points à importer dans l'interface de segmentation semi-automatique

Une fois le nuage de points chargé, l'utilisateur est invité à saisir une tolérance de coplanarité des points avant de sélectionner les quatre points délimitant la surface plane en question. Par exemple, notons $M_1(x_1, y_1, z_1)$, $M_2(x_2, y_2, z_2)$, $M_3(x_3, y_3, z_3)$ et $M_4(x_4, y_4, z_4)$ les 4 points délimitant un plan d'intérêt. Un point $M_i(x_i, y_i, z_i)$ fait partie de la surface sélectionnée si il vérifie, en plus d'être coplanaire avec les 3 autres points, les relations suivantes :

$$\min_{j \in \{1,2,3,4\}}(x_j) \leq x_i \leq \max_{j \in \{1,2,3,4\}}(x_j) \quad (5.8a)$$

$$\min_{j \in \{1,2,3,4\}}(y_j) \leq y_i \leq \max_{j \in \{1,2,3,4\}}(y_j) \quad (5.8b)$$

$$\min_{j \in \{1,2,3,4\}}(z_j) \leq z_i \leq \max_{j \in \{1,2,3,4\}}(z_j) \quad (5.8c)$$

Les 4 points doivent être sélectionnés soigneusement, c'est pourquoi l'interface est dotée d'outils d'agrandissement (zoom), de rotation, de translation, couleurs...etc. Une fois les points d'initialisation choisis, l'utilisateur doit récupérer le fichier de paramètres et les points associés au plan extrait.

La Figure 5.6 montre un exemple de fichier de paramètres généré par l'outil de segmentation semi-automatique pour 3 plans. La première colonne indique l'identifiant de la primitive extraite (n° 1 pour « plan », n° 2 pour « sphère » et n° 3 pour « cylindre »). Les autres colonnes sont les différents paramètres décrivant la primitive géométrique. Par exemple, pour le plan, les colonnes 2 à 4 correspondent à sa normale et la colonne 5 à sa distance à l'origine du repère.

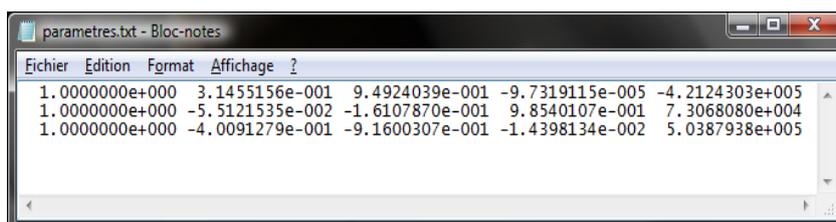


Figure 5.6. Fichier de paramètres de 3 plans extraits semi-automatiquement. A chaque ligne correspond un plan.

Le développement de l'outil de segmentation semi-automatique et son utilisation à travers une interface graphique a pour seul but de comparer les résultats ainsi produits à ceux issus de la segmentation automatique présentée dans le chapitre 3. Le paragraphe suivant explique le mode de fonctionnement de l'outil de segmentation semi-automatique de façades.

5.5.2.2 Approche de segmentation semi-automatique de façades

Comme dans la segmentation automatique, l'extraction des plans est également menée ici dans un mode séquentiel. Ainsi, à chaque plan détecté, les points qui lui sont associés sont retirés du nuage de points. Cela permet d'une part de sauvegarder chaque plan à part et d'autre part de réduire l'échantillon de points, donc de diminuer la difficulté du choix des points au fur et à mesure de l'avancement de l'opération. C'est pourquoi il est judicieux, dans cet outil aussi, de commencer par extraire les plans de grande de superficie et couvrant un nombre de points important. La Figure 5.7 montre les points restants, suite au retrait des points associés au premier plan extrait par l'algorithme de segmentation semi-automatique. Le premier plan extrait correspond en général à la façade principale du bâtiment.

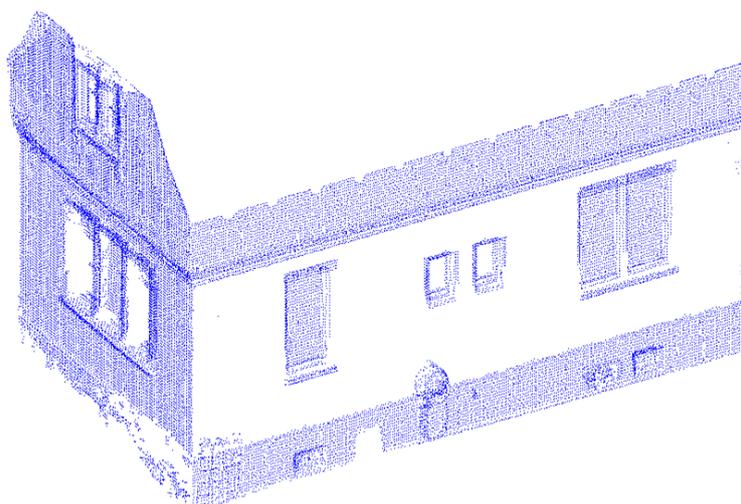


Figure 5.7. Les points restant après le retrait du premier plan du nuage de points.

En poursuivant cette opération, il est possible d'extraire tous les plans constituant le bâtiment ou la façade en question, l'un après l'autre, jusqu'à ce que la façade soit complètement segmentée.

La Figure 5.8 montre le résultat de la segmentation semi-automatique de la façade présentée ci-dessus. Pour adapter le résultat au niveau de détail souhaité (ce qui suppose de disposer d'une résolution spatiale adéquate), l'utilisateur a la possibilité de faire varier la valeur de tolérance associée à la zone tampon entourant chaque plan à extraire. Plus la valeur de tolérance est grande, moins les détails sont détectés et vice versa. Par exemple, dans la Figure 5.8, la segmentation de la façade n°1 fournit un ensemble de segments plans (ouvertures, appuis de fenêtres, châssis de fenêtres) avec un niveau de détail important puisqu'un seuil de 1.5 cm a été fixé. Tandis que la segmentation de la façade n°2 avec un seuil de 4 cm fait à peine ressortir les ouvertures (plan vert sombre). Donc plusieurs niveaux de segmentation sont envisageables avec cet outil.

Evidemment le niveau de difficulté à segmenter une façade est lié à la complexité architecturale de la façade et au nombre de détails à extraire. Par conséquent, le temps nécessaire à la segmentation semi-automatique dépend fortement de ces facteurs et du soin apporté par l'opérateur au choix des points d'initialisation.



Figure 5.8. Exemple de résultat fourni par une segmentation semi-automatique de façade (seuils fixés à 1.5 cm pour la façade 1 et à 4 cm pour la façade 2)

5.5.3 Evaluation des résultats de la segmentation

La littérature ne traite que rarement de l'évaluation de la qualité des résultats de segmentation de données laser. On ne parle de l'évaluation des algorithmes de segmentation que par rapport au temps nécessaire à une telle opération. Par exemple, (Stamos, 2001) ou (Deveau, 2006) ont procédé à une segmentation manuelle pour disposer d'un jeu de données de référence avec lesquelles sont comparés les résultats de segmentation automatique. Cette évaluation est basée sur le seul critère de temps nécessaire à la réalisation des deux segmentations. Certes, la mesure du temps de traitements donc du degré d'optimisation du programme est un facteur

intéressant, surtout dans le cas où les données de départ sont très volumineuses, mais elle ne donne aucun indice sur la qualité des segments obtenus.

L'évaluation de la qualité des résultats de la segmentation est une opération complexe car elle est à rapporter à plusieurs critères. De plus, la méthode d'évaluation n'est pas extrapolable à toutes les segmentations puisque celles-ci peuvent se dérouler de manières différentes (Caloz et Collet, 2001). Il est donc délicat de formuler une procédure unique applicable à une segmentation des données laser, quelle qu'elle soit. Dans tous les cas, une évaluation visuelle rigoureuse de l'analyste est indispensable. Il incombe aussi à l'analyste de juger si l'évaluation garantit bien la qualité des résultats finaux.

La solution proposée ici pour évaluer les segments extraits automatiquement par notre approche se scinde en une évaluation qualitative et une évaluation quantitative.

5.5.3.1 Evaluation qualitative des résultats de segmentation

L'évaluation qualitative est une évaluation visuelle. Une visualisation et analyse minutieuse des segments plans extraits permet déjà de valider en grande partie les résultats. Si ce jugement est favorable, il est ensuite possible de passer à l'évaluation quantitative, sinon il faudrait reprendre la segmentation automatique en changeant les paramètres de départ voire en reconsidérant le processus.

Pour illustrer les étapes de l'évaluation, une façade type a été segmentée. Il s'agit de la façade orientée sud-ouest de l'INSA de Strasbourg (voir Figure 5.9). Comme déjà évoqué, elle est composée d'éléments architecturaux de type mur plein (tout à fait à gauche), fenêtres, allèges (parties maçonnées sous les fenêtres), bandeaux (situés au niveau des nez de dalles), meneaux (poutres verticales entre fenêtres) et poteaux de structure.

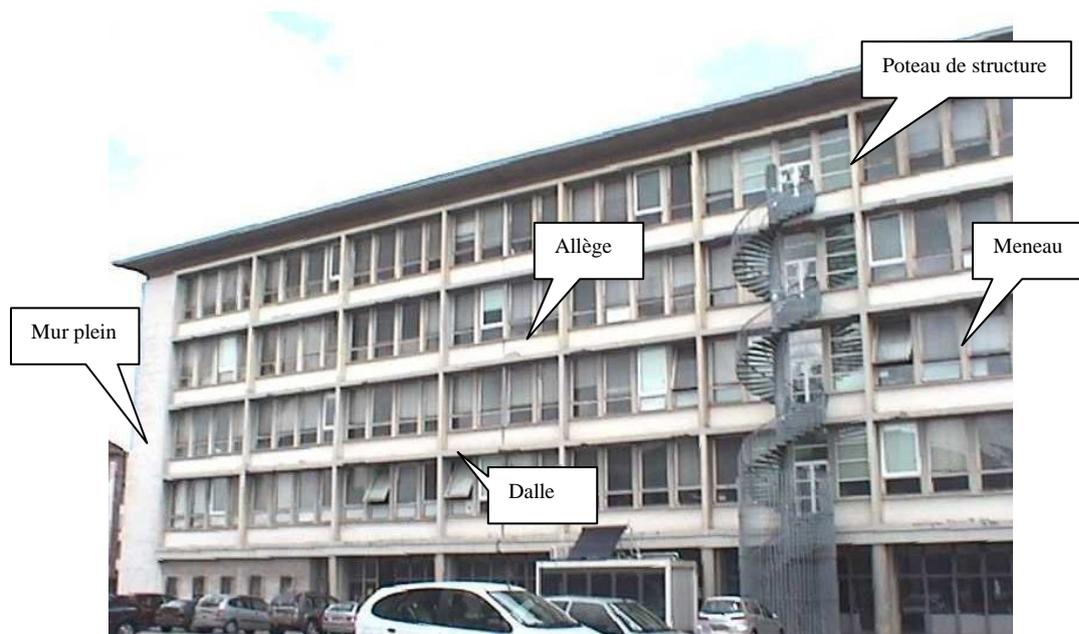


Figure 5.9. Façade orientée sud-ouest de l'INSA de Strasbourg

Cette façade présente l'avantage d'être composée de différents éléments architecturaux qui sont constitués de surfaces planes, ce qui coïncide parfaitement avec l'hypothèse de travail sur laquelle est basé l'algorithme de segmentation. Néanmoins, elle n'a pas été choisie pour contourner les difficultés, au contraire. Sous son apparence simple, cette façade est finalement assez complexe, car elle est composée de plans verticaux et horizontaux, de différentes tailles, parallèles et perpendiculaires à la façade principale. De plus, certains plans sont différents d'un point de vue sémantique mais situés dans le même plan mathématique, comme par exemple les bandeaux et les poteaux de structure, ce qui permet de mettre en évidence la façon dont l'algorithme contourne ces difficultés. De plus, aucune ouverture ne ressemble à sa voisine, car les unes sont opacifiées par des rideaux, certaines sont ouvertes, d'autres non. Enfin, la présence d'obstacles entre la façade et le scanner telles que les voitures ou l'escalier en acier devraient également permettre de mettre en évidence les capacités et limites de l'algorithme de segmentation.

La façade s'étend sur 68 m de longueur, 22 m en hauteur et 1.80 m en profondeur, en raison de la présence d'une corniche et d'éléments en saillie. Elle a ainsi dû être numérisée depuis plusieurs stations afin de disposer d'un nuage sur les deux faces des poutres verticales. Le nuage de points compte environ 200 000 points. La densité du nuage de points n'est pas uniforme. Elle est estimée en moyenne à 96 points/m², soit un point tous les 10 cm environ.

La Figure 5.10 illustre le résultat de la segmentation de cette façade, après sa projection dans le plan OXZ. Chaque couleur correspond à une surface plane.

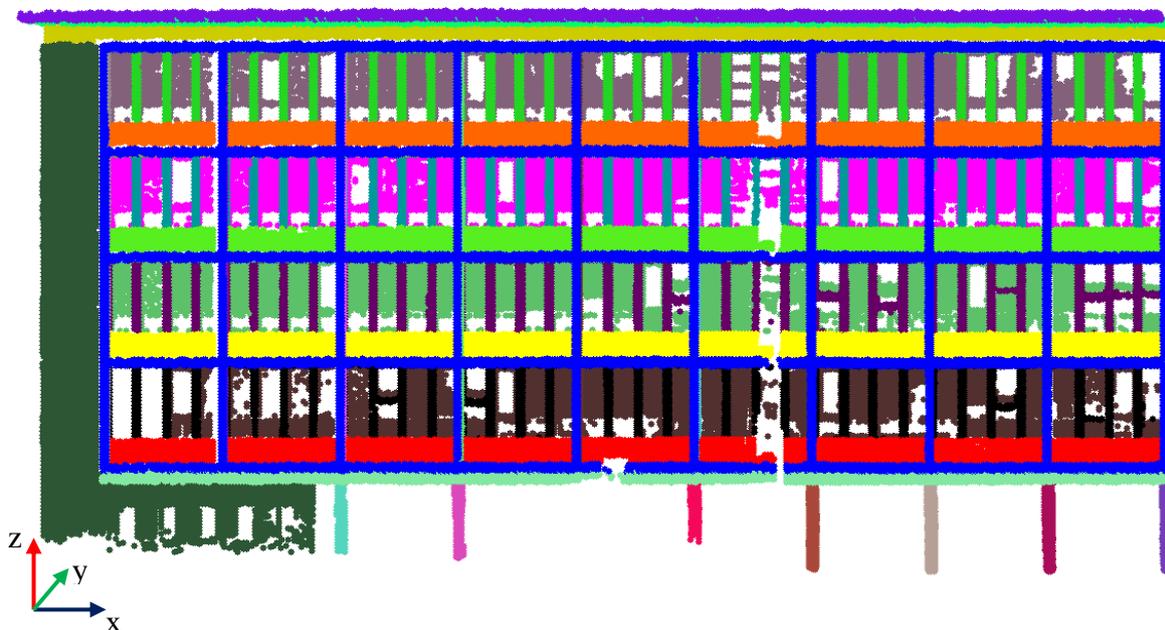


Figure 5.10. Résultats de la segmentation automatique de la façade présentée dans la Figure 5.9.

La Figure 5.10 prouve que, même visuellement, la segmentation est réussie puisque l'on arrive à reconnaître facilement les éléments architecturaux cités précédemment. Le plan formé

par les poteaux de structure et les bandeaux est affiché en bleu, le plan du mur plein est coloré en vert foncé, etc. La photographie de l'édifice peut aider à effectuer ce constat.

Suite à cette évaluation qualitative, il est indispensable de procéder à une analyse quantitative de façon à pouvoir quantifier la qualité des segments. Cette opération va se faire à travers le calcul d'indices de qualité.

5.5.3.2 Evaluation quantitative des résultats de la segmentation

L'évaluation quantitative des résultats de segmentation porte sur la géométrie des segments. En effet, dire qu'un plan est correctement détecté revient à dire que les paramètres qui le décrivent (sa normale et sa distance à l'origine du repère) sont similaires à ceux de son plan homologue considéré comme étant une référence. Le modèle de référence auquel le résultat de la segmentation automatique sera confronté est une segmentation de façade générée semi-automatiquement.

Les paramètres des plans sont calculés en respectant le principe des moindres carrés, à partir de tous les points qui lui sont affectés. Il serait donc judicieux de concevoir des critères de comparaison des points contenus dans deux segments plans homologues. Pour atteindre cet objectif, une méthode basée sur les opérations booléennes a été développée.

5.5.3.2.1 Evaluation de la détection des segments plans

A l'instar de la matrice de confusion, un tableau d'évaluation à double entrée a été construit. La première entrée (indiquée A) se réfère aux données générées de façon automatique par l'approche de segmentation, tandis que la seconde entrée se réfère aux données de référence (SR). Ainsi, la colonne intitulée $Card(A)$ fournit le nombre de points composant le segment plan n° i extrait automatiquement. La colonne intitulée $Card(SR)$ fournit quant à elle le nombre de points composant le segment plan n° i de référence. En ligne apparaissent les numéros des segments plans. Les autres colonnes sont occupées par les paramètres de comparaison explicités sous le Tableau 5.2. La Figure 5.11 illustre les opérations booléennes employées pour calculer les valeurs de ces paramètres.

N° du segment	$Card(A(i))$	$Card(SR(i))$	$I(i)$	$D^+(i)$	$D^-(i)$	$TDR(i)$	$TDA(i)$
1							
2							
i							
n							
Total							
Moyenne	-	-	-	-	-		

Tableau 5.2. Tableau construit pour évaluer la qualité géométrique des segments plans extraits par l'algorithme de segmentation automatique.

$A(i)$: segment plan extrait automatiquement
 $SR(i)$: segment plan de référence
 $Card(A)$: cardinal du segment, c'est-à-dire le nombre de points composant le segment
 $I(i) = A(i) \cap SR(i)$: points du segment i correctement extraits; il s'agit du nombre de points communs aux deux segments comparés
 $D^-(i) = SR(i) \setminus A(i)$: points affectés de manière erronée à un autre segment que $A(i)$
 $D^+(i) = A(i) \setminus SR(i)$: points devant appartenir à un autre segment que $A(i)$
 $TDA(i)$: taux de points correctement détectés dans $A(i)$
 $TDR(i)$: taux de points correctement détectés par rapport aux $SR(i)$

Les résultats de la segmentation semi-automatique sont présentés dans la Figure 5.11 et ceux de la segmentation automatique sont rappelés dans la Figure 5.12, pour faciliter la comparaison.

L'outil de segmentation semi-automatique laisse la possibilité de faire un tri entre les segments plans utiles et inutiles dans le relevé d'une façade (plans décrivant les stores par exemple). Ce choix s'effectue selon le critère de surface minimale d'un plan, qui doit correspondre à la taille du plus petit détail architectural jugé significatif par l'opérateur.

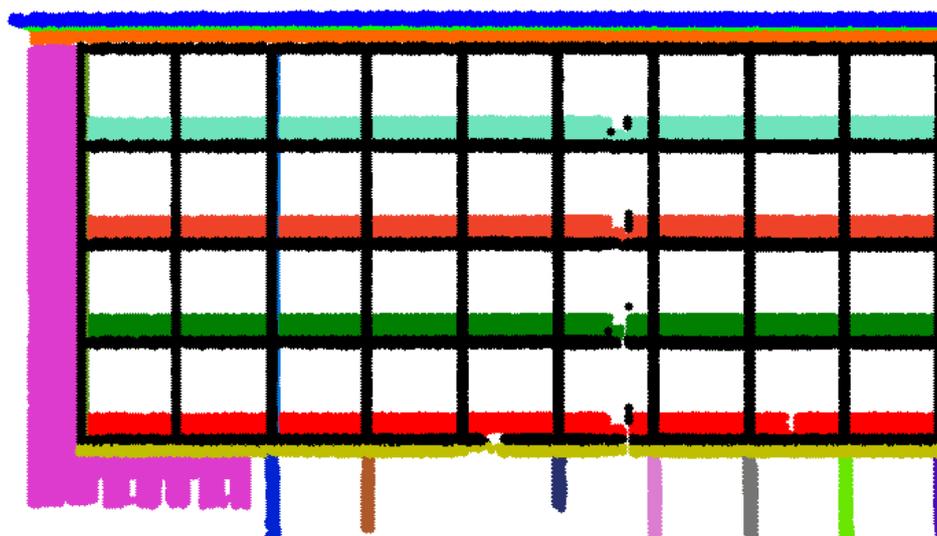


Figure 5.11. Segmentation semi-automatique de la façade orientée sud-ouest de l'INSA de Strasbourg (référence). Chaque couleur se rapporte à un segment plan.

Les résultats de l'évaluation quantitative sont reportés dans le Tableau 5.3. L'échantillon d'évaluation est composé de 10 plans extraits automatiquement, qui ont été confrontés à leurs homologues extraits semi-automatiquement. Les deux dernières colonnes du tableau sont les indicateurs de qualité de la segmentation. La qualité de la segmentation est évaluée pour chaque segment individuellement, puis pour tous globalement, à partir du pourcentage de points correctement détectés par rapport à la référence.

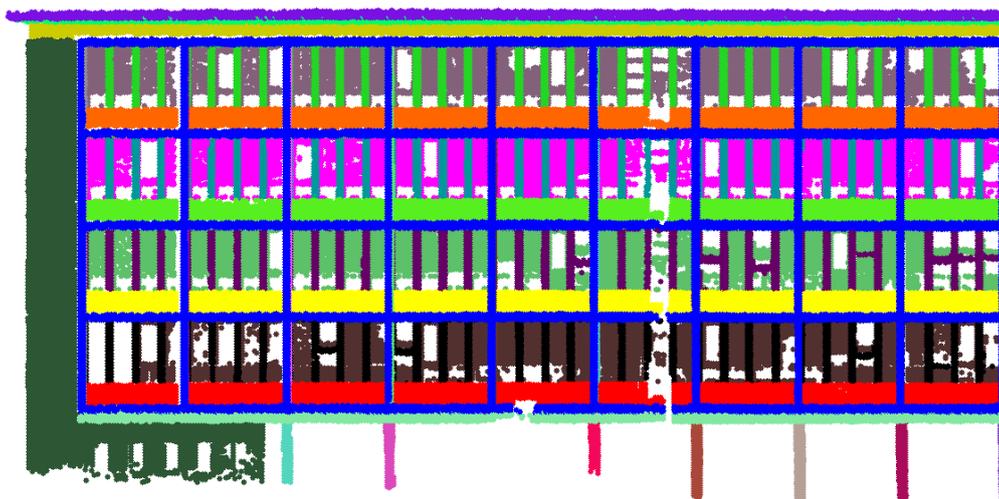


Figure 5.12. Segmentation automatique de la façade de l'INSA de Strasbourg. Chaque couleur se rapporte à un segment plan.

L'indice $TDA(i)$ met en évidence la qualité de détection des points d'un segment, c'est-à-dire le pourcentage de points correctement détectés par rapport au nombre total de points du segment complet auxquels ces points se rapportent. Il est défini, pour le segment i , par le rapport entre le nombre de points correctement extraits et le cardinal du segment i (voir équation 5.9). Il varie donc de 0 à 1. Si l'indice $TDA(i)$ est faible, cela signifie que le segment est constitué de points dont la majorité devrait appartenir à un autre segment, ou bien que le segment ne partage pas suffisamment de points avec son homologue de référence.

$$TDA(i) = \frac{I(i)}{\text{Card}(A(i))} \quad (5.9)$$

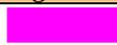
N° du segment	Couleur Fig. 5.11	Card(A(i))	Card(SR(i))	I(i)	D ⁺ (i)	D ⁻ (i)	TDR(i) en %	TDA(i) en %
1		5 422	5 436	5 229	193	207	0,96	0,96
2		9 203	8 720	8 717	486	3	0,99	0,95
3		8 922	8 286	7 841	1 081	445	0,95	0,89
4		158	178	153	5	25	0,86	0,97
5		3 912	3 533	3 533	379	0	1,00	0,91
6		286	280	280	6	0	1,00	0,99
7		19 923	18 996	18 926	997	70	0,99	0,95
8		4 615	4 299	4 283	332	16	0,99	0,94
9		7 949	7 553	7 436	513	117	0,98	0,94
10		414	388	381	33	7	0,98	0,93
Total	-	64 977	63 327	60 951	4 026	2 376	0,97	0,95
Moyenne	-	-	-	-	-	-	0,97	0,94

Tableau 5.3. Tableau d'évaluation pour un échantillon de 10 segments plans de la façade présentée dans la Figure 5.9.

L'indice $TDR(i)$ exprime la qualité de détection du segment par rapport à son homologue de référence, c'est-à-dire la part de points correctement détectés par l'algorithme par rapport à ceux attendus dans la référence. Il est défini, pour chaque segment i , par le rapport entre le nombre de points correctement extraits et le nombre de points composant le segment homologue de référence (voir équation 5.10). Il varie également de 0 à 1. Ainsi, une valeur proche de 1 signifie que le segment est extrait correctement.

$$TDR(i) = \frac{I(i)}{\text{card}(SR(i))} \quad (5.10)$$

Les colonnes D^+ et D^- donnent une idée des erreurs de commission et d'omission. En effet, $D^+(i)$ exprime le nombre de points extraits dans le segment (i) et qui appartiennent probablement à un autre segment (erreur de commission), tandis que $D^-(i)$ exprime le nombre de points manquant au segment (i) (erreur d'omission). L'erreur d'omission est préférable à l'erreur de commission, car il vaut mieux constater un point manquant dans un segment que de devoir lui attribuer un point qui ne lui appartient pas.

Une mesure globale de la qualité de la segmentation consiste à diviser le nombre de points extraits correctement par le nombre de points contenus dans l'ensemble des segments de référence. Dans cet exemple, ce taux s'élève à 0.97. Cela veut dire qu'en moyenne 97% des points ont été extraits avec succès. Un tel résultat est bien sûr très satisfaisant.

5.5.3.2.2 Evaluation géométrique des segments plans

Il reste à savoir quel est l'effet des points manquants (ou en surplus) sur la valeur des paramètres d'un plan, car c'est à partir de l'ensemble des points constituant un segment plan que les paramètres du plan moyen ont été calculés.

Pour se faire une idée de l'erreur générée par les points manquants (ou en surplus) sur les paramètres des plans, une étude a été réalisée avec des plans de référence. Il a été décidé de calculer la distance euclidienne moyenne D entre les points formant le plan calculé et le plan de référence.

Par ailleurs, l'angle formé par les normales aux plans calculés et les normales aux plans de référence a été calculé. Il est noté $(\Delta\theta)$ et a été calculé selon l'équation (5.11).

$$\Delta\theta = \arccos(\langle nr, na \rangle) \quad (5.11)$$

Avec $\langle nr, na \rangle$, le produit scalaire de la normale du plan de référence (nr) avec la normale du plan détecté automatiquement (na).

Le Tableau 5.4 présente les résultats issus du calcul de ces deux paramètres, sachant que l'échantillon utilisé est le même que celui ayant servi aux expérimentations précédentes (les 10 mêmes segments plans que ceux entrant dans le Tableau 5.3).

N° segment	$\Delta\theta$ (gon)	D (m)
1	0.0191	0.007
2	0.6175	0.014
3	0.2928	0.015
4	0.0004	0.007
5	0.0637	0.005
6	0.3183	0.006
7	0.0955	0.005
8	0.1910	0.008
9	0.9804	0.003
10	0.0573	0.007
Moyenne	0.2610	0.008
Ecart-type	0.3119	0.004

Tableau 5.4. Paramètres de comparaison des plans extraits automatiquement et des plans de référence ($\Delta\theta$: écarts angulaires entre normales des plans homologues $A(i)$ et $SR(i)$; D : distance moyenne entre les points du plan $A(i)$ et le plan moyen calculé à partir de $SR(i)$)

Le Tableau 5.4 montre que les écarts angulaires entre les normales des plans homologues s'élève en moyenne à 0.2610 ± 0.3120 gon et que les distances les séparant sont inférieures au centimètre ($8 \text{ mm} \pm 4 \text{ mm}$), ce qui est tout à fait satisfaisant vu la taille de la façade. Cela confirme une fois de plus que les résultats obtenus automatiquement sont aussi fiables que ceux obtenus de façon semi-automatique. Les petites différences sont liées entre autres aux seuils de tolérance fixés lors de l'établissement des segments plans. En effet, dans l'approche automatique, les segments sont tous extraits avec le même seuil de tolérance (de 3cm dans cet exemple). Tandis que dans l'approche semi-automatique développée pour l'évaluation, cette tolérance peut être définie pour chaque segment (elle varie entre 0.5 cm et 3 cm dans cet exemple).

5.5.4 Conclusion

Une nouvelle méthode permettant d'évaluer les résultats d'une segmentation automatique, tant d'un point de vue qualitatif que quantitatif, a été présentée. Afin de disposer de segmentations de référence, un outil de segmentation semi-automatique a été développé.

L'évaluation qualitative consiste à effectuer une analyse visuelle des segments. Si des erreurs grossières sont remarquées au niveau des segments, les plans correspondants doivent être rejetés. Le cas échéant, une nouvelle application de l'approche de segmentation, avec nouvelle définition des paramètres de segmentation, est à prévoir.

Une fois l'évaluation qualitative validée, une évaluation quantitative peut démarrer. Dans ce travail, il a été suggéré d'effectuer une analyse quantitative d'une part au niveau des points constituant les segments et d'autre part au niveau de la géométrie des segments plans.

L'évaluation des points constituant les segments vise à mettre en évidence au travers d'un tableau d'évaluation, les différences en termes de nombre de points composant les segments homologues. Pour ce faire, des opérations booléennes sur les ensembles ont été utilisées pour

générer deux indices de qualité. L'un décrit la qualité de détection des points d'un segment et l'autre la qualité de détection du segment par rapport à son homologue de référence. Les deux indices ont fourni des valeurs proches de 1, ce qui confirme que les segments extraits automatiquement coïncident avec les segments de référence.

Étant donné que la modélisation de la façade s'appuiera sur les paramètres des plans fournis par la segmentation, qui eux ont été définis à partir des points constituant les segments plans, une seconde évaluation à caractère géométrique a été jugé nécessaire. Celle-ci consiste à estimer les écarts géométriques entre les plans détectés automatiquement et leurs homologues de référence. Ces calculs d'écarts ont porté, d'une part, sur les angles entre normales aux plans et d'autre part sur la distance moyenne des points du plan extrait au plan moyen de référence. Les résultats obtenus sur un échantillon de 10 segments plans d'une façade, à première vue basique, ont été plus que satisfaisants.

A présent, il est nécessaire d'évaluer la qualité des résultats que l'approche de modélisation est en mesure de fournir.

5.6 Evaluation des résultats de la modélisation

5.6.1 Introduction

Comme cela a été fait pour la segmentation, les résultats issus de l'opération de modélisation développée dans cette thèse doivent être évalués. A nouveau, il faut disposer de résultats de référence. Afin d'étudier non seulement la précision mais aussi l'exactitude des modèles de façade obtenus, deux modèles de référence ont été créés.

Pour mesurer la précision du modèle de façade calculé, un modèle de référence a été élaboré manuellement, sur la base des mêmes données de départ (nuage de points laser). Pour mesurer l'exactitude des modèles de façade, un modèle de référence a été construit manuellement à partir d'observations effectuées au tachéomètre électronique. Dans ce cas, il est question de qualité absolue ou globale, car les écarts entre les deux modèles reflèteront un cumul de toutes les erreurs susceptibles d'apparaître aussi bien au niveau de l'acquisition des données, que du prétraitement, de la segmentation et de la modélisation.

Le chapitre 4 était consacré à la description des étapes de modélisation de façade menant à des modèles vectoriels. Pour mémoire, la première étape consistait à détecter des points décrivant le contour des éléments architecturaux. La seconde a consisté à ajuster les contours par des droites ou arcs, pour ensuite créer un modèle vectoriel. Les deux étapes seront donc évaluées.

5.6.2 Evaluation des contours

La qualité des contours extraits par l'algorithme se révèle d'une grande importance vue que la qualité finale des modèles vectoriels en dépend directement. Il faut rappeler que les contours

sont composés au départ d'un ensemble de points issus du nuage et situés au niveau des lignes de ruptures de pente dans le nuage (ouvertures, bas reliefs, éléments en saillie...).

Une comparaison qualitative donne d'ors et déjà une impression générale sur la qualité des contours extraits automatiquement (Figure 5.13b) et manuellement (Figure 5.13c).

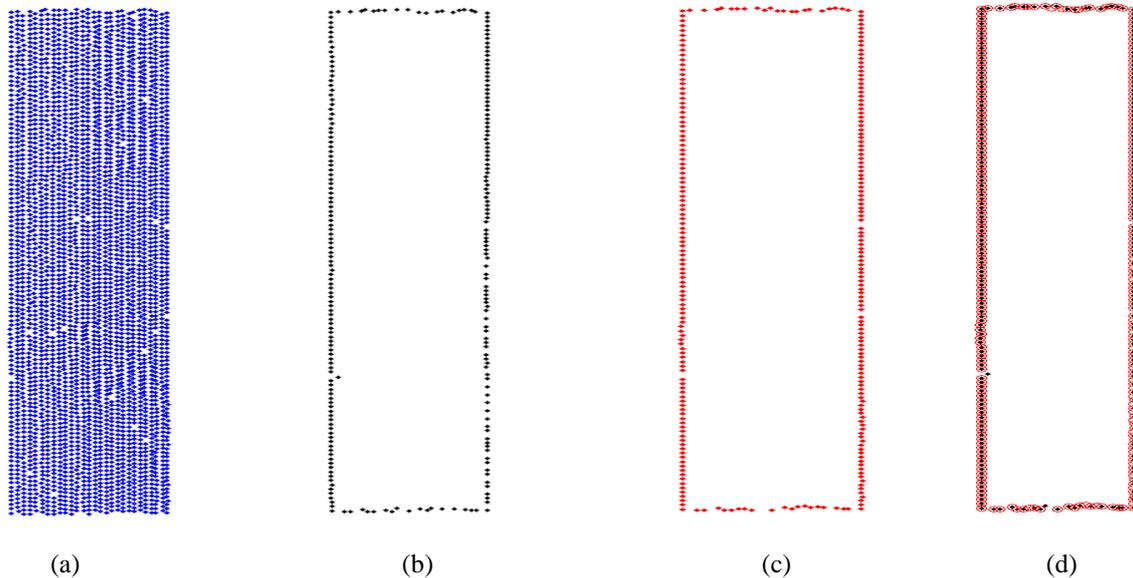


Figure 5.13. Extraction de points de contours automatiquement et manuellement ; a) segment plan fourni par la segmentation ; b) contour généré automatiquement par l'approche de modélisation ; c) contour extrait manuellement ; d) superposition de (b) et (c)

En superposant les contours extraits manuellement et automatiquement, on peut mettre en évidence les différences entre les deux (Figure 5.13d). L'extraction manuelle des points de contours est une tâche délicate, fastidieuse et surtout subjective. Leur évaluation quantitative suppose la mise en œuvre d'un algorithme de calcul d'écarts entre points en 3D, ce qui peut se révéler assez lourd. C'est pourquoi, nous nous sommes contentés d'évaluer les contours au niveau visuel seulement.

L'analyse minutieuse de ces résultats sur d'autres échantillons a révélé toutefois un inconvénient de l'algorithme développé dans cette thèse. En effet, on peut constater que certains points sont manquants au niveau des coins des ouvertures. Cela provient du fait que les points voisins de part et d'autre des coins forment des triangles avec côtés courts, ce qui les exclut de la classe des points de contour. Néanmoins, la géométrie des coins n'est pas faussée dans le modèle vectoriel final, puisque la phase de modélisation prévoit, après extraction des points de contour, un calcul d'intersections des droites composant l'ouverture. Par conséquent, le problème des points manquant dans les coins est contourné et n'affecte pas la qualité des résultats finaux.

5.6.3 Évaluation du modèle vectoriel

Des évaluations qualitatives et quantitatives ont été opérées sur plusieurs façades, à commencer par celle déjà utilisée comme exemple dans ce chapitre mais aussi des façades

plus complexes, comme celle du lycée des Pontonniers, ou des façades présentant des éléments en saillie, comme celle d'un immeuble d'habitation.

5.6.3.1 Evaluation qualitative

L'évaluation qualitative du modèle vectoriel consiste à constater visuellement la qualité de superposition du nuage de points brut et du modèle vectoriel généré sur la base de ce nuage (Figure 5.14). La visualisation et l'analyse de ces résultats montrent que la chaîne de traitements fournit un produit visiblement très satisfaisant.

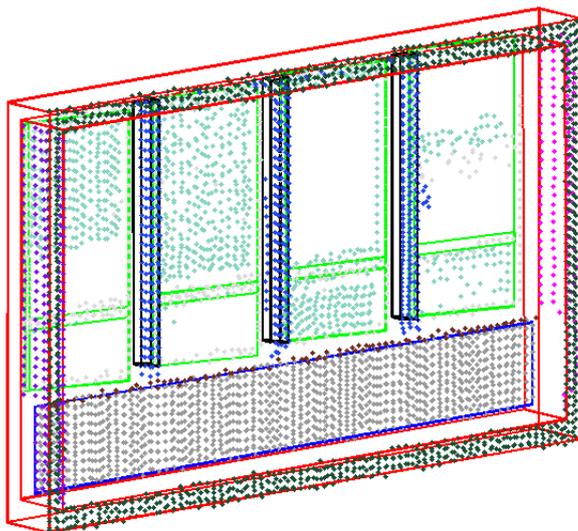


Figure 5.14. Superposition du nuage de points initial et du modèle vectoriel généré automatiquement

5.6.3.2 Evaluation quantitative

Afin de quantifier la qualité géométrique du modèle vectoriel, des indices de qualité proposés dans la littérature par plusieurs auteurs ont été employés (McGlone et Shuflet, 1994 ; Ragia, 2000 ; Henricsson et Baltsavias, 1997 ; Schuster et Weidner, 2003).

Ces indices de qualité sont calculés sur la base de deux modèles vectoriels. Le premier modèle vectoriel, considéré comme étant de référence, est obtenu soit manuellement en partant du même nuage de points (évaluation relative), soit de façon indépendante en partant d'un relevé de points au tachéomètre (évaluation globale). L'autre modèle vectoriel est obtenu automatiquement par le biais de la chaîne de traitements développée ici.

Les indices sont définis à l'aide d'opérations booléennes effectuées sur des ensembles constitués par les surfaces des polygones étudiés. Ces opérations d'analyse spatiale appliquées à des surfaces sont résumées dans la Figure 5.15.

Les indices de qualité ainsi que les équations permettant de les calculer sont expliqués dans le Tableau 5.5. On notera que les sigles *SR* et *SA* signifient respectivement « *Surface du modèle de Référence* » et « *Surface du modèle obtenu Automatiquement* ». Le symbole $|X|$ exprime la surface du polygone *X*.

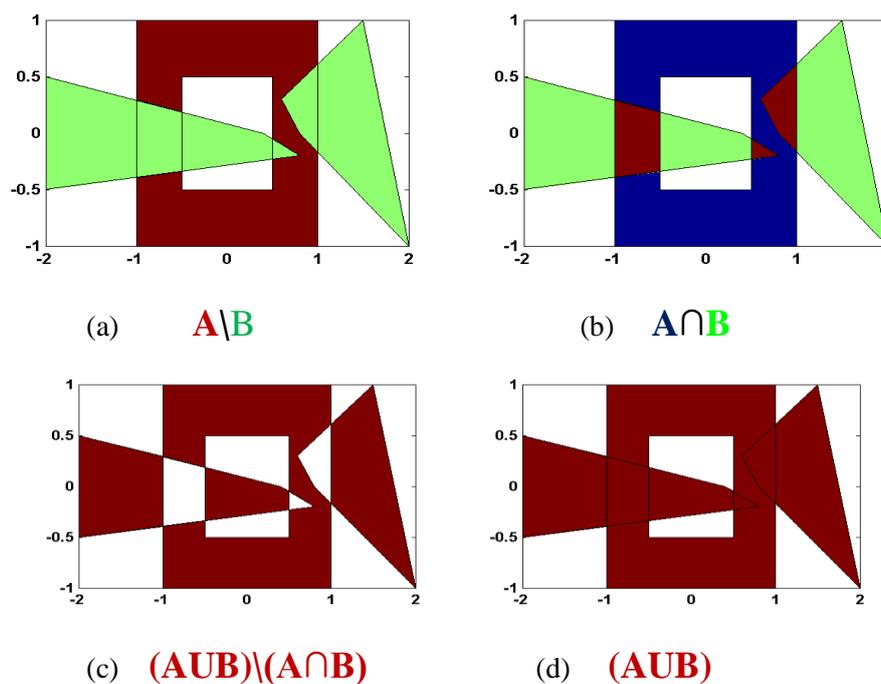


Figure 5.15. Schéma illustratif des opérations booléennes d'analyse spatiale entre deux ensembles de surfaces ; a) différence ; b) intersection c) rapport entre union et intersection ; d) union

Indice	Formule	Signification
Taux de détection	$\rho d = \frac{|SR \cap SA|}{|SR|}$	ρd exprime le rapport entre la surface d'intersection des deux modèles et la surface de référence. Sa valeur est située entre 0 et 1. Plus ρd est proche de 1, plus le modèle est proche du modèle de référence.
Indice de qualité	$\rho q = \frac{|SR \cap SA|}{|SR \cup SA|}$	ρq exprime le rapport entre les parties communes aux deux modèles et l'union des deux modèles. Sa valeur est située entre 0 et 1. Plus ρq est proche de 1, plus le modèle obtenu sera de bonne qualité.
Facteur d'excédent	$\rho b = \frac{|SR \setminus SA|}{|SR \cap SA|}$	ρb exprime le rapport entre la partie du modèle qui n'appartient pas au modèle de référence et l'intersection des deux modèles. Sa valeur peut être supérieure à 1, mais elle est toujours positive. Si ρb est proche de 0, le modèle obtenu est de bonne qualité.
Facteur de déficit	$\rho m = \frac{|SA \setminus SR|}{|SR \cap SA|}$	ρm exprime le rapport entre la partie du modèle de référence, qui n'appartient pas au modèle calculé, et l'intersection des deux modèles. Il peut avoir une valeur supérieure à 1 mais il est toujours supérieur à 0. Si ρm est proche de 0, le modèle obtenu est de bonne qualité.
Indice d'échec	$\rho f = \frac{|SA \setminus SR|}{|SR|}$	ρf exprime le rapport entre la partie du modèle de référence, qui n'appartient pas au modèle calculé, et la superficie du modèle de référence. ρf est compris entre 0 et 1. Si ρf est proche de 0, le modèle obtenu est de bonne qualité.

Tableau 5.5. Indices de qualité utilisés pour quantifier la qualité, par rapport à une référence, de polygones produits par l'approche de modélisation.

❖ Evaluation quantitative relative

L'évaluation quantitative relative d'un modèle vectoriel consiste à comparer les contours extraits automatiquement aux contours digitalisés manuellement. Ainsi, seule la qualité de l'algorithme de modélisation est testée, sans tenir compte de la qualité des données initiales. Pour disposer d'un jeu de données de référence, on a digitalisé à la main les contours des éléments architecturaux à partir des mêmes points de contours. Evidemment, si des points de contours manquaient au niveau des coins des ouvertures (problème évoqué précédemment), la digitalisation s'est limitée à relier les points existants. La Figure 5.16 montre la superposition d'un modèle extrait manuellement et d'un modèle généré automatiquement. Il s'agit d'une partie de la façade de du bâtiment de la sécurité sociale situé au Boulevard de la victoire à Strasbourg.

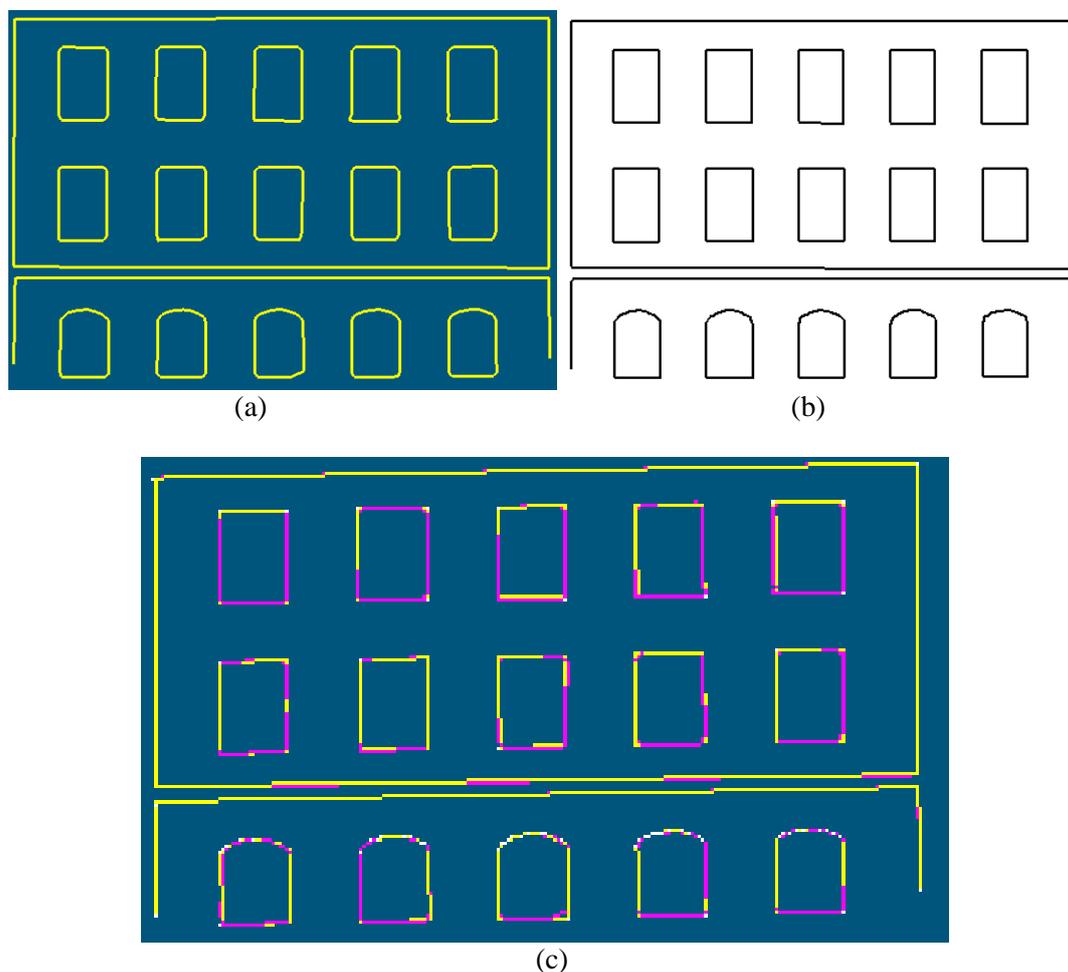


Figure 5.16. Comparaison entre contours extraits automatiquement et manuellement ; a) contours digitalisés ; b) contours extraits automatiquement ; c) superposition des deux modèles

D'un point de vue qualitatif, la Figure 5.16 montre que les contours issus des deux modèles se superposent très bien. Cela signifie que l'algorithme de modélisation est fiable. Néanmoins, comme prévu, de légers écarts sont constatables au niveau de certains coins de fenêtres.

Pour quantifier ces décalages et définir la qualité du résultat produit automatiquement, il s'agit de chiffrer les écarts entre les modèles obtenus automatiquement (Figure 5.16b) et leurs homologues de référence (5.17a). Les écarts linéaires observés entre contours sont inférieurs ou égaux à 2 cm, ce qui reste tout à fait tolérable.

Le taux de surface d'intersection a été évalué à partir d'un échantillon de 10 modèles vectoriels issus de la façade de la Figure 5.16. L'échantillon est composé de fenêtres carrées, de fenêtres avec arcs et des polygones extérieurs décrivant le contour des murs. Une synthèse des résultats obtenus pour le taux d'intersection est présentée dans le Tableau 5.6.

N° modèle	$A (m^2)$	$R (m^2)$	$A \cap R (m^2)$	ρd
1	2.54	2.56	2.53	0.99
2	2.52	2.53	2.51	0.99
3	2.54	2.55	2.53	0.99
4	2.58	2.56	2.55	0.98
5	2.56	2.53	2.50	0.97
6	2.47	2.49	2.47	0.99
7	2.47	2.49	2.47	0.99
8	2.24	2.25	2.21	0.98
9	33.46	33.38	32.29	0.96
10	96.37	95.99	95.80	0.99
Moyenne				0,98
Ecart-type				0,01

Tableau 5.6. Calcul des opérations ensemblistes entre les modèles de référence R digitalisés manuellement et les modèles obtenus automatiquement A (en m^2)

Où : A : surface couverte par le modèle vectoriel obtenu automatiquement
 R : surface couverte par le modèle vectoriel digitalisé manuellement
 $A \cap R$: surface commune aux deux modèles A et R

On s'est limité alors au calcul du taux de détection (ρd), car celui-ci était suffisamment élevé pour ne pas avoir à calculer les autres indices de qualité. Ce résultat est très satisfaisant et prouve que les algorithmes menant à la production de modèles vectoriels sont fiables et que leur qualité relative est élevée. Néanmoins, pour tenir compte également de la qualité des données dans le processus d'évaluation, il est indispensable d'avoir des références issues de données de référence indépendantes de celles ayant servi à l'élaboration des modèles. Cela nous amène à parler de la qualité absolue des modèles obtenus.

❖ Evaluation quantitative absolue

Dans cette évaluation, les modèles vectoriels de référence sont issus d'observations faites par tachéométrie électronique, car on suppose que cette technique permet d'accéder à une meilleure précision de relevé ponctuel que le scanner laser. Le relevé d'un élément plan

rectangulaire par tachéométrie se limite en général au relevé des points caractéristiques le décrivant, c'est-à-dire au relevé de ses 4 coins. En comparant ces coins à ceux détectés par traitement automatique des données laser, l'effet de toutes les erreurs intervenant depuis l'acquisition jusqu'à la modélisation de la façade peut être mis en évidence. Donc l'exactitude des modèles produits peut être estimée.

Des points de référence ont été acquis sur la façade de l'INSA et sur un immeuble d'habitation (logements de fonction de l'INSA) à l'aide d'une station totale Trimble 5600 DR intégrant un distancemètre infrarouge de précision ne nécessitant pas de réflecteur (3 mm+2 ppm sur les distances et 0.3 mgon sur les angles). La fiche technique de la station totale Trimble 5600 DR est présentée dans l'Annexe (E.2). La Figure 5.17 montre les points relevés avec la station totale, superposés au nuage de points de l'INSA acquis avec le scanner laser Trimble GX.

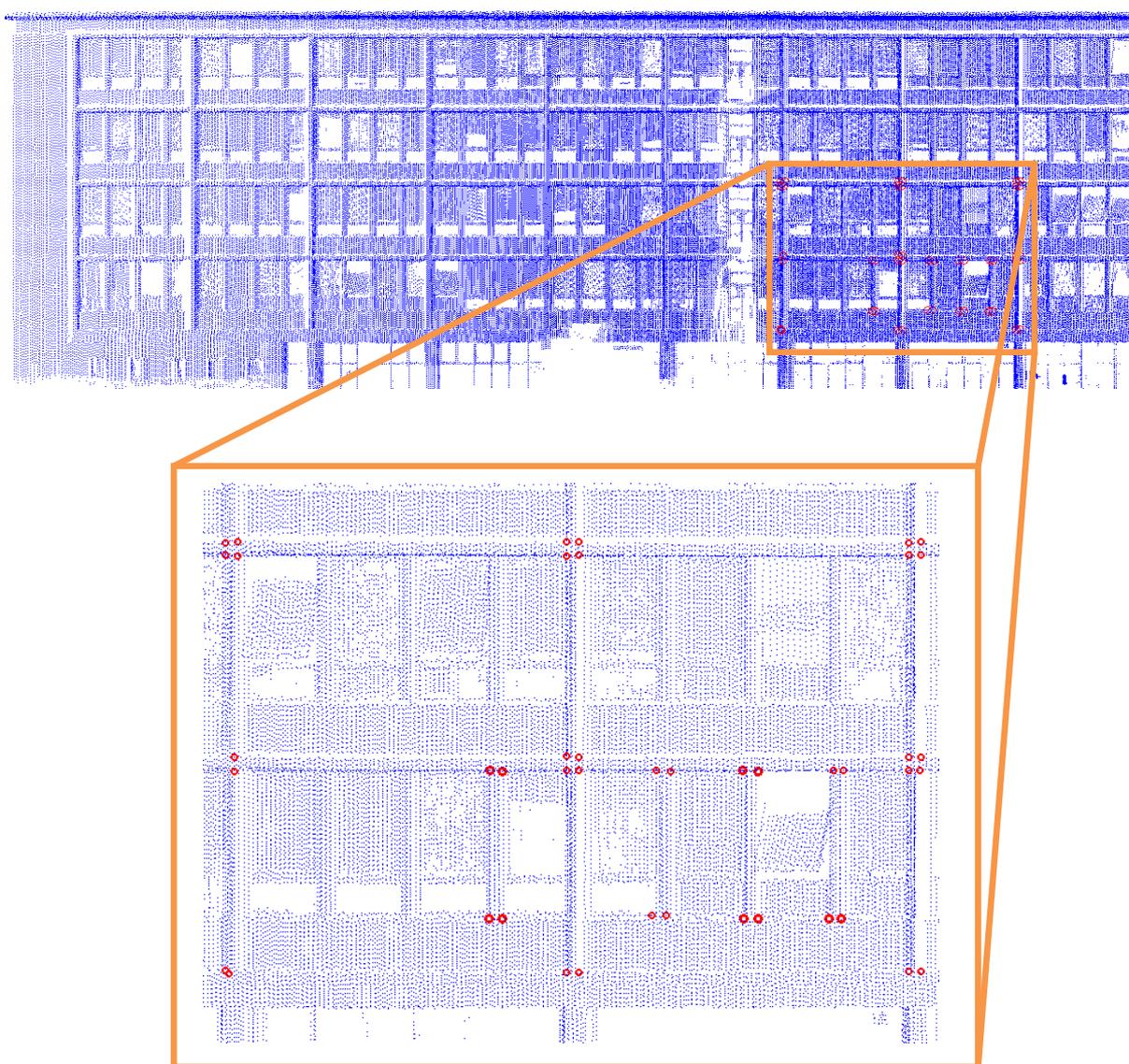


Figure 5.17. Superposition des points acquis avec une station totale Trimble 5600 DR (points rouges) au nuage de points acquis avec le scanner Trimble GX (points bleus)

A nouveau, les indices de qualité ρ_d , ρ_q , ρ_b , ρ_m , ρ_f peuvent être calculés, ce qui suppose de passer par l'analyse spatiale des surfaces des contours calculés et de les comparer aux contours de référence. Un échantillon de 10 polygones issus de la façade de l'INSA de Strasbourg et du logement de fonction a été employé. La Figure 5.18 présente les polygones superposés.

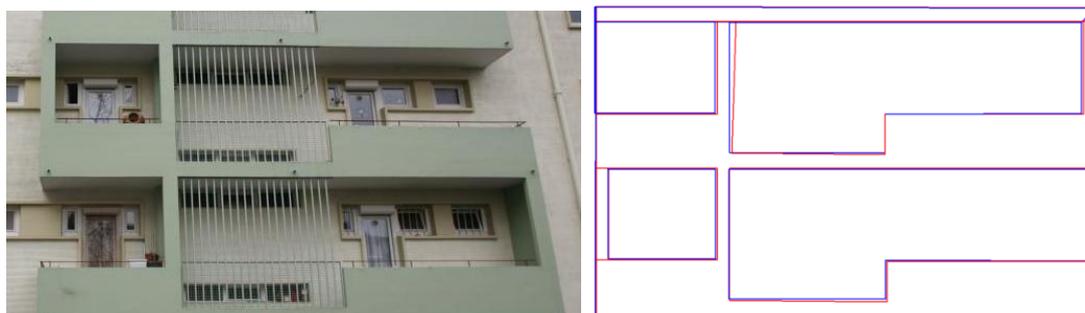


Figure 5.18. Superposition de polygones modélisés et de référence, sur la façade du logement de fonction de l'INSA. En bleu les contours de référence ; en rouge les contours modélisés

Le Tableau 5.7 présente les résultats issus de la comparaison entre ces modèles vectoriels. Il suppose au préalable le calcul des opérations ensemblistes entre les modèles de référence R obtenus par relevés tachéométriques et les modèles obtenus automatiquement A (en m^2).

N° polygone	A (m^2)	R (m^2)	$A \cap R$ (m^2)	$A \cup R$ (m^2)	A/R (m^2)	R/A (m^2)	ρ_d	ρ_q	ρ_b	ρ_m	ρ_f
1	27,07	26,80	26,60	27,23	0,43	0,126	0,99	0,97	0,00	0,01	0,02
2	27,03	26,8	26,52	27,24	0,4	0,15	0,98	0,97	0,01	0,01	0,01
3	27,15	27,10	26,69	27,21	0,46	0,02	0,98	0,98	0,00	0,02	0,02
4	27,03	27,17	26,91	27,41	0,12	0,27	0,99	0,98	0,01	0,00	0,00
5	0,65	0,73	0,60	0,80	0,06	0,24	0,82	0,75	0,40	0,10	0,08
6	2,97	2,98	2,83	3,11	0,14	0,14	0,94	0,91	0,05	0,05	0,04
7	4,80	4,49	4,34	4,66	0,17	0,06	0,96	0,93	0,013	0,04	0,04
8	4,54	4,20	3,91	4,53	0,57	0,00	0,93	0,86	0,00	0,14	0,13
9	62,72	63,28	62,47	63,38	0,25	0,80	0,98	0,98	0,01	0,00	0,00
10	4,07	4,02	3,92	4,09	0,13	0,02	0,97	0,95	0,01	0,03	0,03
Moyenne							0,95	0,93	0,05	0,04	0,03
Ecart- type							0,05	0,07	0,12	0,05	0,04

Tableau 5.7. Indices de qualité obtenus sur un échantillon de 10 polygones issus de la façade de l'INSA de Strasbourg et du logement de fonction

Où : A : surface couverte par le modèle vectoriel obtenu automatiquement
 R : surface couverte par le modèle vectoriel digitalisé manuellement
 $A \cap R$: surface commune aux deux modèles A et R
 $A \cup R$: union des deux surfaces A et R
 A/R : surface des parties de A qui sont en dehors de la surface de R
 R/A : surface des parties de R qui sont en dehors de la surface de A
 ρ_d , ρ_q , ρ_b , ρ_m , ρ_f : cinq indices de qualité expliqués dans le Tableau 5.5

Ces résultats montrent que les modèles générés automatiquement se superposent bien à leurs homologues, les modèles de référence. En effet, ρd et ρq sont proches de 1 et les trois autres paramètres (ρb , ρm , ρf) sont proches de 0. Ces résultats prouvent que la qualité des modèles issus de l'approche de modélisation est très satisfaisante. On constate que les erreurs de modélisation sont plus importantes pour les détails couvrant de petites surfaces que pour les grandes surfaces. Par exemple, sur la façade de l'INSA de Strasbourg, les plus grands écarts entre les segments modélisés et les segments de référence ont été constatés au niveau des meneaux (échantillon n°5 du Tableau 5.7). En effet, la surface commune aux deux modèles ne dépasse pas 80% ($\rho d=0.82$).

Globalement, si l'on compare les Tableaux 5.6 et 5.7 relatifs à l'évaluation quantitative relative et absolue, on constate que l'évaluation quantitative relative fournit de meilleurs résultats que l'évaluation quantitative absolue. Ce phénomène était prévisible, car dans le cas de l'évaluation absolue, la qualité des données ainsi que celle des résultats de la segmentation influencent le résultat de la modélisation.

Le Tableau 5.7 a donné une indication sur la qualité de la détection en termes de surface des polygones modélisés automatiquement, par comparaison à ceux de référence. Cependant, il est souhaitable aussi de quantifier la précision des sommets des polygones produits. Pour ce faire, un échantillon de 10 couples de points « homologues » a été considéré pour calculer les écarts entre les sommets des polygones obtenus automatiquement et les sommets relevés par station totale. Le Tableau 5.8 recueille les écarts en coordonnées ainsi qu'en distance entre ces points. Les écarts en distance sont considérés comme critère d'appréciation du résultat.

	DX(m)	DY(m)	DZ(m)	D(m)
1	0.035	-0.007	-0.012	0.037
2	0.035	-0.003	0.021	0.041
3	-0.005	0.004	0.002	0.007
4	-0.003	0.019	0.024	0.031
5	-0.001	0.005	0.016	0.017
6	0.072	-0.012	0.018	0.076
7	-0.063	0.015	0.022	0.068
8	-0.008	0.018	0.016	0.025
9	-0.060	0.011	0.004	0.061
10	-0.025	-0.016	-0.027	0.040
Moyenne				0.040
Ecart-type				0.022

Tableau 5.8 . Ecart entre coordonnées des sommets des polygones extraits automatiquement et ceux de référence

Il en ressort que l'écart moyen en distance s'élève à 4 cm avec un écart-type de 2 cm, ce qui est relativement satisfaisant, vu les difficultés liées au levé tachéométrique (erreur de pointé), à l'état de la façade (coins dégradés par l'érosion, chanfreins) et bien sûr aux erreurs à rapporter à la modélisation (calcul de points d'intersection sur la base d'un nuage de points, utilisation de seuils, etc.).

Suite à ces constats, on peut tenter d'expliquer les écarts observés entre modèles vectoriels 3D calculés et modèles de référence:

- a) La résolution spatiale du nuage de points n'était pas assez petite (la densité pas assez grande) pour couvrir suffisamment de surface de l'objet d'intérêt;
- b) Pour les éléments de façade occupant une petite surface, un écart surfacique même petit entre contour modélisé et contour levé peut influencer les valeurs des indices de qualité ;
- c) Des écarts peuvent provenir d'erreurs de segmentation, en raison de l'ordre chronologique dans lequel les segments plans ont été détectés. Comme l'approche de segmentation extrait en priorité les plans couverts par un grand nombre de points, ces derniers plans sont susceptibles de s'emparer des points des petits plans ;
- d) La précision de mesure d'un point avec le scanner n'est pas la même que celle de la station totale ;
- e) La qualité des données laser terrestres, décrite par la résolution spatiale associée au balayage et la précision de positionnement des points n'est pas assez bonne;
- f) Le seuil ds de tolérance (zone tampon) associé aux segments plans lors de leur extraction est trop important ;
- g) La présence d'obstacles et la géométrie d'acquisition empêchent le faisceau laser d'atteindre certaines parties de la façade, notamment lorsque celle-ci comporte des éléments en saillie (balcons, meneaux, bandeaux,...).

Les trois derniers facteurs d'influence affectant la qualité du modèle vectoriel méritent quelques explications supplémentaires.

Effet de la résolution spatiale sur la qualité du model vectoriel : La résolution choisie pour le balayage a une influence sur l'exactitude des modèles vectoriels des plans modélisés, puisque les segments plans sont délimités par les points de frontière. Or ces points de frontière ne sont pas positionnés exactement sur l'arête des éléments de façade. Ils ne peuvent que s'en approcher davantage si on augmente la densité de points, donc si l'on réduit la résolution spatiale. Dans le cas d'une résolution faible, il y a de fortes chances que la bordure réelle de l'objet (représentée par un cadre rouge dans la Figure 5.19) soit éloignée des points de contours obtenus par segmentation (points bleus).

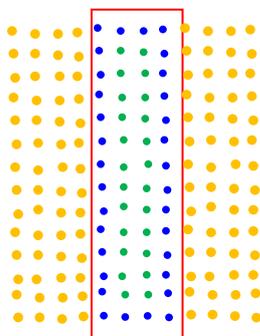


Figure 5.19. Résolution spatiale par rapport à la détection contour. Bordure réelle de l'élément (en rouge), points du segment plan couvrant l'élément (bleus et verts), points de contours du segment (bleus), points situés dans un autre plan (oranges)

Pour réduire l'effet de cette erreur, il est nécessaire de fixer une résolution spatiale adaptée au niveau de détail souhaité et donc également à la précision de positionnement des contours exigée.

Effet de la valeur seuil ds décrivant l'épaisseur des segments plans : Comme expliqué au chapitre 3 consacré à la segmentation, on considère qu'un point appartient à un segment plan si sa distance par rapport au plan théorique est inférieure à une valeur seuil donnée (tolérance ds). Cette valeur procure une certaine épaisseur au segment plan considéré. Dans l'étape de modélisation, les points de contours sont ensuite extraits, après avoir projeté tous les points dans le plan moyen (voir chapitre 4). Cette projection peut créer des décalages entre contours détectés et contours réels, directement dépendants du seuil de tolérance ds fixé. Plus l'épaisseur du segment plan sera grande, plus l'écart entre le contour détecté et celui de référence risque d'être important. Cet écart sera de l'ordre de grandeur du seuil fixé. C'est pourquoi, le seuil définissant l'épaisseur des segments plans doit être choisi minutieusement, comme évoqué dans le chapitre 3.

Effet d'éléments de façade saillants : En analogie avec les ombres RADAR, on pourrait employer le terme d'ombres LIDAR pour décrire l'effet de masques sur le nuage de points. En effet, des ombres sont générées dans le nuage de points, lorsque des objets en relief par rapport au plan de la façade cachent des zones que le faisceau laser ne peut pas atteindre.

Dans le plan horizontal, le problème des masques peut partiellement être contourné par la multiplication des stations autour de l'objet. En pratique, suivant le recul disponible et l'exiguïté des locaux, la combinaison des nuages n'est pas toujours suffisante, en particulier pour des parties rentrantes.

Des masques plus difficiles à éviter se situent dans le plan vertical, lorsqu'il s'agit de scanner des objets situés en hauteur et qui sont partiellement cachés, aux yeux du scanner, par des éléments saillants. La zone couverte par l'ombre dépend de l'angle d'incidence des rayons laser, qui dépend, à son tour, de la distance séparant le scanner de la façade et de la hauteur à laquelle se situe la plage concernée. La multiplication du nombre de stations dans le plan horizontal n'améliore pas la détection de ces zones. Il faudrait disposer d'une nacelle pour scanner les objets depuis différentes altitudes. La Figure 5.20 illustre l'effet lié à la présence d'éléments en saillie sur la façade, éléments qui peuvent être verticaux ou horizontaux.

Ces masques génèrent des erreurs sur les résultats de la modélisation. En effet, la segmentation et l'extraction de points de contours s'appuient exclusivement sur le nuage de points. Si celui-ci présente des zones vides de points, les contours de ces zones seront extraits également.

La Figure 5.21 montre un exemple des surfaces non numérisées à cause de la présence de masques. Cela se répercute alors sur les résultats de la segmentation (Figure 5.21b) et bien entendu sur l'extraction de contours (Figure 5.21c).

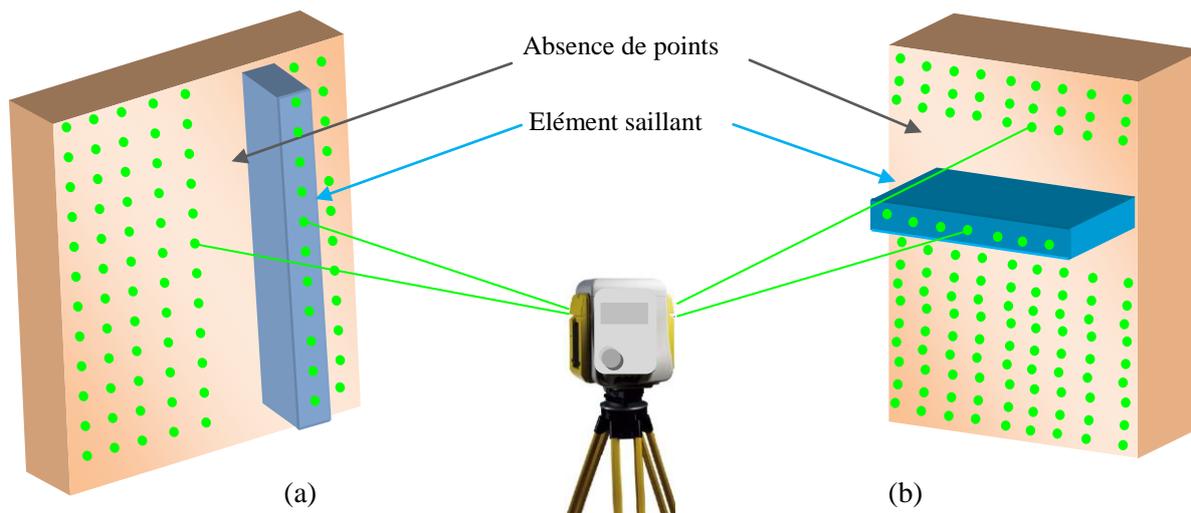


Figure 5.20. Schéma illustratif de « l'effet de masque » ; (a) surface non balayée à cause d'un élément vertical en saillie; (b) surface non balayée à cause d'un élément horizontal en saillie.

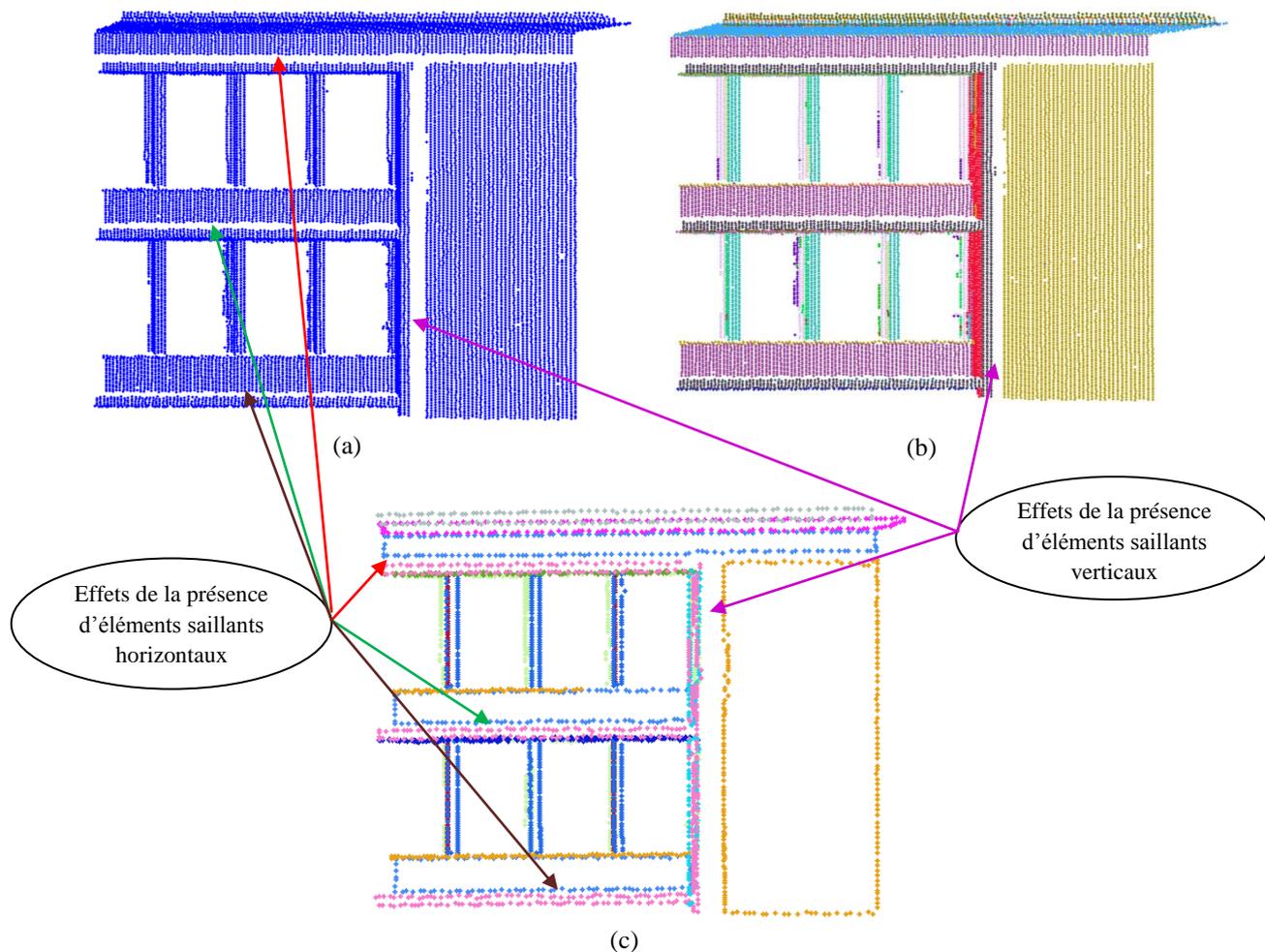


Figure 5.21. Exemple de transmission d'erreurs en raison de masques, sur l'extraction de points de contours ; (a) nuage de points brut ; (b) nuage de points segmenté ; (c) points de contours des segments plans

Ces erreurs se traduisent dans le modèle vectoriel 3D de la façade par la présence de polygones disjoints, alors qu'il est souhaitable d'obtenir un modèle dont les composantes sont bien liées les unes aux autres comme les éléments de la façade. Pour palier ce problème, l'étude des relations topologiques entre les différents polygones s'avère indispensable.

5.6.3.3 Relations spatiales et topologiques entre composants du modèle vectoriel 3D

Il est bien entendu que la manipulation des objets spatiaux nécessite de disposer, d'abord, de leur géométrie. Dans le chapitre 4, une géométrie cartésienne a été adoptée pour la définition des polygones correspondant à des éléments architecturaux d'une façade. Cette géométrie a été définie à l'aide de l'ensemble des coordonnées de chaque point ou sommet qui constitue le polygone. Le modèle ainsi obtenu est géométrique et répond d'ores et déjà au cahier des charges fixé au début de cette thèse. La Figure 5.22 montre le modèle vectoriel 3D de l'INSA de Strasbourg ayant servi comme exemple d'illustration tout au long de ce chapitre.

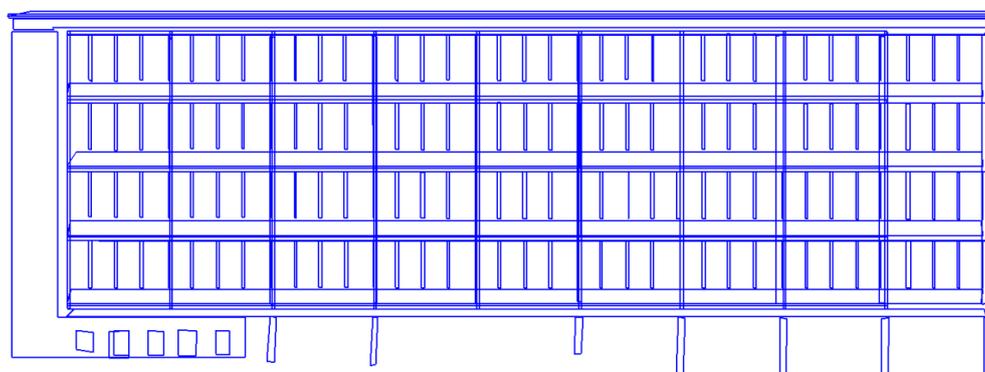


Figure 5.22. Modèle vectoriel de la façade de l'INSA de Strasbourg généré par la modélisation des segments plans de la Figure 5.12.

Du point de vue géométrique, ce modèle présente des caractéristiques similaires à celles des modèles vectoriels 3D de façades obtenus par digitalisation manuelle à partir de nuages de points ou encore obtenus par restitution photogrammétrique, puisque ceux-ci sont également composés de polygones ou de polygones disjoints. Cependant, si l'on souhaite l'affiner, il est judicieux d'étudier les relations spatiales et topologiques que les polygones entretiennent entre eux.

Dans le modèle vectoriel 3D de la Figure 5.22, on constate des disjonctions entre ses composants qui s'expliquent entre autres par la présence d'éléments saillants d'une profondeur importante (parfois 1.80 m). Par exemple les polygones des dalles (plans horizontaux) et ceux des allèges (plans verticaux, en retrait par rapport aux dalles) ne se coupent pas correctement. La raison est qu'il n'y a pas de données dans la zone qui les relie, car les dalles sont en saillie par rapport au plan des allèges et génèrent donc une zone d'ombre sur les allèges. La Figure 5.23 présente en agrandissant du modèle à cet endroit.

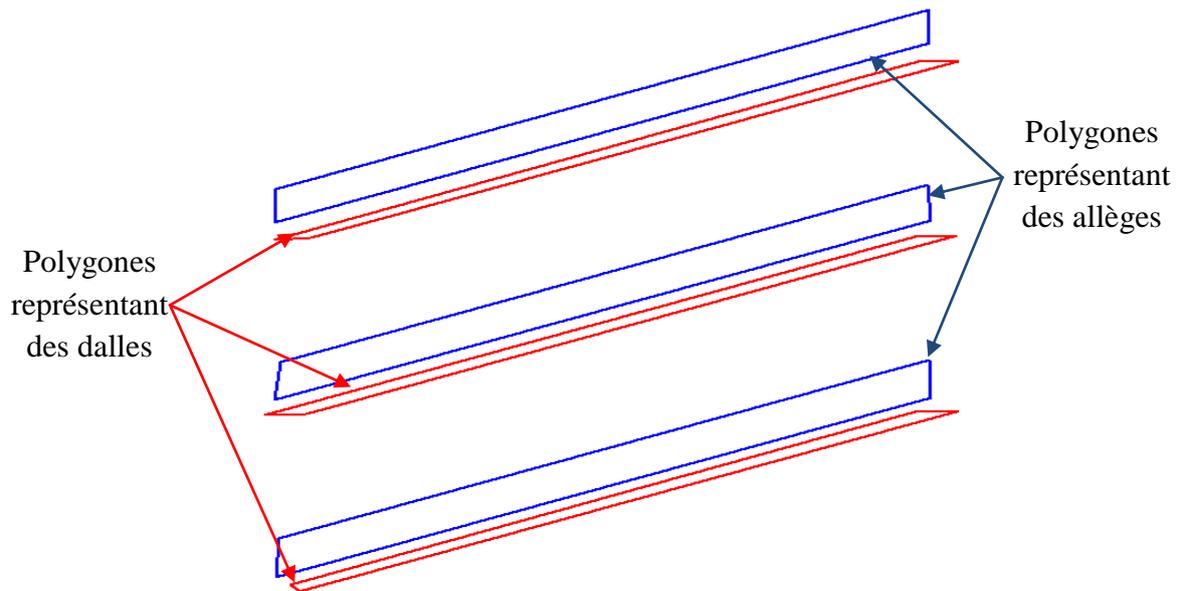


Figure 5.23. Exemple de polygones voisins disjoints en raison de l'absence de points dans le nuage

Dans de tels cas, il est indispensable de définir les relations spatiales entre les objets. (Pullar et Egenhofer, 1988) ont proposé une classification des relations spatiales, en distinguant cinq types de relations :

- les relations sur les directions (par exemple : nord ou nord-est) ;
- les relations topologiques, qui décrivent les voisinages et incidences (par exemple : « disjonction » ou « adjacence ») ;
- les relations de comparaison ou ordinales, qui décrivent l'inclusion ou la préférence (par exemple : « dans » ou « à ») ;
- les relations de distance (par exemple : « loin » ou « proche ») ;
- les relations floues (par exemple : « près de » ou « à côté de »).

Afin de gérer ces relations spatiales, (Egenhofer et Herring, 1990) proposent un modèle de relations topologiques dit « matrice des 4 intersections » qui se base sur des notions ensemblistes. Les modèles des 4 intersections a été défini comme l'intersection des « intérieurs » et des « frontières » respectifs de deux objets étudiés. Ils considèrent qu'un objet spatial S peut être caractérisé par son intérieur, c'est-à-dire l'intérieur du polygone (symbolisé par « S° »), sa frontière ou limite (notée « ∂S »), et le reste de l'espace, c'est-à-dire l'extérieur (noté « S^- »). Ce modèle a ensuite été enrichi et est devenu le modèle appelé « matrice des 9 intersections » pour permettre la prise en compte d'un plus grand nombre de cas de figures, tels que ceux rencontrés en présence de polygones à trous ou à îlots. D'autres modèles ont également été proposés depuis, tels que le modèle RCC (*region connection calculus*) de (Cui *et al.*, 1993). Le paragraphe suivant expliquera l'utilisation de matrice à travers un exemple illustratif.

Soient par exemple, deux objets géométriques A et B. Si l'intersection de la frontière de A et de la frontière de B ($\partial A \cap \partial B$) est non vide, cela signifie que les objets A et B sont adjacents

par leur frontière ou ont une intersection commune. La Figure 5.24 présente un exemple de « matrice des 9-intersections » définissant les relations topologiques entre deux objets spatiaux géométriques A et B (ellipses bleue et orange). Ces relations sont de type point, ligne ou surface, notées respectivement 0, 1, 2 dans la matrice.

$$\begin{pmatrix} \partial A \cap \partial B & \partial A \cap B^\circ & \partial A \cap B^- \\ A^\circ \cap \partial B & A^\circ \cap B^\circ & A^\circ \cap B^- \\ A^- \cap \partial B & A^- \cap B^\circ & A^- \cap B^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 2 \end{pmatrix}$$


Figure 5.24. Exemple de « matrice des 9 intersections » pour deux objets spatiaux géométriques A et B de type polygone (0 : point, 1 : ligne, 2 : surface) (Servigne et Libourel, 2006).

Dans notre cas, la « matrice des 9 intersections » serait à calculer seulement entre plans disjoints. Par conséquent, les intersections seront soit des droites soit des ensembles vides. A ce stade de développement, l'intégration des relations topologiques entre plans détectés n'a pas encore été intégrée à l'approche de modélisation.

L'automatisation de la définition des relations topologiques des éléments vectoriels modélisés sur les façades serait envisageable, à condition d'intégrer de l'information sémantique relative à l'architecture des façades. Cette information sémantique aidera à décrire les relations de voisinage entre les différents éléments architecturaux composant la façade et à créer ensuite les liens nécessaires à sa reconstruction la plus plausible.

Cette piste d'amélioration n'a de sens que si les éléments géométriques existent dans le modèle vectoriel. Or, comme cela a déjà été évoqué plusieurs fois, il arrive de ne pas disposer de points à certains endroits de la façade en raison, cette fois ci, d'obstacles qui n'appartiennent pas à la façade mais qui sont situés devant elle. Il s'agit le plus souvent d'arbres et de véhicules. Pour contourner ce problème, une solution appelée « modélisation par motif » est proposée.

5.6.3.4 Modélisation par motif

Pour combler le manque de données lié à la présence d'obstacles (de type arbre, véhicules, éléments de voirie) placés entre le scanner et la façade, une modélisation par motif est proposée.

La Figure 5.25 montre l'exemple de la façade du Lycée des Pontonniers à Strasbourg, sur laquelle des ombres dans le nuage proviennent de la présence d'arbres. Des stations supplémentaires n'ont pas permis de réduire ces surfaces vides de points. La modélisation automatique de cette façade pourrait conduire à des résultats erronés par rapport à la réalité. Pour palier ce problème, une solution baptisée « modélisation par motif » est proposée. Cette solution est basée sur le principe que la majorité des éléments architecturaux d'une même façade sont de même taille, de même forme et ont tendance à se répéter. Il semble en effet judicieux de modéliser les éléments qui sont correctement numérisés et de les reproduire là où les données sont de qualité inférieure.

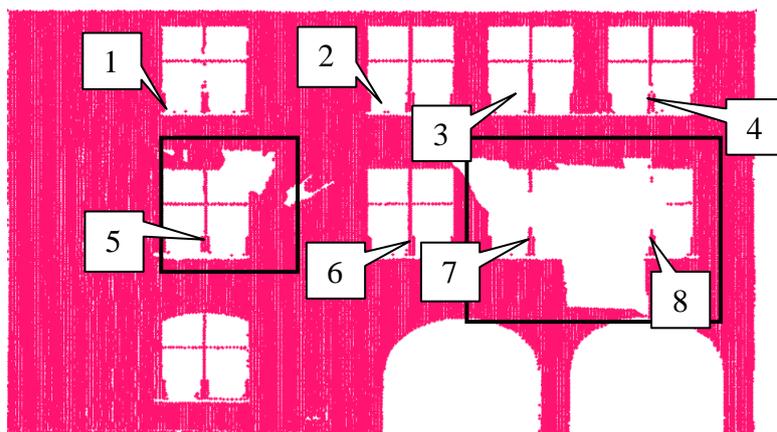


Figure 5.25. Exemple d'ombres dans le nuage (encadrées en noir) créées par la présence d'obstacles situés entre la station et la façade du bâtiment

Par exemple, sur la Figure 5.25, on remarque clairement que les fenêtres des premier et deuxième étages sont semblables. Par contre, elles ne sont pas complètes dans les données qui les décrivent. Les fenêtres n° 1, 2, 3, 4 et 6 sont bien numérisées, tandis que les fenêtres n° 5, 7 et 8 sont très mal saisies. La reproduction de motifs s'opère une fois que l'étape de modélisation automatique a généré les contours des éléments sous forme vectorielle. Ensuite, l'élément le mieux modélisé, en l'occurrence la fenêtre n°3, est reproduit par des applications affines dans le plan : translation et rotation. Le choix du meilleur modèle est fait de manière visuelle et les paramètres de transformation sont déterminés de manière semi-automatique. La Figure 5.26 présente le résultat de cette modélisation par motifs.

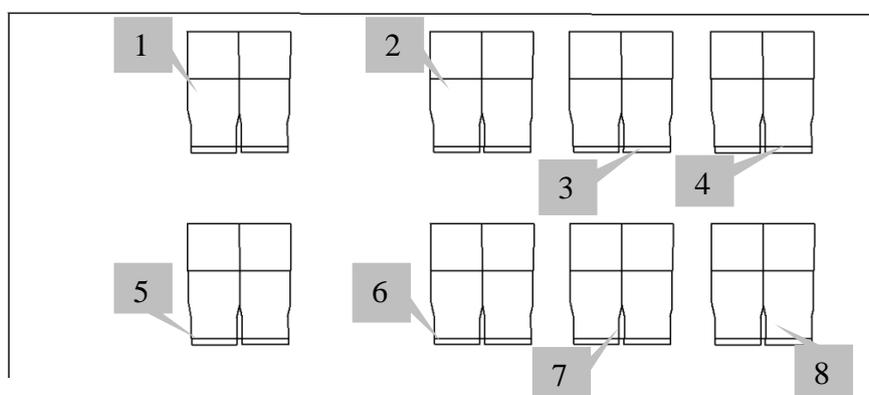


Figure 5.26. Fenêtres du 1^{er} et 2^{ème} étages modélisées suivant le même motif

L'avantage de cette étape de modélisation par motif est de combler les erreurs provenant des données et de produire des modèles de qualité homogène sur toute la façade.

5.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté l'évaluation des résultats de l'ensemble de la chaîne de traitements, en commençant par la qualité des données, en poursuivant par la qualité de la segmentation et en finissant par la qualité de la modélisation de la façade.

L'évaluation de la qualité des données acquises par le scanner laser Trimble GX dépend non seulement des précisions de mesures de distances et d'angles fournies par le constructeur, mais aussi de l'influence des matériaux composant la surface de l'objet à numériser. On retiendra tout de même une précision de positionnement effective des points du nuage de l'ordre de 12 mm à 100 m à défaut de disposer d'une précision effective des angles.

Le principe de l'évaluation des approches de segmentation et de modélisation consiste à comparer les résultats obtenus automatiquement à des résultats que l'on considère comme étant de référence, pour mettre en évidence des écarts susceptibles d'aider à l'amélioration du processus. L'établissement de ces références a nécessité le développement d'un outil de segmentation semi-automatique ainsi que l'élaboration de critères de qualité basés sur des opérations booléennes.

Les résultats produits par l'algorithme de segmentation et plus particulièrement l'étape d'extraction de contours sont très satisfaisants. Son avantage majeur est d'extraire simultanément les points des contours intérieurs et extérieurs. Néanmoins, le processus d'évaluation a permis de constater que cet algorithme omet parfois quelques points (coins de fenêtres ou d'ouvertures), extrait des points situés seulement à proximité de l'arête (dépend de la résolution spatiale choisie) ou encore extrait des points qui n'existent pas dans les modèles de référence (contours liés à des masques). Le manque de points provient de l'idée employée pour détecter les points de contours, car il arrive souvent que les points situés dans les coins d'ouvertures appartiennent à des arêtes courtes. Heureusement ces coins sont redéterminés par les calculs d'intersections auxquels procède l'étape de construction du modèle vectoriel. Finalement, les indices de qualité ont montré que la segmentation fournissait des points de contours fiables.

La modélisation vectorielle des contours a ensuite été confrontée à des modèles générés manuellement et via des relevés topographiques plus précis. L'évaluation s'est appuyée sur le calcul des cinq indices de qualité déjà employés précédemment. Les valeurs de ces indices ont montré que les résultats fournis par l'approche de modélisation géométrique sont également très satisfaisants.

Pour contourner les problèmes liés à la présence d'éléments saillants sur la façade, la prise en compte des relations spatiales et topologiques entre segments plans est nécessaire. Elle n'a pas encore été intégrée à la chaîne de traitements, car elle nécessite la définition sémantique des composantes de la façade. Or l'objectif que représente la classification des éléments de façade n'est pas encore atteint à ce stade de la thèse.

Pour contourner les problèmes liés à la présence d'obstacles situés entre le scanner et la façade, une solution de modélisation par motifs a été évoquée et mérite d'être poursuivie pour automatiser un maximum sa mise en œuvre.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion

Les travaux de cette thèse avaient pour objectif de proposer une segmentation et une modélisation géométriques des façades de bâtiments à partir de relevés laser terrestres. Pour atteindre cet objectif, une nouvelle approche globale de segmentation et de modélisation a été développée. Elle a pour particularité de s'appuyer exclusivement sur des données acquises par un scanner laser terrestre.

La chaîne d'opérations débute par un prétraitement dont la finalité est de réduire le bruit de mesure et par conséquent de disposer de données cohérentes et fiables. Ainsi, un processus de suppression des points faux et indésirables dans le nuage a été mis en place, permettant de ne conserver que les points d'intérêt. Basée sur ces données laser prétraitées et partant de l'hypothèse que la majorité des façades est composée essentiellement de surfaces planes, une segmentation automatique du nuage de points en un ensemble de segments a été mise en œuvre. Cette approche géométrique est basée sur la détection de segments plans, au regard de la coplanarité des points qui les composent et de la connectivité des surfaces formées par ces plans. En effet, les points composant un segment doivent non seulement appartenir au même plan, mais ils doivent aussi représenter une entité architecturale à part entière. Cette opération de segmentation s'appuie initialement sur la combinaison de deux algorithmes que sont l'algorithme RANSAC et un algorithme de croissance de région.

La première étape du processus de segmentation consiste à extraire des plans à l'aide de l'algorithme RANSAC. Détecter des plans dans un nuage de points par RANSAC, dans sa version classique, revient à chercher le meilleur plan du point de vue statistique, c'est-à-dire celui contenant un maximum de points du nuage initial. Bien que l'approche proposée exploite la puissance de RANSAC en tant qu'estimateur robuste de paramètres, elle en fait de plus un outil de segmentation géométrique très efficace. En effet, cet algorithme a été adapté et étendu à l'extraction de plans principaux de la façade. Ainsi, il a été intégré à un processus d'extraction séquentielle de segments plans selon leur orientation. De cette manière, tous les plans principaux présents dans le nuage de points considéré et susceptibles de constituer la façade étudiée sont générés.

La seconde étape du processus de segmentation consiste à analyser la propriété de connectivité des segments plans, c'est-à-dire à vérifier que les segments plans non reliés les uns aux autres représentent effectivement des entités architecturales différentes. En effet, malgré les améliorations et les adaptations apportées à RANSAC, les plans extraits ne coïncident pas toujours avec les composantes architecturales d'une façade, qui sont généralement des entités à part entière. C'est pourquoi un algorithme de croissance de région a été intégré au processus de segmentation. Celui-ci permet de segmenter les images produites à partir des segments plans, en régions isolées. Ainsi le détail architectural recherché

correspond à la région dont la surface est maximale et dépasse un seuil minimal. Les points correspondant aux autres régions sont réinjectés dans le nuage de points restant, afin qu'ils participent à l'extraction des segments plans calculés ultérieurement. Le processus s'achève par le calcul des paramètres les plus probables des plans, en respectant le principe des moindres carrés.

La deuxième étape de la chaîne de traitements visant à fournir des modèles 3D de façades est la modélisation géométrique des contours des segments plans. Pour pouvoir démarrer ce processus de modélisation, il est nécessaire au préalable de caractériser les éléments principaux de la façade. Ainsi, l'algorithme développé commence par extraire automatiquement les points constituant les contours des plans. L'idée innovante accompagnant ce processus consiste à s'appuyer sur la méthode bien connue de la triangulation de Delaunay. En effet, les points de contours sont en général les extrémités des plus longues arêtes constituant les triangles de Delaunay. Par ce biais, l'algorithme réussit à détecter aussi bien les contours extérieurs des plans (arêtes de la façade, bord de toit) que les contours intérieurs (ouvertures, chambranles, fenêtres ou portes). A ce stade, les contours ne sont, en réalité, que des points constituant les lignes caractéristiques esquissant l'allure générale de la façade et des éléments la composant. Ces lignes caractéristiques sont ensuite décomposées en éléments géométriques simples que sont les tronçons droits et les arcs. Cette classification en tronçons droits ou arcs s'appuie sur le simple critère de colinéarité des points. Ensuite, la construction de l'ensemble des éléments issus de la décomposition nécessite le calcul préalable des points d'intersection entre les différents tronçons. Parmi tous les points d'intersection, ceux représentant des nœuds permettent de déterminer les contours vectoriels des éléments de la façade. Le passage de la 2D à la 3D s'opère ensuite soit par le regroupement des modèles vectoriels 2D de tous les segments plans dans un système à 3 dimensions, soit par extrusion du plan principal de la façade.

Un processus d'évaluation a été mis en œuvre pour juger de la qualité des résultats obtenus par le biais de cette chaîne de traitements. Il commence tout d'abord par l'évaluation des données laser terrestres avant l'évaluation des résultats de la segmentation et des résultats de la modélisation. Pour toute opération d'évaluation, un jeu de données de référence est indispensable.

Afin de disposer d'une segmentation de référence, une segmentation semi-automatique a été développée. Des indices de qualité basés sur des opérations ensemblistes ont été appliqués et ont permis de quantifier la précision des résultats de la segmentation. La qualité des segments plans a ainsi pu être évaluée et s'avère tout à fait acceptable.

En ce qui concerne l'évaluation de la modélisation, les modèles de référence sont issus de levés effectués à l'aide d'une station totale. Les éléments vectoriels issus de la modélisation développée ont été comparés à ceux de la modélisation de référence, grâce à l'utilisation d'une série d'indices de qualité. En réalité, cette dernière évaluation met en évidence l'exactitude du modèle final, car elle analyse à la fois la qualité des données, la qualité de la segmentation et la qualité de la modélisation.

Les résultats de cette évaluation sont globalement satisfaisants et confirment la fiabilité des approches de segmentation et de modélisation proposées. La qualité des résultats fournis par l'approche de segmentation et de modélisation géométriques dépend bien entendu de plusieurs facteurs, à savoir de la qualité des données, de l'homogénéité du nuage de points couvrant la façade, de sa densité, des seuils utilisés dans les processus de segmentation et de modélisation et enfin de la complexité architecturale de la façade.

Pour contourner les problèmes liés à la présence d'éléments saillants ou d'obstacles perturbant l'acquisition d'un nuage de points homogène et complet sur la façade, des solutions ont été proposées. Comme les éléments en saillie faussent la géométrie des composants de la façade, la prise en compte des relations spatiales et topologiques entre segments plans doit être envisagée. Pour contourner les problèmes liés à la présence d'obstacles situés entre le scanner et la façade, une solution de modélisation par motifs a été évoquée et mérite d'être automatisée davantage.

Un avantage de l'approche développée ici est qu'elle convient à la majorité des façades, dans la mesure où elles sont souvent composées d'éléments plans. Cependant, pour modéliser des façades très complexes, comme par exemple les façades d'églises ou de châteaux contenant beaucoup d'ornements architecturaux ou des parties endommagées, il paraît nécessaire d'intégrer à la chaîne de traitements, des connaissances architecturales a priori et fort probablement des primitives géométriques supplémentaires.

Perspectives

Ce travail trouve d'ores et déjà une application pratique dans le cadre d'une collaboration récente avec l'équipe MAP-CRAI de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy. Le projet a pour but de construire et de modifier facilement les éléments de la façade à partir d'un catalogue d'objets architecturaux, dont les paramètres de mise à l'échelle sont fournis par l'approche développée dans cette thèse. L'avantage majeur de cette méthode de modélisation réside dans sa capacité à compléter des modèles de façades de bâtiments de manière interactive. Ainsi, les modèles de façades des plus simples aux plus complexes sont décrits par des éléments de structure disponibles dans une bibliothèque d'objets architecturaux. Cette nouvelle approche permet entre autres d'intégrer des objets parfaitement modélisés, de type « tels que conçus », et donc d'augmenter la précision des modèles tant au niveau architectural que géométrique. Cette méthode de modélisation paramétrique constitue une véritable étape complémentaire à l'approche de modélisation non paramétrique proposée dans cette thèse.

Dans une deuxième étape, et pour une représentation plus fidèle des éléments architecturaux composant une façade, un ajout de texture aux éléments modélisés est envisagé. Cette opération pourra être réalisée à l'aide de photographies acquises soit par le scanner, soit indépendamment du scanner.

Il est également envisagé d'étendre l'approche développée dans cette thèse au traitement de scènes urbaines plus larges, balayées par des systèmes de cartographie mobile. Ainsi, combinée à des informations spatiales et terrestres, elle permettra d'envisager la production de modèles tridimensionnels de façades de façon automatique, sur des rues entières.

Bibliographie

Références bibliographiques

Alshawa, M., Boulaassal, H., Landes, T., Grussenmeyer., 2009. Acquisition and automatic extraction of façade element on large sites from a low cost laser mobile mapping system. 3rd International Workshop 3D-ARCH; 3D virtual reconstruction and visualization of complex architectures. 25-28, February, Trento, Italy. 6 pages.

Amann, M-Ch., Bosch, T., Lescure, M., Myllylä, R. Riox, M., 2001. Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement. *Optical Engineering*, vol. 40 n°1, pp. 10 – 19.

Arun, K. S., Huang, T. S., Blostein, S. D., 1987. Least square fitting of two 3-d point sets. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 9 n°: 698 – 700.

Axelsson, P., 1999. Processing of Laser Scanner Data -Algorithms and Applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, vol. 54, pp. 138-147.

Baltsavias, E. P., 1999a. A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 54, pp. 83 – 94.

Baltsavias, E. P., 1999b. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 54, pp. 199 – 214.

Bauer, J., Karner, K., Schindler, K., Klaus, A., Zach, C., 2005. Segmentation of building from dense 3D point-clouds. *Proceedings of the ISPRS. Workshop Laser scanning 2005, Enschede, the Netherlands.*

Begrache, R., 2003. Profil - du nuage de points au modèle 3D, contribution de l'élaboration d'un outil d'aide à la modélisation, cas d'un entablement composite. DEA, Modélisation et Simultation des espaces Bâtis. MAP-CRAI (NANCY).

Belton, D., Lichti, DD., 2006. Classification and segmentation of terrestrial laser scanner point clouds using local variance information. *IAPRS Volume XXXVI, Part 5, Dresden, 25-27 September .*

Besl, P.J., Jain, R.C., 1988. Segmentation through variable-order surface fitting. *PAMI*, vol. 10 n°. 1, Mars 1988, pp. 167–192.

Besl, P.J., McKay, N.D., 1992. A method for registration of 3D shapes. *IEEE PAMI*, vol. 14 n°2, pp. 239-256.

Blais, F., 2003. A Review of 20 Years of Range Sensor Development. In *Videometrics VII*, S. F.El-Khakim, A. Gruen, J. S. Walton, Eds. *Proceedings of SPIE-IS&T Electronic Imaging*, SPIE, vol. 5013, pp. 62 – 71.

Boehler, W., Marbs, A., 2005. Investigating Laser Scanner Accuracy. URL: <http://scanning.fh-mainz.de/scannertest/results300305.pdf>.

Böhm, J., Becker, S., Haala, N., 2007. Model refinement by integrated processing of laser scanning and photogrammetry. ISPRS, Proceedings of the 2nd ISPRS International Workshop 3D-ARCH 2007: "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures". 6 pages.

Briese, C., Pfeifer, N., 2008. Line based reconstruction from terrestrial laser scanning data; Journal of Applied Geodesy vol.2, issue 2; ISSN 1862-9016, pp. 85 - 95.

Caloz, R., Collet, C., 2001. Précis de télédétection, vol. 3, traitements numériques d'images de télédétection, Presses de l'université du Québec, Agence universitaire de la Francophonie, ISBN 2-7605-1145-6(v-3). 386 pages.

Chen, C., Stamos, I., 2007. Range Image Segmentation for Modeling and Object Detection in Urban Scenes, The 6th International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, Published by Oxford University Press.

Chen, C., Hung, Y., Cheng, J., 1999. RANSAC-based DARCES: A New Approach to Fast Automatic Registration of Partially Overlapping Range Images (1999), IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol 21 n 11 (1999) p1229-1234.

Chen, Y., Medioni, G., 1992. Object modelling by registration of multiple range images. Image and Vision Computing. vol. 10, issue 3, pp. 2724-2729.

Chum, O., Matas, J., 2002. Randomized RANSAC with Td,d test. In 13th British Machine Vision Conference, September 2002. 10 pages.

Cohen-Steiner, D., Alliez, P., Desbrun, M., 2004. Variational shape approximation. In Proc. SIGGRAPH, Los Angeles, CA, pp. 905-914.

Conseil international de la langue française, 1997. Terminologie de télédétection et photogrammétrie. Manuel terminologique didactique de télédétection et photogrammétrie Français-anglais. Publié avec le concours de la délégation générale de la langue française. ISBN : 2-85319-270-9. 400 pages.

Cui, Z., Cohen, A.G., Randell, D.A., 1993. Qualitative and topological relationships in spatial databases. Proceeding of the 3rd symposium on large Spatial Databases, Lecture Notes in computer Science 692, 23-25, pp. 296-315.

Deveau, M., 2006. Utilisation conjointe de données image et laser pour la segmentation et la modélisation 3D. Thèse présentée pour l'obtention du titre de Docteur de l'Université René Descartes – Paris 5, Spécialité : Informatique. Soutenue le 28 septembre 2006.

Duquenne, F., Botton, S., Peyret, F., Bétaille, D., Willis, P., 2005. GPS, localisation et navigation par satellites. Lavoisier, ISBN 2-7462-1090-8.

- Durupt, M., Taillandier, F., 2006. Modélisation automatique de bâtiments à partir d'un MNE et de limites cadastrales : une approche opérationnelle. 15ème congrès francophone AFRIF-AFIA Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle. 10 pages.
- Egenhofer, M.J., Herring, J.R., 1990. A mathematical framework for the definition of topological relationships. Proceedings of the 4th international symposium on spatial data handling, SDH-90, Zurich, pp.803-813.
- Fischler, M. A., Bolles, R. C., 1981. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model fitting with application to Image Analysis and Automated Cartography. Communications of the ACM, vol. 24 n°6, pp. 381-395.
- Fitzgibbon, A., 2001. Robust registration of 2d and 3d point sets. Image and Vision Computing, vol. 21, 2003. pp. 1145–1153
- Gamba, P., Casella, V., 2000. Model Independent Object Extraction from Digital Surface Models, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam. vol. XXXIII, Part B3/1, Amsterdam, pp. 312-319.
- Geibel, R., Stilla, U., 2000. Segmentation of Laser Altimeter Data for Building Modélisation: Different Procedures and Comparison; International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXIII, Part B3, Amsterdam, pp.326-334.
- Gelfand, N., Rusinkiewicz, S., Levoy, M., 2003. Geometrically Stable Sampling for the ICP Algorithm. In Proc. IEEE 3DIM, Canada. 8 pages.
- George, P-L., Borouchaki, H., 1997. Triangulation de Delaunay et maillage, application aux éléments finis. Edition HERMES, Paris. ISBN 2-86601-625-4. 432 pages.
- Gonzalez, RC., Woods, RE., Eddins, SL., 2004. Digital Image processing using MATLAB. Printed in USA, Pearson Prentice Hall. ISBN 0-13-008519-7. 609 pages.
- Goulette, F., 2009. Relevés laser urbains par systèmes mobiles de cartographie. Revue XYZ n°119, éditée par l'association française de topographie. ISSN 0290-9057 : <http://www.aftopo.org>. pp. 21-25.
- Gorte, B., Pfeifer, N., 2004. Structuring laser-scanned trees using mathematical morphology. In Proc. 20th ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, pp. 929–933.
- Gotardo, P. F. U., Boyer, K. L., Bellon, O. R. P., Silva, L., 2004. Robust extraction of planar and quadric surfaces from range images. In Proc. Intl. Conf. Pattern Recognition (ICPR), Cambridge, England. pp. 216-219.
- Haala, N., Becker, S., Kada, M., 2006. Cell Decomposition for the Generation of Building Models at Multiple Scales. IAPRS vol. XXXVI Part III, Symposium Photogrammetric Computer Vision, pp. 19-24.
- Hancock, J. A., 1999. Laser Intensity-Based Obstacle Detection and Tracking. Doctoral dissertation, technical report CMU-RI-TR-99-01, Robotics Institute, Carnegie Mellon

University.URL:

http://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub1/hancock_john_1999_1/hancock_john_1999_1.pdf.

Hanke, K., Grussenmeyer, P., Grimm-Pitzinger, A., Weinold, TH., 2006. First experiences with the Trimble GX scanner. Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology' Dresden, Germany 25-27 September 2006 ISSN 1682-1750 vol. 36, part 5. 6 pages.

Hartley, R., Zisserman, A., 2003. Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, Second Edition 2003. pp 117-121.

Hebert, M., Krotkov, E., 1992. 3D measurements from imaging laser radars: how good are they? Image and Vision Computing, vol. 10, No. 3, pp. 170 – 178.

Henricsson, O., Baltsavias, E., 1997. 3-D building reconstruction with ARUBA: a qualitative and quantitative evaluation. In: Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II), Ascona, pp. 65-76.

Hoover, A., Jean-Baptise, G., Jiang, X., 1996. An experimental comparison of range image segmentation algorithms. In IEEE Trans. Patt. Anal. and Machine Intell., vol. 18 n°. 7. pp. 673-689

Horowitz, S.L., Pavlidis, T., 1976. Picture segmentation by a tree traversal algorithm. JACM, vol. 23, n°2, pp. 368–388.

Horn, B.K.P., 1987. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternion's Journal of the Optical Society of America A, vol. 4, n°. 4, pp. 629–642.

Hough, P.V.C., 1962. Method and Means for Recognizing Complex Patterns. U.S. Patent 3.069.654.

Hubeli, A., Gross, M., 2001. Multiresolution feature extraction for unstructured meshes. Proceedings of the conference on Visualisation'01; San Diego, California. ISBN:1070-2385. pp. 278-294.

Iavarone, A., 2002. Laser Scanning Fundamentals. Professional Surveyor Magazine, September.URL: <http://www.profsurv.com/psarchiv.htm>.

Ingensand, H., 2006. Methodological aspects in terrestrial laser-scanning technology. In Proceedings of the 3rd IAG Symposium of Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering and 12th FIG Symposium on Deformation Measurements.

Jiang, X.Y., Bunke, H., 1994. Fast Segmentation of Range Images into Planar Regions by Scan Line Grouping. Machine Vision and Applications vol. 7, n° 2, pp.115-122.

Johnson, A., Hebert, M., 1997. Control of polygonal mesh resolution for 3D computer vision. Technical Report CMURI -TR-96-20, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA. 34 pages.

- Krebs, B., Sieverding, P., Korn, B. 1996. A fuzzy ICP algorithm for 3d free form object recognition, in Proceedings of the 13th International Conference on Pattern Recognition, Vienna, 1996, vol. A, pp. 539-543.
- Koskinen, M., Kostamovaara, J., Myllylä, R., 1991. Comparison of the continuous wave and pulsed time-of-flight laser rangefinding techniques. SPIE Proceedings, vol. 1614, pp. 296 – 305.
- Landes, T. et Vögtle, T., 2009. Influence de différents matériaux sur des mesures effectuées par scanner laser terrestre. Revue Contrôles Essais Mesures, Numéro Spécial Colloque CMOI, pp.43-46 (sous presse).
- Lay, D.C., 2004. Algèbre linéaire, théorie, exercices et applications. Traduction de la 3ème édition américaine par Citta-Vanthemsche, M. publié par De boeck et Larcier S.A 2004. ISBN 2.8041-4408.9. 560 pages.
- Ledig, J., 2006. Télémétrie et tachéométrie électroniques. Cours de l'Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, Filière Topographie.
- Leonardis, A., Gupta, A., Bajcsy, R., 1995. Segmentation of range images as the search for geometric parametric models. Int. J. Comput. Vision vol. 14, n°.3, pp. 253-277.
- Lerma Garcia, J.L., Van Genechten, B., Heine, E., Quintero Santana, M., 2008. Theory and practice on terrestrial laser scanning. Training material based on practical applications. Universidad politécnica de valencia. Editorial UPV. ISBN : 978-84-8363-312-0.
- Li, Y., Wang, Y., 2008. An accurate registration method based on point clouds and redundancy elimination of LIDAR data. The Proc International Archive of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. vol. XXXVII. Part B5. 6 pages.
- Lichti, D. D., Gordon, S. J., 2004. Error Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Recording. In Proceedings of FIG Working Week. Athens, Greece, May 22 – 27. URL: <http://www.fig.net/pub/athens/>.
- Lichti, D. D., Harvey, B. R., 2002. An investigation into the effects of reflecting surface material properties on terrestrial laser scanner measurements. Geomatics Research Australasia, n°. 76, pp. 1 – 21.
- Määttä, K., Kostamovaara, J., Myllylä, R., 1993. Profiling of hot surfaces by pulsed time-offlight laser range finder techniques. Applied Optics, vol. 32, n°. 27, pp. 5324 – 5347.
- Maas, H. G., G. Vosselman, 1999, Two Algorithms for Extracting Building Models from Raw Laser Altimetry Data, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, vol. 54, pp. 153-163.
- Marshall, G. F. (Ed.), 2004. Handbook of Optical and Laser Scanning. Marcel Dekker. Inc., New York. 792 pages.

- Masaharu, H., Hasegawa, H., 2000. Three-Dimensional City Modeling from Laser Scanner Data by Extracting Building Polygons Using Region Segmentation Method, Proc. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam.
- Matas, J., Chum, O., Urban, M., Pajdla, T., 2002. Robust Wide Baseline Stereo from Maximally Stable Extremal Regions. Proceedings of the British Machine Vision Conference In Proceedings of British Machine Vision Conference, vol. 1, pp. 384-393.
- McGlone, J., Shufelt, J., 1994. Projective and object space geometry for monocular building extraction. In: Proceedings Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 54 – 61.
- Mian, A. S., Bennamoun, M., Owens, R. A., 2006. A Novel Representation and Feature Matching Algorithm for Automatic Pairwise Registration of Range Images", International Journal of Computer Vision, vol. 66, n°1, pp. 19 – 40.
- Maillet, H., 1984. Le laser : principes et techniques d'application. Technique et Documentation (Lavoisier). ISBN: 2-85206-240-2.
- Mitra, N.J., Gelfand, N., Pottmann, H., Guibas, L., 2004. Registration of point cloud data from a geometric optimization perspective, Eurographics Symposium on Geometry Processing. 10 pages.
- Moring, I., Heikkinen, T., Myllylä, R., Kilpelä, A., 1989. Acquisition of three-dimensional image data by a scanning laser rangefinder. Optical Engineering, vol. 28, n°. 8, pp. 897 – 902.
- Nayar, S. K., Ikeuchi, K., Kanade, T., 1989. Surface Reflection: Physical and Geometrical Perspectives. Technical Report CMU-RI-TR-89-7, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University. URL: http://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub3/nayar_s_k_1989_1.
- Paul, S., Alouges, A., Bonneval, H., Pontier, L., 1982. Dictionnaire de télédétection aérospatiale. ISBN : 2-225-75889-1. 236 pages.
- Pfeifer, N., 2007. DSM/DTM filtering. Theory and Application of Laser Scanning. ISPRS Summer School 2007. Ljubljana, Solvenia (talk. paper)..
- Polidori, L., 1997. Cartographie RADAR. Publié aux Pays-Bas sous licence de Gordon and Breach Science Publishers. ISBN 90-5699-051-9 (broché). 302 pages.
- Pu, S., Vosselman, G., 2009. Building facade reconstruction by fusing terrestrial laser points and images Sensors. vol. 9, n° 6, pp. 4525-4542.
- Pu, S., Vosselman, G., 2006. Automatic extraction of building features from terrestrial laser scanning. IAPRS, vol. 36, part 5, Dresden, Germany, September 25-27, 5 p. (on CD-ROM).
- Pullar, D.V., Egnhofer, M.J., 1988. Toward formal definitions of topological relations among spatial objects. Proceedings of the 4th international symposium on spatial data handling, SDH88, Sydney, pp. 225-241.
- Queste, D., 2006. Vers un processus automatique de modélisation du patrimoine architectural au moyen de données lasergrammétriques. Le savoir architectural comme source d'information. Mémoire de soutenance de diplôme d'ingénieur INSA, Filière de Topographie.

- Ragia, L., 2000. A quality model for spatial objects. Proceedings of the 19th ISPRS Congress, Amsterdam, 16-23 July.
- Ratcliffe, S., 2005. A digital signal processing technique for time-of-flight laser ranging. In *Optical 3-D Measurement Techniques VII*, A. Grün / H. Kahmen (Eds.), vol. II, pp. 359 – 364.
- Reshetyuk, Y., 2006. Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners. Licentiate thesis in Geodesy Royal Institute of Technology (KTH), Department of Transport and Economics, Division of Geodesy. 151 pages.
- Rottensteiner, F., Briese, Ch., 2002. A new method for building extraction urban areas from high-resolution LIDAR data. ISPRS workshop, comm. III. Graz; 09 - 13. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXIV / 3A (2002), ISSN 1682-1750; pp.295 - 301.
- Rueger, J. M., 1990. Electronic distance measurement. An Introduction. 3rd totally revised edition, Springer Verlag, Berlin – Heidelberg – New York – London – Paris – Tokyo – Hong-Kong. 266 pages.
- Samet, H., 1990. Application of Spatial Data Structures: Computer Graphics, Image Processing, and GIS, Addison-Wesley Publishing Company, pp.57-110.
- Sappa, A., Restrepo-Specht, A., Devy, M., 2001. Range Image Registration by using an Edge-based Representation .In Proceedings of the 9th International Symposium on Intelligent Robotic Systems, (SIRS '01), 10 pages.
- Schnabel, R., Wahl, R., Klein, R., 2007. Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection. In *Computer Graphics Forum*, vol. 26, n°. 2, Blackwell Publishing, June 2007, pp. 214-226.
- Schuster, H.-F., Weidner, U., 2003. A new approach towards quantitative quality evaluation of 3D building models. In: J. Schiewe, L. Hahn, M. Madden and M. Sester (eds), *ISPRS com IV, Workshop. Challenges in Geospatial Analysis, Integration and Visualization II*, pp. 156.163.
- Servigne, S., Libourel, T., 2006. *Fondements des bases de données spatiales*. Hermes sciences publications, Lavoisier. ISBN 2-7462-1378-8. 236 pages.
- Shan, J.K., Toth, C., 2008. *Topographic Laser ranging and scanning, principles and processing*. ISBN-13: 978-1-4200-5142-1, 590 pages.
- Sithole, G., Vosselman, G., 2004. Experimental Comparison of Filter Algorithms for Bare Earth Extraction from Airborne Laser Scanning Point Clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. vol 59 (1-2): pp. 85-101.

Scaioni, M., 2005. Direct georeferencing of TLS in surveying of complex sites. In Proceedings of the ISPRS Working Group V/4 Workshop 3D-ARCH “Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures”.

URL: <http://www.isprs.org/publications/archives.html>.

Staiger, R., 2003. Terrestrial laser scanning—Technology, systems and applications. Second FIG Regional Conference, 10 pages.

Stamos, I., Allen, P.K., 2002. Geometry and texture recovery of scenes of large scale. CVIU, Novembre 2002, vol. 88, n° 2 pp : 94–118,.

Stamos, I., 2001. Geometry and texture recovery of scenes of large scale: integration of range and intensity sensing. Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in the graduate school of arts and sciences. Columbia University.

Vögtle, T., Schwab, I., Landes, T. 2008. Influences of Different Materials on the Measurements of a Terrestrial Laser Scanner (TLS), The XXith ISPRS Congress, Beijing, China, 3-11 July 2008, Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Comm. V, ISSN 1682-1750, vol. XXXVII, part B5, pp.1061-1066

Vosselman, G., Gorte, B.G.H., Sithole, G., Rabbani, T., 2004. Recognising structure in laser scanner point clouds. IAPRS, vol. 46, part 8/W2, Freiburg, Germany, October 4-6, pp. 33-38.

Vosselman, G., Dijkman, S., 2001. 3D Building Model Modélisation from Point Clouds and Ground Plans, Proc. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 7 pages.

Tarsha-Kurdi, F., 2008. Extraction et reconstruction de bâtiments en 3D à partir de relevés LIDAR aéroportés. Thèse présentée pour obtenir le grade de Docteur de l'Université Louis Pasteur Strasbourg. Discipline : Sciences pour l'Ingénieur Spécialité : Topographie-Géomatique. Laboratoire MAP-PAGE.

Tarsha-Kurdi, F., Landes, T., Grussenmeyer, P., 2008. Extended RANSAC algorithm for automatic detection of building roof planes from LIDAR data. The Photogrammetric Journal of Finland. vol. 21, n°1, 2008, pp. 97-109.

Tarsha-Kurdi, F., Landes, T., Grussenmeyer, P., 2007. Hough-transform and extended RANSAC algorithms for automatic detection of 3D building roof planes from LIDAR data. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems. vol. XXXVI, Part 3 /W52, 2007, pp. 407-412.

Torr, P.H.S., Zisserman, A., 2000. MLESAC: A new robust estimator with application to estimating image geometry. Journal of Computer Vision and Image Understanding, vol.78 n° 1, pp. 138–156.

Wang, M., Tseng, Y.-H., 2004. LIDAR data segmentation and classification based on octree structure. XXth ISPRS Congress, 12-23 July 2004 Istanbul, Turkey, Commission 3.

Weichel, H., 1990. Laser beam propagation in the atmosphere. SPIE Optical Engineering Press. 98 pages.

Wunderlich, T. A., 2003. Terrestrial Laser Scanners – an important Step towards Construction of Information. In Proceedings of FIG Working Week.

URL: http://www.fig.net/pub/fig_2003/index.htm.

Yu, G., Grossberg, M., Wolberg, G., Stamos, I., 2008. Think globally, cluster locally: a unified framework for range segmentation. Proceedings of 3DPVT'08-the Fourth Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission. 8 pages.

Références issues d'Internet

[@Faro] Faro Laser : <http://www.faro.com/>

[@fda] : <http://www.fda.gov/>

[@GIM] : www.gim-international.com

[@iec] : <http://www.iec.ch/>

[@ i3Mainz] Site du laboratoire i3Mainz (Fachhochschule de Mayence), analyse et compare de très nombreux dispositifs d'acquisition laser : www.scanning.fh-mainz.de

[@ Leica] Leica (scanners HDS) : http://www.leica-geosystems.com/fr/fr/lgs_5570.htm

[@ Map-Crai] : Laboratoire MAP-CRAI : www.crai.archi.fr

[@ Map-Page] : Laboratoire MAP-PAGE : <http://photogeo.insa-strasbourg.fr/index.htm>

[@Matlab] : <http://www.mathworks.com/>

[@Riegl] Riegl : <http://www.riegl.com/>

[@Trimble ;@mensi] Trimble, scanner laser 3D. la société Trimble a racheté Mensi, fabricant du scanner laser Soisic employé comme référence dans cette thèse.

<http://www.trimble.com/3dlaserscanners.shtml>.

[@Z+F] Zoller + Froehlich : <http://www.zf-laser.de/>

Liste des publications

Les contributions principales de cette thèse ont fait l'objet de deux publications dans deux revues et de trois communications avec comité de lecture, lors de congrès internationaux.

Publication dans des revues :

- Boulaassal, H., Landes, T., Grussenmeyer, P., 2009. Automatic extraction of planar clusters and their contours on building façades recorded by terrestrial laser scanner. *International Journal of Architectural Computing (IJAC)*, Volume 7, Number 1, January 2009, pp. 1-20.
- Boulaassal, H., Landes, T., Grussenmeyer, P., 2009. Modélisation de façades par des primitives géométriques à partir de données laser terrestres. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection* (article accepté et en cours d'impression).

Publications dans des congrès :

- Boulaassal, H., Landes, T., Grussenmeyer, P., Tarsha-kurdi, F., 2007. Automatic segmentation of building façades using terrestrial laser data. *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007* Espoo, September 12-14, 2007, Finland, IAPRS Volume XXXVI, Part 3 / W52, pp. 65-70.
- Boulaassal, H., Landes, T., Grussenmeyer, P., 2008. Automatic extraction of planar clusters and their contours on building façades recorded by terrestrial laser scanner, In: *Proceedings of the 14th International Conference on Virtual Systems and Multimedia: VSMM 2008, Dedicated to Digital Heritage, Limassol, Cyprus, October 20th-25th*, pp.8-15.
- Alshawa, M., Boulaassal, H., Landes, T., Grussenmeyer, P., 2009. Acquisition and automatic extraction of facade elements on large sites from a low cost laser mobile mapping system. *3D-ARCH'2009. 3D Virtual Modélisation and Visualization of Complex Architectures* 25-28 February 2009, Trento, Italy. Volume XXXVIII-5/W1 ISSN p 1682-1777.

ANNEXES

Sommaire

ANNEXE A	181
A.1 BALAYAGE LASER MOBILE	181
A.2 RAPPELS AUTOUR DE LA TECHNOLOGIE LASER	182
A.2.1 Fonctionnement d'un laser	182
A.2.2 Eléments constitutifs d'une source laser	182
A.2.3 Sécurité relative au laser	183
A.3 CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DU SCANNER LASER TRIMBLE GX (@TRIMBLE)	184
A.4 CALCUL DE DISTANCES PAR MESURE DE DIFFERENCE DE PHASES	184
A.4.1 Méthode des fréquences emboîtées	185
A.4.2 Méthode des fréquences proches	185
A.5 CLASSIFICATION DES SCANNERS SELON LEUR CHAMP DE VISION	186
A.5.1 Scanner panoramique	186
A.5.2 Scanner hybride	186
A.5.3 Scanner caméra	186
ANNEXE B	187
B.1 METHODES DE CONSOLIDATION BASEES SUR DES ENTITES SURFACIQUES	187
B.2 CONSOLIDATION PAR ARETES	188
B.3 ORGANIGRAMME DE LA SEGMENTATION PAR FUSION DE PROFILS DE BALAYAGE	188
B.4 MODELISATION DE FAÇADES PAR COMBINAISON DE DONNEES LASER TERRESTRES ET D'IMAGES	189
ANNEXE C	190
C.1 UTILISATION DES NORMALES DANS LA DETERMINATION DES PARAMETRES DES PRIMITIVES GEOMETRIQUES	190
C.2 PSEUDO CODE DE L'APPROCHE ADAPTATIVE DE RANSAC	191
C.3 INITIALISATION DES PARAMETRES D'UN PLAN	191
C.3.1 Combinaison linéaire de vecteurs directeurs	191
C.3.2 Définition par un vecteur normal et un point	192
ANNEXE D	193
D.1 ERREURS INSTRUMENTALES AFFECTANT LES MESURES D'UN SCANNER LASER TERRESTRE ...	193
D.1.1 Erreurs sur la mesure de distance	193
D.1.2 Erreurs sur la mesure d'angles	195
D.2 ERREURS ENVIRONNEMENTALES AFFECTANT LES MESURES D'UN SCANNER LASER TERRESTRE	197
D.3 ERREURS DE MESURES PROVENANT DES CARACTERISTIQUES DE L'OBJET	198
D.4 ERREURS METHODOLOGIQUES AFFECTANT LA MESURE	199
ANNEXE E	200
E.1 DETECTION SEMI-AUTOMATIQUE DE FORMES GEOMETRIQUES	200
E.1.1 Détection d'une sphère	200
E.1.2 Détection de cylindres	203
E.2 FICHE TECHNIQUE DE LA STATION TOTALE TRIMBLE 5600 DR (@TRIMBLE)	209

Annexe A

A.1 Balayage laser mobile

Les relevés laser terrestres peuvent être réalisés en mode statique ou dynamique selon la nature de la plateforme considérée. Contrairement aux systèmes statiques à balayage laser statique, les systèmes dynamiques utilisent des plateformes mobiles pour acquérir de l'information tout en se déplaçant. Ceci a pour avantage de couvrir des scènes aussi larges que possible dans un laps de temps très court, avec une précision raisonnable. Ils permettent un gain de temps considérable et possèdent donc un avantage économique indéniable comparés aux systèmes statiques. Du point de vue technique, ces systèmes font intervenir des instruments permettant de maîtriser le positionnement du véhicule et donc le géoréférencement des données acquises (Figure A.1).

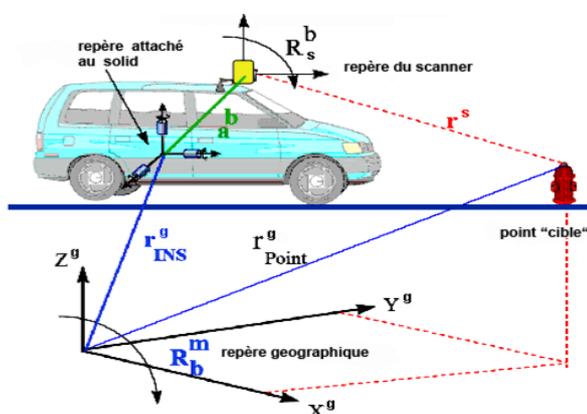


Figure 0.1. Schéma d'une plateforme mobile montrant les différents repères intervenant dans le géoréférencement des données

En effet, pour produire automatiquement des nuages de points géoréférencés, il est indispensable de connaître la position et l'orientation précise du scanner laser tout au long de l'acquisition. Ceci implique l'utilisation d'un système de positionnement et d'orientation, un scanner laser, une informatique embarquée et bien sûr un véhicule (Goulette, 2009). Pour le situer tout au long de sa trajectoire, le capteur laser est en général couplé à un GPS (Global Positioning System) et à une centrale inertielle (Figure A.2).



Figure 0.2. Système d'orientation et de positionnement.

Le GPS permet de positionner la plateforme dans le repère géographique, tandis que la centrale inertielle intervient pour fournir l'information d'attitude du système dans le repère géographique. Une centrale inertielle est composée d'une part d'un gyromètre triaxial, qui mesure les angles d'orientation de la plateforme selon les 3 axes du système de coordonnées (roulis, tangage, lacet), et d'autre part d'un accéléromètre triaxial, qui mesure l'accélération et à partir duquel on peut déduire la position relative de la plateforme par double intégration.

A.2 Rappels autour de la technologie laser

Le laser est une source de rayonnement, capable de produire dans des bandes spectrales extrêmement fines d'intenses champs électromagnétiques cohérents dans l'intervalle spectral s'étageant de l'infrarouge lointain à l'ultraviolet (Maillet, 1984). Le principe général du laser consiste à exciter un atome pour lui faire atteindre un niveau d'énergie supérieur afin de provoquer un dégagement de ce surplus d'énergie sous la forme de l'émission d'un photon. L'atome restitue ainsi l'énergie qui lui a été fournie pour revenir à son état initial.

A.2.1 Fonctionnement d'un laser

Un laser est fondamentalement un amplificateur de lumière fonctionnant grâce à l'émission stimulée dont la sortie est branchée sur l'entrée. L'amplificateur est un ensemble d'atomes que l'on « pompe » dans un état excité, au moyen d'une source d'énergie extérieure. Ces atomes peuvent alors se désexciter vers un niveau d'énergie inférieure, en émettant des photons. Ainsi un rayonnement passant à travers ce milieu peut être amplifié. Le rayonnement sortant de cet amplificateur est rebouclé sur son entrée au moyen de miroirs, qui constituent une « cavité » où la lumière est piégée. Bien sûr, un dispositif comme un miroir partiellement réfléchissant permet d'extraire de la lumière de ce système, pour obtenir le rayonnement laser utilisable.

A.2.2 Eléments constitutifs d'une source laser

D'après (Maillet, 1984) un oscillateur laser doit comporter au moins trois éléments fondamentaux : le matériau actif, la cavité, le dispositif de pompage.

Le milieu actif peut être des solides tels que des cristaux ou des verres au néodyme (verre dopé par des ions de néodyme). Un autre matériau actif couramment employé dans les lasers à solide est le YAG (Yttrium Aluminium Garnet). Le scanner laser Trimble GX se sert du laser Nd: YAG (acronyme du nom anglais : *neodymium-doped yttrium aluminium garnet*) ou grenat d'yttrium-aluminium dopé au néodyme (Nd:Y3Al5O12) qui est un cristal utilisé comme milieu amplificateur. Les lasers Nd-YAG sont pompés optiquement au moyen de lampes flash ou de diodes laser. Les Nd-YAG émettent de la lumière avec une longueur d'onde typique de 1064 nanomètres, dans l'infrarouge. Cependant, dans de nombreuses applications, la lumière infrarouge est doublée en fréquence - voire triplée- en utilisant des matériaux optiquement non-linéaires comme le triborate de lithium afin d'obtenir de la lumière visible (le vert à 532 nm pour le scanner laser Trimble GX).

A.2.3 Sécurité relative au laser

Selon la puissance et la longueur d'onde d'émission du laser, celui-ci peut représenter un réel danger pour la vue et provoquer des brûlures irréparables de la rétine. Le tableau A.1 résume les différentes classes de laser.

Classe	Commentaire
I	Lasers qui ne sont pas dangereux pour une vision en continu ou sont fabriqués pour éviter le champ de vision humain. Cela concerne typiquement des lasers de faible puissance ou des lasers intégrés à des boîtiers (exemples : imprimantes, lecteurs de CD-ROM, lecteurs de DVD).
II	Lasers émettant une lumière visible causant une gêne pour les yeux, ne représentent pas un danger pour de courtes périodes d'exposition.
IIa	Lasers émettant une lumière visible n'étant pas faite pour être vue et ne devant pas causer de dommages en cas de vue directe pendant moins de 1000 secondes (par exemple, des lecteurs de code-barres).
IIIa	Lasers qui ne devraient pas être dangereux s'ils sont vus temporairement, mais pourraient présenter un danger vus à travers des appareils optiques focalisants, tels que les loupes et les télescopes.
IIIb	Lasers qui présentent un danger s'ils sont vus directement, et peuvent causer des brûlures, aussi bien directement que par réflexion, mais pas par diffraction (sauf à courte distance).
IV	Lasers qui représentent un danger aussi bien par vue directe que par réflexion et diffraction. Peuvent également causer des incendies.

Tableau 0.1. Différentes classes de laser et niveau de dangerosité pour la vue.

A.2.4 Recommandations de sécurité relatives au scanner laser Trimble GX

D'après le constructeur Trimble, les scanners Trimble GX et les séries GS sont conformes aux performances exigés par US FDA CFR§1040.10 (*FDA : Food and Drug Administration (@fda)*). FDA est une agence publique de santé qui se charge de la protection des consommateurs américains. Elle a classé le laser utilisé par Trimble comme un laser de type classe II. Les scanners Trimble Gx se conforment également aux performances exigées par IEC 60825-1 (*International Electrotechnical Commission (@iec)*).

A.3 Caractéristiques techniques du scanner laser Trimble GX (@Trimble)

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques détaillées du Trimble GX ayant servi à l'acquisition des nuages de points traités dans cette thèse.

PERFORMANCES	<ul style="list-style-type: none"> - Portée standard : 200 m ; étendue : 350 m (avec OverScan) - Vitesse de numérisation jusqu'à 5 000 points par seconde - Précision d'un point unique (position) = 12 mm à 100 m - Précision de distance = 7 mm à 100 m ; angle horizontal Hz = 12" (60 μrad) ; angle vertical = 14" (70 μrad) - Compensation de niveau automatique et de température en temps réel - Paramètres avancés de corrections atmosphériques. - Mise au point automatique (autofocus) : contrôlée par l'utilisateur ou implémentation automatique - Taille du spot (empreinte laser) : 3 mm à 50 m - Taille du spot avec autofocus : 0,3mm à 5 m ; 0,9 mm à 15 m ; 1,5 mm à 25 m. - Espacement des points : jusqu'à 3,2 mm à 100 m (disponibilité de 1,6 mm vertical = 18 pts/cm²)
SPÉCIFICATIONS DU SYSTÈME	<ul style="list-style-type: none"> - Type de diode laser à impulsions : Nd-YAG ; longueur d'onde 532 nm (vert) - Classe : IEC 60825-1 – Classe 3R ; 21 CFR §1041,10 : Classe II - Champ de vision : 360° x 60° numérisation unique continue - Optique : système optique de numérisation breveté - Imagerie numérique : vidéo couleur intégrée en temps réel avec zoom optique x 5,5.

Tableau A.2. Caractéristiques techniques du scanner laser Trimble GX (@trimble)

A.4 Calcul de distances par mesure de différence de phases

Les scanners laser à différence de phases utilisent un phasemètre numérique pour mesurer la différence de phase entre le signal émis et le signal reçu pour déterminer la distance scanner-objet. C'est le même procédé que celui utilisé dans la plupart des tachéomètres électroniques. Le principe consiste à compter le nombre de longueurs d'ondes employées entre le scanner et l'objet à numériser. En effet, entre l'émetteur et le récepteur, il existe un nombre entier n de longueurs d'onde plus une fraction $\Delta\lambda$ de longueur d'onde.

La distance D est donnée par la relation suivante :

$$D = \frac{n\lambda + \Delta\lambda}{2} \Leftrightarrow 2D = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} * \frac{c}{f} + n * \frac{c}{f} \quad (\text{A.1})$$

Avec :

$\Delta\varphi$: différence de phase mesurée par le phasemètre

f : fréquence de l'onde

c : célérité de la lumière

Le problème consiste à présent à compter le nombre entier n de longueurs d'ondes nécessaire au parcours aller-retour pour en déduire D . On appelle cela la résolution d'une « ambiguïté » sur la distance.

Parmi les méthodes utilisées pour lever l'indétermination sur n (nombre entier de cycles sur le parcours $2D$), on peut citer celle des fréquences emboîtées et la méthode des fréquences proches (Ledig, 2006).

A.4.1 Méthode des fréquences emboîtées

Cette méthode s'appuie sur l'utilisation de fréquences de modulation différentes qui se déduisent les unes des autres par divisions de successives k fois ($k=10$ par exemple). Le faisceau laser émet le signal avec une longueur d'onde λ , qui se propage dans l'air à la vitesse de la lumière. Donc la méthode des fréquences emboîtées utilise différentes fréquences spatiales, qui permettent de mesurer des différences de phase $\Delta\phi_i$ et de calculer D . Ainsi elle permet de lever l'ambiguïté sur la distance. La distance scanner objet est déterminée en calculant les valeurs approchées de la distance en utilisant à chaque fois une fréquence différente. La distance finale est calculée avec précision en utilisant la plus petite fréquence après avoir dégrossi le problème en utilisant les autres fréquences.

A.4.2 Méthode des fréquences proches

Une autre méthode consiste à utiliser une série de fréquences légèrement différentes mais très stables. Les différences de phase mesurées pour chaque fréquence sont utilisées pour résoudre le système linéaire suivant :

$$2D=m_1.\lambda_1+\Delta\lambda_1 \quad (\text{A.2})$$

$$2D=m_2.\lambda_2+\Delta\lambda_2 \quad (\text{A.3})$$

$$2D=m_3.\lambda_3+\Delta\lambda_3 \quad (\text{A.4})$$

Pour résoudre un ensemble d'équations telles que celles-ci on opère par soustractions des équations.

$$(1)-(2) \Leftrightarrow m_1.\lambda_1+\Delta\lambda_1= m_2.\lambda_2+\Delta\lambda_2 \quad (\text{A.5})$$

$$(1)-(3) \Leftrightarrow m_1.\lambda_1+\Delta\lambda_1= m_3.\lambda_3+\Delta\lambda_3 \quad (\text{A.6})$$

Ces différences nous amènent à un système de 2 équations à 3 inconnues que nous pourrons résoudre en posant des hypothèses sur le facteur m . On posera $m_1=m_2$ ou $m_1=m_3$ et on calculera le m_i restant.

Donc on aura :

$$m_1=m_2= (\Delta\lambda_2-\Delta\lambda_1)/(\lambda_2-\lambda_1) \quad \text{et} \quad m_3= (m_1.\lambda_1+\Delta\lambda_1-\Delta\lambda_3)/\lambda_3 \quad (\text{A.7})$$

Plus les fréquences sont proches, plus grand est le domaine dans lequel l'ambiguïté est levée d'emblée (c'est-à-dire m déterminé). En effet, pour deux longueurs d'ondes données (de l'ordre de 10m par exemple), plus elles seront proches, plus longue pourra être la distance sur laquelle elles se répèteront un même nombre de fois. Les fréquences doivent être proches par exemple $f_1=29.97 \text{ Mhz}$; $f_2=30.04492 \text{ Mhz}$ et $f_3=31.4685 \text{ Mhz}$. Cette partie de résolution d'ambiguïté a été rédigée avec l'aide de (Ledig, 2006).

A.5 Classification des scanners selon leur champ de vision

Cette classification a été adoptée par (Staiger, 2003). Il distingue trois types de scanners laser terrestres statiques : le scanner « panoramique », le scanner « caméra » et le scanner « hybride » (Figure A.3).

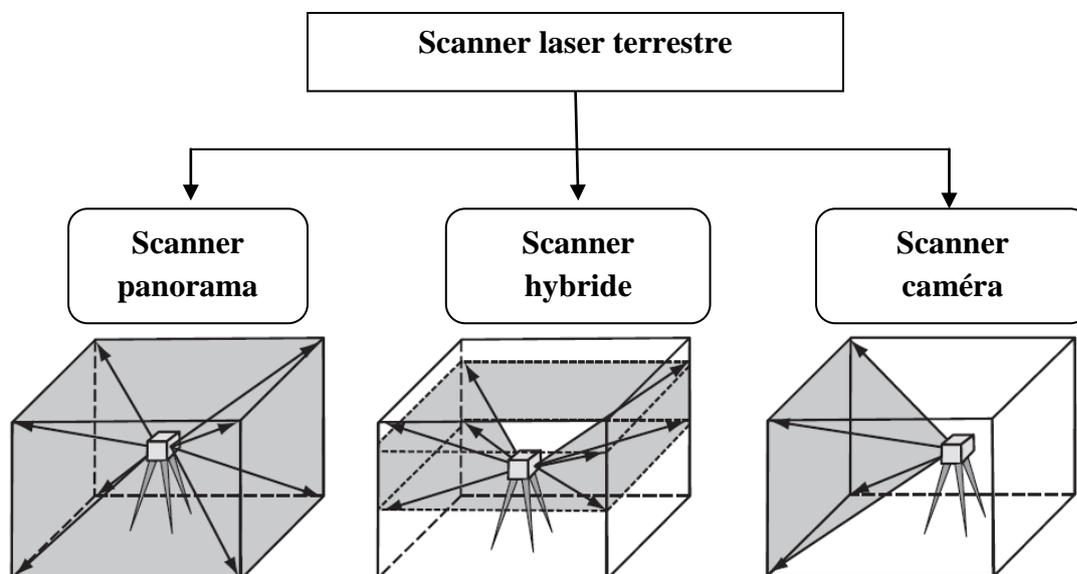


Figure 0.3. Classification des scanners laser selon leur champ de vision (Staiger, 2003).

A.5.1 Scanner panoramique

Ce type de scanners effectue des mesures de distances et d'angles dans un champ de vision de 360° dans le plan horizontal et d'au moins 180° dans le plan vertical. Cette caractéristique lui donne la possibilité de lever l'environnement direct englobant la station, excepté la partie située directement en dessous de l'appareil. Ce type de scanner est non seulement utile aux levés topographiques classiques, mais aussi et surtout aux levés d'équipements industriels complexes.

A.5.2 Scanner hybride

Avec ces scanners, le balayage s'effectue grâce à la rotation illimitée du scanner autour d'un seul axe. Généralement le balayage est effectué horizontalement, autour de l'axe vertical de l'instrument. En revanche, le champ de vision dans le plan vertical est limité à 50° ou 60° . Ce genre de scanners est communément utilisé pour scanner à longue ou à moyenne portée de l'objet et est adapté aux travaux topographiques courants.

A.5.3 Scanner caméra

Les scanners caméras effectuent les mesures de distances et d'angles dans un champ de vision particulièrement étroit aussi bien dans le plan horizontal que dans le plan vertical. Le champ angulaire couvert est de l'ordre de $40^\circ \times 40^\circ$. Son principe de mesure est basé sur deux miroirs rotatifs d'axes orthogonaux et dévient le rayon dans l'espace objet.

Annexe B

B.1 Méthodes de consolidation basées sur des entités surfaciques

Ces méthodes de consolidation basées sur des entités surfaciques travaillent à partir de *spin-images* (Johnson et Hebert, 1997) ou de tenseurs (Mian *et al.*, 2006). La première méthode utilise le voisinage direct de chaque point pour trouver un plan et la normale au plan passant par ce point. Ainsi, pour un point p quelconque d'une surface (voir Figure B.1), il faut premièrement trouver le meilleur plan P qui convienne dans le voisinage local de ce point. Ce plan avec sa normale n passant par p forment un repère, selon lequel on représente les points du voisinage par le couple (α, β) . Ces grandeurs α et β permettent de déterminer les positions des pixels sur la surface auxquels on associe les normales comme valeurs numériques. L'image ainsi obtenue est appelée *spin-image*.

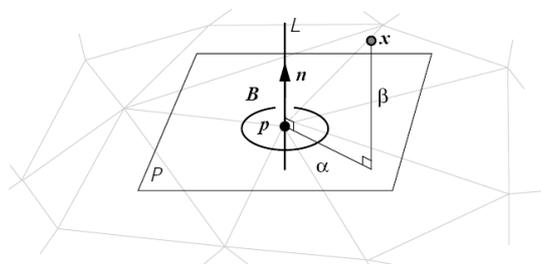


Figure B.1 Détermination des coordonnées d'un point pour la méthode basée sur des entités surfaciques (Johnson et Hebert, 1997)

Pour alléger les calculs, il peut être utile de réduire la taille du nuage, mais à condition de ne pas dégrader la description des entités géométriques. Pour ce faire, on peut utiliser l'algorithme proposé par (Johnson et Hebert, 1997) qui diminue le nombre de points en essayant de garder la précision du maillage 3D calculé sur ces points. Ils ont également démontré que la similarité entre deux images ainsi générées reflète la similarité entre les surfaces originales qu'elles représentent. Par conséquent, le problème de la consolidation 3D se transforme finalement en un problème de corrélation 2D entre deux images.

La deuxième méthode de consolidation est basée sur des surfaces 3D approchées par des tenseurs de 3^{ème} ordre. Ainsi, pour pouvoir consolider deux semis de points, (Mian *et al.*, 2006) ont suggéré de se baser sur la décomposition tensorielle. Etant donné que les tenseurs sont des descripteurs de surfaces locales, il serait possible d'établir des liens en fonction de la similarité entre tenseurs et de déduire ainsi les liens de correspondance entre les deux nuages. L'avantage de cet algorithme est qu'il peut être appliqué à des objets de forme géométrique quelconque et ne nécessite aucune connaissance des angles de vue des nuages de points ni des zones de recouvrement entre les deux nuages de points. Ces techniques présentent des limites car elles sont basées toutes les deux sur les surfaces maillées. En présence de bruit, le maillage peut perdre de sa qualité. Par conséquent cela peut influencer la production soit des *spin-images*, soit les tenseurs qui servent à déterminer les liens de correspondance entre les

deux nuages. En termes de comparaison, (Mian *et al.*, 2006) précisent que les expérimentations ont montré que la méthode basée sur les tenseurs était plus efficace que celle basée sur les *spin-images*.

B.2 Consolidation par arêtes

(Sappa *et al.*, 2001) ont utilisé les points des arêtes pour appliquer la méthode ICP. Ils ont démontré que cette démarche réduisait le temps de traitement comparée à l'utilisation de l'ICP seule. Cette démarche diminue aussi la sensibilité de l'ICP à la position initiale des nuages. Une arête est décrite ici par la meilleure fonction d'ajustement possible. Selon (Sappa *et al.*, 2001) les points de discontinuité formant les arêtes peuvent décrire soit des arêtes de pli (*crease edges*) entre deux surfaces d'orientations différentes, soit des arêtes de saut (*jump edges*) lorsqu'une rupture a lieu dans la surface elle-même. Les auteurs suggèrent d'effectuer la modélisation en utilisant des courbes quadratiques, surtout pour les scans effectués en milieu industriel.

B.3 Organigramme de la segmentation par fusion de profils de balayage

L'organigramme de la Figure B.2 explique les étapes principales suivies par un algorithme de segmentation basé sur le principe de fusion. En effet, après avoir séparé les profils de balayage laser, on les subdivise en segments droits à partir desquels on cherche les graines de départ. Une fois une graine de départ sélectionnée, le processus de fusion commence par regrouper des segments droits voisins et qui appartiennent au même plan.

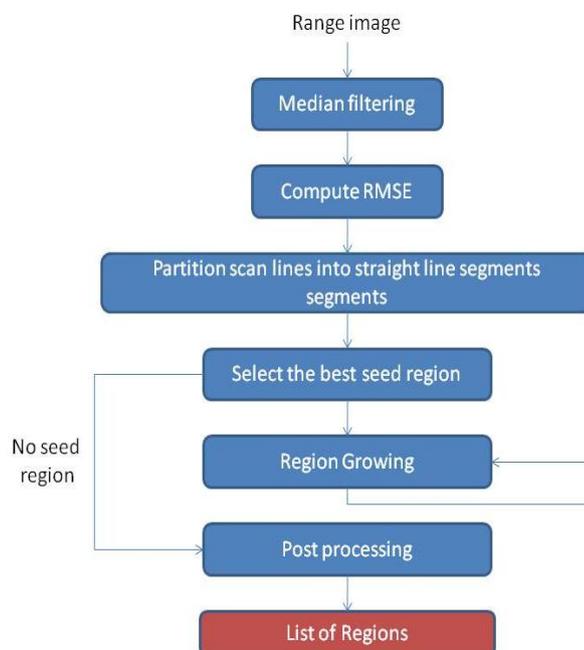


Figure B.2 : Organigramme de l'algorithme de segmentation des points en segments sur la base de segments droits, d'après (Jiang et Bunke, 1994)

B.4 Modélisation de façades par combinaison de données laser terrestres et d'images

La Figure B.3 présente une chaîne de traitements menant au modèle 3D de la façade par combinaison de données laser terrestres et d'images. Le modèle vectoriel de la façade est généré à partir des nuages de points et affiné à partir des images par l'extraction de contours d'éléments de façade supplémentaires. Les mêmes images sont utilisées pour doter le modèle d'une texture réelle.

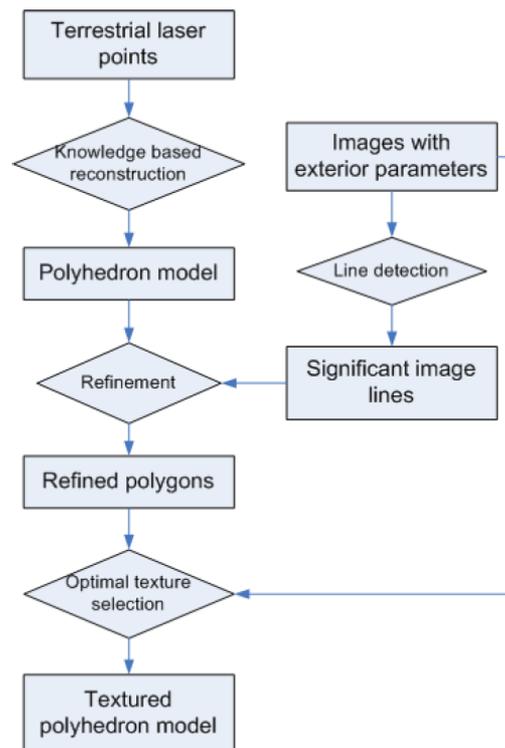


Figure B.3. Organigramme du processus de modélisation de façade combinant laser et image, proposé par (Pu et Vosselman, 2009).

Annexe C

C.1 Utilisation des normales dans la détermination des paramètres des primitives géométriques

Le nombre minimal de points nécessaires pour déterminer les paramètres d'un modèle diffère du type de primitive géométrique considéré et du type de données disponible. Chaque point 3D, noté p_i , d'un échantillon, fixe un seul paramètre de la primitive. Cependant, afin de réduire le nombre de points requis (c.-à-d. le nombre minimal nécessaire) on calcule une normale approximative n_i pour chaque point, de telle sorte que l'orientation fournisse deux fois de plus de paramètres par échantillon. De cette manière, il est possible d'évaluer chacune des formes de base considérée à partir d'un minimum de points.

Ci-après, on considère les primitives les plus courantes et les plus couramment rencontrées dans un espace 3D qui sont : les plans, les sphères, les cylindres, les cônes et les tores. Ces formes géométriques exigent de disposer de trois à sept paramètres.

a) Plan

Pour un plan, un ensemble minimale de 3 points $\{p_1, p_2, p_3\}$ est nécessaire pour déterminer ses paramètres, si on ne prend pas en considération les normales des points. Si on dispose de la normale d'un seul point du plan, il est suffisant de calculer les paramètres de ce plan qui seront alors définis par une normale et par un point du plan.

b) Sphère

Les paramètres d'une sphère (rayon et centre) peuvent être déterminés à partir des coordonnées de 4 points. Mais si l'on utilise les normales, deux points sont largement suffisants. En effet, on utilise le segment le plus court entre deux lignes données (notés pt_1 et pt_2) et leurs normales (notées n_1 et n_2) pour définir le centre de la sphère c . Le rayon de la sphère est défini par le calcul de la distance entre le centre et un des deux points.

c) Cylindre

Pour générer les sept paramètres d'un cylindre, on a besoin de sept points définis par leurs coordonnées. Ce nombre de points peut être réduit à deux points si l'on utilise leurs normales. En effet, il faut déterminer d'abord la direction de l'axe (a) par le produit vectoriel des deux normales ($a = n_1 \wedge n_2$). Ensuite, les deux segments droits paramétriques ($(D_1): p_1 + tn_1$ et $(D_2): p_2 + tn_2$) sont projetés sur le plan d'équation ($(P): ax = 0$) parallèlement à l'axe (a) et leur intersection détermine le centre c . Le rayon est défini par la distance entre c et pt_1 dans le plan (P).

C.2 Pseudo code de l'approche adaptative de RANSAC

L'algorithme de l'approche adaptative de RANSAC fonctionne comme suit :

- Initialisation des variables : $N = \infty$, $\text{iteration} = 0$
- Tant que $N > \text{itérations}$, alors répéter l'opération suivante :
 - Choisir aléatoirement un échantillon et compter le nombre de points valides
 - Nombre de points valides : $\epsilon = 1 - \frac{\text{nbre de pts valides}}{\text{nbre total de pts}}$
 - Nombre d'itérations $N = \frac{\log((1-p))}{\log((1-(1-\epsilon)^s))}$ avec $p = 0.99$
- Incrémenter : $\text{iteration} = \text{iteration} + 1$

Fin

C.3 Initialisation des paramètres d'un plan

Initialiser un plan signifie déterminer sa normale et sa distance par rapport à l'origine du repère. Un plan est un sous-espace de dimension 2 d'un espace vectoriel sur un corps \mathbb{K} . On parle aussi dans ce cas d'un plan vectoriel. Un plan est toujours défini par deux vecteurs \vec{u} et \vec{v} non colinéaires. De la sorte, un vecteur appartient au plan si et seulement s'il est une combinaison linéaire de \vec{u} et \vec{v} , à coefficients dans \mathbb{K} . Ceci peut se traduire de la façon suivante :

Soit un point $A(a_1; a_2; a_3)$ par lequel passe le plan (PL) et $\vec{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}$ et $\vec{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}$ les vecteurs directeurs non colinéaires qui définissent son orientation.

Il y a trois possibilités de définir le plan selon le type de données disponibles : soit par combinaison linéaires de vecteurs directeurs, soit par définition d'un vecteur normal et d'un point, soit par la coplanarité de 3 vecteurs.

C.3.1 Combinaison linéaire de vecteurs directeurs

Le plan passant par A, de vecteurs directeurs \vec{u} et \vec{v} , est l'ensemble des points $M(x; y; z)$ pour lesquels il existe deux scalaires λ et μ tels que :

$$\overrightarrow{OM} = \overrightarrow{OA} + \lambda\vec{u} + \mu\vec{v} \quad (\lambda, \mu) \in \mathbb{R}^2 \quad (\text{équation vectorielle}) \quad (\text{C.1})$$

En introduisant les coordonnées des deux cotés de l'équation (C.1) on obtient l'équation paramétrique du plan :

$$\begin{cases} x = a_1 + \lambda u_1 + \mu v_1 \\ y = a_2 + \lambda u_2 + \mu v_2 \\ z = a_3 + \lambda u_3 + \mu v_3 \end{cases} \quad \text{où } (\lambda, \mu) \in \mathbb{R}^2 \quad (\text{équation paramétrique}) \quad (\text{C.2})$$

C.3.2 Définition par un vecteur normal et un point

Le plan passant par $A(a_1; a_2; a_3)$, de vecteur normal $\vec{n} = (n_1, n_2, n_3)$ est l'ensemble des points $M(x, y, z)$ pour lesquels le vecteur les reliant au point A est orthogonal au vecteur normal; autrement dit pour lesquels le produit scalaire entre ces vecteurs est nul :

$$\vec{n} \cdot \overrightarrow{AM} = 0 \quad (\text{C.3})$$

Cette définition amène à l'équation cartésienne du plan :

$$n_1x + n_2y + n_3z + d = 0 \quad (\text{C.4})$$

Où :

$\vec{n} = (n_1, n_2, n_3)$: la normale du plan

d : la distance du plan par rapport à l'origine

La troisième possibilité se base sur le principe de coplanarité de 3 vecteurs. Cette méthode a été implémentée dans l'algorithme de RANSAC et elle est présentée dans le chapitre 3.

Annexe D

D.1 Erreurs instrumentales affectant les mesures d'un scanner laser terrestre

Cette partie complète les définitions des types d'erreurs affectant les mesures effectuées à l'aide de scanners laser terrestres évoquées dans le chapitre 5. Elle présente quelques erreurs théoriques des scanners laser terrestres à temps de vol ainsi que, dans la mesure du possible, les modèles mathématiques les décrivant.

D.1.1 Erreurs sur la mesure de distance

Dans le cas de mesures de distances effectuées à l'aide d'un scanner laser contenant un distancemètre à impulsions, les erreurs accidentelles permettent de déterminer la précision de la mesure de distance, selon l'équation suivante (Koskinen *et al.*, 1991):

$$\sigma_r = \frac{0.35c}{2 b.R_{S/B}} \quad (D.1)$$

Avec :

c : célérité de lumière dans l'air

$R_{S/B}$: rapport signal / bruit de la détection des impulsions

b : bande passante de l'impulsion de synchronisation ou canal du récepteur

Cependant, il faut noter que la capacité de mesurer la distance par plusieurs tirs est disponible dans certains scanners laser à temps de vol comme par exemple Trimble GX. Dans ce cas, si la distance est calculée par la moyenne de n mesures indépendantes (n tirs), la précision sur la distance est calculée par la relation suivante:

$$\sigma_r = \frac{0.35.c}{2 b.R_{S/B}\sqrt{n}} \quad (D.2)$$

Dans les équations (D.1) et (D.2), on remarque que la précision de la distance dépend du rapport signal-sur-bruit ($R_{S/B}$). Plus ce rapport est grand, meilleure sera la précision sur la mesure de distance.

En plus de ce rapport signal-sur-bruit, (Reshetyuk, 2006) précise que la précision sur la distance est également influencée par d'autres facteurs liés aux ondes émises telles que l'erreur due à l'intervalle de temps entre l'émission de deux impulsions successives et l'erreur due à la largeur des impulsions.

L'erreur due à la divergence du faisceau laser a été évoquée dans le chapitre 1. Le fait que le faisceau soit légèrement divergent génère une empreinte sur la surface de l'objet, qui n'est pas ponctuelle. L'erreur ainsi générée provient du fait que la distance n'est pas forcément mesurée au centre du faisceau. En effet, le point effectivement mesuré peut se situer n'importe où à l'intérieur de l'empreinte lumineuse (Lichti et Gordan, 2004). L'écart-type de l'incertitude de la largeur de l'empreinte lumineuse est donnée par la relation suivante :

$$\sigma_{faisceau} = \pm \frac{\gamma}{4} \quad (D.3)$$

Où :

γ : divergence du faisceau.

L'équation (D.3) montre que l'erreur de l'empreinte lumineuse correspond tout simplement à un quart de la divergence du faisceau laser. Elle est moins importante chez les scanners ayant une bonne focalisation du faisceau c'est à dire munis d'un auto-focus.

Les erreurs citées ci-dessus ont un caractère plutôt aléatoire donc font partie des erreurs accidentelles (Reshetyuk, 2006). D'autres erreurs à caractère systématique peuvent aussi influencer la précision de distance mesurée par un scanner laser à temps de vol. Il s'agit de :

- L'erreur du « temps de vol »
- La dérive de la température
- L'erreur de « zéro »
- L'effet de bord.

Ces erreurs méritent quelques explications.

- ✓ Erreur du « temps de vol », dite *time walk error* en anglais : il s'agit d'une erreur dans la discrimination du temps due aux variations de l'amplitude et de la forme des impulsions (Amann *et al.*, 2001). La Figure D.1 illustre deux impulsions présentant des amplitudes différentes. Ces différences en amplitude se traduisent par une erreur sur la distance mesurée.

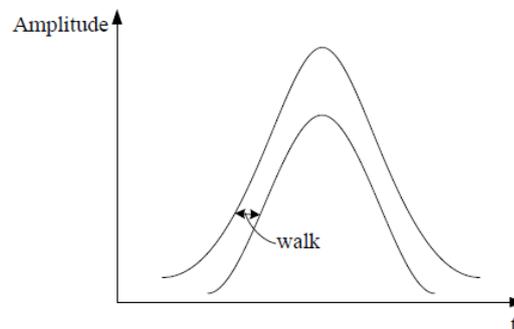


Figure 0.1. Erreur entre impulsions (Amann *et al.*, 2001).

D'après (Moring *et al.*, 1989), l'erreur engendrée sur la distance est liée à la résolution temporelle par la relation suivante:

$$\Delta r_{walk} = c \cdot t_{rise} \cdot k \left(1 - \frac{1}{d}\right) \quad (D.4)$$

Où :

c : célérité de lumière

t_{rise} : résolution temporelle

k : durée temporelle correspondant au signal d'amplitude moyenne

d : vraie valeur de l'amplitude moyenne.

- ✓ Dérive de la température dans la mesure électronique du temps. Ce phénomène entraîne la dérive de distance, en raison de changements dans la température ambiante et / ou de la température dans le distancemètre au bout de quelques temps après sa mise en marche. La température à l'intérieur du scanner peut être considérablement plus forte que la température ambiante (Boehler et Marbs, 2005). Il est important que la température de l'émetteur laser soit stabilisée afin que la production de formes d'impulsions reste stable. D'après (Määttä *et al.*, 1993), la dérive de distance due à la variation de température ambiante est linéaire et peut être compensée par comparaison à des mesures de température régulières. D'après les mêmes auteurs, l'influence de la température sur la mesure de distance est d'environ ± 4 mm sur l'intervalle de température [-20° , $+40^\circ$].
- ✓ Effet de bord : En raison de la divergence du faisceau laser, si le faisceau laser tombe sur le bord d'un objet, une partie du faisceau est réfléchi par la surface de l'objet, et une autre par la surface de l'objet situé derrière elle (Boehler et Marbs, 2005). La distance est donc calculée en prenant la moyenne des distances pour les points sur les deux faces situées dans l'empreinte du faisceau. Ce problème est particulièrement grave, car la distance ainsi calculer peut ne reposer sur aucune des deux surfaces, mais quelque part entre les deux. L'erreur attendue peut varier d'une fraction de millimètre à plusieurs décimètres (Boehler et Marbs, 2005). Elle souligne l'importance de disposer de scanners lasers terrestres susceptibles de mesurer plusieurs échos, comme le font les LiDAR aéroportés actuels.

A côté des erreurs affectant la mesure de distance, il faut tenir compte des erreurs affectant la mesure d'angles, puisque le calcul des coordonnées des points en 3D est dépendant de ces grandeurs.

D.1.2 Erreurs sur la mesure d'angles

L'acquisition des nuages de points de grande densité est effectuée grâce à la combinaison du distancemètre laser et du déflecteur de rayons laser, qui est plus communément appelé scanner. En effet, l'impulsion laser est guidée par un petit dispositif tournant (miroir, prisme) du scanner vers l'objet. Le déflecteur introduit une autre source d'erreurs instrumentales et a

une influence sur la précision de mesure d'angles. Contrairement à la précision de mesure de distances, celle de la mesure d'angles n'a pas été largement étudiée dans la littérature, en raison de la difficulté de son évaluation. Dans cette section, on identifiera les principales erreurs angulaires propres au scanner laser.

1. Erreur de fréquence : elle risque d'engendrer un placement irrégulier des points laser (empreintes laser) le long de la ligne de scan, de façon aléatoire ou répétitive (Figure D.2) ;

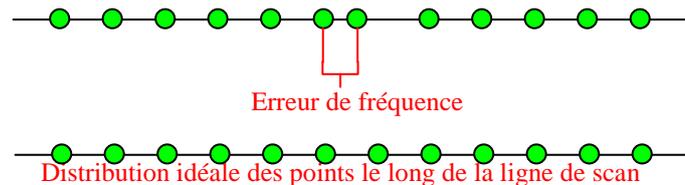


Figure 0.2. Erreur due à la fréquence d'impulsions d'un scanner polygonal (Marshall, 2004).

2. Variation de vitesse sur la ligne de balayage (*scanline* en anglais) : elle est causée entre autres par l'inertie du scanner (dépend du poids du miroir et de sa vitesse angulaire), d'une oscillation permanente de la vitesse du moteur, du comportement des roulements (usure ou saleté) ;
3. Déséquilibre du scanner : puisque les scanners fonctionnent à des vitesses élevées, ils doivent être bien stabilisés. Un déséquilibre se traduit par des vibrations du scanner qui provoquent des erreurs sur les mesures d'angles ;
4. Variations périodiques dans le passage d'une ligne à l'autre : elles peuvent être causées par des vibrations mécaniques et la stabilité de vitesse du moteur générant la rotation horizontale de la tête de scanner ;
5. Courbure d'une ligne de balayage : la courbure est causée par des erreurs dans l'alignement du faisceau. On se reportera aux travaux de (Marshall, 2004) pour plus de détails.

Une grande partie des erreurs angulaires est causée par les miroirs employés (systèmes rotatifs à un miroir, à deux miroirs à miroir polygonal, etc.) :

- ✓ Déformations du miroir à la suite d'un mauvais montage ou d'une mauvaise conception ;
- ✓ Déformations thermiques de la surface du miroir en raison de la conduction de la chaleur des rayons laser entrants ;
- ✓ Erosion progressive du revêtement réfléchissant de la surface du miroir en raison de son interaction avec les particules de poussière en suspension dans l'air ;
- ✓ Non-planéité de la surface du miroir (limites de fabrication).

Une autre source d'erreur dans l'unité de déflexion du faisceau laser est la mauvaise synchronisation entre le déflecteur du faisceau laser et le distancemètre. La distribution des erreurs de synchronisation est relativement constante tant que le scanner est stationnaire. Les erreurs instrumentales sont nombreuses et nécessitent des études approfondies basées sur des expérimentations difficiles à mettre en œuvre dans des laboratoires de recherche tels que le nôtre. Néanmoins, les constructeurs peuvent assurer la calibration et l'étalonnage des scanners laser terrestres, ce qui devrait atténuer les effets négatifs des erreurs instrumentales sur la qualité des données.

D.2 Erreurs environnementales affectant les mesures d'un scanner laser terrestre

Ces erreurs proviennent des conditions environnementales dans lesquelles les mesures sont effectuées. Ces erreurs ont été étudiées bien avant l'arrivée des scanners terrestres sur le marché, car elles sont à prendre en compte lorsque l'on travaille avec des théodolites classiques. On peut citer les plus importantes :

1. Une distorsion de la forme de l'impulsion laser retournée (Wunderlich, 2003; Ratcliffe, 2005).
2. L'atténuation et la réduction de l'intensité de la lumière laser. L'atténuation est la conséquence de la dispersion et de l'absorption de l'onde par la vapeur d'eau entre autres. Cette atténuation peut être décrite par l'équation suivante (Rueger, 1990):

$$I_R = \frac{I_0}{R^2} e^{-\gamma R} \quad (\text{D.5})$$

Où I_0 et I_R sont respectivement l'intensité des rayons laser émis et transmis (à la distance R du scanner) ; γ^R est le coefficient d'atténuation, calculé comme suit d'après (Weichel, 1990):

$$\gamma^R = \alpha_m + \beta_m + \alpha_a + \beta_a \quad (\text{D.6})$$

Où α et β sont respectivement les coefficients d'absorption et de diffusion, l'indice m signifie « moléculaire » et a signifie « aérosol ».

Le degré de l'atténuation dépend de plusieurs facteurs (Rueger, 1990) à savoir la longueur d'onde du laser, la distance à l'objet, la température, la pression, la composition gazeuse de l'atmosphère, les conditions météorologiques et la présence de particules microscopiques de diverses tailles dans l'air.

Les longueurs d'ondes utilisées par les scanners laser actuels se situent entre 500 et 1500 nm. Lorsque les scanners laser fonctionnent à courtes portées, l'effet de l'atténuation atmosphérique sur l'intensité de l'onde n'est pas aussi sévère que celle subie par les stations totales ou les scanners laser aéroportés. En outre, la lumière laser est monochrome, donc elle subit une dispersion moins forte dans l'air que la lumière infrarouge conventionnelle.

Néanmoins, l'effet des conditions atmosphériques doit parfois être pris en considération, en particulier dans des mesures à très haute précision (métrologie industrielle).

D.3 Erreurs de mesures provenant des caractéristiques de l'objet

Le modèle lambertien est employé en général pour décrire des réflexions diffuses d'objets à la surface de la terre. Pour décrire la réflexion spéculaire par contre, d'autres modèles sont plus appropriés, comme le modèle de réflectance de Torrance - Sparrow (Nayar *et al.*, 1989).

Le type de réflexion de surfaces générera des écarts dans la distance mesurée. Ainsi les surfaces ayant une réflectance élevée fournissent des mesures plus fiables et précises que celles dont la réflectance est faible, car dans ce dernier cas, la quantité d'énergie laser absorbée par la surface est plus importante. Si la réflectance de l'objet est trop élevée (surfaces métalliques, bandes rétro-réfléchissantes, couleurs éblouissantes) ou trop basse, la distance risque de ne pas pouvoir être enregistrée ou bien avec une précision moindre.

Les décalages dans la mesure de distance liées à la réflectance de la surface correspondent, en quelques sortes, à la composante de l'erreur zéro pour les stations totales. Les décalages induits par différents matériaux numérisés seront différents suivant la longueur d'onde employée par le laser. Pour cette raison, (Boehler et Marbs, 2005) indiquent qu'une correction universelle de l'erreur zéro dans les scanners laser ne peut pas être effectuée. Cependant, on peut choisir une surface de référence et l'utiliser pour déterminer l'erreur zéro de chaque scanner.

Les propriétés réfléchissantes de la surface déterminent non seulement la fiabilité de la mesure de distance, mais aussi la portée maximale tolérable entre le scanner et l'objet. Les fabricants de scanners laser devraient préciser normalement pour quelles cibles (réflectance diffuse / réflexion spéculaire) la portée maximale annoncée est valide. Les diagrammes de correction de distance devraient également être fournis. En parallèle à la réflexion, une partie du rayonnement est absorbée ou transmise, donc un faisceau laser incident peut aussi pénétrer dans certains matériaux et être réfracté comme le présente la Figure D.3.

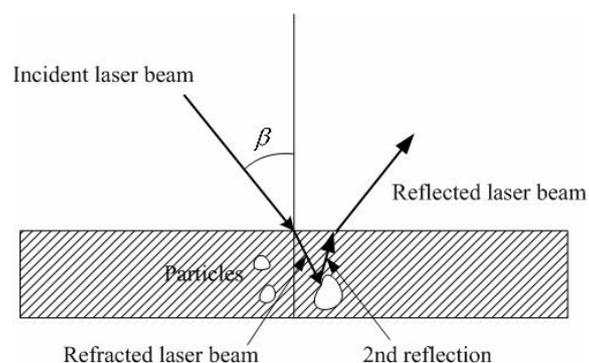


Figure 0.3. Réfraction et absorption partielle du rayon laser (Ingensand *et al.*, 2003)

D.4 Erreurs méthodologiques affectant la mesure

Dans l'approche de géoréférencement direct, les coordonnées de tous les points peuvent être obtenues immédiatement dans le système externe. Le scanner peut être mis en station sur un point connu et être calé de la même façon qu'un théodolite.

Une description du budget d'erreurs pour le géoréférencement direct est donnée par (Marshall, 2004) :

- Précision de la détermination des coordonnées (position) du scanner. Elle peut être décrite par la matrice de variance-covariance $C_{scanner}$, dont le contenu dépend de la façon dont la position du scanner a été déterminée. Si le scanner est centré sur un point connu et sa hauteur est mesurée avec une chaîne, la matrice $C_{scanner}$ se calcule d'après (Scaioni, 2005) par :

$$C_{scanner} = C_0 + C_H \quad (D.7)$$

où C_0 est la matrice de variance-covariance des coordonnées du point stationné et C_H la matrice de variance-covariance de la position verticale du centre du scanner par rapport au point stationné. Cette dernière se calcule par $C_H = diag(0, 0, \sigma_H^2)$, où σ_H est l'erreur sur la détermination de la hauteur de l'instrument. Si la position du scanner est déterminée à l'aide d'une station totale, la matrice $C_{scanner}$ peut être constituée en application de la théorie de la propagation des erreurs sur une mesure de distance inclinée et sur la mesure d'angles horizontaux et verticaux.

- Précision de l'azimut (α_3) du scanner lorsqu'il effectue une visée arrière vers la cible : elle est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_{\alpha_3} = \mp \frac{\sqrt{2}\sigma_{hor}}{d_{0-VA}} [rad] \quad (D.8)$$

Où σ_{hor} : précision des coordonnées du scanner et des coordonnées de la cible visée
 d_{0-VA} : distance entre le scanner et la cible visée.

- Erreur de nivellement du scanner

$\sigma_{lv} = \pm 0.2v$: précision de l'angle vertical

$\sigma_{lh} = \pm \sigma_{lv} \tan \theta$: précision de l'angle horizontal

Où : v est la sensibilité de la nivelle du scanner ou du compensateur (en radian) et θ est l'angle vertical.

La liste des erreurs présentées ci-dessus n'est pas exhaustive, pour plus d'informations le lecteur est invité à consulter les références citées.

Annexe E

E.1 Détection semi-automatique de formes géométriques

Les outils de segmentation semi-automatique présentés dans le chapitre 5 permettent la détection semi-automatique, en plus des plans, des sphères et des cylindres.

E.1.1 Détection d'une sphère

La détection d'une sphère se fait à partir de quatre points non coplanaires. Une sphère est définie dans l'espace par quatre paramètres : son centre (X_c, Y_c, Z_c) et son rayon. Pour les déterminer, nous avons mis au point deux méthodes : une méthode géométrique basée sur les plans médiateurs et une méthode basée sur l'équation de la sphère.

E.1.1.1 Méthode géométrique par plans médiateurs

Considérons P_1, P_2, P_3 , et P_4 , comme étant quatre points de la sphère, et qui soient non coplanaires. Les plans médiateurs des segments $[P_1P_2]$, $[P_2P_3]$, $[P_3P_4]$ et $[P_1P_4]$ se coupent en un seul point qui est le centre de la sphère (Figure E.1). Une fois ce dernier déterminé, il suffit de calculer la distance entre le centre obtenu et un point de la sphère (P_1, P_2, P_3 ou P_4) pour déterminer son rayon.

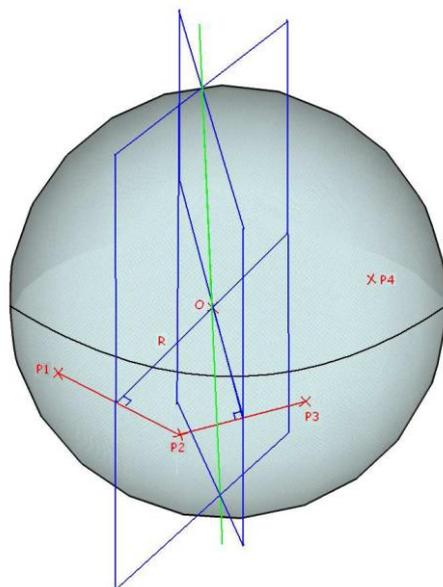


Figure 0.1. Détection des paramètres géométriques d'une sphère par les plans médiateurs

Les coordonnées du centre sont déterminées par la résolution du système suivant :

$$\begin{cases} a_1x + b_1y + c_1z + d_1 = 0 \\ a_2x + b_2y + c_2z + d_2 = 0 \\ a_3x + b_3y + c_3z + d_3 = 0 \\ a_4x + b_4y + c_4z + d_4 = 0 \end{cases} \quad (\text{E.1})$$

D'un point de vue matriciel, on a donc :

$$\begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \\ a_4 & b_4 & c_4 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -d_1 \\ -d_2 \\ -d_3 \\ -d_4 \end{pmatrix} \quad (\text{E.2})$$

On calcule ensuite une distance spatiale entre un point quelconque de la sphère et le centre, pour déterminer le rayon, d'où :

$$r = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (\text{E.3})$$

De cette manière, les quatre paramètres de la sphère sont déterminés.

E.1.1.2 Méthode basée sur l'équation de la sphère

On définit géométriquement une sphère comme l'ensemble des points vérifiant l'équation suivante :

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = r^2 \quad (\text{E.4})$$

Où r : rayon de la sphère
 (x_0, y_0, z_0) : coordonnées du centre O de la sphère

Cette équation paraît dans un premier temps difficile à résoudre, car elle est non linéaire. Cependant, il est possible de la linéariser. On commence pour cela par développer l'équation précédente :

$$x^2 + y^2 + z^2 + x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - 2xx_0 - 2yy_0 - 2zz_0 = r^2 \quad (\text{E.5})$$

On introduit la variable A :

$$A + 2xx_0 + 2yy_0 + 2zz_0 = x^2 + y^2 + z^2 \quad (\text{E.6})$$

On transforme l'équation sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} 1 & 2x_1 & 2y_1 & 2z_1 \\ 1 & 2x_2 & 2y_2 & 2z_2 \\ 1 & 2x_3 & 2y_3 & 2z_3 \\ 1 & 2x_4 & 2y_4 & 2z_4 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} A \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 \\ x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 \\ x_4^2 + y_4^2 + z_4^2 \end{pmatrix} \quad (\text{E.7})$$

A
X
B

En en déduit la matrice X :

$$X = A^{-1} \times B \quad (\text{E.8})$$

On obtient donc directement les coordonnées du centre de la sphère. On détermine ensuite le rayon à partir de la valeur A :

$$r^2 = A + x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 \quad (\text{E.9})$$

➤ Calcul des paramètres compensés de la sphère

Les méthodes expliquées précédemment permettent de calculer les paramètres approchés de la sphère. On détermine ensuite tous les points situés à une distance du centre de la sphère égale au rayon approché à plus ou moins une certaine tolérance (saisie par l'utilisateur). Pour calculer les paramètres compensés de la sphère on applique la méthode de *Gauss-Newton*. L'idée consiste à minimiser l'écart entre la distance du centre à un point pi :

$$d_i = r_i - r \quad \text{où} \quad r_i = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} \quad (\text{E.10})$$

On construit ensuite d'après cette fonction la matrice Jacobienne par rapport aux coordonnées du centre de la sphère et au rayon. Si on considère que la compensation se fait à partir de n points, on obtient :

$$J = \begin{pmatrix} \frac{-(x_1-x_0)}{r_1} & \frac{-(y_1-y_0)}{r_1} & \frac{-(z_1-z_0)}{r_1} & -1 \\ \frac{-(x_2-x_0)}{r_2} & \frac{-(y_2-y_0)}{r_2} & \frac{-(z_2-z_0)}{r_2} & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{-(x_n-x_0)}{r_n} & \frac{-(y_n-y_0)}{r_n} & \frac{-(z_n-z_0)}{r_n} & -1 \end{pmatrix} \quad (\text{E.11})$$

Les trois premières colonnes correspondent aux dérivées partielles de la fonction à minimiser par rapport aux coordonnées du centre de la sphère. La dernière colonne est la dérivée partielle par rapport au rayon. On résout le système suivant :

$$JP = -d \quad (\text{E.12})$$

où $P = \begin{pmatrix} p_{x0} \\ p_{y0} \\ p_{z0} \\ p_r \end{pmatrix}$ est la matrice des résidus relatifs aux coordonnées du centre et du rayon de la sphère. Par la suite, on a :

$$\begin{cases} x'_0 = x_0 + p_{x0} \\ y'_0 = y_0 + p_{y0} \\ z'_0 = z_0 + p_{z0} \\ r'_0 = r_0 + p_r \end{cases} \quad (\text{E.13})$$

où x'_0 , y'_0 , z'_0 et r'_0 sont les paramètres compensés de la sphère par la méthode de Gauss-Newton. On effectue des itérations jusqu'à ce que les résidus soient inférieurs à une certaine valeur (10^{-10}). Ensuite l'algorithme dessine la sphère à partir de ses paramètres compensés (Figure E. 2)

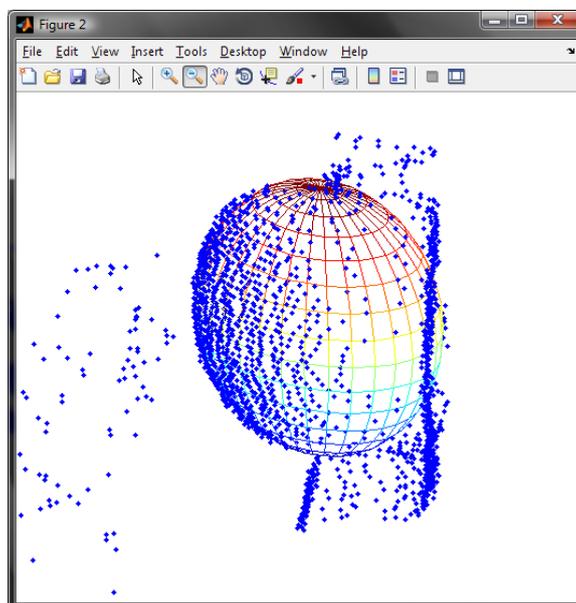


Figure 0.2. Affichage des primitives géométriques détectées (environnement MATLAB)

E.1.2 Détection de cylindres

E.1.2.1 Première approche

Cette forme géométrique est définie par un rayon (un paramètre) et un axe (6 paramètres). L'axe est assimilé à une droite qui peut être définie de plusieurs manières, énoncées ci-dessous.

➤ Par un point et un vecteur directeur :

Soit $A(x_A, y_A, z_A)$, un point de la droite et $\vec{u} = (a, b, c)$, un vecteur directeur. On sait que M est un point de la droite (AM) si et seulement si, il existe un réel k non nul tel que :

$$\overrightarrow{AM} = k\vec{u} \quad (\text{E.14})$$

➤ Par deux points :

Il suffit dans ce cas de connaître les coordonnées des deux points pour définir la droite (AM). On en déduit ainsi le vecteur directeur et on se retrouve dans le premier cas.

➤ Par deux plans :

Une droite dans l'espace peut être considérée comme l'intersection de deux plans sécants. De ce fait, tout point $M(x, y, z)$ appartient à cette droite si et seulement si :

$$\begin{cases} ax + by + cz + d = 0 \\ a'x + by' + cz' + d' = 0 \end{cases} \quad (\text{E.15})$$

Où a, b, c, d et a', b', c' et d' sont les paramètres respectifs des deux plans qui définissent la droite. On retient qu'il faut déterminer 7 paramètres pour définir un cylindre : un pour le rayon, et 6 pour l'axe. Nous avons élaboré diverses méthodes dans le but de calculer ces paramètres.

E.1.2.1 Recherche de caractéristiques géométriques du cylindre

A partir de 5 points (ou plus) choisis par l'utilisateur, il paraît difficile de générer un cylindre.

➤ Cylindre vertical

Pour simplifier le problème, il a été décidé d'approfondir surtout le cas du cylindre vertical, laissant en suspens les autres cas. On sait par ailleurs, que la plupart des cylindres contenus dans les bâtiments sont verticaux.

Le cas du cylindre vertical est particulièrement simple, puisque le vecteur directeur de l'axe est directement défini. En effet, ses deux premières composantes sont nulles (en x et y) et la dernière en z vaut 1 (si on considère que ce vecteur est normé). Il reste à déterminer 4 paramètres qui sont : le rayon et les coordonnées d'un point de l'axe.

Dans cette situation, l'utilisateur choisit seulement 3 points du cylindre. Les points doivent être de préférence répartis tout autour du cylindre, peu importe leur altitude. Une fois ces 3 points sélectionnés, on les projette dans la direction de l'axe du cylindre, dans un plan dont le vecteur normal est égal au vecteur directeur de l'axe, et qui passe par l'origine du repère. Nous obtenons dans notre cas, 3 points projetés contenus dans un plan horizontal, d'altitude nulle. Il suffit alors de déterminer le centre du cercle défini par ces 3 points identifié dès lors comme un point de l'axe du cylindre, ainsi que le rayon de ce cercle, qui est le rayon du cylindre dont on veut déterminer les paramètres.

Soit un point A de coordonnées (x_A, y_A, z_A) , et (P) un plan d'équation :

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (\text{E.16})$$

On cherche à déterminer les coordonnées du point $A'(x_{A'}, y_{A'}, z_{A'})$, projection orthogonale du point A sur le plan (P) . La droite (AM) , sur laquelle se trouve le point A' , est donc définie telle que :

$$\overrightarrow{AM} = k\vec{u} \quad (\text{E.17})$$

Où k est un réel, et \vec{u} le vecteur directeur de la droite (AA')

On cherche à déterminer le point d'intersection A' de la droite et du plan. Dans notre cas, la projection est orthogonale au plan. Par suite, le vecteur \vec{u} a pour coordonnées : $\vec{u}(a, b, c)$

D'après (D. 25), on a l'équation suivante :

$$\begin{cases} x_{A'} = x_A + ka \\ y_{A'} = y_A + kb \\ z_{A'} = z_A + kc \end{cases} \quad (\text{E. 18})$$

De plus, A' appartient au plan (P), on a donc :

$$ax_{A'} + by_{A'} + cz_{A'} + d = 0 \quad (\text{E.19})$$

En en déduit alors de (D. 26) et (D. 27) les coordonnées du point projeté A' , soit :

$$\begin{cases} x_{A'} = \frac{(b^2+c^2).x_A - ab.y_A - ac.z_A - d.a}{a^2+b^2+c^2} \\ y_{A'} = \frac{-ab.x_A + (a^2+c^2).y_A - bc.z_A - d.b}{a^2+b^2+c^2} \\ z_{A'} = \frac{-ac.x_A - bc.y_A + (a^2+b^2).z_A - d.c}{a^2+b^2+c^2} \end{cases} \quad (\text{E.20})$$

Une fois les 3 points projetés sur un plan, on calcule les paramètres du cercle généré par ces 3 points. Comme pour la sphère, nous avons le choix entre utiliser l'intersection des médiatrices (centre du cercle circonscrit) ou l'équation du cercle. Nous avons opté pour la deuxième solution. On a donc :

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2 \quad (\text{E.21})$$

On développe ensuite l'équation, en introduisant un coefficient comme pour la sphère, de manière à rendre l'équation linéaire. On a donc :

$$x^2 + y^2 + x_0^2 + y_0^2 - 2xx_0 - 2yy_0 = r^2 \quad (\text{E.22})$$

$$A + 2xx_0 + 2yy_0 = x^2 + y^2 \quad (\text{E.23})$$

On transforme l'équation sous une forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} 1 & 2x_1 & 2y_1 \\ 1 & 2x_2 & 2y_2 \\ 1 & 2x_3 & 2y_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} A \\ x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1^2 + y_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 \\ x_3^2 + y_3^2 \end{pmatrix} \quad (\text{E. 24})$$

A X B

En en déduit la matrice X :

$$X = A^{-1} \times B \quad (\text{E.25})$$

On calcule ainsi les paramètres du cercle. Le rayon de ce cercle est égal au rayon du cylindre, tandis que son centre correspond à un point de l'axe. Le vecteur directeur de l'axe étant connu, tous les paramètres du cylindre sont donc maintenant définis.

Bien entendu, le cercle dans la méthode précédente est calculé à partir de 3 points. On peut très bien imaginer améliorer le calcul des paramètres du cercle en prenant un nombre supérieur de points. Le principe est le même que pour la sphère. On utilise une fois de plus la méthode de Gauss Newton.

A ce stade, on est donc capable de calculer les paramètres définitifs d'un cylindre vertical, que ce soit à partir de trois points ou plus.

Il s'agit de calculer la distance entre l'axe du cylindre et chaque point du nuage. Une fois les points du cylindre détectés, on calcule les paramètres compensés en utilisant la méthode de Gauss-Newton. On obtient de cette manière les 4 paramètres compensés, à savoir les coordonnées d'un point de l'axe et le rayon du cylindre.

➤ Cas du cylindre quelconque

La grande difficulté dans la détection du cylindre résulte dans le calcul des paramètres de l'axe. En effet, lorsque l'on calcule les paramètres de l'axe du cylindre, les autres paramètres se calculent de la même manière que pour le cylindre vertical. Pour palier ce problème, nous avons pensé dans un premier temps à utiliser les normales des points du nuage.

Le scanner terrestre fournit les valeurs des normales de chaque point du nuage. Ces normales sont calculées par rapport aux points les plus proches. Il s'agit du vecteur normal du plan moyen calculé à partir des k points voisins. La technique employée s'intitule « k -nearest neighbors ». Pour accélérer la réalisation de l'algorithme, on peut se restreindre et ne traiter que les points déjà relativement proches de la zone voulue, plutôt que d'appliquer la méthode à l'ensemble du nuage.

De cette manière, l'utilisateur peut se contenter de choisir seulement deux points : considérons tout d'abord P1 et P2, deux points du cylindre :

$$\begin{aligned} P1 & (x1, y1, z1, \dots, a1, b1, c1) \\ P2 & (x2, y2, z2, \dots, a2, b2, c2) \end{aligned}$$

Où x , y et z sont les coordonnées spatiales des points et a , b et c les coordonnées des vecteurs normaux. En théorie, les vecteurs normaux de ces deux points, si l'on considère que le cylindre est parfait, doivent être orthogonaux à sa surface. Cela nous amène à penser que ces deux vecteurs sont orthogonaux à l'axe du cylindre. Dès lors, il suffit de calculer le produit vectoriel de ces deux vecteurs de manière à obtenir la direction de l'axe du cylindre. On a donc :

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} a_2 \\ b_2 \\ c_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 c_2 - c_1 b_2 \\ c_1 a_2 - a_1 c_2 \\ a_1 b_2 - b_1 a_2 \end{pmatrix} \quad (E.26)$$

Où \vec{u} est un vecteur directeur de l'axe du cylindre

Avec cette solution, on peut également calculer les coordonnées approchées d'un point de l'axe. Si on projette dans un plan orthogonal à l'axe du cylindre, les deux droites ayant pour

vecteur directeur les deux vecteurs normaux des points choisis par l'utilisateur, l'intersection de ces deux droites est un point de l'axe du cylindre.

On calcule deux nouveaux points P'1 et P'2 appartenant respectivement aux droites (D1) et (D2) définies par les points P1 et P2, et ayant pour vecteur directeur les normales de P1 et P2. On obtient :

$$\begin{pmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ z'_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{pmatrix} \quad (\text{E.27})$$

$$\begin{pmatrix} x'_2 \\ y'_2 \\ z'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_2 \\ b_2 \\ c_2 \end{pmatrix} \quad (\text{E. 28})$$

On projette ces 4 points, P1, P2, P'1 et P'2 dans un plan (P) passant par l'origine et ayant pour vecteur orthogonal l'axe du cylindre. Les coordonnées de ces points sont calculées de la même manière que pour le cylindre vertical. Dans la suite de nos explications, on nommera respectivement les points A, B, C et D comme les points projetés de P1, P'1, P2 et P'2.

On sait donc que le point d'intersection M des droites (AB) et (CD) dans le plan de projection correspond à un point de l'axe du cylindre.

Pour calculer les coordonnées de ce point, on calcule les vecteurs directeurs de droites (AB) et (CD), soit :

$$\vec{u}_1 = \begin{pmatrix} x_B - x_A \\ y_B - y_A \\ z_B - z_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_1 \\ e_1 \\ f_1 \end{pmatrix} \text{ et } \vec{u}_2 = \begin{pmatrix} x_D - x_C \\ y_D - y_C \\ z_D - z_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_2 \\ e_2 \\ f_2 \end{pmatrix} \quad (\text{E. 29})$$

Le point M vérifie les deux équations suivantes :

$$\overrightarrow{AM} = k\vec{u}_1 \quad \text{et} \quad \overrightarrow{CM} = t\vec{u}_2 \quad (\text{E. 30})$$

où k et t sont des réels non nuls

Donc :

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -d_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -e_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -f_1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -d_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -e_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -f_2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_M \\ y_M \\ z_M \\ k \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \\ x_C \\ y_C \\ z_C \end{pmatrix} \quad (\text{E. 31})$$

A
X
B

On en déduit la matrice X :

$$X = A^{-1} \times B \quad (\text{E. 32})$$

Il est possible aussi de calculer du cylindre quelconque par la matrice de variance-covariance. Dans ce cas, on émet pour cette méthode l'hypothèse que la hauteur du cylindre étudié est supérieure à son diamètre, ce qui est généralement le cas pour les cylindres décrivant des composantes d'un bâtiment, notamment pour les tours.

On calcule tout d'abord la matrice de variance-covariance de la matrice des coordonnées du nuage du point constituant le cylindre. Il est nécessaire de calculer les valeurs les plus probables $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ relatives à chaque composante X, Y et Z. On calcule ensuite les résidus relatifs à ces trois dernières composantes, soit :

$$v_{Xi} = Xi - \bar{X} ; v_{Yi} = Yi - \bar{Y} ; v_{Zi} = Zi - \bar{Z} \quad (\text{E.33})$$

On en déduit ensuite la matrice de variance-covariance :

$$C = \begin{pmatrix} \frac{[v_{Xi} v_{Xi}]}{n-1} & \frac{[v_{Xi} v_{Yi}]}{n-1} & \frac{[v_{Xi} v_{Zi}]}{n-1} \\ \frac{[v_{Xi} v_{Yi}]}{n-1} & \frac{[v_{Yi} v_{Yi}]}{n-1} & \frac{[v_{Yi} v_{Zi}]}{n-1} \\ \frac{[v_{Xi} v_{Zi}]}{n-1} & \frac{[v_{Yi} v_{Zi}]}{n-1} & \frac{[v_{Zi} v_{Zi}]}{n-1} \end{pmatrix} \quad (\text{E. 34})$$

On calcule ensuite les vecteurs et valeurs propres de la matrice de variance-covariance. Les vecteurs propres de cette matrice correspondent aux axes de variance selon les trois composantes X, Y et Z. On cherche à déterminer l'axe de plus grande variance qui pourra ensuite être identifié comme le vecteur directeur de l'axe du cylindre. Ce vecteur propre n'est autre que le vecteur auquel est associée la valeur propre la plus élevée.

Il reste à déterminer un point de l'axe ainsi que le rayon du cylindre. On effectue un changement de repère pour se retrouver dans le cas du cylindre vertical. On calcule les paramètres du cercle à partir des points projetés, comme précédemment.

Une première idée est d'utiliser la méthode de compensation de Gauss-Newton qu'on a déjà appliquée à la sphère. Cela nécessite la connaissance de paramètres approchés. Une fois les points projetés dans un plan orthogonal à l'axe, l'utilisateur doit choisir 3 points sur le cercle projeté de manière à se placer dans un cas favorable. A partir de leurs coordonnées, on calcule le rayon et les coordonnées du centre approché. Ces valeurs sont ensuite compensées par la méthode de Gauss-Newton après plusieurs itérations.

Cependant, il faut savoir que les points choisis au départ par l'utilisateur sont issus d'une segmentation. Il est donc possible que certains points sélectionnés et présents dans le nuage de points traité n'appartiennent pas au cylindre. On peut donc imaginer une méthode permettant d'éliminer les points faux. Ainsi, ces points ne feront plus partie du calcul de compensation, ce qui améliore la qualité des résultats. Nous avons donc utilisé l'algorithme de RANSAC. Les résultats ne sont que peu sensibles à la tolérance (zone tampon autour du plan) entrée par l'utilisateur. Les résultats obtenus sont très proches de ceux obtenus avec la méthode de Gauss-Newton.

E.2 Fiche technique de la station totale Trimble 5600 DR (@trimble)

FICHE TECHNIQUE



**STATION TOTALE
TRIMBLE 5600**

CARACTÉRISTIQUES CLÉ

- Deux options Direct Reflex
- Technologie de contrôleur avancée Trimble
- Evolution vers les fonctions Autolock et Robotic
- Asservissement à 4 vitesses
- Système de recherche active

TECHNOLOGIE DIRECT REFLEX

La station totale Trimble® 5600 Direct Reflex (DR) vous donne accès aux méthodes de mesure les meilleures et les plus productives qui soient, dans toutes les situations. La technologie Direct Reflex (DR) de Trimble permet des mesures sans prisme même à des distances exceptionnelles. Les cibles difficiles à atteindre ou dangereuses ne constituent pas un obstacle au Trimble 5600. Mesurez rapidement et en toute sécurité sans compromettre la précision.

Il n'est plus nécessaire d'entrer dans une propriété pour la lever dès lors que ses limites et ses coins sont visibles. De même, le lever de câbles aériens, de tunnels, de ponts, de fronts de taille de carrières, de dépôts de matériaux, de bâtiments et de points inaccessibles peut être effectué avec rapidité, aisance et en toute sécurité en pleine circulation.

DEUX OPTIONS DR DISPONIBLES

DR Standard

L'option DR Standard disponible sur la 5600 permet la mesure jusqu'à 70 m sur une carte Kodak Gris au coefficient de réflexion de 90% et jusqu'à 50 m sur une carte Kodak Gris au coefficient de réflexion de 18%. La portée avec un seul prisme est de 5000 m, la précision étant de $\pm(2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$. La grande précision de mesure, le laser de pointé visible et l'étroitesse du faisceau du DR Standard en font un instrument idéal pour les levés d'intérieur et les travaux topométriques de précision à courte portée.

DR 200+

L'option à longue portée DR 200+ permet d'effectuer des mesures jusqu'à 600 m sur une carte Kodak Gris au coefficient de réflexion de 90% et jusqu'à 200 m sur une carte Kodak Gris au coefficient de réflexion de 18%, soit 3,3 fois plus loin que toute autre station totale mesurant sans réflecteur. Et la portée avec un seul prisme est de 5500 m, avec une précision de $\pm(3 \text{ mm} + 3 \text{ ppm})$.

TECHNOLOGIE DE CONTRÔLEUR AVANCÉE TRIMBLE

La station totale 5600 Trimble prend en charge les tout derniers contrôleurs et les logiciels de terrain Trimble et vous permettent ainsi de bénéficier des nouvelles fonctionnalités logicielles telle que la technologie de recherche GPS.

La technologie de recherche GPS utilise le GPS pour guider votre station 5600 jusqu'à la canne robotisée, en quelques secondes. La recherche GPS vous facilite la tâche en éliminant la crainte de perdre le verrouillage sur la cible et rend la topographie robotisée encore plus efficace. Tout ce dont vous avez besoin pour accéder à la fonctionnalité de recherche GPS est une canne I.S (Topographie Intégrée) ou une simple carte GPS Trimble.

LA SOLUTION DE TOPOGRAPHIE INTÉGRÉE ET AU-DELÀ

Dans certaines situations, il est plus productif de recourir au GPS qu'aux stations totales et la réciproque est vraie dans d'autres cas.

Les solutions de topographie intégrée (Integrated Surveying™) de Trimble vous offrent le meilleur de chacun de ces deux univers. Déplacez tout simplement le contrôleur Trimble d'un système à l'autre, en l'espace de quelques secondes, et poursuivez votre lever. L'environnement logiciel est le même et les données circulent avec fluidité.

Sachez relever les nouveaux défis qui se présentent grâce aux outils et techniques spécialisés que Trimble met à votre disposition. Les systèmes Trimble s'intègrent sans aucun problème grâce à un déroulement des opérations et des technologies partagés, qui font de votre chantier de tous les jours un ensemble plus puissant que la somme des



La station totale 5600 Trimble prend en charge le contrôleur CU/ACU et le contrôleur Géodimètre CU/Trimble.



STATION TOTALE TRIMBLE 5600 DR STANDARD

CARACTÉRISTIQUES DE PERFORMANCE

Mesure d'angles

Précision (écart type selon la norme DIN 18723)

5603 .....	.3" (1,0 mgr)
5605 .....	.5" (1,5 mgr)

Lecture angulaire (incrément minimal)

Horizontal et vertical	
Mesure standard .....	.1" (0,1 mgr)
Mesure rapide .....	.1" (0,1 mgr)
Mesure en continu .....	.2" (0,5 mgr)

Moyenne arithmétique (D barre)

5603-5605	
Angle horizontal et vertical .....	.1" (0,1 mgr)

Compensateur automatique

Compensateur à deux axes $\pm 6'$ (± 100 mgr)

Mesure de Distances

Précision (écart type)

Prisme, EDM DR Standard à haute précision*

Mesure standard	$\pm(2$ mm + 2 ppm)
Mesure rapide	$\pm(3$ mm + 2 ppm)
Mesure en continu	$\pm(5$ mm + 2 ppm)
Moyenne arithmétique (D barre)	$\pm(1$ mm + 1 ppm)

Prisme, EDM DR Standard

Mesure standard	$\pm(2$ mm + 2 ppm)
Mesure rapide	$\pm(3$ mm + 2 ppm)
Mesure en continu	$\pm(5$ mm + 2 ppm)
Moyenne arithmétique (D barre)	$\pm(2$ mm + 2 ppm)

Feuille réfléchissante

Mesure standard	$\pm(3$ mm + 2 ppm)
Mesure rapide	$\pm(3$ mm + 2 ppm)
Mesure en continu	$\pm(5$ mm + 2 ppm)
Moyenne arithmétique (D barre)	$\pm(3$ mm + 2 ppm)

Mode Direct Reflex

Mesure standard	$\pm(3$ mm + 2 ppm)
Mesure rapide	$\pm(5$ mm + 2 ppm)
Mesure en continu	$\pm(10$ mm + 2 ppm)
Moyenne arithmétique (D barre)	$\pm(3$ mm + 2 ppm)

Distance minimale de mesure

Sur un prisme	1,5 m
Mode Direct Reflex	1,5 m
Feuille réfléchissante	2,5 m

Durée d'une mesure

Mode prisme	
Mesure standard .....	.2 s
Mesure rapide	1,8 s
Mesure en continu	0,5 s

Moyenne arithmétique (D barre)

3,5 s par mesure. Répétition jusqu'à l'arrêt manuel (ou après 99 mesures)

Mode Direct Reflex

Mesure standard	3 s jusqu'à 30 m +1 s/10 m
Mesure rapide	2 s jusqu'à 30 m +1 s/10 m
Mesure en continu	0,8 s jusqu'à 30 m +1 s/10 m

Moyenne arithmétique (D barre)

3,5 s par mesure. Répétition jusqu'à l'arrêt manuel (ou après 99 mesures)

Portée (en conditions standard**)

 Portée avec un ou plusieurs prismes

1 prisme	3000 m
1 prisme, mode longue portée (pour des mesures >1000 m uniquement)	5000 m
3 prismes	5000 m
3 prismes, mode longue portée (pour des mesures >1000 m uniquement)	7500 m

 Portée avec une feuille réfléchissante

Feuille réfléchissante, 20 mm	100 m
Feuille réfléchissante, 20 mm Mode longue portée	200 m
Feuille réfléchissante, 60 mm	250 m
Feuille réfléchissante, 60 mm Mode longue portée	800 m

 Portée en mesure Direct Reflex (valeurs usuelles)

Carte Kodak Gris (coeff. réflexion 18%)**	50 m
Carte Kodak Gris (coeff. réflexion 90%)**	70 m
Béton	40-50 m
Construction en bois	40-60 m
Construction en métal	40-60 m
Roche claire	40-50 m
Roche sombre	30-40 m

STATION TOTALE TRIMBLE 5600 DR 200+

CARACTÉRISTIQUES DE PERFORMANCE

Mesure d'angles

Précision (écart type selon la norme DIN 18723)

5603	.....	.3" (1,0 mgr)
5605	.....	.5" (1,5 mgr)

Lecture angulaire (incrément minimal)

Horizontal et vertical		
Mesure standard	.....	.1" (0,1 mgr)
Mesure rapide	.....	.1" (0,1 mgr)
Mesure en continu	.....	.2" (0,5 mgr)

Moyenne arithmétique (D barre)

5603-5605	.....	.1" (0,1 mgr)
Angle horizontal et vertical	.....	.1" (0,1 mgr)
Compensateur automatique	.....	Compensateur à deux axes $\pm 6'$ (± 100 mgr)

Mesure de distances

Précision (écart type)

Prisme		
Mesure standard	.....	$\pm(3$ mm + 3 ppm)
Mesure rapide	.....	$\pm(8$ mm + 3 ppm)
Mesure en continu	.....	$\pm(10$ mm + 3 ppm)
Moyenne arithmétique (D barre)	.....	$\pm(3$ mm + 3 ppm)
Feuille réfléchissante		
Mesure standard	.....	$\pm(3$ mm + 3 ppm)
Mesure rapide	.....	$\pm(8$ mm + 3 ppm)
Mesure en continu	.....	$\pm(10$ mm + 3 ppm)
Moyenne arithmétique (D barre)	.....	$\pm(3$ mm + 3 ppm)
Mode Direct Reflex		
5-200 m		
Mesure standard	.....	$\pm(3$ mm + 3 ppm)
Mesure rapide	.....	$\pm(8$ mm + 3 ppm)
Mesure en continu	.....	$\pm(10$ mm + 3 ppm)
Moyenne arithmétique (D barre)	.....	$\pm(3$ mm + 3 ppm)
>200 m	.....	$\pm(5$ mm + 3 ppm)

Distance minimale de mesure

Sur un prisme	.....	.2 m
Mode Direct Reflex	.....	.2 m
Feuille réfléchissante	.....	.2 m

Durée d'une mesure

Mode prisme		
Mesure standard	.....	.3 s
Mesure rapide	.....	.3 s
Mesure en continu	.....	.0,4 s
Moyenne arithmétique (D barre)	.....	3,5 s par mesure. Répétition jusqu'à l'arrêt manuel (ou après 99 mesures)
Mode Direct Reflex		
Mesure standard	.....	.3-7 s
Mesure rapide	.....	.3-7 s
Mesure en continu	.....	.0,4 s
Moyenne arithmétique (D barre)	.....	3,5 s par mesure. Répétition jusqu'à l'arrêt manuel (ou après 99 mesures)

Portée (en conditions standard*)

Portée avec un ou plusieurs prismes		
1 prisme	.....	.2500 m
1 prisme, mode longue portée	.....	5500 m (portée maxi)
3 prismes	.....	.3500 m
3 prismes, mode longue portée	.....	5500 m (portée maxi)
Portée en mesure Direct Reflex (valeurs usuelles)		
Carte Kodak Gris		
(coeff. réflexion 18%)**	.....	>200 m
Carte Kodak Gris		
(coeff. réflexion 90%)**	.....	>600 m
Béton	.....	.200-300 m
Construction en bois	.....	.150-300 m
Construction en métal	.....	.150-200 m
Roche claire	.....	.150-250 m
Roche sombre	.....	.100-150 m
Portée avec une feuille réfléchissante en mode Direct Reflex		
Feuille réfléchissante, 20 mm	.....	.800 m
Feuille réfléchissante, 60 mm	.....	.1600 m

CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES

Trimble 5600 DR 200+

Source lumineuse	Diode laser (pulsé) 870 nm Laser de classe 1
Pointeur laser excentré (En option)	Laser de classe 2
Divergence du faisceau	
Horizontale	.0,4 mrad (4 cm/100 m)
Verticale	.0,8 mrad (8 cm/100 m)

Trimble 5600 DR Standard

Source lumineuse	Diode laser 660 nm Laser de classe 1 en mode prisme Laser de classe 2 en Direct Reflex
Laser de pointé coaxial (standard)	Laser de classe 2
Divergence du faisceau	
Horizontale	.0,4 mrad (4 cm/100 m)
Verticale	.0,8 mrad (8 cm/100 m)

Généralités

Correction atmosphérique	De -60 à 195 ppm en continu
Calage	
Niveau circulaire de l'embase	.8/2 mm
Niveau électronique à 2 axes sur l'affichage à cristaux liquides	d'une résolution de 6" (2 mgr)
Vis de calage et mouvements fins	Asservissement avec réglage fin sans fin

Centrage

Système de centrage	Trimble universel
Plomb optique	Plomb optique dans l'embase
Grossissement	2,4x
Distance de mise au point	De 0,5 m à l'infini

Lunette

Grossissement	.26x (30x en option)
Ouverture	.40 mm
Champ visuel à 100 m	.2,6 m
Distance de mise au point	De 1,7 m à l'infini
Eclairage du réticule	Variable (15 niveaux)

Tracklight	En option (Servo uniquement) Standard (Autolock et Robotic)
------------	----------------------------------------------------------------

Plage de température	De -20 °C à +50 °C
----------------------	--------------------

Alimentation électrique

Batterie interne	Batterie rechargeable NiMH 12 V, 1,8 Ah Autonomie d'environ 3 h (Servo uniquement)
Batterie externe	Batteries externes rechargeables NiMH 12 V, 3,8-11,4 Ah. Autonomie d'environ 11 h en Autolock, 9 h en Robotic (11,4 Ah)

Poids

Instrument (Contrôleur exclu)	.6,6 kg
Embase	.0,7 kg
Batterie interne	.0,4 kg
Instrument en évolution Robotic (Avec Tracker et radio intégrée)	.7,5 kg
Hauteur de l'axe des tourillons	205 mm

CARACTÉRISTIQUES DE LA FONCTION ROBOTIC

Portée

Robotic*	Jusqu'à 1200 m selon le type de cible (RMT)
Autolock*	Jusqu'à 2200 m selon le type de cible (RMT)

Distance de recherche mini	.2 m
----------------------------	------

Précision de pointé du Tracker à 200 m (écart type)	<2 mm
-----------------------------------------------------	-------

Lecture angulaire (incrément minimal)	
Mesure standard	1" (0,1 mgr)
Mesure rapide	1" (0,1 mgr)
Mesure en continu	2" (0,5 mgr)
Moyenne arithmétique (D barre)	1" (0,1 mgr)

Durée d'une mesure: DR Standard, DR 200+

Mesure standard	.5-8 s
Mesure rapide	.5-8 s
Mesure en continu	.0,4 s
Moyenne arithmétique (D barre)	3,5 s par mesure

Répétition jusqu'à l'arrêt manuel
(ou après 99 mesures)

Durée de recherche (usuelle)**	.2-10 s
--------------------------------	---------

Zone de recherche	.360 degrés (400 gr) ou fenêtre de recherche définie horizontalement et verticalement
-------------------	------------------------------------------------------------------------------------------

* Conditions standard: absence de brume, temps couvert ou ensoleillement modéré, très légère réfraction. La portée et la précision dépendent des conditions atmosphériques et du niveau de rayonnement ambiant.

** Selon la fenêtre de recherche sélectionnée.