HAL
open science

Co-recalage de données hétérogènes 3D géo-référencées : contributions à la correction des relevés laser mobiles

Taha Ridene

To cite this version:

Taha Ridene. Co-recalage de données hétérogènes 3D géo-référencées : contributions à la correction des relevés laser mobiles. Géométrie algorithmique [cs.CG]. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2010. Français. NNT : 2010ENMP0020 . pastel-00563782

HAL Id: pastel-00563782

https://pastel.hal.science/pastel-00563782

Submitted on 7 Feb 2011

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

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

Ecole doctorale n° 431 : Information, communication, modélisation et simulation

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris

Spécialité « Informatique temps réel – Robotique – Automatique »

présentée et soutenue publiquement par

Taha RIDENE

le 9/07/2010

CO-RECALAGE DE DONNÉES HÉTÉROGÈNES 3D GÉO-RÉFÉRENCÉES : CONTRIBUTIONS À LA CORRECTION DE RELEVÉS LASER MOBILES

Directeur de thèse : **François GOULETTE**

Jury

M. Michel DEVY	Directeur de recherche CNRS, LAAS	Rapporteur
M. Nicolas PAPARODITIS	Directeur de recherche IGN, MATIS	Rapporteur
M. Michel KASSER	Professeur des Universités, ENSG	Président du jury
M. Atilla BASKURT	Professeur des Universités, INSA Lyon	Examinateur
M. Raouf BEN JEMAA	Responsable R&D, Mensi Trimble	Examinateur
M. François GOULETTE	HDR, Centre de robotique, MINES ParisTech	Directeur de thèse

T H E S E

MINES ParisTech
Centre de robotique
60 Boulevard Saint Michel 75006 Paris

Remerciements

Je tiens à remercier cordialement François Goulette, enseignant chercheur au centre de robotique de Mines ParisTech, pour le temps qu'il m'a consacré et les conseils qu'il ma prodigué. Je le remercie pour la confiance qu'il m'a accordée pour les choix scientifiques effectués dans ma thèse.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance à Fawzi Nashashibi, ingénieur de recherche au centre de robotique de Mines ParisTech, pour ses conseils, son aide, sa disponibilité ainsi que sa sympathie qui m'ont beaucoup aidé pour mener à terme mes travaux.

Je souhaiterais adresser ma gratitude à Antoine Manzanera, enseignant chercheur à l'ENSTA ParisTech, pour son soutient, son assistance ainsi que sa collaboration, et ce depuis mon stage de master. C'est un vrai exemple pour moi de part ses qualités humaines et professionnelles exceptionnelles.

Mes remerciements s'adressent également aux membres de mon jury pour l'enthousiasme qu'ils ont porté sur mes travaux. Les rapporteurs Michel Devy et Nicolas Paparoditis, pour leurs remarques pertinentes et conseils justifiés qui ont permis de rendre ce manuscrit plus juste et plus complet. Le président du jury Michel Kasser, directeur de l'ENSG, école qui m'a ouvert ses portes pour le suivi du module cartographie numérique pendant ma thèse, je le remercie pour sa sympathie ses remarques ainsi que ses conseils pertinents pendant la soutenance. Atilla Baskurt, directeur du LIRIS, qui a pu dégager de son temps précieux pour participer au jury et amener ses conseils précieux pour la carrière d'un jeune docteur. Raouf Ben Jemaa, responsable R&D à MENSI Trimble, avec qui j'ai eu le plaisir d'échanger pendant le projet TerraNumerica, et qui a amené, lors de la soutenance, le point de vue et l'expertise d'un industriel confirmé.

Je témoigne aussi de ma vive reconnaissance aux membres du centre de robotique : les directeurs respectifs Claude Laurgeau et Arnaud de La Fortelle, à tous mes collègues et aux enseignants chercheurs qui ont apporté leurs conseils et soutiens durant la période de ma thèse, aux assistants de direction, Christine et Christophe, qui ont toujours résolu mes problèmes administratifs avec le sourire et la bonne humeur. Je souhaite faire un clin d'œil à nos techniciens, David avec sa philosophie inégalée et à Jacky l'altermondialiste voyageur, avec qui j'ai beaucoup apprécié les différentes campagnes d'acquisitions.

Enfin, parmi mes collègues je remercie tous particulièrement l'équipe MMS : J-E «l'humaniste», Hyun-Jea «it's OK», Keerthi «Mr. hypermarket le champion du rafting». Je tiens à remercier également les poissons de l'aquarium Jean-Raoul «l'intègre» et petite sœur «l'or».

Je voudrais exprimer ma reconnaissance à Safwan, à Samer et à Nicolas qui ont été toujours à mes cotés aux moments de doutes ainsi que les plus grands moments de joie.

Je remercie Nicolas Loménie, enseignant chercheur au SIP de l'Université René Descartes, pour ses conseils et son écoute, et ce depuis l'année de mon Master.

Merci à Laure, Fawzi, Antoine, Raoul, Nicolas, Joël, Alexis, Jean-Emmanuel, Jean-Gabriel, Fatin, Gwennaël : pour le travail de relecture qu'ils ont réalisé à un moment ou à un autre, que ce soit pour ma thèse ou pour mes publications.

Je voudrais exprimer ma gratitude à mon père, qui m'a donné le goût pour la recherche, et sans qui bien sûr je ne serais pas ce que je suis, à ma mère qui a été toujours ma première source d'inspiration, à mes sœurs Fatma et Meriem et mon frère Iyadh qui malgré la distance qui nous séparait, étaient toujours dans mon cœur (unis comme toujours). Je fait un clin d'œil pour mon beau frère Karim (mon deuxième frère) et un gros bisou pour mes neveux Ahmed et Aymen.

Je voudrais témoigner de ma reconnaissance à mon oncle Mohamed qui a été toujours derrière moi pour arriver à ce grade. Un remerciement pour le soutien que j'ai eu des familles Ridene et Larnaout.

Ça sera ingrat d'oublier mes amis de TunAlliance, une association chère à mon cœur, une deuxième famille pour moi, qui a été le refuge de stabilité à ma vie extra-thèse. Vraiment un grand Merci.

Merci aux amis qui m'ont accompagné pendant cette période longue et difficile, merci pour leur écoute, leur soutien ainsi que leurs patience, parmi ceux-la je cite : Zouheir, Sami, Synda, Mehdi, Moez, Montasar, Emine, Haythem, Ahmed, Ali, Omar, Tarek, Mhamed-Hashem, Aymen, Mohammed.

Une profonde pensée à Raouf et à tonton Fathi !

J'espère que ceux qui ne sont pas cités nominativement me pardonneront, mais je me rends compte aujourd'hui que rédiger des remerciements est un exercice fastidieux et difficile, et qu'il vaudrait mieux remercier les gens de vive voix (chose que j'essaye de faire au mieux ;).

À mes parents, à mon frère et à mes sœurs.

Résumé

Un développement considérable des bases de données cartographiques 3D à différentes échelles s'est produit ces dernières années. Il a été stimulé par de nombreux besoins et soutenu par de véritables progrès technologiques, et par une diversité d'approches en numérisation 3D. Nous considérons dans cette thèse un contexte de production de cartographie numérique basée sur la fusion de données hétérogènes 3D.

Nous intégrons trois types de données : relevés avec laser fixe, relevés avec laser mobile issus d'un Système de Cartographie Mobile (MMS) et un Modèle Numérique de Surface (MNS). Les caractéristiques différentes de ces données muti-sources se traduisent par des incohérences et des déformations. Nous nous focalisons essentiellement sur les erreurs affectant les données du MMS.

Nous décrivons une démarche innovante de correction de relevés laser terrestres en nous basant sur des données externes au système d'acquisition (MNS, *BD TOPO*®. . .). Notre démarche est basée sur un recalage hétérogène de données 3D. Nous proposons trois variantes de recalage rigide de la famille des ICP.

Nous proposons également une nouvelle méthode d'évaluation qualitative du recalage, ayant deux variantes. Celle-ci est basée sur l'extraction et la comparaison de primitives géométriques. Elle a été utilisée pour la comparaison des précisions des algorithmes de recalage développés.

Les résultats expérimentaux issus de nos implémentations montrent des temps raisonnables pour une exploitation sur de grandes bases de données.

Mots-clés : Cartographie Numérique 3D, Systèmes de Cartographie Mobiles, Nuages de Points 3D, MNS, Recalage Hétérogène, ICP, RANSAC, Évaluation Qualitative, Logique Floue.

Abstract

The development of 3D mapping databases is a matter of increasing interest. Databases have recently been developed at different scales (national, European, international) and to meet different needs. Such development has been made possible by the implementation of efficient 3D mapping technologies. The context of this study is related to the production of 3D digital databases.

In this thesis, we perform a fusion of three kinds of 3D data : 3D point clouds from fixe and mobile acquisition and a Digital Surface Model (DSM). We propose a new method of correction of 3D mobile mapping system data, based on registration with external data (DSM, *BD TOPO*®. . .). In this term, we propose new Heterogeneous registration methods applied to solve problems in 3D urban environment representations issued from a Mobile Mapping System. We improve the stability of convergence, the computation time and handle heterogeneous data sets in various scenarios.

We also propose a new method for qualitative evaluation of 3D registration related to the developed algorithms. Two variants of FQ-Evaluation were tested, based on the extraction and the comparison of geometric features.

Experimental results issued from our implementations show a computation time sufficient to the using of large databases.

Keywords : 3D data bases, Mobile Mapping System, 3D point clouds, DSM, Heterogeneous Registration, ICP, RANSAC, Qualitative Evaluation, Fuzzy.

Table des matières

Liste des abréviations **29**

1 Introduction **31**
1.1 Contexte 31
1.1.1 Centre de robotique 31
1.1.2 Projet TerraNumerica 32
1.1.3 Contexte de la thèse 33
1.2 Contributions de la thèse 33
1.3 Plan du document 33
1.3.1 Première partie 34
1.3.2 Seconde partie 34

I Contexte technologique et protocole expérimental **35**

2 Cartographie 3D : état de l'art et approche adoptée **37**
2.1 Introduction 38
2.2 Développement des cartographies 2D/3D 38
2.2.1 Les enjeux et les besoins 38
2.2.2 Les facteurs propulsants 38
2.2.3 Usages de la cartographie 2D/3D 39
2.2.4 Sécurité civile 40
2.2.5 Militaire 41
2.2.6 Tourisme 42
2.2.7 Patrimoine 44
2.2.8 Urbanisme et service de proximité 48
2.2.9 Synthèse des applications 3D et besoins techniques 48
2.3 L'imagerie satellitaire et la photographie aérienne 49
2.3.1 Images Satellitaires 49
2.3.2 Photographies aériennes 49
2.4 Sources de données 3D 51
2.4.1 Modèle Numérique de Surface 51
2.4.2 Les relevés laser 51

2.4.3 La photogrammétrie 59
2.4.4 Le RaDAR 62
2.4.5 Comparaison et synthèse des données 3D 62
2.5 Approches de production de cartographies 3D 64
2.6 La fusion de données 3D hétérogènes 65
2.6.1 Principe et état de l'art 68
2.6.2 Cas d'étude et données traitées 68
2.6.3 Problèmes d'incohérences et solutions proposées 71
2.7 Conclusion 71

3 Les technologies mobiles de cartographie terrestre 73
3.1 Introduction 73
3.2 Technologies mobiles de cartographie terrestre - LBMMT 74
3.2.1 Contexte de développement des LBMMT 74
3.2.2 Domaines d'utilisation des LBMMT 74
3.3 Les MMS embarqués sur véhicules 79
3.3.1 État de l'art 79
3.3.2 Stratégie de développement et coût engendré 83
3.3.3 Synthèse du coût 87
3.4 Conclusion 87

4 Relevés laser mobiles expérimentaux, analyse et amélioration 89
4.1 Introduction 90
4.2 Le système de cartographie mobile *Lara3D* 90
4.3 Détermination expérimentale des erreurs relatives aux MMS 93
4.3.1 Caractérisation des erreurs des capteurs 93
4.3.2 Aspects opérationnels des acquisitions 100
4.4 Axes d'amélioration 103
4.5 Consolidation du nuage de points laser 104
4.5.1 Contexte de l'étude 104
4.5.2 Mise en hauteur du télémètre laser 104
4.5.3 Utilisation de télémètre *muti nappe* 104
4.5.4 Utilisation d'une configuration multi-télémètres 106
4.6 Amélioration du géo-référencement direct 106
4.6.1 Contexte de l'étude 106
4.6.2 État de l'art de la fusion de données 108
4.6.3 Zone d'étude et observation des données de test 108
4.6.4 Approches de fusion développées 110
4.6.5 Résultats de la fusion 112
4.7 Approches de correction basée sur des données externes 113
4.7.1 Contexte 113
4.7.2 Apport des images aériennes 114
4.7.3 Approche proposée basée sur le MNS 114
4.7.4 Apport de la *BD TOPO®* 115

4.8 Configuration optimale d'un MMS et approche de correction proposée . 116
4.9 Conclusion 116

II Co-recalage de relevés hétérogènes, analyse et évaluation des résultats 119

5 État de l'art du recalage 121
5.1 Introduction 121
5.2 Recalage et variantes 121
5.2.1 Domaines d'application des techniques de recalage 122
5.2.2 Classification des méthodes de recalage 122
5.2.3 Synthèse de la littérature du recalage 125
5.2.4 Formulation du traitement du recalage 126
5.3 Recalage rigide 3D 127
5.3.1 État de l'art 127
5.3.2 Étapes de l'algorithme ICP 128
5.3.3 Variantes de l'algorithme ICP 129
5.4 Recalage non rigide 131
5.4.1 Besoin du recalage non rigide 131
5.4.2 État de l'art des modèles non linéaires 132
5.5 Conclusion 134

6 Approches de recalage proposées 135
6.1 Introduction 135
6.2 Algorithmes de base profitant au recalage 135
6.2.1 L'algorithme RANSAC 135
6.2.2 Extraction des traces au sol à partir de données hétérogènes . . . 136
6.3 Méthodes de recalage rigide proposées 139
6.3.1 ICP-SA : recalage ICP avec Seuil Adaptatif 140
6.3.2 R-ICP : recalage ICP avec initialisation via RANSAC 144
6.3.3 HPS-ICP : recalage ICP avec initialisation via segmentation de plans horizontaux 145
6.4 Conclusion 147

7 Correction de relevés laser par recalage hétérogène 149
7.1 Introduction 149
7.2 Scénarios de recalage recensés 150
7.2.1 Présentation des scénarios 150
7.2.2 Présentation des zones de test 150
7.2.3 Considérations générales 152
7.3 Résultats et discussions 152
7.3.1 Recalage de relevés laser mobiles sur MNS 152
7.3.2 Recalage entre relevés laser mobiles 154
7.3.3 Recalage de relevé laser fixe sur MNS 161

7.3.4 Synthèse du résultat de correction obtenu par R-ICP et ICP-SA . 161
7.3.5 Recalage par HPS-ICP 167
7.3.6 Discussion 173
7.4 Conclusion 175

8 Évaluation des recalages 3D effectués 177
8.1 Introduction 177
8.2 Présentation de l'évaluation 3D 178
8.3 Évaluation du recalage : État de l'art 178
8.3.1 Évaluation quantitative 178
8.3.2 Évaluation qualitative : validation 179
8.4 Méthodes proposées 181
8.4.1 Matériel à disposition 181
8.4.2 Validation basée sur les primitives : approche binaire $FBQ - E_b$. 183
8.4.3 Détermination de l'incertitude σ 185
8.4.4 Validation basée sur les primitives : approche floue $FBQ - E_f$ . . 187
8.5 Résultats et discussions 189
8.5.1 Évaluation binaire 189
8.5.2 Évaluation floue 190
8.5.3 Discussion 195
8.6 Limites de l'évaluation proposée 195
8.6.1 Extraction interactive 195
8.6.2 Cas du décalage vertical 195
8.7 Conclusion 196

9 Conclusions et Perspectives 197
9.1 Conclusions 197
9.2 Améliorations 198
9.3 Perspectives 199

Liste des publications 201

A Caractérisation des données et des capteurs 219
A.1 Imagerie satellitaire 219
A.2 Caméra aéroportée 221
A.3 Scanner laser 2D 222
A.4 Scanner laser 3D 223
A.5 Capteurs GPS 225
A.6 Centrales inertielles 226
A.7 Système *Applanix POS-LV* 226

B Géo-référencement **227**
B.1 Systèmes de coordonnées et de projection . . . 227
B.1.1 Surface de référence . . . 227
B.1.2 Systèmes de coordonnées . . . 228
B.1.3 Système de projection . . . 229
B.2 Différents types de géo-référencement . . . 232
B.2.1 Géo-référencement direct . . . 233
B.2.2 Géo-référencement indirect . . . 234

C Acquisitions *Magny-Les-Hameaux* **235**
C.1 Cadre des expérimentations . . . 235
C.1.1 Le métier des géomètres experts . . . 235
C.1.2 Sites d'acquisition . . . 235
C.1.3 Dispositif matériel utilisé . . . 235
C.2 Résultats . . . 237
C.2.1 Résultat de la trajectoire . . . 237
C.2.2 Évaluations réalisées par le cabinet de géomètres . . . 238

D Acquisitions *Paris 5ème* **239**
D.1 Cadre des expérimentations . . . 239
D.2 Détails des acquisitions . . . 239
D.2.1 Planification des itinéraires . . . 239
D.2.2 Configurations matérielle et logicielle . . . 241
D.3 Résultats . . . 243
D.3.1 Résultat global couleur sur la zone . . . 243
D.3.2 Exemple d'échec d'acquisition . . . 243
D.3.3 Exemple de résultat nécessitant une correction non rigide . . . 243
D.3.4 Problème de l'aspect temporel des acquisitions . . . 243
D.4 Remerciements . . . 243

E Acquisitions *INRIA Rocquencourt* **247**
E.1 Cadre des expérimentations . . . 247
E.2 Site d'acquisition . . . 247
E.3 Configuration matérielle et logicielle . . . 247
E.4 Résultat global de l'acquisition . . . 248

F Acquisitions scanner Trimble GX sur Lara3D **249**
F.1 Cadre des expérimentations . . . 249
F.2 Configuration matérielle et logicielle . . . 250
F.2.1 Configuration matérielle . . . 250
F.2.2 Configuration logicielle . . . 250
F.2.3 Calibration du télémètre avec la POS . . . 250
F.3 Résultats des acquisitions . . . 252
F.3.1 Acquisition avec $\theta = 0°$ . . . 252

F.3.2 Acquisition avec θ = 30° 252
F.3.3 Acquisition avec θ = 45° 253
F.3.4 Acquisition avec θ = -30° 253
F.3.5 Acquisition avec θ = -45° 254
F.4 Bilan des acquisitions 254
F.4.1 Orientation de la géométrie des données 254
F.4.2 Couverture des nuages de points 254
F.4.3 Géo-référencement des données 254
F.4.4 Validation de la consolidation 254
F.5 Tests de vibration 256

G Recalage de nuage de points 3D sur ortho-photo 257
G.1 Recalage entre ortho-photo géo référencée et trajectoire de *Lara3D* 257
G.2 Résultat de recalage de nuage de points 3D et ortho-photo 258

H Implémentations algorithmiques 259

Table des figures

1.1 Principaux axes scientifiques et techniques de l'équipe MMS. 31
1.2 Diagramme de décomposition fonctionnelle du projet TerraNumerica. Les parties concernant nos travaux sont encadrées en bleu. 32

2.1 Appareils GPS grand marché dotés d'une cartographie 2D/3D. 38
2.2 Exemple de PDA produit par DELL. 39
2.3 Risques encourus dans les secteurs d'activité de la société civile *(Source des informations : projet TerraNumerica)*. 40
2.4 Formation des officiers pompiers sur le logiciel de simulation d'incendies présentant des interfaces 3D *(Source des illustrations : http ://www.virtual-command.com)*. 41
2.5 Simulateur de navigation pour hélicoptères doté d'une cartographie 3D *(Source des illustrations : http ://www.thalesgroup.com/)*. 41
2.6 *Google Street View* environnement 2D panoramique, simulation de navigation 3D dans la ville *(Source des illustrations : http ://www.maps.google.com)*. 42
2.7 Interface du logiciel SuperTourTravel. Focus sur le *Golden Gate Bridge* à *San Francisco (Source des illustrations : http ://supertour.com)*. 43
2.8 Usage de l'application multimédia mobile *VeasyGuide* pour la visite du domaine de la reine *Marie-Antoinette* au château de *Versailles (Source des illustrations : http ://www.veasymedia.com)*. 43
2.9 Exposition *Femmes Héroïques du Musée de l'Homme* dans *Second Life (Source des illustrations : http ://femmesheroiques.wordpress.com)*. 44
2.10 Exemple d'édifice numérisé en 3D *(Source des illustrations : projet TerraNumerica)*. 45
2.11 Restitution du port de Carthage en 3D *(Source des illustrations : http ://italicaromana.blogspot.com/)*. 45
2.12 Grand Versailles en 3D *(Source des illustrations : http ://www.gvn.chateauversailles.fr)*. 46
2.13 Le domaine de la grande pyramide de *Kheops* en 3D réalisé par *Dassault Système*. Grâce à différentes options interactives, la visite en ligne permet de découvrir les hypothèses des différentes étapes de construction du site *(Source des illustrations : http ://khufu.3ds.com)*. 47

2.14 Étude d'impact de développement urbain (accès, trafic, intégration...). Utilisation de la technologie 3D couplée à des techniques de réalité augmentée *(Source des illustrations : projet TerraNumerica).* 48
2.15 Image satellitaire *FORMASAT-2* de la presqu'île *Mokpo(Corée-du-Sud) (Source des illustrations : http ://www.spotimage.com).* 50
2.16 Photographie aérienne du *Mont Saint-Michel en Normandie (France) (Source des illustrations : http ://www.ign.fr).* 50
2.17 Un MNT obtenu par l'intégration d'un MNS (MNA) et d'une ortho-photo plan, permet la modélisation de l'espace géographique en 3D 52
2.18 Principe de fonctionnement de la télémétrie laser par la *triangulation plane*. 53
2.19 Principe de la télémétrie laser à mesure du temps de vol. 54
2.20 Principe de la télémétrie laser à mesure de différence de phase. 54
2.21 Nuages de points 3D colorés de la pyramide de *Cheops*. Numérisation réalisée avec un télémètre *RIEGL LMSZ420i (Source des illustrations : (Neubauer et al., 2005)).* 56
2.22 Place du *Vendôme* à *Paris 1er*. Combinaisons de plusieurs relevés de laser fixe obtenus par le scanner *Trimble GX (Source des illustrations : projet TerraNumerica).* 56
2.23 (à gauche) Système de cartographie mobile à base de télémétrie laser (*StreetMapper*). (à droite) Résultat de l'acquisition du village de *Halstead* aux *États-Unis (Source des illustrations : http ://www.3dlasermapping.com).* . 57
2.24 Empreinte au sol des trois systèmes laser aéroportés : (à gauche) à balayage transversal basé sur un miroir oscillant ; (au centre) à balayage transversal basé sur un polygone rotatif ; (à droite) à balayage axial basé sur les fibres optiques *(Source des illustrations : (Bretar, 2006)).* 58
2.25 (à gauche) Principe du relevé laser aéroporté. (à droite) Vue d'un Modèle Numérique de Surface MNS (MNA) obtenu avec cette technique *(Source des illustrations : http ://www.merrick.com).* 58
2.26 Principe stéréoscopique en photogrammétrie. 59
2.27 Résultat de Modèle Numérique de Terrain obtenu par des approches photogrammétriques appliquées sur des images aériennes. 61
2.28 Cartographie 3D des façades du mobilier urbain à *Chapel Hill* en *Caroline du nord* au *États-Unis*. Produit par un Système de Cartographie Mobile à base de quatre caméras. La génération de la 3D est basée sur des approches de photogrammétrie *(Source des illustrations : http ://www.cs.unc.edu).* 62
2.29 Modèle Numérique de Surface produit par un système RaDAR aéroporté. *(Source des illustrations : http ://www.cfr.washington.edu).* 63
2.30 *Rue Soufflot Paris 5ème*, grand plan sur le bâtiment numéro 15. (a) Données Scanner fixe *Trimble GX*. (b) Données Stéréopolis. (c) Données MNS. (d) Données *Lara3D (Source des données : projet TerraNumerica).* 66
2.31 Complémentarité de la fusion des données représentées à la figure 2.30. 67

2.32 Données hétérogènes sur la zone du *Panthéon, Paris 5ème*. Illustration du rôle et de l'échelle de représentativité des trois données 3D fusionnées. On part d'une représentation précise (1 à 5 cm) pour les données représentant les bâtiments remarquables. On passe à une résolution moyenne (10 à 20 cm) pour la représentation des rues et on finit par une représentation moins fine (0.5 à 1 m) à l'échelle de la ville. 69
2.33 Diagramme de traitement d'un processus de génération de modèles 3D à partir de données 3D hétérogènes. Malgré le géo-référencement une phase de recalage de données est requise pour garantir la qualité de la phase de fusion et de modélisation 3D. 70
2.34 Illustration des problèmes d'incohérence affectant les données issues du MMS *Lara3D* sur la zone du *Panthéon, Paris 5ème*. 71

3.1 Les compétences ainsi que les domaines principaux impliqués dans l'élaboration et la mise en place d'un Système de Cartographie Mobile. . . . 75
3.2 Le système de cartographie mobile *Stanley*, vainqueur de l'édition 2005 de *DARPA challenge (Source des illustrations : http ://cs.stanford.edu/)*. 77
3.3 *VECTRA MFL* système de cartographie mobile vérifiant les structures des pipelines de gaz et d'huile *(Source des illustrations : http ://www.bjservices.com/)*. 77
3.4 (à gauche) Système de cartographie d'environnement intérieur. (à droite) Système d'aide à la navigation de personne *(Sources des illustrations : http ://berkeley.edu/ et http ://www.osu.edu/)*. 78
3.5 (à gauche) Système de cartographie mobile monté sur un chariot *Swiss trolley*. (à droite) Résultat de la numérisation 3D *(Source des illustrations : http ://www.terra.ch/)*. 78
3.6 Distribution des équipes de recherche travaillant sur les Systèmes de Cartographie Mobiles au niveau mondial. 80
3.7 Stratégies de développement des technologies de cartographie mobile et coût engendré. 83
3.8 (à gauche) Système de positionnement bas coût *MTi-G*. (à droite) Système de positionnement à coût élevé *POS-LV*. 84
3.9 (à gauche) GPS bas de gamme et faible coût *WS5012*. (au centre) *DGPS AG 132* moyen de gamme. (à droite) GPS haut de gamme et à coût élevé *RTK Sagitta*. 84
3.10 Les prix des systèmes de navigation inertiels sont proportionnels à leurs précisions *(Source des illustrations : http ://mms.geomatics.ucalgary.ca/)*. . . . 85
3.11 (à gauche) Télémètre nappe-simple *LD A* de chez *IBEO*. (au centre) Télémètre multi-nappe *LD multilayer* de chez *IBEO*. (à droite) télémètre nappe-simple *LMS 221* de chez *SICK*. 85
3.12 (à gauche) Caméra bas de gamme *Marlin F-046B*. (au centre) Caméra moyen de gamme *AVT Pike F-145C*. (à droite) Caméra haut de gamme *Iconix HEAD-RH1* (supposée utilisée pour *Google Street view*). 86
3.13 (à gauche) Appareil photo 3D. (à droite) Caméra *3D full-HD* de chez *Panasonic*. 86

3.14 Scanner laser 3D *HDL-64E* embarqué sur un véhicule participant au *DARPA grand challenge (Source des illustrations : http ://www.velodyne.com)*. 86

4.1 Diagramme RT-Maps utilisé pour la génération des modèles 3D avec les deux principaux modules de traitement. 91
4.2 (à gauche) Le prototype *Lara3D* avec sa configuration de capteurs de base. (à droite) Résultat de la numérisation 3D de la *Mairie de Paris 5ème*. . 92
4.3 Principe de fonctionnement du laser en balayage vertical. 92
4.4 (à gauche) Système de vision couplée : télémètre laser, Caméra CCD avec objectif œil de poisson (*Fish-Eye*). (à droite) Système de vision couplée : télémètre laser, appareil photo numérique haute définition. 93
4.5 (à gauche) Géométrie favorable des satellites. (à droite) Géométrie non favorable. 94
4.6 Dérives du GPS : signaux non visibles, multi-trajets et perturbations atmosphériques. 94
4.7 Rue *Soufflot, Paris 5ème*. Erreur GPS due à un problème de masquage se traduit par une incohérence affectant les données issues du MMS *Lara3D*. 95
4.8 La portion 1 de la rue *Saint Jacques, Paris 5ème*. Erreur GPS due à un problème de multi-trajets se traduit par une incohérence affectant le nuage de points 3D issues du MMS *Lara3D*. 96
4.9 Acquisition à *Magny-Les-Hameaux*. (a) Erreur de saut GPS due à des perturbations atmosphériques et répercussion sur le nuage de points 3D. (b) Problème de dérive de centrale inertielle qui se traduit par des erreurs sur l'angle de lacet avec répercussion sur le nuage de points 3D. 97
4.10 Recalage rigide par changement de repère entre un nuage de points 3D et une photo aérienne sur la rue *Gay Lussac* à (Paris 5ème). Sur la fin du tronçon (partie encerclée), le résultat est aberrant et la déformation du modèle 3D est claire. Ceci est dû à une dérive de la centrale inertielle couplée à la perte des informations GPS. Une des solutions est la correction du modèle 3D en s'appuyant sur des techniques de recalage non rigide. 98
4.11 Rue Soufflot Paris acquisition avec *Lara3D*. Problème de pénétration du laser par les surfaces en verre dans une acquisition urbaine. 99
4.12 (à gauche) Problème des réflexions mixées (*Mixed Pixels*). (à droite) Problème d'angles d'incidence dans le cas de numérisation des zones de contour *(Illustrations reproduites à partir de (Hebert and Krotkov, 1992) et (Dias et al., 2001))*. 99
4.13 Les textures ne sont pas multi-résolutions : un grand plan sur une primitive particulière est réalisé en géométrie mais la texture ne suit pas. C'est le même effet dans le cas d'une texturation de la même zone avec des distances du point vue variables. 100
4.14 Rue *Gay-Lussac* à *Paris 5ème* : les problèmes d'occultations du laser avec des véhicules en mouvement ou bien garés produisent des trous dans les façades des bâtiments. 101

4.15 Acquisition avec *Lara3D* au Village d'*Étables-sur-Mer* en *Côtes-d'Armor*. Problèmes d'acquisition en boucle : le point de départ ne correspond pas au point d'arrivée. 102
4.16 Acquisition sur une trajectoire non rectiligne. Des erreurs de précision sur le nuage de points résultant peuvent être observées. 103
4.17 Télémètre laser placé à une hauteur de 0.6m. Cette configuration ne permet pas de numériser les « bas-côtés ». 104
4.18 Télémètre laser placé à une hauteur de 3.1m. Cette configuration permet d'effectuer correctement les relevés des « bas-côtés ». 105
4.19 *Lara3D* : (à gauche) V1 avec télémètre à H = 0.6m. (au centre) V2 expérimentale avec télémètre à H = 3.1m. (à droite) Version actuelle avec validation du prototype expérimental de la V2. 105
4.20 (à gauche) Télémètre laser *IBEO multi nappe* utilisé initialement pour la détection d'obstacles. (à droite) Utilisation du télémètre pour la cartographie mobile 3D. 106
4.21 Montage du scanner laser 3D *Trimble GX* sur le véhicule *Lara3D*. 107
4.22 Configuration des six télémètres *Sick LMS 221* sur *Lara3D*. 107
4.23 Circuit d'acquisition du GIAT doté d'une trajectoire de référence tracée par l'intermédiaire d'un GPS-PPK (*Post Processing Kinematic*). Les trois composantes de la chaussée (gauche, droite, centre) sont représentées. . 109
4.24 (à gauche) Configuration des différents capteurs ainsi que les interfaces d'enregistrements. (à droite) Le véhicule « LOLA » utilisé pour l'acquisition avec les différents capteurs embarqués. 109
4.25 Illustration du résultat d'acquisition des trois GPS (A12, AG123, Sagitta) sur le circuit. Nous remarquons une instabilité en Z dans l'intervalle [150-250] des positions enregistrées. 110
4.26 Une approche d'intégration faiblement couplée EKF/UKF. 111
4.27 Intégration GPS/INS/Odométrie (Implémentation des contraintes non holonomes). 111
4.28 Illustration du comportement du filtrage EKF intégrant les données de la centrale inertielle et du GPS A12. Résultat de la localisation sur le parcours global. Nous remarquons un comportement positif dans les zones présentant une courbure faible et des difficultés dans les zones présentant une courbure forte. 112
4.29 Illustration du comportement du filtrage EKF intégrant les données de la centrale inertielle et du GPS A12 ainsi que l'information de l'odométrie. Nous remarquons un comportement positif dans les parcours présentant une courbure faible ainsi que les zones à courbure forte, les erreurs du GPS en Z ont été lissées par le filtrage. 113
4.30 Superposition des données 3D de *Lara3D* avec des images 2D de *Google Earth* via l'application *CAORTO (Source des illustrations : (Bargeton, 2009))*. 114

4.31 Simulation d'un recalage en deux sous-étapes sur un ensemble de données composé de trois tronçons issus de *relevés laser fixe ou mobile* (P1,P2,P3) et un MNS. En observant les recouvrements entre (P1,P2,P3) P1 est considéré comme tronçon d'intérêt. La première sous-étape de recalage consiste à trouver la transformation *T1* résultante du recalage P1/MNS, nous obtenons un tronçon de référence intermédiaire P1ref. La deuxième sous-étape est de déterminer les transformations *T2* et *T3* à partir des recalages respectifs (P2/P1ref) et (P3/P1ref). 115
4.32 *BD TOPO®* incluant bâtiments et axes centraux des routes. 116
4.33 Diagramme présentant notre démarche globale pour la correction des éventuelles déformations pouvant affecter les *relevés par laser mobile*. . . . 117

5.1 Différents types de transformation en 2D. 124
5.2 Niveaux d'interaction selon la sensibilité du contexte du recalage. 124
5.3 Représentation des étapes du calcul itératif (ICP). 127
5.4 Recalage non rigide entre une surface et un contour 3D utilisant les *Cubic B-Spline (Source des illustrations : (Akca, 2007))*. 133

6.1 Méthodes adoptées pour l'extraction de plans horizontaux à partir de données 3D et 2.5D. 137
6.2 Algorithme de segmentation par profil. 138
6.3 Principe de la récupération de la trace au sol des façades. 138
6.4 (à gauche) Problèmes causés par des bruits locaux dans les nuages de points et répercussion sur la détection des traces au sol. (à droite) Illustration de ce cas d'erreur causé par un passage de bus lors de la numérisation de bibliothèque *Sainte-Geneviève Paris 5ème* (Bus 84). 139
6.5 Technique de rejet réussie localement mais biaisée globalement, selon le seuil utilisé. Cas de recalage utilisant un seuil statique : le recalage peut échouer en utilisant un seuil faible. Un seuil élevé est coûteux en temps de calcul. La solution est d'utiliser un seuil adaptatif, initialement élevé, qui diminue au fur et à mesure des itérations. 140
6.6 Représentation en 2D : (à gauche) Distance point à point (P-to-P). (à droite) Distance point à plan tangent ou à surface (P-to-S). 141
6.7 Apport de la primitive de la couleur dans le recalage hétérogène 3D. (à gauche) Cas de conflit de recalage dû à l'utilisation de la distance euclidienne uniquement. (à droite) L'ajout de la primitive de la couleur est déterminante pour réussir un recalage correct. 142
6.8 Elimination des duplications de mise en correspondance. Ceci est réalisé par l'enregistrement dans un tampon mémoire d'une liste des plus proches voisins (p.p.v) pour chaque point mis en correspondance. 143
6.9 Notre implantation d'ICP-SA (ICP avec seuil adaptatif th_{ad}). L'algorithme est précédé par des pré-traitements permettant de restreindre l'espace de recherche en se focalisant sur la zone de recouvrement et de réduire le bruit sur les données brutes. 144

6.10 Algorithme ICP précédé par une phase d'initialisation par RANSAC. . . 145
6.11 Détermination des trois degrés de liberté selon le plan (X,Y) et la rotation autour de l'axe des Z. Avec HP(Plan Horizontale) et RLM (Relevé Laser Mobile). 146
6.12 Détermination du quatrième degré de liberté selon l'axe des Z. Avec HP(Plan Horizontale) et RLM (Relevé Laser Mobile). 147
6.13 Algorithme ICP précédé par une phase d'initialisation basée sur la segmentation et la mise en correspondance des plans horizontaux (représentant la voirie). 148

7.1 Zone du *Panthéon, Paris 5ème* : répartition sur le MNS en 2.5D des différents tronçons acquis par *Lara3D* et par scanner fixe. 150
7.2 Zone de l'*INRIA Rocquencourt*. Répartition sur une image aérienne des différents tronçons acquis par *Lara3D*. 151
7.3 Zone de test dans *Paris 5ème* autour du *Panthéon*, données MNS en noir, données scanner fixe en vert clair et les données des relevés laser mobiles sont dans les couleurs illustrées sur la figure 7.1. (à gauche) Illustration des données géo-référencées en entrée : nous observons des décalages en 3D. (à droite) Résultat final du recalage des trois types de données de la zone de test (combinaison des meilleurs résultats de ICP-SA et R-ICP). . 153
7.4 Rue Soufflot dans la zone de *Paris 5ème*. Illustration des différentes étapes de pré-traitement et de recalage automatique via ICP-SA des données laser mobile de *Lara3D* sur le MNS. 155
7.5 Comportement de l'algorithme ICP-SA dans le cas du recalage sur la rue *Soufflot* (P2/MNS). Utilisation de la ditance P-to-P et P-to-S. 156
7.6 Cas de recalage de données sur la rue *Soufflot* P2/MNS. Comportement de l'erreur moyenne avec les algorithmes ICP-SA et R-ICP. L'initialisation de R-ICP (de 7.01->2.45(m)) influe fortement sur le comportement de l'algorithme et le ramène à la convergence après 33 itérations. 156
7.7 Tour du *Panthéon, Paris 5ème*. Cas de recalage de données *Lara3D/Lara3D* présentant un recouvrement partiel. (en haut) Problèmes d'offset et de décalage en 3D avant le recalage. (en bas) Résultat après l'application du recalage automatique avec ICP-SA utilisant la distance P-to-S. 157
7.8 Cas du recalage du couple P3/P4. Illustration du comportement de l'algorithme du recalage ICP-SA en termes de convergence. Utilisation des distances P-to-P et P-to-S. 158
7.9 Rue *Soufflot* dans la zone de *Paris 5ème* P1/P2. Cas de recalage de données *Lara3D/Lara3D* présentant un recouvrement en extrémités. (à gauche) Problèmes d'offset et de décalage en 3D avant le recalage. (à droite) Résultat après l'application du recalage automatique avec ICP-SA utilisant la distance P-to-S. 159
7.10 Cas de recalage du couple P1/P2. Illustration du comportement de l'algorithme du recalage en termes de convergence. Utilisation de ICP-SA avec les distances P-to-P et P-to-S. 159

7.11 Zone *INRIA* couple T2/T1. Cas de recalage présentant un recouvrement total de données issues de relevés laser mobile. (à gauche) Avant le recalage. (à droite) Après le recalage via ICP-SA. 160
7.12 Cas du recalage du couple T2/T1. Illustration du comportement de l'algorithme du recalage en termes de convergence. Utilisation de ICP-SA avec les deux distances P-to-P et P-to-S. 161
7.13 Illustration des différents pré-traitements et du recalage via ICP-SA de la façade du *Panthéon* dans *Paris 5ème* produite par scanner fixe au sol, sur la zone extraite du MNS. 162
7.14 Comportement de l'algorithme ICP-SA dans le cas du recalage sur le *Panthéon* (Scanner-GX/MNS). 163
7.15 Façade du *Panthéon*, cas de recalage de données scanner fixe GX sur MNS. Evolution de l'erreur moyenne avec les algorithmes ICP-SA et R-ICP. Nous remarquons l'influence de l'initialisation par RANSAC au lancement de l'algorithme. 163
7.16 Zone de test *Paris 5ème* autour du *Panthéon*. Données MNS en noir, les différents tronçons des relevés laser mobiles distingués par les couleurs correspondant à celles dans la figure 7.1. (en haut) Illustration des données géo-référencées en entrée : nous observons des décalages en 3D. (en bas) Résultat final du recalage utilisant le MNS comme référence (combinaison des meilleurs résultats de ICP-SA et R-ICP). 164
7.17 Zone de test *Paris 5ème* autour du *Panthéon*. Observation des relevés laser mobiles : (à gauche) avant la correction, (à droite) après correction. Grand plan sur le carrefour de la place *Edmond Rostand*. 165
7.18 Segmentation par RANSAC sur le *Bvd Saint Michel*. La segmentation est effectuée par morceau sur la partition traitée (Portion 1 et 2). Application d'une étape de seuillage après la segmentation. 168
7.19 Relevés *Lara3D* sur une portion de la rue *Soufflot* à *Paris 5ème*. Représentation de la trace au sol extraite par l'algorithme de segmentation par profils. 169
7.20 Détection de la trace au sol des données MNS : filtrage *DoG*. 170
7.21 *Bvd Saint Michel*, *Paris 5ème*. Superposition des données 3D de MNS (noir) et les relevés *Lara3D* (bleu). Données segmentées par filtrage *DoG* et par approche profils. Superposition des résultats de segmentation avec l'observation du décalage 3D. 171
7.22 *Bvd Saint Michel*, *Paris 5ème* : (à gauche) Données avant recalage. (à droite) Résultat du recalage via HPS-ICP. 172
7.23 Comportement de l'algorithme R-ICP et HPS-ICP dans le cas du recalage sur la rue *Soufflot*. 174
7.24 Configuration difficile pour HPS-ICP. Le passage de la représentation 3D à celle en 2D génère une perte d'informations, ce qui est contraignant pour le bon fonctionnement de HPS-ICP. 174

8.1 Niveaux d'interaction selon la sensibilité du contexte de l'évaluation du recalage. 179
8.2 Carte de référence 2D à une échelle (1/200e) sur la zone du *Panthéon, Paris 5ème*. 182
8.3 Principe général des approches de validation proposées. 183
8.4 Processus d'extraction de « lampadaires » sur la rue *Soufflot* et devant la façade de la mairie, *Paris 5ème*. 184
8.5 Méthode d'évaluation basée sur l'extraction de primitives de référence. Nous faisons l'extraction des positions des « lampadaires » L_i dans les données résultant du recalage avec ICP-SA et R-ICP, puis comparons ces positions avec les positions de référence $LRef_i$ selon la formule $E_b(.)$. **(a)** $E_b(L(R-ICP))$ = true et $E_b(L(ICP-SA))$ = false. **(b)** $E_b(L(R-ICP))$ = true et $E_b(L(ICP-SA))$ = false. **(c)** $E_b(L(R-ICP))$ = false and $E_b(L(ICP-SA))$= false. 186
8.6 (à gauche) Fonction de sélection binaire. (à droite) Fonction de sélection floue exprimée selon le nombre de profil (N.P) représentatif du lampadaire à la sélection. 187
8.7 Illustration de l'incertitude de la sélection du point représentant le « lampadaire ». **(a)** Cas d'une sélection sur base d'un seul profil : φ=0. **(b)** Cas d'une sélection sur base de deux profils : φ=0.25. **(c)** Cas d'une sélection sur base de trois profils : φ=0.5. **(d)** Cas d'une sélection sur base de quatre profils : φ=0.75. **(e)** Cas d'une sélection sur base de cinq profils : φ=1. . . 188
8.8 Toute la zone d'acquisition. Score retourné par $FBQ-E_F$ pour les résultats de R-ICP et ICP-R. Cas de configuration A-. 191
8.9 Toute la zone. Score retourné par $FBQ-E_F$ pour les résultats de R-ICP et ICP-R. Cas de configuration A. 192
8.10 Toute la zone. Score retourné par $FBQ-E_F$ pour les résultats de R-ICP et ICP-R. Cas de configuration A+. 192
8.11 Rue *Soufflot*. Score retourné par $FBQ-E_F$ pour les résultats de R-ICP, HPS-ICP et ICP-SA. Cas de configuration A-. 193
8.12 Rue *Soufflot*. Score retourné par $FBQ-E_F$ pour les résultats de R-ICP, HPS-ICP et ICP-SA. Cas de configuration A. 194
8.13 Rue *Soufflot*. Score retourné par $FBQ-E_F$ pour les résultats de R-ICP, HPS-ICP et ICP-SA. Cas de configuration A+. 194
8.14 Limite principale de la méthode $FBQ-E_.$. Dans ce cas de figure, $FBQ-E_.$ retourne le même score d'évaluation des deux résultats de recalage malgré le décalage visible en Z. 196

A.1 Lorsqu'un satellite est en orbite autour de la Terre, le capteur « observe » une certaine partie de la surface. Cette surface porte le nom de *couloir-couvert* ou *fauchée (Source des illustrations : http ://www.ccrs.nrcan.gc.ca)*. . . 219
A.2 Diagramme comparatif des images satellitaires les plus connues. 220
A.3 Spécifications des résolutions et des précisions du système *POS-LV (Source des illustrations : http ://www.applanix.com)*. 226

B.1 (a)Coordonnées cartésiennes . (b) Coordonnées géographiques. 228
B.2 (a) Projection conique. (b) Projetion cylindrique. 230
B.3 Etendue de la projection Lambert sur la france, la zone I est centrée sur ϕ_0 = 55 gr, la zone II sur 52 gr, la zone III sur 49 grad et la zone IV (pour la Corse) sur 46,85 gr. 231
B.4 Etendue mondiale de la projection UTM 232
B.5 Répartition mondiale des différents systèmes de projection *(Source des illustrations : http ://www.ign.fr/)*. 233
B.6 (à gauche) Géo-référencement indirect. (à droite) Géo-référencement direct *(Source des illustrations : http ://dprg.geomatics.ucalgary.ca)*. 234

C.1 Ortho-photo géo-référencée de l'itinéraire de la zone urbaine dans la ville de *Magny-les-Hameaux* : 1er itinéraire. Les positions en Lambert I : début (581 368.93, 113 711.63, 163.51) et fin (581 708.78 113 743.32 163.72). Longueur itinéraire 310m. 236
C.2 Ortho-photo géo-référencée de l'itinéraire de la zone rurale dans la ville de *Magny-les-Hameaux* : 2ème itinéraire. Les positions en Lambert I : début (5579 812.47, 115 941.23, 153.03) et fin (579 407.28, 115 815.35, 159.54). Longueur itinéraire 450m. 236
C.3 Disposition des différents capteurs utilisés pendant les campagnes d'acquisition. 237
C.4 (à gauche) Trajectoire résultante du premier itinéraire. (à droite) Trajectoire résultante du deuxième itinéraire. 237
C.5 Résultat d'un recalage entre l'itinéraire d'origine et la trajectoire obtenue lors de la première campagne d'acquisition sur le premier parcours de la ville de *Magny-les-Hameaux*. 238

D.1 Tronçons d'acquisition de la zone de test à *Paris 5ème*. 240
D.2 Différents angles de vue sur les résultats d'acquisition autour du *Panthéon* après application du recalage. 244
D.3 Anomalies difficilement corrigibles sur la rue de *l'Abbé-de-l'Épée*. 245
D.4 Rue *Clotaire*. Cas de déformation nécessitant une correction par recalage non rigide. 245
D.5 Rue *Soufflot* portion 1. (En haut à gauche) résultat d'acquisition (Octobre 2008). (en haut à droite) résultat d'acquisition (Mars 2009). (En bas) Gros plan sur la différence remarquée dans les géométries des deux tronçons résultants des deux acquisitions, celle-ci étant dû à des travaux de la voie publique effectués courant Mars 2009. 246

E.1 *INRIA Rocquencourt*. (en haut) les trois tronçons acquis. (en bas) Résultat global de l'acquisition après l'application du traitement du recalage. . . 248

F.1 Zone d'acquisition sur la rue *Soufflot* à *Paris 5ème*. 249
F.2 Montage du scanner laser 3D *Trimble GX* sur le véhicule *Lara3D*. 250
F.3 Nouveau composant de géo-référencement, spécifique au laser *Trimble GX*.251

F.4 la transformation sur le plan (X,Y) entre le repère GX et le repère R_{INS} de l'intégration INS/GPS. 251
F.5 Façade droite de la rue *Soufflot* à *Paris 5ème* par *Lara3D* avec *scanner GX* et $\theta = 0°$. 252
F.6 Façade droite de la rue *Soufflot* à *Paris 5ème* par *Lara3D* avec *scanner GX* et $\theta = 30°$. 252
F.7 Façade droite de la rue *Soufflot* à *Paris 5ème* par *Lara3D* avec *scanner GX* et $\theta = 45°$. 253
F.8 Façade droite de la rue *Soufflot* à *Paris 5ème* par *Lara3D* avec *scanner GX* et $\theta = -30°$. 253
F.9 Façade droite de la rue *Soufflot* à *Paris 5ème* par *Lara3D* avec *scanner GX* et $\theta = -45°$. 254
F.10 (En noir) les données obtenues avec $\theta = 0°$ et (en vert) $\theta = 30°$. Nous remarquons la complémentarité de ces deux données, cela est observable au niveau des façades perpendiculaires à la trajectoire du véhicule. Aussi nous observons un offset lié au géo-référencement des deux nuages de points. 255
F.11 (En noir) les données obtenues avec $\theta = 0°$, (en vert) $\theta = 30°$ et en rouge $\theta = 45°$. Nous remarquons la complémentarité de ces deux données, cela est observable au niveau des façades perpendiculaires à la trajectoire du véhicule. Aussi nous observons des offsets liés au géo référencement des trois nuages de points. 255
F.12 Télémètre laser *Trimble GX* avec accéléromètre. 256

G.1 Ortho-photo géo-référencée par un fichier .tfw 257
G.2 Résultat d'un recalage entre ortho-photo aérienne et nuage de points 3D, pour le premier parcours de la ville de *Magny-les-Hameaux* 258

Liste des abréviations

CCD	Charge Coupled Device
CT	Computed Tomography
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DOP	Dillution Of Precision
EBS	Elastic Body Spline
EDM	Electronic Distance Measuring
EKF	Extended Kalman Filter
$FBQ - E_b$	Feature-Based Quality Evaluation : binary
$FBQ - E_f$	Feature-Based Quality Evaluation : fuzzy
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HPS-ICP	Iterative Closest Point with Horizontal Plans Segmentation
HSV	Hue, Saturation and Value
ICP	Iterative Closest Point
ICP-SA	Iterative Closest Point avec Seuil Adaptatif
IGN	Institut Géographique National
IMARA	Informatique, Mathématiques et Automatique pour la Route Automatisée
IMU	Inertial Measurement Unit
IMVN	Image Multimédia & Vie Numérique
INS	Inertial Navigation System
INRIA	Institut National de Recherche en Informatique et Automatique
ISI	Institut d'Information Scientifique
ITS	Intelligent Transport Systems
K-D Tree	K Dimensional binary search Tree
LBMMT	Land Based Mobile Mapping Technologies
LiDAR	Light Detection And Ranging
LIVIC	Laboratoire sur les Interactions Véhicules-Infrastructure-Conducteurs
LMS	Least Mean Squares
MMS	Mobile Mapping System
MNS	Modèle Numérique de Surface

MNT	Modèle Numérique de Terrain
MQ	Multiquadratique
MR	Magnetic Resonance
M2	Master 2
PDA	Personal Digital Assistant
PET	Positron Emission Tomography
PMR	Personnes à Mobilité Réduite
PND	Personal Navigation Device
PPK	Post Processing Kinematic
p.p.v	plus proche voisin
P-To-P	Distance point à point
P-To-S	Distance point à surface
R-A	Réalité Augmentée
RaDAR	Radio Detection And Ranging
RANSAC	RANdom SAmple Consensus
RGB	Red, Green and Blue
R-ICP	Iterative Closest Point avec Initialisation via RANSAC
RLM	Relevé Laser Mobile
RTK	Real Time Kinematic
RT-Maps	Real Time Multisensor Advanced Prototyping Software
R-V	Réalité Virtuelle
R&D	Recherche et Développement
SARI	Surveillance Automatisée des Routes pour l'Information des conducteurs et des gestionnaires
SIG	Système d'Information Géographique
SLAM	Simultaneous Localization And Mapping
SVD	Singular Value Decomposition
THR	Très Haute Résolution
TLS	Terrestrial Laser System
TPE	Target Point Evaluation
TPS	Thin-Plate Splines
TR	Temps réel
UKF	Unscented Kalman Filter
UTM	Universal Transverse Mercator
ULM	Ultra-Léger Motorisé
VIZIR	Vision Intelligente de Zones et Itinéraires à Risque
WGS-84	World Geodetic System 1984

Chapitre 1

Introduction

Nous présentons dans cette partie le cadre général du travail, son contexte scientifique, les contributions principales de la thèse et le plan du mémoire.

1.1 Contexte

1.1.1 Centre de robotique

Ce travail de thèse a été réalisé au Centre de Robotique CAOR de Mines ParisTech. L'étude a été effectuée au sein de l'équipe « Systèmes de Cartographie Mobiles - MMS [1] ». Les actions principales de recherche entreprises par l'équipe MMS sont résumées sur la figure 1.1.

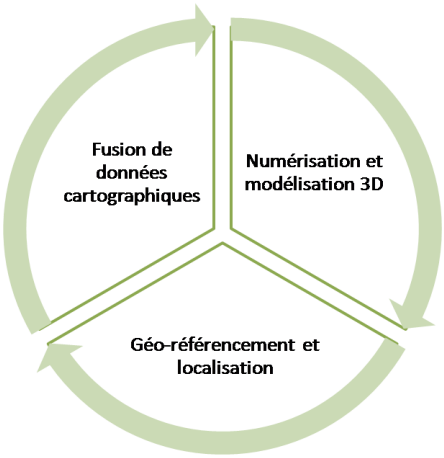


FIGURE 1.1 – Principaux axes scientifiques et techniques de l'équipe MMS.

1. Mobile Mapping System.

1.1.2 Projet TerraNumerica

Notre travail est effectué dans le cadre du projet TerraNumerica, dont le programme s'inscrit dans le pôle de compétitivité *Cap Digital* [2]. Ce dernier traite des aspects Image Multimédia & Vie Numérique (IMVN). Ce groupement est composé d'organismes publics, académiques et de petites, moyennes et grandes entreprises.

Le programme TerraNumerica vise la représentation et la numérisation des territoires et de leurs ressources. Il comprend également la valorisation multimédia de ces informations. Le diagramme 1.2 illustre la décomposition fonctionnelle du projet.

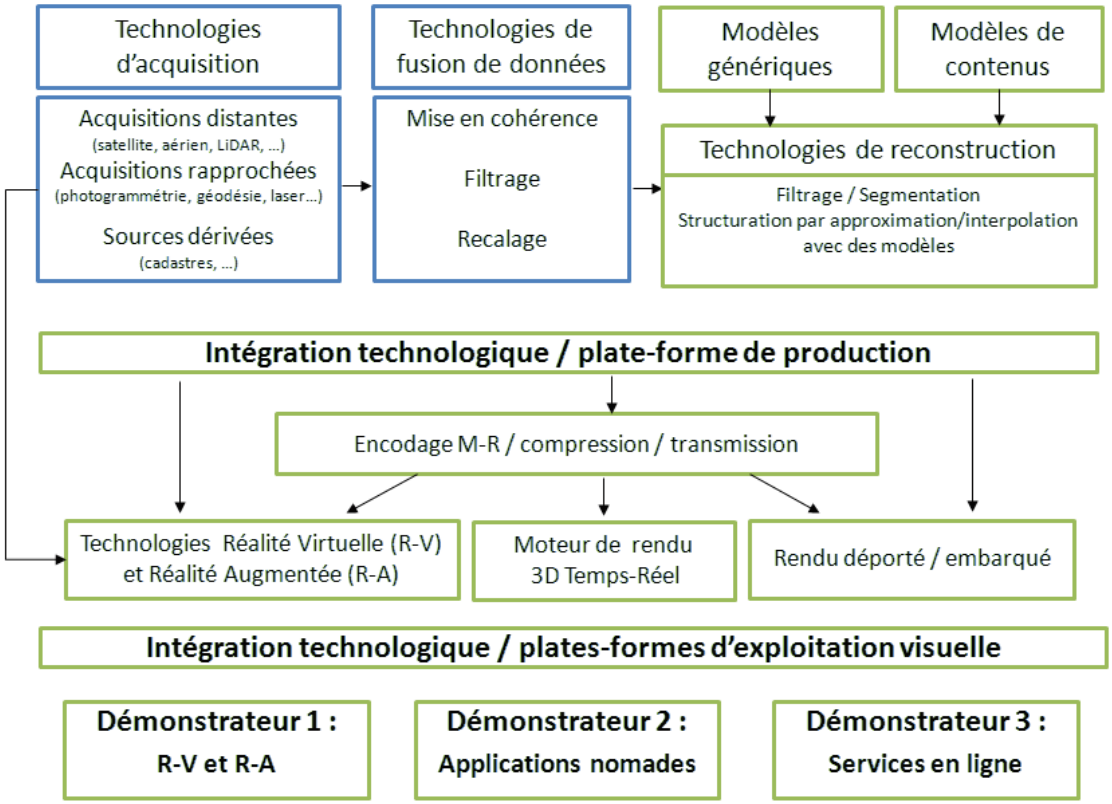


FIGURE 1.2 – Diagramme de décomposition fonctionnelle du projet TerraNumerica. Les parties concernant nos travaux sont encadrées en bleu.

2. http ://www.capdigital.com/

1.1.3 Contexte de la thèse

Nous travaillons dans cette thèse sur les axes technologiques de production de données en traitant deux thématiques principales :

- Acquisition et Numérisation : amélioration de notre plateforme de numérisation mobile terrestre Lara3D en terme de précision, de résolution et de réalisme du modèle 3D produit.
- Recalage et fusion : proposition de solutions algorithmiques pour la mise en cohérence et la fusion de données 3D produites lors de la phase d'acquisition. Le but est de produire une cartographie 3D muti-échelle complète et réaliste.

Ces aspects sont intégrés dans la plate-forme de production (cf. Figure 1.2).

1.2 Contributions de la thèse

Nous proposons dans cette thèse une démarche innovante de correction de données 3D issues de MMS en utilisant des données externes. La réalisation de cette démarche a stimulé les contributions principales de cette thèse :

- La première contribution réside dans notre méthodologie de correction de données de relevés laser mobiles. Nous traçons différents scénarios de recalage opérant sur toute une zone de test et intégrant des données hétérogènes.
- La deuxième contribution est la réalisation de trois variantes de recalage rigide ICP-SA, R-ICP et HPS-ICP pour le traitement du recalage 3D hétérogène.
- La troisième contribution, consiste en l'analyse de l'application des méthodes de recalage proposées sur des jeux de données expérimentales.
- La quatrième contribution est la proposition d'une nouvelle méthode d'évaluation qualitative des algorithmes de recalage basée sur la détection et la comparaison de primitives géométriques.
- Enfin, nous proposons un travail expérimental de spécification des erreurs des Systèmes de Cartographie Mobiles ainsi que les solutions adéquates à chaque type d'anomalie. Grâce à l'analyse de cette phase expérimentale nous proposons un système de cartographie mobile moyen de gamme optimisé.

Ces contributions ont fait l'objet des publications suivantes (Ridene and Goulette, 2008, 2009b; Ridene and Nashashibi, 2009; Ridene and Goulette, 2009e,c,a,d, 2010b,a) (cf. fin du document).

1.3 Plan du document

Nous avons structuré le manuscrit en deux parties principales :

1.3.1 Première partie

Dans cette partie, nous exposons le contexte technologique et le protocole expérimental ; nous explicitons la démarche scientifique innovante de notre travail. Cette partie est composée des chapitres 2, 3 et 4.

Dans le chapitre 2, nous commençons par un état de l'art des cartographies 3D. Nous faisons une synthèse des usages ainsi que des différentes sources de production de données cartographiques. Nous exposons par la suite la méthode de production de cartographie 3D adoptée dans le cadre de notre étude : la fusion de données 3D hétérogènes.

Dans le chapitre 3 nous mettons l'accent sur les technologies mobiles de cartographie terrestre, technologies centrales dans le cadre de notre étude. Nous faisons un état de l'art détaillé ainsi qu'un comparatif en terme de coût.

Enfin dans le chapitre 4, nous exposons nos contributions expérimentales pour la réalisation des relevés avec laser mobile et nous faisons une analyse des erreurs affectant ces systèmes. Nous détaillons nos choix matériels pour la réalisation d'une plateforme optimale. Une étude de fusion de données pour l'amélioration de la localisation par filtrage de *Kalman* est exposée. Cette analyse nous permet de proposer une démarche innovante de correction de relevés laser mobile par le biais de données externes au système de cartographie mobile.

1.3.2 Seconde partie

Cette partie consiste en la mise en œuvre de la démarche innovante proposée dans la première partie du manuscrit, elle inclue les contributions algorithmiques, les résultats et les évaluations. Cette partie est composée des chapitres 5, 6, 7 et 8.

Dans le chapitre 5, une synthèse détaillée de l'état de l'art du recalage rigide et non rigide est présentée.

Dans le chapitre 6, nous mettons l'accent sur les algorithmes de segmentation et de recalage proposés dans le cadre de notre étude.

Nous exposons les scénarios ainsi que les zones de test dans le chapitre 7. Nous détaillons aussi une analyse des résultats de recalage des algorithmes exposés dans le chapitre précédent.

Enfin, dans le chapitre 8, nous abordons une problématique de recherche ouverte : la validation des traitements 3D. Nous faisons un état de l'art des méthodes d'évaluation de recalage et nous exposons une nouvelle méthode d'évaluation basée sur les primitives géométriques. Cette méthode a été utilisée pour la validation des variantes de recalage appliquées pour la réalisation de notre approche de correction innovante.

Première partie

Contexte technologique et protocole expérimental

Chapitre 2

Cartographie 3D : état de l'art et approche adoptée

Sommaire

2.1 Introduction **38**
2.2 Développement des cartographies 2D/3D **38**
2.2.1 Les enjeux et les besoins 38
2.2.2 Les facteurs propulsants 38
2.2.3 Usages de la cartographie 2D/3D 39
2.2.4 Sécurité civile 40
2.2.5 Militaire 41
2.2.6 Tourisme 42
2.2.7 Patrimoine 44
2.2.8 Urbanisme et service de proximité 48
2.2.9 Synthèse des applications 3D et besoins techniques 48
2.3 L'imagerie satellitaire et la photographie aérienne **49**
2.3.1 Images Satellitaires 49
2.3.2 Photographies aériennes 49
2.4 Sources de données 3D **51**
2.4.1 Modèle Numérique de Surface 51
2.4.2 Les relevés laser 51
2.4.3 La photogrammétrie 59
2.4.4 Le RaDAR 62
2.4.5 Comparaison et synthèse des données 3D 62
2.5 Approches de production de cartographies 3D **64**
2.6 La fusion de données 3D hétérogènes **65**
2.6.1 Principe et état de l'art 68
2.6.2 Cas d'étude et données traitées 68
2.6.3 Problèmes d'incohérences et solutions proposées 71
2.7 Conclusion **71**

2.1 Introduction

Un développement considérable des bases de données cartographiques 3D s'est produit ces dernières années, se caractérisant par des portées à différentes échelles. Il a été poussé par de nombreux besoins et soutenu par de véritables progrès technologiques. Nous présentons dans cette section les besoins et les enjeux qui ont poussé le développement des bases de données cartographiques 2D/3D. Par la suite, nous exposons les différents types de données utilisés pour la production d'une cartographie. Pour finir, nous mettons l'accent sur le principe de la fusion de représentations 3D hétérogènes et son application pour notre cas d'étude.

2.2 Développement des cartographies 2D/3D

2.2.1 Les enjeux et les besoins

La production des cartographies 2D/3D a été stimulée par de véritables enjeux et besoins sur différents plans. Sur le plan économique, des investissements sont réalisés dans diverses applications utilisant la cartographie : téléphonie mobile, la navigation basée sur GNSS[1] (par exemple le GPS[2] cf. Figure 2.1) ... D'autre part, sur le plan politique, ces bases de données présentent une technologie centrale pour des besoins gouvernementaux de sécurité, de sûreté et de défense. Enfin, sur le plan culturel, la 3D présente un outil fiable pour la conservation et la valorisation du patrimoine.

FIGURE 2.1 – Appareils GPS grand marché dotés d'une cartographie 2D/3D.

2.2.2 Les facteurs propulsants

Trois facteurs technologiques principaux ont propulsé le développement en masse des bases de données cartographiques 2D/3D :

- La progression faite au niveau des architectures des ordinateurs : des processeurs et des mémoires très puissants couplés à des cartes graphiques plus adaptées aux différents logiciels de cartographie, permettant l'accès au grand public à ce type d'applications.

1. Global Navigation Satellite System.
2. Global Positioning System.

– La multiplication des moyens d'imagerie et une amélioration de leurs qualités : **(1)** un grand pas en avant a été accompli dans l'imagerie satellitaire lié directement aux progrès de la télédétection [3], **(2)** développement de la technologie LiDAR [4], **(3)** maturité des méthodes d'acquisition et de calibration des images stéréoscopiques.
– Le progrès important réalisé dans le domaine de la localisation : principalement l'accroissement de la production des systèmes GPS après la désactivation de la dégradation du signal (la disponibilité sélective) le 1er mai 2000 (Clinton, 2000), dont la cartographie a généré un marché à part entière (Campagne, 2006).

Ces facteurs ont dicté un choix technologique déterminant dans la société de services et de l'information du 21*ime* siècle, à savoir l'évolution du multimédia vers du multiservice : *PND* [5], *PDA* [6](cf. Figure 2.2). Pour les lecteurs intéressés, un état de l'art des guides mobiles est présenté par Kray et Baus dans (Kray and Baus, 2003).

FIGURE 2.2 – Exemple de PDA produit par DELL.

2.2.3 Usages de la cartographie 2D/3D

Les enjeux et les besoins assistés par les facteurs technologiques (cf. section 2.2.2) sont à l'origine de la création de plusieurs applications utilisant la cartographie 3D. Dans ce qui suit, nous illustrons les principaux domaines dans lesquels la cartographie 3D a suscité de l'intérêt et a joué un rôle déterminant.

3. Télédétection ou (*Remote Sensing*) « Ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci. » (CITTA, 1988).
4. Light Detection And Ranging.
5. Assistant de Navigation Personnel (*Personal Navigation Device*) est un système de navigation transportable, pour voiture, moto ou piéton.
6. Assistant Numérique Personnel (*Personal Digital Assistant*) aussi appelé organiseur, est un ordinateur de poche composé d'un processeur, d'une mémoire vive, d'un écran tactile et de fonctionnalités réseau dans un boîtier compact d'extrêmement petite taille.

2.2.4 Sécurité civile

L'évolution socio-économique de la plupart des sociétés actuelles met en évidence un accroissement très significatif des risques liés à des situations de crise. Le diagramme 2.3 dénombre les risques encourus dans les secteurs d'activité de la société civile.

FIGURE 2.3 – Risques encourus dans les secteurs d'activité de la société civile *(Source des informations : projet TerraNumerica)*.

Les enjeux humain et économique sont ceux de la maîtrise de la sécurité civile via le développement d'outils qui augmentent l'efficacité des actions des organismes et des services responsables (sapeurs-pompiers, force de l'ordre, sécurité civile, services médicaux, collectivités locales ...). L'un des outils les plus utiles et adéquats pour faciliter cette tâche est la cartographie 2D/3D. Dans ce sens, le développement d'outils 3D vers un but sécuritaire est en pleine expansion. Les commandes de gestion de crise sont l'exemple d'outils performants basés sur la technique de simulation dans des environnements 3D virtuels. Ils sont utilisés pour la planification des plans d'actions en cas de crise ainsi que pour la formation et le recyclage des connaissances pour les professionnels de terrains. La figure 2.4 présente l'interface d'un logiciel de simulation d'incendie, un des produits de la firme « *Virtual Command* »[7]. Ce produit est utilisé pour la formation des sapeurs pompiers.

Dans le thème *VIZIR*[8] du projet *SARI*[9], l'utilisation d'une modélisation 3D d'itinéraires routiers a permis l'étude de la visibilité en situation de conduite. L'objectif étant la vérification et la correction des signalisations routières pour garantir plus de sécurité au volant. Pour plus de détails concernant cette étude, le lecteur peut se référer aux travaux de Brun et al. dans (Brun et al., 2006).

7. La firme Virtual Command, basée en Grande Bretagne, fournit des systèmes de gestion de crise (Emergency Command System) basés sur les techniques de la réalité virtuelle. http ://www.virtualcommand.com

8. Vision Intelligente de Zones et Itinéraires à Risque.

9. Surveillance Automatisée des Routes pour l'Information des conducteurs et des gestionnaires est une action concertée du projet PREDIT

FIGURE 2.4 – Formation des officiers pompiers sur le logiciel de simulation d'incendies présentant des interfaces 3D *(Source des illustrations : http ://www.virtualcommand.com).*

2.2.5 Militaire

Les militaires investissent des sommes considérables pour les applications liées à la simulation 3D et la réalité virtuelle. Ils réalisent des études permettant de développer des outils fiables et efficaces pour des objectifs opérationnels (formation et entraînement, préparation de missions, aide à la décision en temps réel . . .). La figure 2.5 illustre un simulateur d'environnements de navigation pour les hélicoptères, doté d'une cartographie 3D (produit du groupe Thalès [10]).

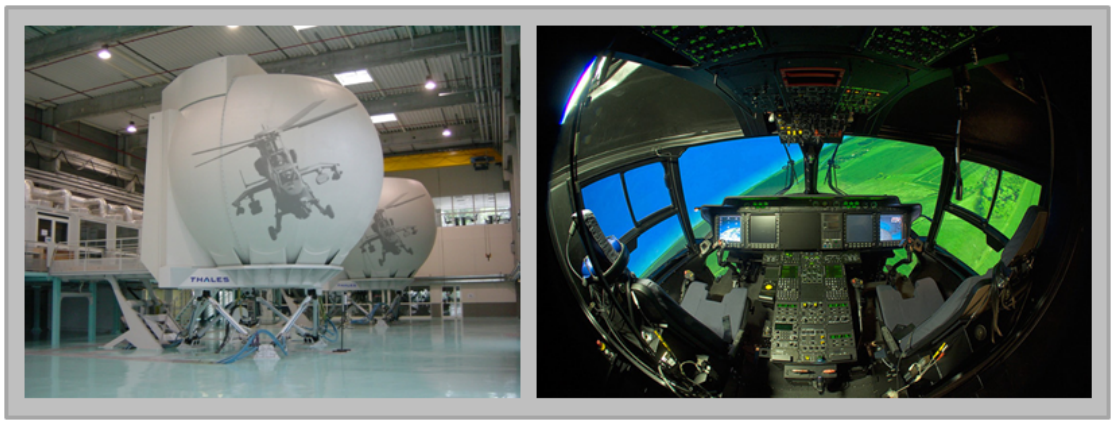


FIGURE 2.5 – Simulateur de navigation pour hélicoptères doté d'une cartographie 3D *(Source des illustrations : http ://www.thalesgroup.com/).*

10. http ://www.thalesgroup.com/

2.2.6 Tourisme

La cartographie 2D/3D s'impose dans le secteur du tourisme, en particulier avec le fort développement du marché du E-tourisme [11]. Elle est devenue un moyen incontournable de présentation et de valorisation de l'information touristique.

Pour la planification de visites touristiques, plusieurs applications dotées d'une cartographie 2D/3D sont offertes au grand public. La firme « *Google* » a produit la technologie *Google Street View* (cf. Figure 2.6) qui permet l'immersion d'une personne au niveau du sol pour la visite virtuelle d'une ville. *SuperTourTravel* présente un outil de cartographie (2D, vidéo 2D panoramique) de dix villes américaines. Des services additionnels de sélection d'hôtels ou d'adresses touristiques y sont proposés (cf. Figure 2.7).

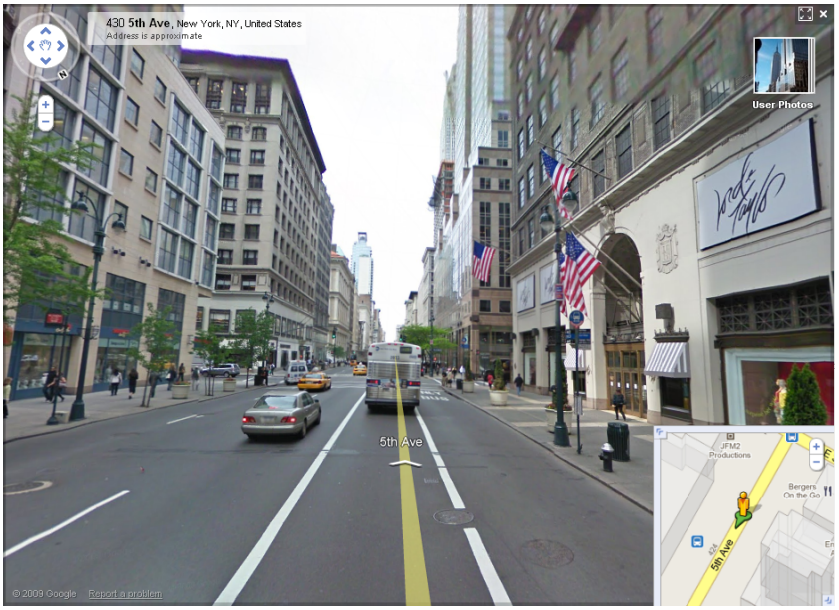


FIGURE 2.6 – *Google Street View* environnement 2D panoramique, simulation de navigation 3D dans la ville *(Source des illustrations : http ://www.maps.google.com).*

Des applications de navigation sur *PDA* dotées d'une cartographie (2D/3D) géo-référencée et liée à du contenu (textuel, informationnel), servent comme guides touristiques pour des sites particuliers. « *Veasymedia* » [12] a produit l'application multimédia mobile *VeasyGuide*. Faisant suite aux audio-guides, il s'agit d'un outil d'aide à la visite interactive et ludique sur *PDA* géo-référencé. La figure 2.8 illustre un exemple d'usage du *VeasyGuide* pour la visite du domaine de la reine *Marie-Antoinette* au château de *Versailles*.

11. Le E-tourisme est la combinaison de trois facteurs, le business (management, marketing, finance), le IT/IS (système d'informations, technologies de communications) et le tourisme.
12. http ://www.veasymedia.com

FIGURE 2.7 – Interface du logiciel SuperTourTravel. Focus sur le *Golden Gate Bridge* à *San Francisco (Source des illustrations : http ://supertour.com).*

FIGURE 2.8 – Usage de l'application multimédia mobile *VeasyGuide* pour la visite du domaine de la reine *Marie-Antoinette* au château de *Versailles (Source des illustrations : http ://www.veasymedia.com).*

La cartographie 3D intervient aussi dans des applications de tourisme virtuel. Dans *Second Life* [13], la visite virtuelle de musées est possible : nous pouvons prendre pour exemple l'exposition *Femmes Héroïques du Musée de l'Homme* [14] (cf. Figure 2.9). La particularité de ces visites réside dans le fait qu'elles soient accompagnées de la présence d'avatars [15], visiteurs avec qui il est possible d'échanger et d'interagir.

FIGURE 2.9 – Exposition *Femmes Héroïques du Musée de l'Homme* dans *Second Life (Source des illustrations : http ://femmesheroiques.wordpress.com).*

2.2.7 Patrimoine

La numérisation 3D est mise au service du patrimoine pour la conservation, la restitution et la valorisation de ce patrimoine.

La conservation s'effectue par la numérisation des édifices. Le modèle numérique est un clone ultra précis de l'édifice réel et éventuellement de son environnement (cf. Figure 2.10). Ce modèle numérique sert de référence dans les cas de perte totale ou partielle de l'édifice original (catastrophes naturelles, vol. . .).

La restitution des environnements et des monuments disparus a pour objectif de leur redonner vie. Cette opération permet entre autres de comprendre et analyser des phénomènes historiques et d'étudier des civilisations antérieures. Par exemple, la restitution du port de Carthage en 3D (cf. Figure 2.11) a permis de donner une explication à la puissance maritime des carthaginois dans le bassin de la méditerranée à la période des deux premières guerres puniques [16].

13. http ://secondlife.com
14. http ://femmesheroiques.wordpress.com
15. En Inde, nom des incarnations d'un dieu de *Vishnou*. Dans un contexte *Second life* c'est la représentation virtuelle d'un acteur réel.
16. Première guerre punique 264-241 av. J.-C. Deuxième guerre punique 218-202 av. J.-C.

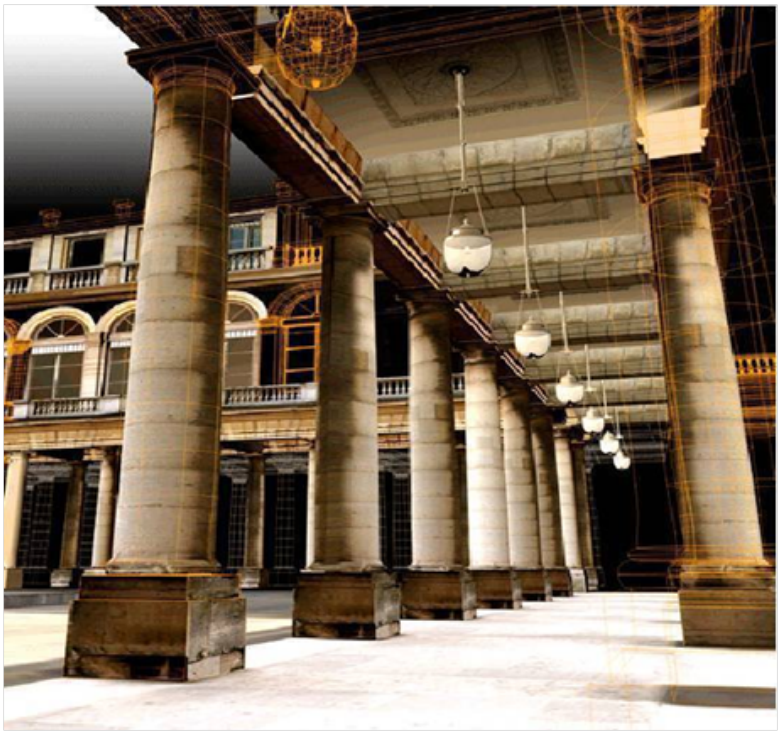


FIGURE 2.10 – Exemple d'édifice numérisé en 3D *(Source des illustrations : projet TerraNumerica).*

FIGURE 2.11 – Restitution du port de Carthage en 3D *(Source des illustrations : http ://italicaromana.blogspot.com/).*

Rassemblés dans une même base d'informations, ces édifices numériques représentent un système d'informations patrimoniales servant d'outil de base pour la conservation, la restitution, la restauration et la gestion des bâtiments. La figure 2.12 représente le système d'informations patrimoniales du grand Versailles en 3D.

Figure 2.12 – Grand Versailles en 3D *(Source des illustrations : http ://www.gvn.chateauversailles.fr).*

La valorisation du patrimoine est réalisée grâce à des outils interactifs d'accès à l'information patrimoniale par le grand public. Cette cartographie peut être accessible par le biais de supports variés (en ligne, dispositifs muséographiques immersifs, PDA. . .). Ces outils facilitent la compréhension des visiteurs. Mais ils ont également un rôle académique. Ce rôle se traduit par la transmission du savoir dans le cadre des formations à distance destinées à des futurs spécialistes ou professionnels du patrimoine. À titre d'exemple, les hypothèses de la construction de la grande pyramide de *Kheops*, élaborées par l'architecte *Jean-Pierre Houdin*, ont été modélisées en 3D avec l'outil « *Virtools* » [17] de « *Dassault Systemes* » [18]. Cette modélisation 3D est accessible en ligne (cf. Figure 2.13).

17. http ://www.virtools.com
18. http ://www.3ds.com

FIGURE 2.13 – Le domaine de la grande pyramide de *Kheops* en 3D réalisé par *Dassault Système*. Grâce à différentes options interactives, la visite en ligne permet de découvrir les hypothèses des différentes étapes de construction du site *(Source des illustrations : http ://khufu.3ds.com).*

2.2.8 Urbanisme et service de proximité

Les collectivités territoriales sont de plus en plus intéressées par la réalisation de maquettes 3D interactives. Ces maquettes sont utilisées dans le cadre de projets liés à l'urbanisme ou l'aménagement du territoire (restauration urbaine, projet de ville, aménagement routier. . .). Ces maquettes interviennent principalement lors des phases d'études (intégration et visualisation des différentes options). À titre d'illustration, nous citons l'usage de la cartographie 3D pour la simulation d'éclairage dans le but de l'amélioration de la sécurité routière.

Ce type de cartographie a aussi le rôle d'outil de communication autour des choix stratégiques, notamment lorsqu'une concertation avec la population est requise pour la réalisation de projets tracés par les dirigeants. Ces interfaces opérationnelles sont souvent couplées à des outils de sondage pour le grand public. La figure 2.14 illustre deux cas utilisant la 3D dans l'étude d'impact de développement urbain. L'utilisation de la cartographie pour l'aide au diagnostic des ré-aménagements au profit des PMR (Personnes à Mobilité Réduite) a été traitée dans (Ridene and Goulette, 2010a).

FIGURE 2.14 – Étude d'impact de développement urbain (accès, trafic, intégration. . .). Utilisation de la technologie 3D couplée à des techniques de réalité augmentée *(Source des illustrations : projet TerraNumerica).*

2.2.9 Synthèse des applications 3D et besoins techniques

Bien que les applications présentées en amont de cette section utilisent toutes la cartographie 2D/3D, les caractéristiques en termes de qualité, précision et nature de la donnée 3D employée diffèrent d'une application à une autre. Avant de se pencher sur les approches adoptées pour la production des cartographies 3D, nous mettons le point dans ce qui suit sur l'un des facteurs qui a propulsé le développement des

bases de données cartographiques à savoir : l'avancée spectaculaire des technologies d'acquisition. Nous détaillons les techniques principales d'acquisition 2D/3D servant de matériel élémentaire dans la production d'une cartographie 3D.

2.3 L'imagerie satellitaire et la photographie aérienne

De la photographie aérienne à la télédétection spatiale par satellite, les méthodes d'acquisition d'images de la terre se sont multipliées durant ces trois dernières décennies, donnant lieu à une grande diversité d'images. Ces données sont devenues, grâce à une politique mondiale d'ouverture et de partage d'informations, accessibles à d'autres communautés scientifiques que le domaine initial de la défense. Les photographies aériennes peuvent être traitées informatiquement et rendues parfaitement superposables à une carte. Les éventuelles déformations (aléas du vol, optique, courbure terrestre) sont corrigées. Les photos sont ainsi « redressées » en un plan rigoureusement horizontal et géo-référencées : on parle alors de « ortho-photo ».

2.3.1 Images Satellitaires

Les images satellitaires ont été un des centres d'intérêt de la communauté de traitement d'images et de la cartographie 2D/3D en particulier. En effet, la diversité des satellites imageurs et la richesse de leurs caractéristiques (multi-canaux, multi-chromatiques...), ont été très bien exploitées pour la construction de cartographies 2D/3D. L'utilisation de techniques de traitement automatique d'images et des approches multi-échelles (Winter, 1997) a donné lieu à des résultats remarquables, non seulement réussis sur le plan scientifique mais aussi très appréciés par le grand public. Une illustration d'image satellitaire est présentée sur la figure 2.15. L'annexe A inclut plus de détails sur les images satellitaires les plus utilisées.

2.3.2 Photographies aériennes

Comme toutes les techniques d'acquisition d'images aériennes, la télédétection aérienne légère associe un appareil de prise de vue à un moyen de transport, nommé vecteur aérien. Parmi ces moyens, on peut citer les avions légers monomoteurs, les hélicoptères, les ULM [19], les drones (avions sans pilotes), les ballons captifs, les dirigeables et montgolfières. Les appareils de prises de vue forment deux groupes : d'une part les appareils optiques, d'autre part les appareils numériques. La photographie aérienne permet d'obtenir des images de grande précision (inférieure au mètre), ce qui rend leurs utilisations complémentaires avec les images satellitaires dans la construction des cartographies 2D/3D. Une illustration de photographie aérienne est présentée sur la figure 2.16. Pour plus de détails au sujet des caméras aéroportées, le lecteur peut consulter l'annexe A.2.

19. Ultra-Léger Motorisé.

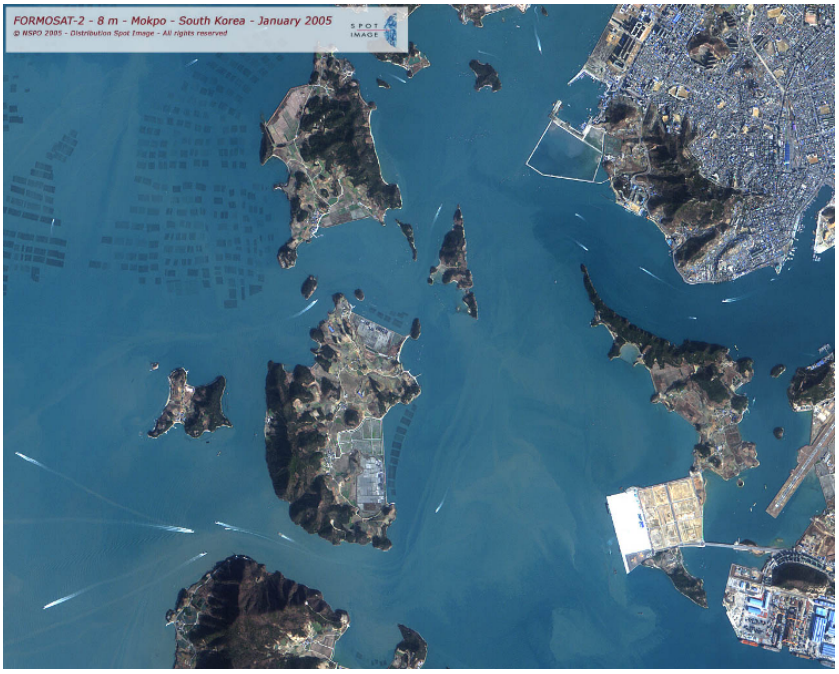


FIGURE 2.15 – Image satellitaire *FORMASAT-2* de la presqu'île *Mokpo(Corée-du-Sud) (Source des illustrations : http ://www.spotimage.com).*

FIGURE 2.16 – Photographie aérienne du *Mont Saint-Michel en Normandie (France) (Source des illustrations : http ://www.ign.fr).*

2.4 Sources de données 3D

2.4.1 Modèle Numérique de Surface

Un Modèle Numérique de Surface (MNS) ou d'altitude (MNA) est une représentation de la surface apparente d'une scène numérisée à la verticale. La disponibilité des MNS (MNA) est primordiale pour l'exécution des corrections géométriques et radiométriques du terrain sur des images de télédétection. Les techniques de cartographie actuelles sont rarement effectuées en considérant seulement les questions planimétriques. La demande pour les MNS (MNA) s'accroît avec l'utilisation plus commune des SIG [20] et avec l'amélioration de l'information extraite des données d'altitude. Les données d'altitude (produites par photogrammétrie ou par lasergrammétrie) sont aussi utilisées dans la production de cartes topographiques [21]. Ces données, intégrées à des images satellitaires ou des ortho-photos sont aussi utilisées pour produire des modèles numériques de terrain (MNT). Une illustration d'un MNT obtenu par l'intégration d'un MNS (MNA) et d'une ortho-photo aérienne, est présentée sur la figure 2.17. Nous exposons dans la suite de ce chapitre les techniques de production de données d'altitudes MNS.

2.4.2 Les relevés laser

L'utilisation des données laser présente un intérêt majeur dans le contexte de la cartographie 3D. Les avantages principaux de cette technologie sont :

- La rapidité : la numérisation de quelques millions de points d'une scène se fait en quelques minutes. Ce qui rend la tâche d'acquisition moins lourde en terme de temps et de coût.
- Pas de contrainte temporelle : l'acquisition peut s'effectuer de nuit ou de jour (le laser est un imageur actif). Ceci donne plus de liberté pour la planification des acquisitions dans des zones urbaines très mouvementées au cours de la journée. En plus, d'un point de vue pratique, ceci engendre moins de contraintes pour l'obtention de permissions de vol pour des acquisitions aéroportées.
- Visualisation directe du résultat : ce qui rend la vérification du résultat visuel immédiate. Une acquisition qui génère un résultat erroné peut donc être refaite immédiatement. Ce schéma s'applique surtout aux acquisitions terrestres (cf. section 3).

20. Système d'Information Géographique : « ensemble organisé de matériels informatiques, de logiciels, de données géographiques et de personnel capable de saisir, stocker, mettre à jour, manipuler, analyser et présenter toutes formes d'informations géographiquement référencées » (de Blomac, 1994).

21. La topographie a pour objet la description et la représentation locale des formes de la surface de la Terre. Le topographe procède donc à des relevés, soit en mesurant directement sur le terrain (mesures d'angles, de distances, ou GPS), soit en exploitant les propriétés métriques d'images aériennes stéréoscopiques du sol (photogrammétrie).

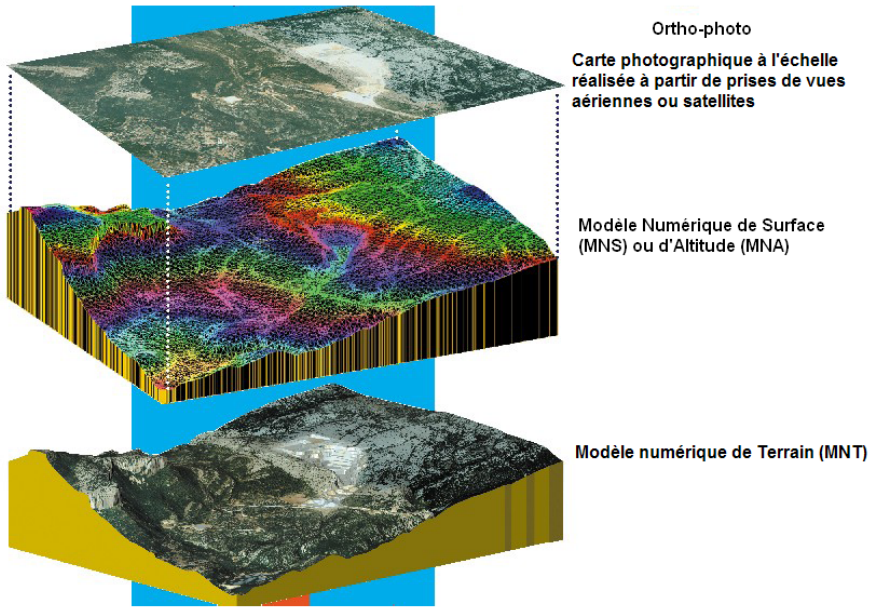


FIGURE 2.17 – Un MNT obtenu par l'intégration d'un MNS (MNA) et d'une ortho-photo plan, permet la modélisation de l'espace géographique en 3D

Principe du LiDAR

Le terme LiDAR représente le nom des capteurs laser. Rappelons que le laser est une technique optique active de mesure. Pour plus de détails sur le fondement physique du LiDAR se référer à (Prenel, 1999). Nous nous focalisons dans ce qui suit sur les capteurs de mesure de distance *(Range Finder)* appelés télémètres ou scanners laser.

Les télémètres laser de numérisation 3D se divisent essentiellement en trois modes de fonctionnement : la *triangulation plane*, la *mesure du temps de vol* et la *mesure de différence de phase*. Cette classification est détaillée dans (Goulette and Laurgeau, 2002).

La triangulation plane

Le principe consiste à transformer l'information de distance longitudinale en un décalage transversal du faisceau rétro-diffusé. La mesure s'effectue alors en repérant cette position à l'aide d'un détecteur multi-points de type barrette CCD [22], barrette de photo-diodes ou une photo-diode sensible à la position. L'erreur varie avec la distance au carré.

Une source laser émet un faisceau collimaté ou focalisé à une distance intermédiaire dans la gamme de mesure du télémètre et selon une ouverture angulaire λ. Un système optique de réception refocalise le spot laser rétro-diffusé par la cible sur une barrette

22. Charge Coupled Device.

CCD. Le récepteur CCD capte le point laser et fournit une estimation de son orientation σ selon son point de vue. La position du point laser est donnée par :

$$d = b.(\frac{1}{tan(\lambda)} + \frac{1}{tan(\sigma)})$$

La figure 2.18 présente le principe de fonctionnement des télémètres laser par *la triangulation plane*.

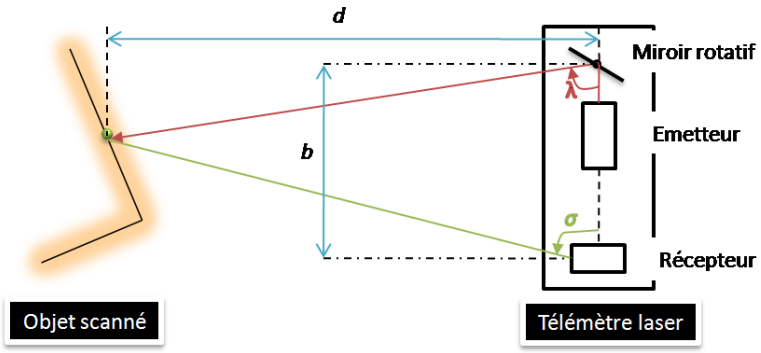


FIGURE 2.18 – Principe de fonctionnement de la télémétrie laser par la *triangulation plane*.

La mesure du temps de vol

Le télémètre laser opère par l'émission d'un faisceau (tir laser) et le déclenchement d'une horloge. Ce faisceau intercepté par le premier objet est partiellement rétro-diffusé. À la réception de la réponse, l'horloge est arrêtée. La célérité de l'onde du tir laser étant connue à l'avance, le temps écoulé entre l'émission et la réception permet de connaître la distance à laquelle le faisceau a été réfléchi.

Considérons d la distance parcourue par un tir laser ayant une vitesse c (célérité de la lumière). Nous avons la relation suivante :

$$d = c\,\frac{t}{2}$$

Ce qui donne pour un intervalle de temps Δt :

$$\Delta d = c\,\frac{\Delta t}{2}$$

Pour un intervalle minimum de capacité de mesure de temps du télémètre laser Δt_{min}, on peut faire correspondre une résolution minimale en distance Δd_{min} :

$$\Delta d_{min} = c\,\frac{\Delta t_{min}}{2}$$

La figure 2.19 présente le principe de fonctionnement des télémètres laser à *mesure du temps de vol*. Nous utilisons ce type de télémètre dans le cadre de notre étude car ils sont bien adaptés aux grandes distances (cf. section 3).

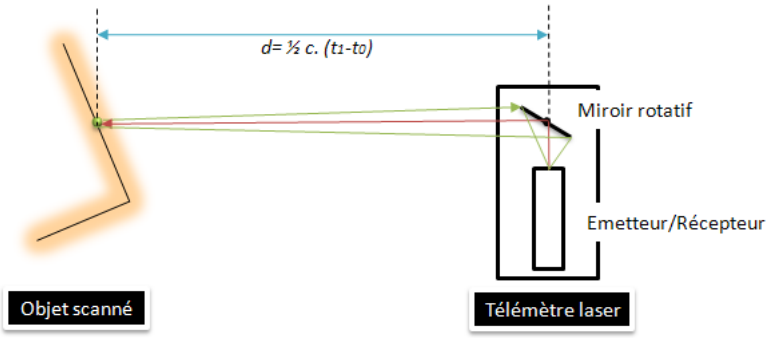


FIGURE 2.19 – Principe de la télémétrie laser à mesure du temps de vol.

La mesure de différence de phase

Le principe de ce télémètre est celle de la mesure de la différence de phase par un phasemètre numérique. Cette mesure s'opère sur les deux signaux émis et réfléchi pour la détermination de la distance. Le télémètre laser fonctionne par la modulation de l'intensité du faisceau laser à une fréquence relativement basse. La figure 2.20 présente le principe de fonctionnement des télémètres laser à *mesure de différence de phase*. La mesure de distance est déduite à partir du déphasage selon l'équation suivante :

$$2D_{df} = \frac{\Delta\Phi}{2\pi}.\frac{c}{f} + N_o.\frac{c}{f}$$

Avec $\Delta\Phi$ et f respectivement la différence de phase et la fréquence de modulation.

Pour déduire D_{df} il faut également déterminer le nombre de longueurs d'onde N_o de la distance parcourue.

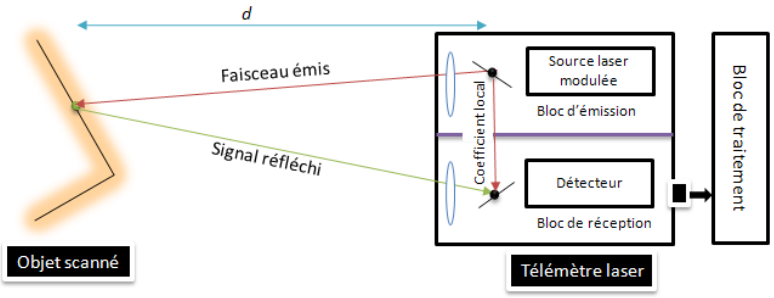


FIGURE 2.20 – Principe de la télémétrie laser à mesure de différence de phase.

Portée et précision des lasers

La portée du laser correspond à la distance maximale pour atteindre correctement une cible par le faisceau émis. Cette caractéristique est fournie par le constructeur. En

pratique elle est approximative puisqu'elle dépend de plusieurs paramètres (les conditions météorologiques, l'objet numérisé, la géométrie de la scène : angle d'incidence. . .).

La quantification de la précision d'un laser n'est guère une tâche simple, car l'acquisition est dépendante d'un grand nombre de facteurs et de contraintes. Néanmoins, en comparant les trois techniques laser déjà mentionnées plus haut, nous constatons que pour les télémètres laser à triangulation plane sont plus précis que ceux à *mesure du temps de vol* mais d'une portée inférieure. Grâce à la simultanéité de la mesure et de l'émission des ondes, les scanners à différence de phase sont plus rapides que ceux à temps de vol (Pfeifer and Briese, 2007) mais d'une portée fortement limitée. Ceci n'étant pas dû au bilan de liaison, mais par le lever d'ambiguïté, parce que par principe N_0 est égal à zéro.

Plusieurs études de quantification de précision de laser ont été menées. Boehler et al. ont présenté dans (Boehler et al., 2003) une étude comparative en terme de précision de treize scanners terrestres. Baltsavias dans (Baltsavias, 1999a) s'est intéressée à la question de la précision des scanners aéroportés. Ackermann dans (Ackermann, 1999) s'est focalisé sur l'étude de la précision des mesures laser dans un cadre topographique. Reshetyuk dans le cadre de sa thèse (Reshetyuk, 2006) a exposé un large état de l'art autour des scanners laser terrestres en explicitant les sources d'erreur, la calibration et les résolutions ainsi que les précisions de ces types de scanner.

Le LiDAR terrestre

Les télémètres laser terrestres se caractérisent par des tailles et des portées relativement petites en comparaison avec leurs homologues aéroportés. La précision est centimétrique et la vitesse de numérisation assez élevée (Ullrich et al., 2002). En cartographie il y a deux méthodes de numérisation utilisant les télémètres laser terrestres.

Les relevés avec laser fixe, le télémètre placé sur un trépied fixé au sol, balaye la scène à numériser autour d'un ou deux axes selon son ouverture angulaire. La figure 2.21 présente un exemple de résultat d'acquisition par scanner fixe au sol. Le télémètre peut aussi être embarqué sur un véhicule terrestre spécialisé appelé « Système de Cartographie mobile » (MMS), dont un état de l'art sera présenté à la section 3. Dans ce cas, ces systèmes opèrent par un mode d'acquisition statique (*Stop and Go*).

La combinaison de *relevés avec laser fixe* issus de plusieurs points de vue, permet par la fusion d'obtenir une représentation 3D globale de la scène (cf. Figure 2.22). Le résultat obtenu par ces types de relevés est beaucoup plus rapide et moins fastidieux, comparé aux résultats obtenus par des méthodes classiques appliquées par les géomètres experts en utilisant les *tachéomètres* [23] ou les stations totales. Dans le cadre du projet TerraNumerica il a été estimé que l'acquisition d'un bloc de dix bâtiments en architecture *Haussmanienne* en utilisant les méthodes classiques prendra dix jours, contre deux jours pour les *relevés avec laser fixe*.

23. Un tachéomètre est un instrument topographique comportant les trois fonctions de : goniomètre (mesure des angles), clisimètre (mesure des pentes), stadimètre (mesure des distances). (Source : http ://-seig.ensg.ign.fr/)

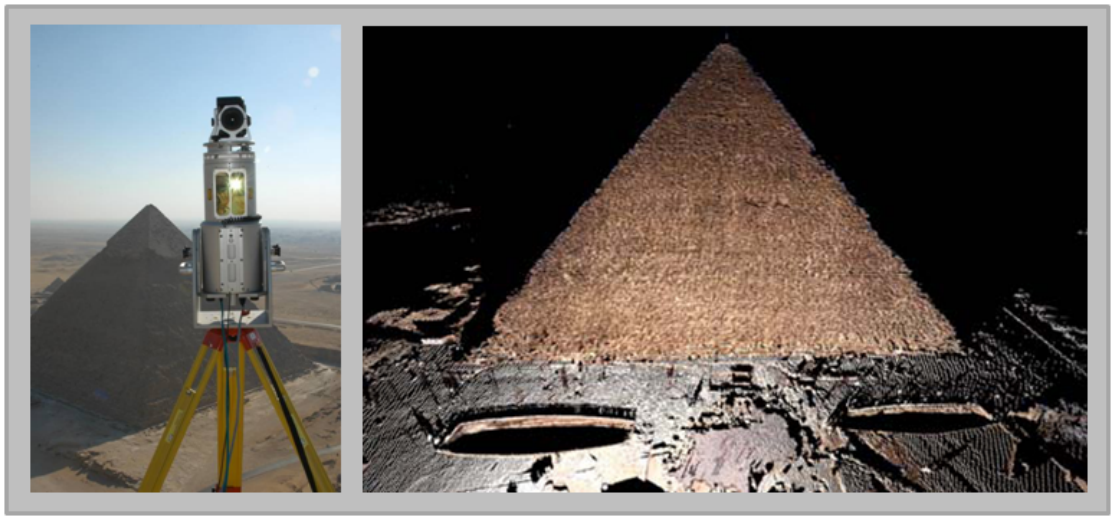


FIGURE 2.21 – Nuages de points 3D colorés de la pyramide de *Cheops*. Numérisation réalisée avec un télémètre *RIEGL LMSZ420i (Source des illustrations : (Neubauer et al., 2005))*.

Cette approche de combinaison de *relevés avec laser fixe* nécessite l'utilisation de techniques de recalage entre les différents points de vue, dans le but de mettre en cohérence les différents relevés (initialement géo-référencés par rapport à la position relative du scanner) dans le même repère. Cette technique est plus adaptée aux édifices remarquables (façades de monuments) nécessitant une précision et une densité conséquentes. Toutefois, pour effectuer une numérisation urbaine à grande échelle, il est plus adapté d'utiliser des techniques de *relevés avec laser mobile*.

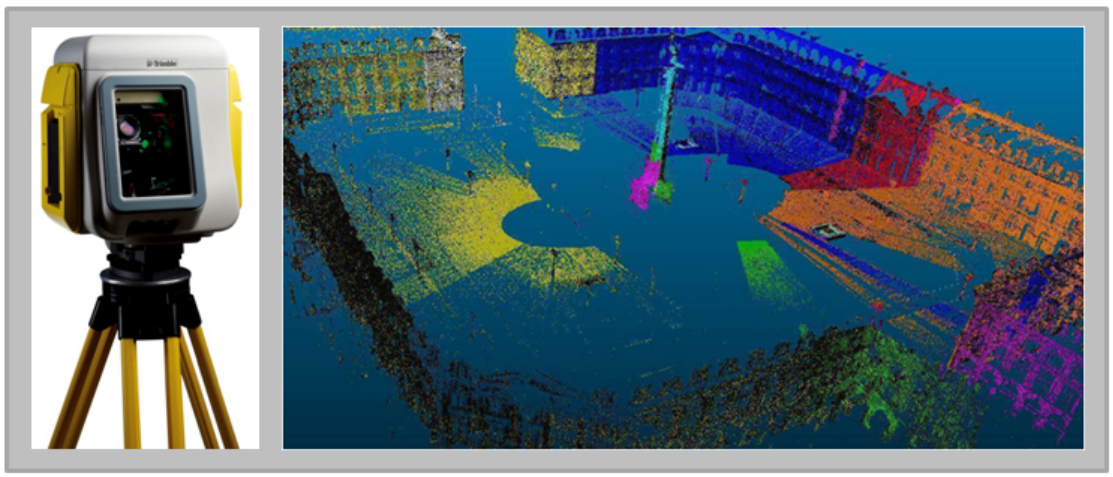


FIGURE 2.22 – Place du *Vendôme* à *Paris 1er*. Combinaisons de plusieurs relevés de laser fixe obtenus par le scanner *Trimble GX (Source des illustrations : projet TerraNumerica).*

Les relevés avec laser mobile, le télémètre est embarqué sur un MMS (cf. section 3). À la différence des *relevés avec laser fixe*, les acquisitions sont effectuées en mode dynamique (*On Drive*). Différentes configurations de balayage laser peuvent êtres utilisées. La combinaison de plusieurs télémètres laser est envisageable. Les résultats d'acquisitions mobiles présentent généralement des rendus moins denses mais plus étendus. Des problèmes de cohérence dûs aux erreurs affectant la chaîne de la fusion de données multicapteurs (laser(s), GPS, INS [24]. . .) peuvent affecter les résultats finaux et donc leurs précisions, généralement inférieures à celles des *relevés avec laser fixe* (cf. section 3). La figure 2.23 présente des acquisitions terrestres réalisées grâce à un MMS basé sur la télémétrie laser.

FIGURE 2.23 – (à gauche) Système de cartographie mobile à base de télémétrie laser (*StreetMapper*). (à droite) Résultat de l'acquisition du village de *Halstead* aux *États-Unis (Source des illustrations : http ://www.3dlasermapping.com).*

Le LiDAR aéroporté

A l'instar des caméras de prises de vue d'images aériennes ou satellitaires, les LiDAR aéroportés sont embarqués sur des vecteurs aériens (avion, hélicoptère, drone. . .). Ces systèmes survolent la scène acquise à la verticale. Leurs vitesses sont relativement faibles et constantes. Le système LiDAR balaye de façon continue et de manière transversale (cf. Figure 2.24) ce qui permet de spatialiser la mesure le long d'une bande de largeur (la fauchée). Celle-ci est variable en fonction du système et de l'altitude du vecteur aérien. La fréquence d'acquisition est très rapide. La répartition des points au sol est différente suivant les systèmes. Pour plus de détails sur la technique LiDAR aéroportée et les différents capteurs qui s'y réfèrent le lecteur intéressé peut consulter (Baltsavias, 1999a; Bretar, 2006).

24. Inertial Navigation System.

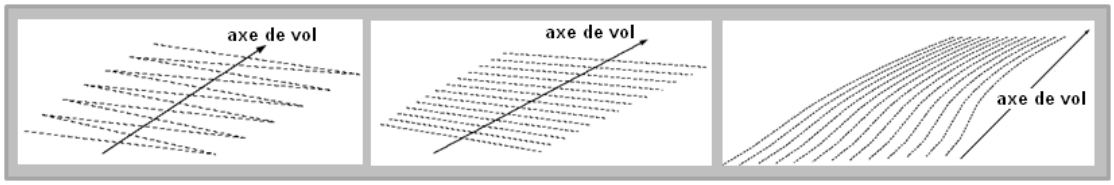


FIGURE 2.24 – Empreinte au sol des trois systèmes laser aéroportés : (à gauche) à balayage transversal basé sur un miroir oscillant ; (au centre) à balayage transversal basé sur un polygone rotatif ; (à droite) à balayage axial basé sur les fibres optiques *(Source des illustrations : (Bretar, 2006)).*

Pour acquérir une zone aussi longue que large, le vecteur doit donc décrire des trajectoires de va-et-vient établies à l'avance (trajectoires dites en hippodrome). Le but est d'assurer un recouvrement optimal entre chaque bande pour ne pas manquer des zones de terrain tout en faisant le minimum d'aller-retours. Le produit de ces acquisitions aériennes sont des MNS (MNA) sous forme 3D. La figure 2.25 illustre le principe des relevés avec un système laser aéroporté. Plusieurs travaux ont été réalisés dans l'objectif de production de MNS (MNA) à partir de données de LiDAR aéroporté parmi lesquels nous pouvons citer : (Kost et al., 1997; Maas, 2001).

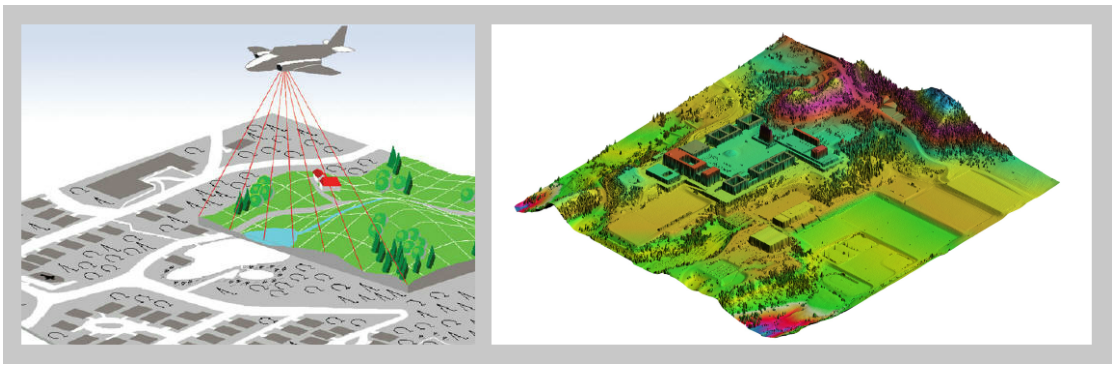


FIGURE 2.25 – (à gauche) Principe du relevé laser aéroporté. (à droite) Vue d'un Modèle Numérique de Surface MNS (MNA) obtenu avec cette technique *(Source des illustrations : http ://www.merrick.com).*

Pour la cartographie 3D, l'un des avantages de cette technique d'acquisition est la grande étendue de sa couverture (échelle d'une ville). Les précisions des modèles sont variables, mais globalement elles sont décimétriques en résolution verticale et horizontale. Le grand inconvénient de ces acquisitions réside dans leur sensibilité aux bruits dont sont entachés les capteurs de localisation (GPS, INS...). Néanmoins, il faut signaler que cette sensibilité est moins importante que celle rencontrée pour les acquisitions avec des MMS terrestres (cf. chapitre 3). Sur le plan pratique, le survol d'une zone stratégique peut se confronter à des difficultés administratives d'obtention de permission de vol.

2.4.3 La photogrammétrie

La photogrammétrie est une technique qui permet d'effectuer des mesures géométriques (spatiales) à partir de photos ou d'autres images numériques. Cette technique étudie également la création même de l'image et sa correction géométrique, notamment pour le calcul d'ortho-photos. Basée sur la stéréoscopie (cf. Figure 2.26), la photogrammétrie permet de trouver la troisième dimension à partir de deux ou plusieurs images du même objet, prises avec des points de vue différents. Il existe deux façons de réaliser les prises de vue stéréoscopiques. Si les deux prises de vues sont issues de deux caméras différentes, nous parlons alors de stéréoscopie spatiale (parallaxe horizontale). Sinon, si elles sont issues de la même caméra mais que la caméra a été déplacée entre ces deux prises, la stéréoscopie devient alors temporelle (parallaxe de mouvement). Pour plus de détails sur le fondement théorique se référer à (Kraus and Waldhäusl, 1997; Kasser and Egels, 2002).

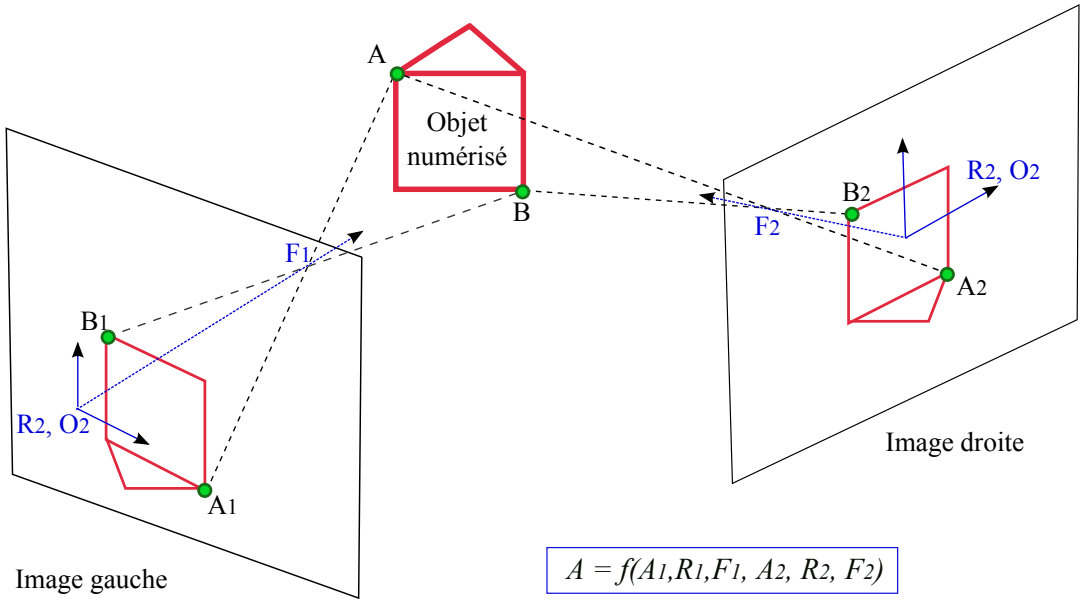


FIGURE 2.26 – Principe stéréoscopique en photogrammétrie.

Photogrammétrie aérienne

L'utilisation de la photogrammétrie sur de l'imagerie aérienne permet de calculer l'altitude à partir de différentes prises de vue. On s'appuie, dans ces méthodes, sur des approches manuelles ou automatiques produisant ainsi des MNS (MNA). Ces modèles se présentent sous la forme d'une grille d'élévation 2.5D couvrant la surface apparente de la terre. Les techniques manuelles de photogrammétrie produisent des MNS ca-

ractérisés de grande précision. Par contre, l'opération de *stéréo-restitution*[25] nécessite l'intervention d'un professionnel averti. Cette tâche est en général coûteuse financièrement et temporellement. L'intervention peut être compliquée dans le cas de données très complexes. C'est la raison pour laquelle une automatisation du processus est requise. Différents travaux basés sur les techniques de corrélation ont été mis en œuvre (Smith and Smith, 1996; Huertas et al., 1999; Pierrot-Deseilligny and Paparoditis, 2006). Les données aériennes que nous traitons dans le cadre de notre étude sont produites par cette technique. D'autre travaux de génération de MNS en photogrammétrie se basant sur le *Tensor Voting* ont été proposés par Tang (Tang et al., 2001). La figure 2.27 présente un exemple de production de MNS à partir d'un couple d'images aériennes.

Pour la cartographie 3D, les MNS produits par la photogrammétrie sont des sources riches en informations sur les surfaces apparentes de la terre. Toutefois, bien que ces MNS se présentent sous forme 3D, la nature de la géométrie d'acquisition (moyen d'acquisition à la verticale) fait que les surfaces verticales (façade de bâtiments) sont faiblement numérisées (cf. Figure 2.30.(c)). Dans le cas de cartographie du mobilier urbain, les façades des bâtiments sont des éléments de base du modèle final. Utiliser uniquement un MNS obtenu par corrélation peut être une limitation pour ce type de cartographie. Néanmoins, le MNS de corrélation servira pour la représentation des surfaces horizontales et plus précisément les surfaces à faibles mouvements dynamiques (toitures). Les techniques de corrélation sont sensiblement affectées par le bruit du mouvement entre les deux (ou plusieurs) clichés de la scène observée. Les zones urbaines dynamiques (véhicules, passants. . .) seront représentées dans le MNS par des valeurs d'altitude complètement faussées par les bruits du mouvement. Ces bruits sont quantifiables à l'échelle locale mais difficilement détectables à une échelle globale, ce qui exclut le recours à des techniques de filtrage globales pour l'exploitation correcte de ces zones.

Photogrammétrie terrestre

Comme dans le cas de la photogrammétrie aéroportée, dans un cadre terrestre on utilise des caméras classiques. Ce type de caméra fournit une projection plane de la scène qu'elle observe, il n'est *a priori* pas possible d'effectuer la transformation inverse sans faire certaines hypothèses simplificatrices. La stéréoscopie permet de lever cette ambiguïté en utilisant un deuxième cliché de la même scène mais avec un point de vue différent (cf. Figure 2.26). La stéréoscopie peut être combinée avec le *shape from silhouette* pour la reconstruction 3D d'objets (Matsumoto et al., 1999; Tosovic and Sablatnig, 2001).

Dans le cadre de la cartographie 3D il existe des systèmes mobiles de numérisation 3D à base de stéréo vision multi-caméras. L'équipe de l'université de *Caroline du nord* aux *États-Unis* utilise un véhicule (cf. Figure 2.28) doté d'un système de photogrammétrie terrestre pour la génération de la 3D, ce système est détaillé dans (Pollefeys et al., 2008). Nous donnons plus de détails sur ce type de systèmes dans le chapitre 3.

25. Détermination des coordonnées de points en 3D à partir d'un couple de clichés.

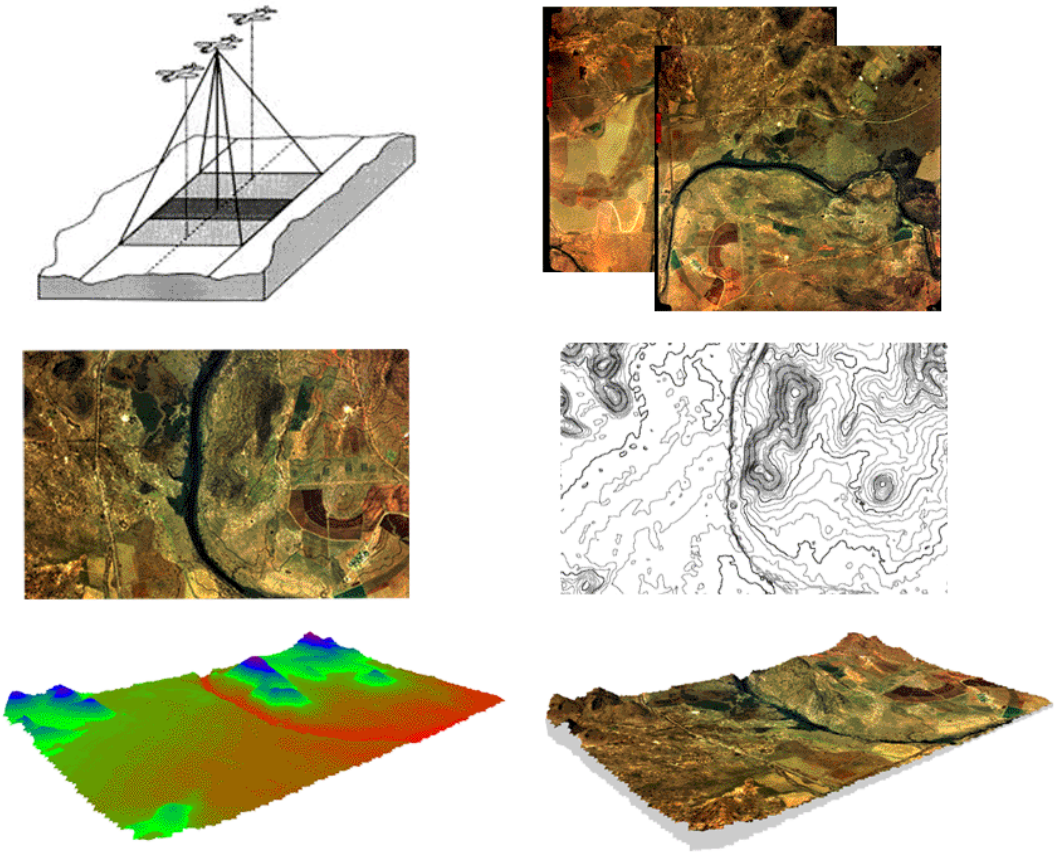


FIGURE 2.27 – Résultat de Modèle Numérique de Terrain obtenu par des approches photogrammétriques appliquées sur des images aériennes.

FIGURE 2.28 – Cartographie 3D des façades du mobilier urbain à *Chapel Hill* en *Caroline du nord* au *États-Unis*. Produit par un Système de Cartographie Mobile à base de quatre caméras. La génération de la 3D est basée sur des approches de photogrammétrie *(Source des illustrations : http ://www.cs.unc.edu).*

2.4.4 Le RaDAR

La technique de mesure du RaDAR [26] est une technique active telle que le LiDAR. L'antenne RaDAR utilise le même principe que les capteurs laser à savoir *la mesure du temps de vol*. Par contre la différence réside dans l'utilisation d'une onde électromagnétique très haute fréquence à la place d'un pulse laser.

Les systèmes RaDAR ont d'abord été conçus dans les années 30 pour la détection des positions d'objets (les navires de guerre) et pour mesurer leur distance. Grâce aux propriétés électromagnétiques des ondes-radio, les systèmes RaDAR ont la capacité d'effectuer des acquisitions indépendamment des conditions atmosphériques et sans se soucier des contraintes de visibilité (de nuit ou de jour). Depuis les années 50 sont apparus les RaDAR imageurs exploités dans un premier temps à des fins militaires. Néanmoins, ces systèmes ont été déclassifiés du domaine de la défense. Ils sont utilisés à présent dans le domaine de la télédétection, dont l'application de la cartographie 2D/3D constitue un axe central. La figure 2.29 représente un MNS produit par RaDAR aéroporté.

Nous ne détaillons pas ici le principe des acquisitions RaDAR car nous ne traitons pas ce type de données dans le cadre de notre étude. Le lecteur intéressé pourra trouver une description détaillée des systèmes RaDAR dans (Skolnik, 2003).

2.4.5 Comparaison et synthèse des données 3D

Comme nous l'avons vues en début de cette section, les techniques d'acquisition 3D sont nombreuses. Les géométries sont différentes, les fondements physiques sont

26. Radio Detection And Ranging.

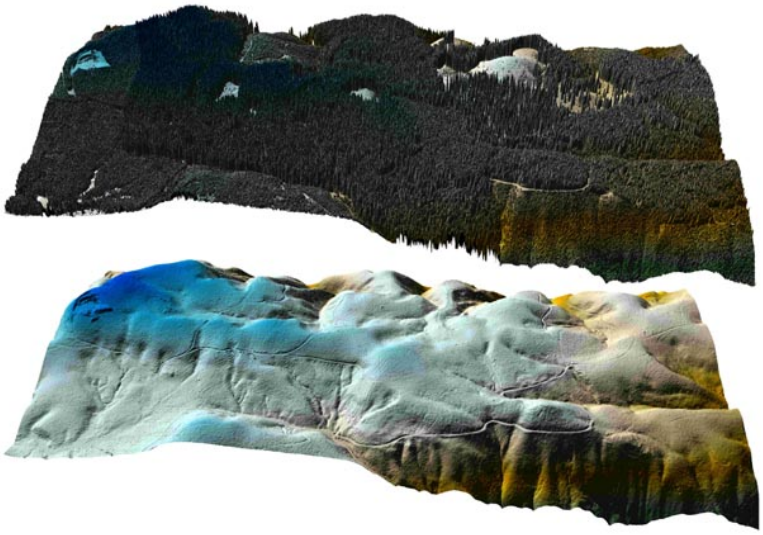


FIGURE 2.29 – Modèle Numérique de Surface produit par un système RaDAR aéroporté. *(Source des illustrations : http ://www.cfr.washington.edu).*

variables et les contraintes à respecter peuvent évoluer d'un système à un autre. Dans la table 2.1 nous faisons une comparaison entre les données 3D présentées au préalable. Pour cette comparaison nous considérons les neuf critères suivants :

- c1. étendue de la couverture de l'acquisition ;
- c2. précision du résultat de la numérisation ;
- c3. résolution de la données résultante de l'acquisition ;
- c4. vitesse d'acquisition, ce qui correspond à la durée de la collecte des données ;
- c5. besoin de post-traitement, cas ou les données brutes sont non exploitables directement ;
- c6. contraintes atmosphériques, correspondent aux techniques d'acquisition nécessitant des conditions atmosphériques particulières (pas de pluie. . .) ;
- c7. contraintes temporelles, correspondent aux techniques d'acquisition fonctionnant durant des plages horaires particulières (nuit, jour. . .) ;
- c8. contrainte d'environnement dynamique ;
- c9. coût moyen d'une acquisition.

Nous proposons un tableau comparatif de synthèse, confrontant les six types de données exposées dans le tableau 2.1. D'autres travaux comparatifs ont été proposés sur des ensembles des données moins larges.

Les approches laser et les approches photogrammétriques de création de MNS sont comparables en termes de performances. Toutefois, elles sont considérées comme complémentaires (Baltsavias, 1999b). Des travaux de couplage entre la photogrammétrie et le laser dans un contexte 3D ont été menés par Bretar dans (Bretar, 2006).

	LiDAR			Photogrammétrie		RaDAR
	aérien	mobile terrestre	fixe terrestre	aérienne	terrestre	aérien
c1	ville	rue	bâtiment	ville	rue	ville
c2	20−50cm	10-20cm	1−10cm	0.5−1m	10−20cm	0.5−1m
c3	moyenne(+)	haute(+)	THR	moyenne(−)	haute (−)	haute(+)
c4	rapide (−)	rapide	lente	rapide (+)	rapide(−)	rapide (+)
c5	non	non	non	oui	oui	oui
c6	non	non	non	oui	oui	non
c7	non	non	non	oui	oui	non
c8	non	oui	oui	non	oui	non
c9	cher(+)	moyen	cher (−)	cher (−)	moyen	cher (−)

TABLE 2.1 – Comparaison des techniques d'acquisition de données cartographique 3D. *(c1. étendue, c2. précision, c3. résolution, c4. vitesse, c5. post-traitement, c6. contraintes atmosphériques, c7. contraintes temporelles, c8. contrainte d'environnement dynamique, c9. coût).*

Les approches laser et les approches photogrammétriques de création de modèle 3D de façades en ville sont comparables en termes de performances, mais elles sont considérées comme complémentaires. La version 2 de *stéréopolis* est équipée des deux techniques terrestres de génération de la 3D à savoir la lasergrammétrie et la photogrammétrie. Nous pouvons effectuer dans ce cas, le traitement de la texturation du rendu laser 3D directement à partir du modèle 3D issu de la photogrammétrie.

Les techniques de *relevés avec laser fixe* et avec *laser mobile* sont deux techniques complémentaires pour effectuer la cartographie des façades d'une ville. Nous opérons dans un premier temps par l'acquisition de 90% du mobilier urbain par des MMS à base de *relevés avec laser mobile*. Dans un deuxième temps, les 10% restants (les édifices remarquables de la ville) seront numérisés par des techniques de *relevés avec laser fixe* présentant plus de détail et de qualité.

2.5 Approches de production de cartographies 3D

Les méthodes de production de base de données cartographiques se distinguent en plusieurs classes selon le besoin du contexte applicatif. Nous distinguons essentiellement les approches suivantes :

- Classiques : méthodes adoptées par les géomètres experts basées sur des mesures réalisées sur des tachéomètres ;
- Lasergrammétrique : méthodes qui s'appuient sur des techniques d'intégration et de fusion de relevés laser fixes ou mobiles (aériens ou terrestres) ;
- Photogrammetrique : approches utilisant des techniques de stéréoscopies d'images terrestres ou aériennes ;
- Interactives : méthodes adoptées par les *Designer* pour la production de la 3D en

utilisant des logiciels interactifs comme *3ds Max*[27] ou *Virtools*.
- Procédurales : approches reposant sur des techniques de génération de formes géométriques à partir d'un modèle procédural (Müller et al., 2006; Teboul et al.).

Le tableau 2.2 présente un comparatif entre les différentes méthodes de production de cartographies 3D.

Approches	Compacité du modèle	vitesse production	réalisme	portabilité	couverture
classiques	(–)	(–)	(++)	(–)	partielle
laser	(–)	(++)	(++)	(–)	partielle
photogrammétriques	(+/-)	(+)	(+)	(+/-)	partielle
interactives	(+)	(–)	(+/-)	(++)	globale
procédurales	(+)	(++)	(+)	(++)	partielle

TABLE 2.2 – Différentes approches de production de cartographies 3D.

La seule méthode produisant une cartographie 3D réaliste et complète parmi les approches présentées est l'approche interactive. Cette approche est caractérisée par un coût élevé ainsi qu'un traitement lourd.

Dans le cas d'une construction de cartographie 3D urbaine complète, l'observation du résultat seul de chaque méthode d'acquisition révèle qu'il est impossible de représenter la scène observée en couvrant toutes ses grandeurs et ses détails avec une seule de ces méthodes.

Dans le cas d'une construction d'une cartographie 3D urbaine partielle (par exemple les façades du mobilier urbain), l'utilisation d'une seule technique d'acquisition peut paraître limitée en terme de précision (par exemple : cas d'une acquisition avec laser mobile seulement). En utilisant un autre type d'acquisition le résultat peut avoir une précision améliorée en dépit d'un coût de réalisation très élevé (par exemple : cas d'une acquisition avec laser fixe seulement).

À partir de ce constat, nous cherchons à optimiser les tâches de construction d'une cartographie en termes de coût et de temps, tout en produisant une représentation finale la plus riche et complète possible. Nous sommes donc amenés à combiner plusieurs représentations hétérogènes complémentaires.

2.6 La fusion de données 3D hétérogènes

Les caractéristiques des données 3D présentées à la section 2.4 (à savoir : distributions géométriques, résolutions, précisions, bruits ...) sont variables, ce sont donc des données hétérogènes. La figure 2.30 illustre cette hétérogénéité. L'illustration 2.31 présente la complémentarité entre les différentes données déjà exposées sur la figure 2.30.

27. http ://www.autodesk.fr

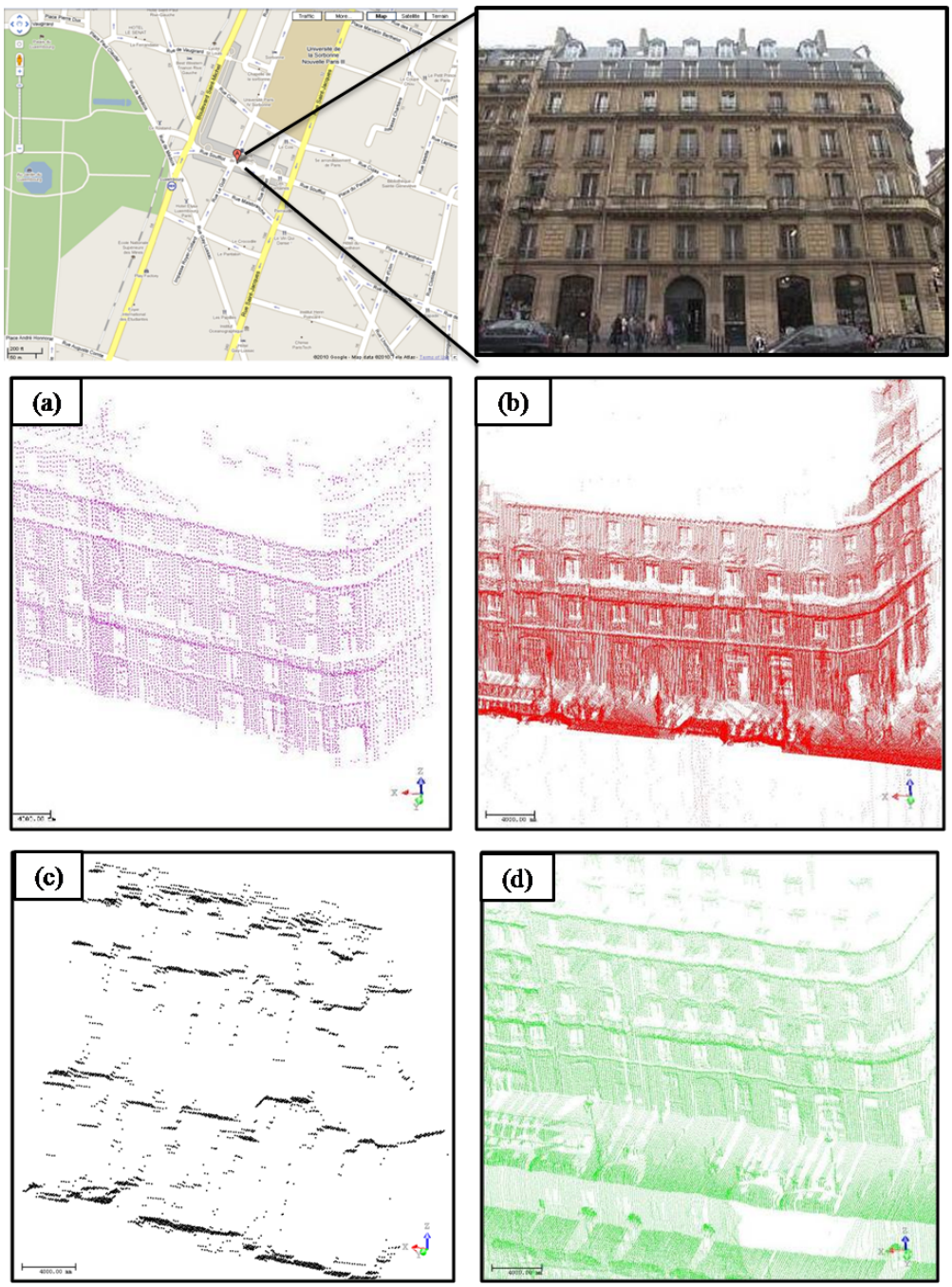


FIGURE 2.30 – *Rue Soufflot Paris 5ème*, grand plan sur le bâtiment numéro 15. (a) Données Scanner fixe *Trimble GX*. (b) Données Stéréopolis. (c) Données MNS. (d) Données *Lara3D (Source des données : projet TerraNumerica).*

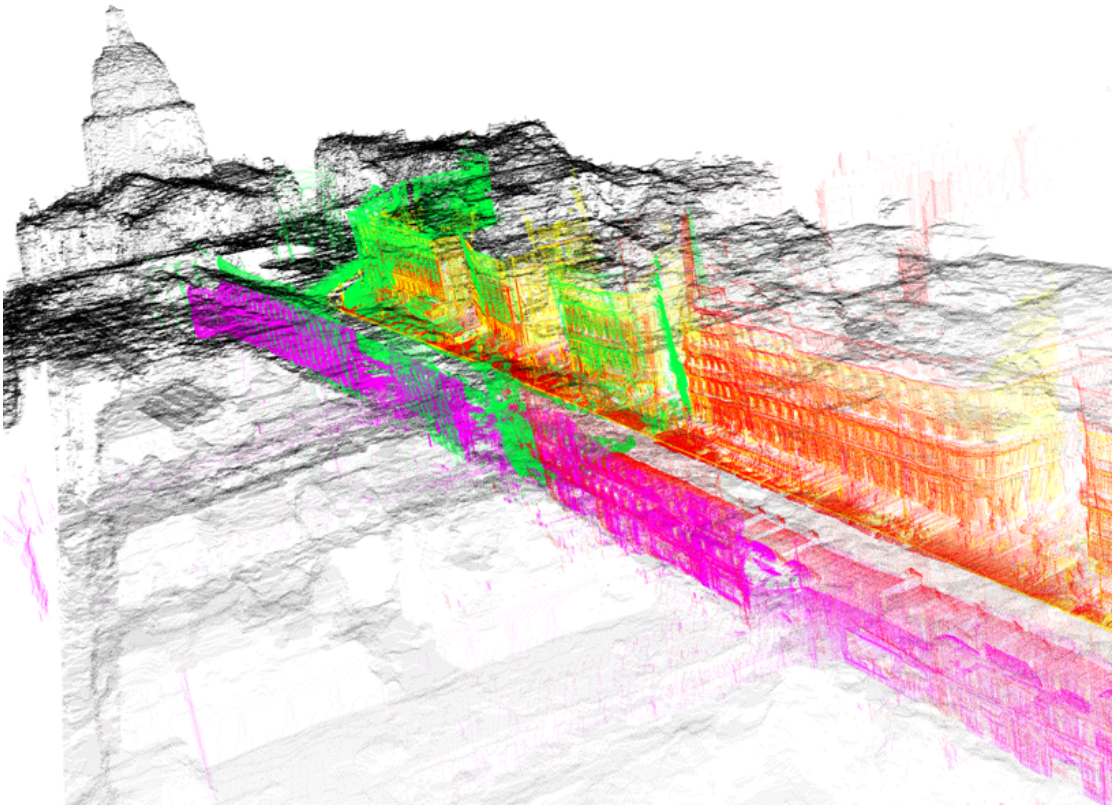


FIGURE 2.31 – Complémentarité de la fusion des données représentées à la figure 2.30.

2.6.1 Principe et état de l'art

Le développement des bases de données cartographiques à partir de représentations hétérogènes se déroule essentiellement en deux étapes :

1. La première étape se traduit par la collecte des différentes données de perception et des données de géo-référencement.
2. La deuxième étape consiste à utiliser des techniques logicielles de recalage et de fusion entre les différentes données collectées.

Quelques travaux ont été menés dans ce sens n'intégrant pas, en général, plus de deux données à la fois. Rares sont les travaux intégrant plusieurs données hétérogènes pour la cartographie. En effet les équipes spécialisées disposant d'une multitude de données hétérogènes pour leur travaux de recherches ne sont pas nombreuses. La mise en commun des bases de données cartographiques n'est pas courante dans les communautés scientifiques s'intéressant à la cartographie 2D/3D. Ceci est lié principalement à des contraintes de confidentialité, voire à des interdictions gouvernementales stratégiques. Des coûts élevés de production et l'indisponibilité simultanée sur la même zone peuvent être également les raisons de ce manque de mise en commun. Ces contraintes compliquent la tâche d'accès aux données hétérogènes par la communauté scientifique.

Néanmoins, nous pouvons distinguer les travaux réalisés par Bretar (Bretar, 2006), combinant des données LiDAR aéroportés avec des données photogrammétriques aériennes pour l'analyse des scènes tridimensionnelles. D'autre travaux intègrent des images aériennes avec des données issues d'un MMS terrestre (Früh and Zakhor, 2003(b, 2004). Fiocco et al. dans (Fiocco et al., 2005) ainsi que Sequeira et al. dans (Sequeira et al., 2007) confrontent des données laser terrestres à haute résolution obtenues par MMS terrestre et des données laser aéroportées.

2.6.2 Cas d'étude et données traitées

Nous traitons dans le cadre de ce travail un ensemble de données 3D incluant l'équivalent de 6 millions de points. Il est constitué de trois types de données :

- MNS produit par l'Institut Géographique National (IGN) par des approches de corrélation d'images aériennes ;
- *Relevés avec laser mobile* obtenus par MMS *Lara3D* (cf. section 4.2) ;
- *Relevés avec laser fixe* obtenus par scanner fixe *Trimble GX*.

L'objectif de cette fusion de données hétérogènes est la production d'une cartographie 3D réaliste à échelle et résolution variables. La figure 2.32 illustre l'ensemble de données traité avec le rôle et l'échelle de représentativité de chacune des données 3D fusionnées dans la cartographie 3D résultante. Le diagramme de la figure 2.33 illustre le processus de traitement de ces données hétérogènes, de l'acquisition jusqu'à la la génération de modèles 3D réalistes d'environnements extérieurs.

Ce travail est original par rapport à ce qui se trouve dans la littérature, par le type et la variété des données traitées. Un cas proche est celui de Fiocco et al. dans (Fiocco et al., 2005), où toutefois les données sont différentes en géométrie d'acquisition et en qualité.

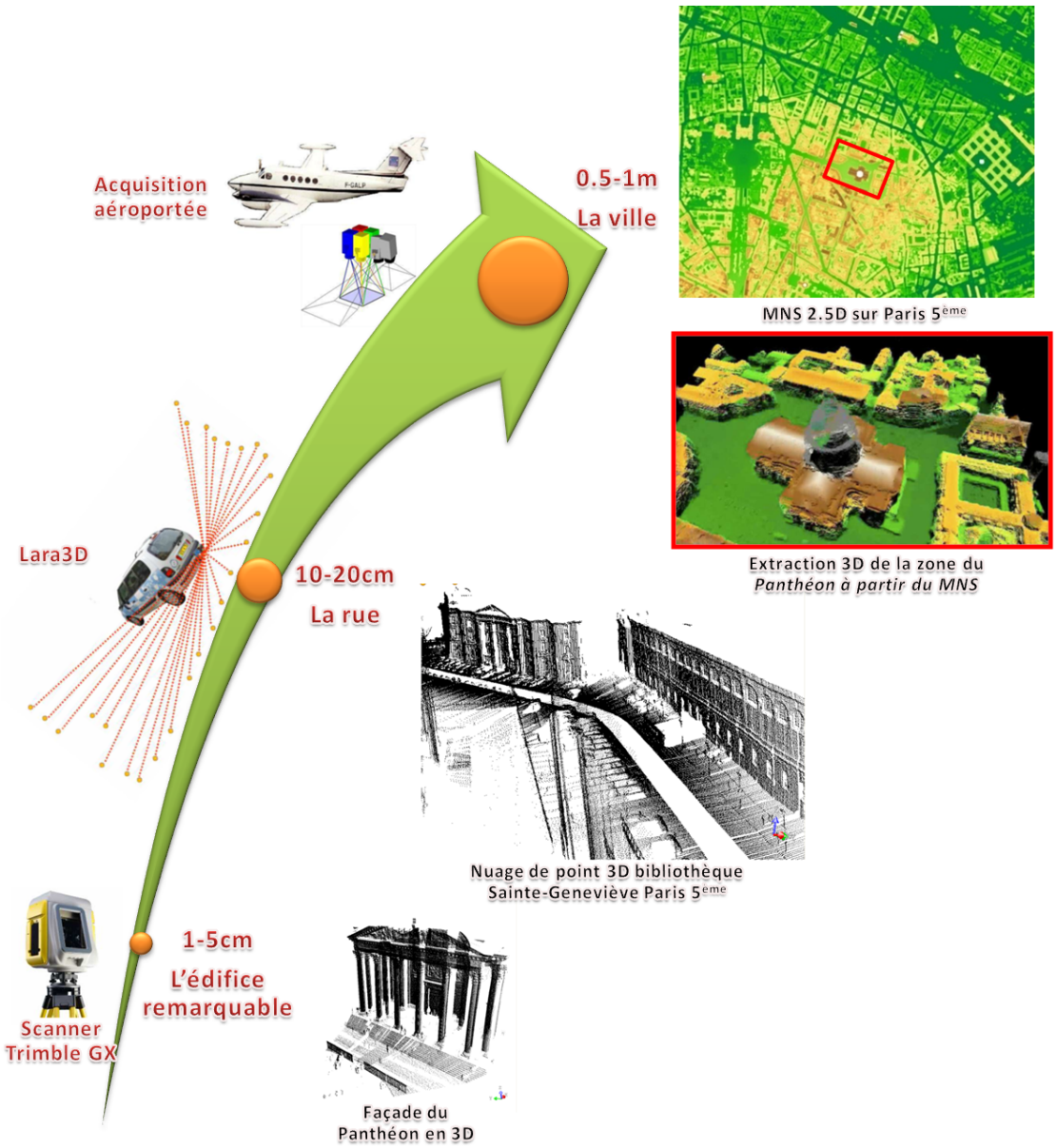


FIGURE 2.32 – Données hétérogènes sur la zone du *Panthéon, Paris 5ème*. Illustration du rôle et de l'échelle de représentativité des trois données 3D fusionnées. On part d'une représentation précise (1 à 5 cm) pour les données représentant les bâtiments remarquables. On passe à une résolution moyenne (10 à 20 cm) pour la représentation des rues et on finit par une représentation moins fine (0.5 à 1 m) à l'échelle de la ville.

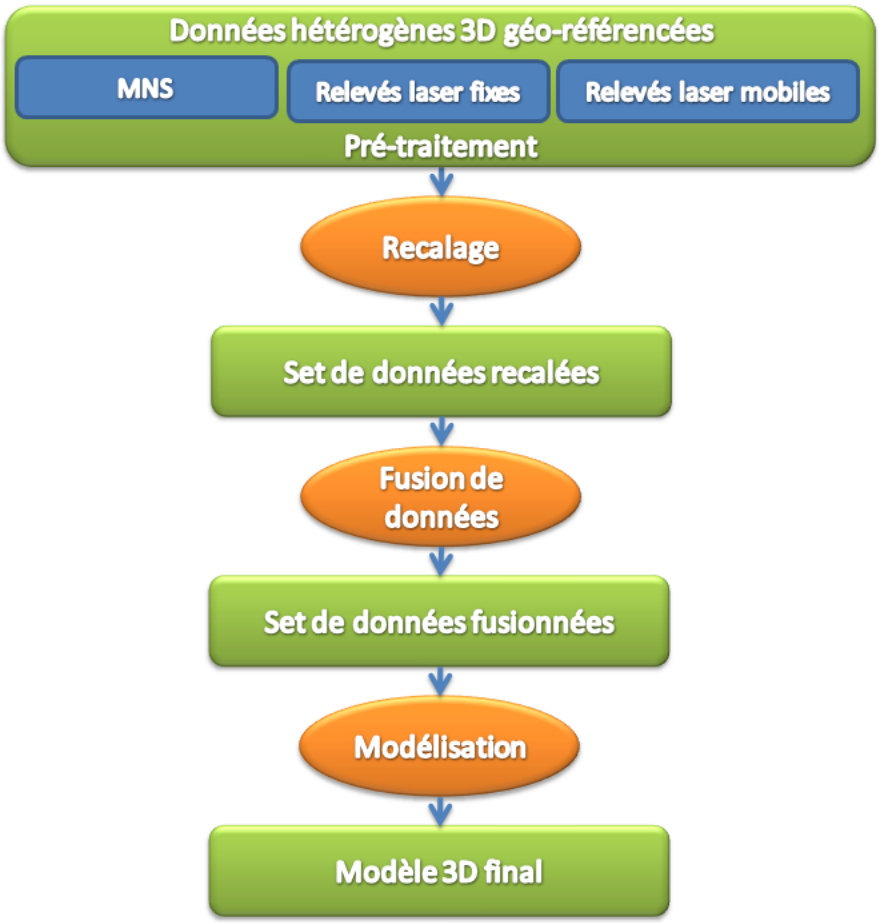


FIGURE 2.33 – Diagramme de traitement d'un processus de génération de modèles 3D à partir de données 3D hétérogènes. Malgré le géo-référencement une phase de recalage de données est requise pour garantir la qualité de la phase de fusion et de modélisation 3D.

2.6.3 Problèmes d'incohérences et solutions proposées

Les données acquises avec des configurations différentes ou à des moments différents sont sujettes à des problèmes d'incohérences et de déformations (cf. Figure 2.34). Les sources de ces anomalies sont explicitées dans la section 4.3. L'application directe d'une fusion à partir de ces données aura comme résultat une cartographie 3D partiellement faussée. Pour résoudre ces anomalies, nous avons travaillé sur les aspects suivants :

- Analyser les incohérences, leurs sources et leurs répercussions sur les données. Les erreurs observées sur les données *Lara3D* sont explicitées dans le chapitre 4 ;
- Proposer des solutions de correction des erreurs des relevés laser mobiles (cf. chapitre 4) ;
- Développer et rendre robuste une étape de recalage de données hétérogènes, en proposant des algorithmes adéquats pour traiter et corriger les cas de déformations et d'incohérences du set de données traité. (cf. chapitre 6 et 7).

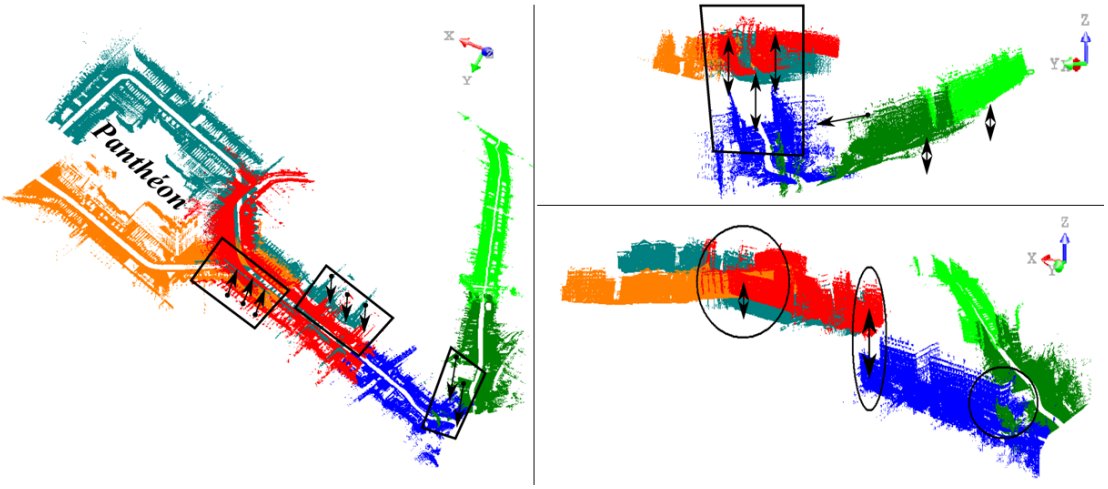


FIGURE 2.34 – Illustration des problèmes d'incohérence affectant les données issues du MMS *Lara3D* sur la zone du *Panthéon, Paris 5ème*.

2.7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les enjeux, les besoins ainsi que les champs d'application des cartographies 3D. Nous avons exposé par la suite les différentes techniques d'acquisition 2D/3D servant de matériel élémentaire pour une cartographie 3D réaliste. Un travail comparatif des données hétérogènes produites par ces divers types d'acquisition nous a permis de soutenir le principe de la fusion de données hétérogènes comme choix méthodologique pour le développement d'une cartographie 3D. Nous exposons dans la suite de cette partie du mémoire les travaux d'amélioration des acquisitions terrestres entrepris sur le prototype *Lara3D*.

Chapitre 3

Les technologies mobiles de cartographie terrestre

Sommaire

3.1 Introduction **73**
3.2 Technologies mobiles de cartographie terrestre - LBMMT **74**
3.2.1 Contexte de développement des LBMMT 74
3.2.2 Domaines d'utilisation des LBMMT 74
3.3 Les MMS embarqués sur véhicules **79**
3.3.1 État de l'art 79
3.3.2 Stratégie de développement et coût engendré 83
3.3.3 Synthèse du coût 87
3.4 Conclusion **87**

3.1 Introduction

La technique d'acquisition terrestre via des Systèmes de Cartographie Mobile (MMS [1]) est l'une des techniques qui s'est fortement développée et qui a suscité beaucoup d'intérêt pour la cartographie 3D. Dans une démarche de fusion de données hétérogènes, l'amélioration de ces systèmes d'acquisition et de leurs rendus servira à perfectionner la cartographie 3D finale. Nous commençons ce chapitre par un état de l'art des Technologies de Cartographie Mobile Terrestre (LBMMT [2]). Puis, nous détaillons les MMS embarqués sur véhicule. Nous passons ensuite en revue notre plateforme d'acquisition terrestre : *Lara3D*. Et pour finir, nous présentons les anomalies pouvant affecter les acquisitions 3D obtenues par MMS embarqués sur véhicules terrestres.

1. Mobile Mapping System.
2. Land Based Mobile Mapping Technologies.

3.2 Technologies mobiles de cartographie terrestre - LBMMT

3.2.1 Contexte de développement des LBMMT

Les techniques d'acquisition mobiles ont vu le jour au début des années 1980. Elles se sont particulièrement développées ces deux dernières décennies, suite aux progrès technologiques dans divers domaines connexes. Nous citons prioritairement les avancées marquées dans :

- Les systèmes de positionnement (GPS, INS, Odomètre,. . .) ;
- Les technologies de communication (wifi, ethernet. . .) et les architectures des ordinateurs ;
- Les systèmes de perception (caméras, lasers . . .) ;
- L'informatique embarquée et les plateformes de synchronisation et de traitement temps réel de données multi-capteur.

Ces systèmes sont embarqués sur une plateforme mobile (véhicule, chariot, individu. . .) et se composent essentiellement de deux familles de capteurs :

1. Capteurs de positionnement (GPS, INS, Odomètres. . .) ;
2. Capteurs de perception (caméras, lasers, RaDARs. . .).

Ces capteurs sont synchronisés par des logiciels de traitements temps réel et commandés par le biais d'ordinateurs dédiés aux calculs embarqués.

Selon l'application, le nombre, le type et les caractéristiques des capteurs peuvent changer. Toutefois, les capteurs les plus utilisés sur les plateformes mobiles, ainsi que leurs rôles dans la chaîne de traitement sont présentés dans le tableau 3.1.

La recherche autour des technologies de cartographie mobile présente un carrefour de plusieurs compétences scientifiques (traitement d'image, traitement de signal, reconnaissance de forme. . .) couplées à des compétences d'ingénierie (électronique, informatique, mécanique. . .) et des connaissances métier (topographe, géomètres experts. . .). Vient s'ajouter à tout cela un lien fort avec l'industrie. La figure 3.1 résume les compétences ainsi que les domaines principaux impliqués dans l'élaboration et la mise en place d'un MMS. Une revue des avancées dans les technologies de cartographie mobile a été présentée par Tao et Li dans (Tao and Li, 2007).

3.2.2 Domaines d'utilisation des LBMMT

Les LBMMT sont capables de réaliser plusieurs traitements temps réel tels que : la localisation, la cartographie, la visualisation de données, etc. Cette compétence est à l'origine de l'accroissement de l'utilisation de ces technologies durant ces deux dernières décennies, ceci en réponse à des besoins applicatifs dans différents domaines. Parmi ceux-ci, nous pouvons citer :

- *Les Systèmes de Transport Intelligents* (ITS[3]). Les LBMMT sont utilisés pour des systèmes de navigation autonome. Le *DARPA challenge*[4] est un concours qui a suscité

3. Intelligent Transport System.
4. Defense Advanced Research Projects Agency. http ://www.darpa.mil/grandchallenge/index.asp

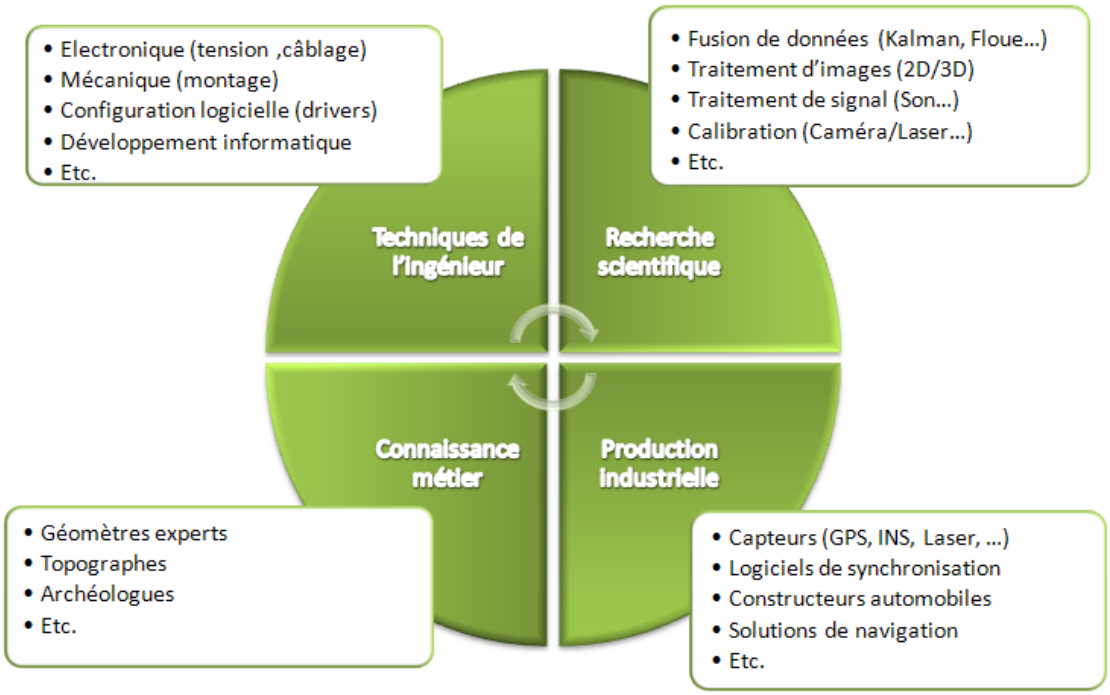


FIGURE 3.1 – Les compétences ainsi que les domaines principaux impliqués dans l'élaboration et la mise en place d'un Système de Cartographie Mobile.

Capteur	Fonctionnalité
GPS	Géo-référencement absolu du système Synchronisation et contrôle des autres capteurs de localisation (INS, odomètres...) Datation des données de perception (laser, images...)
INS	Orientation en 3D des données de perception Données de support pour le géo-référencement relatif Données continues de correction et de support pour le GPS
Odomètres	Données de support pour le géo-référencement relatif Données continues de correction pour la fusion GPS/INS
Caméra	Génération de la 3D (systèmes basés sur la photogrammétrie) Génération de la texture (systèmes basés sur la lasergrammétrie) Génération de primitives pour le géo-référencement indirect
Télémètre laser	Génération de la 3D directement (scanner 3D) Génération de la 3D par recalage de profil (scanner 2D) Génération de primitives pour un géo-référencement indirect
Boussole, jauge de gravité, baromètre...	Informations additionnelles de support pour le géo-référencement

TABLE 3.1 – Les capteurs les plus utilisés sur les plateformes de cartographie mobiles et leurs rôles dans la chaine de traitement.

l'intérêt des industriels ainsi que celui des équipes de recherche travaillant sur les LBMMT. Le but de la compétition de 2005 était de parcourir l'équivalent de *211 Km* d'un itinéraire tracé dans le désert. Le véhicule *Stanley* de l'équipe de *Stanford Racing*[5] qui a remporté la compétition a reçu la prime de 2*M*$ (cf. Figure 3.2). Pour plus de détails le lecteur intéressé peut se référer à (Thrun et al., 2006).

- *Les Systèmes de Cartographie d'Infrastructures Souterraines*. Les plateformes et les environnements souterrains sont difficilement accessibles par des humains. L'utilisation des MMS pour des besoins de vérification ou d'exploration présente une solution fiable pour ces types d'environnement. Le Système *VECTRA MFL*[6] est un exemple d'outil de vérification de pipelines (Rempel, 2005). La figure 3.3 présente un aperçu de ce système.

- *Les Systèmes de Cartographie Embarqués sur individu*. Le développement de ces systèmes répond essentiellement par des besoins stratégiques pour l'exploration d'environnements à accès limité (infiltration militaire), mais aussi en terme d'aide à la mobilité des PMR[7]. Dans cette catégorie nous distinguons les systèmes d'aide à la navigation des personnes (Grejner-Brzezinska et al., 2008) (cf. Figure 3.4 (droite)) et les systèmes de cartographie d'environnements intérieurs (Naikal et al., 2009; Chen et al., 2010) (cf. Figure 3.4 (gauche)).

5. http ://cs.stanford.edu/group/roadrunner//old/index.html
6. http ://www.bjservices.com
7. Personnes à Mobilité Réduite.

FIGURE 3.2 – Le système de cartographie mobile *Stanley*, vainqueur de l'édition 2005 de *DARPA challenge (Source des illustrations : http ://cs.stanford.edu/).*

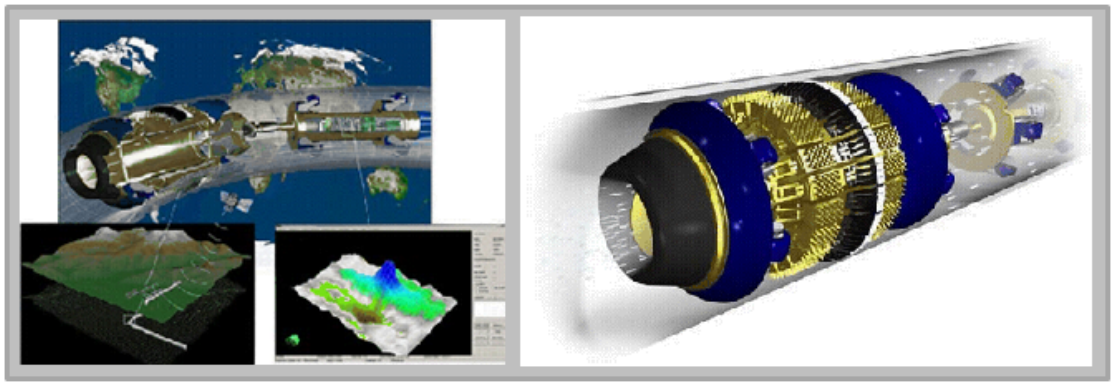


FIGURE 3.3 – *VECTRA MFL* système de cartographie mobile vérifiant les structures des pipelines de gaz et d'huile *(Source des illustrations : http ://www.bjservices.com/).*

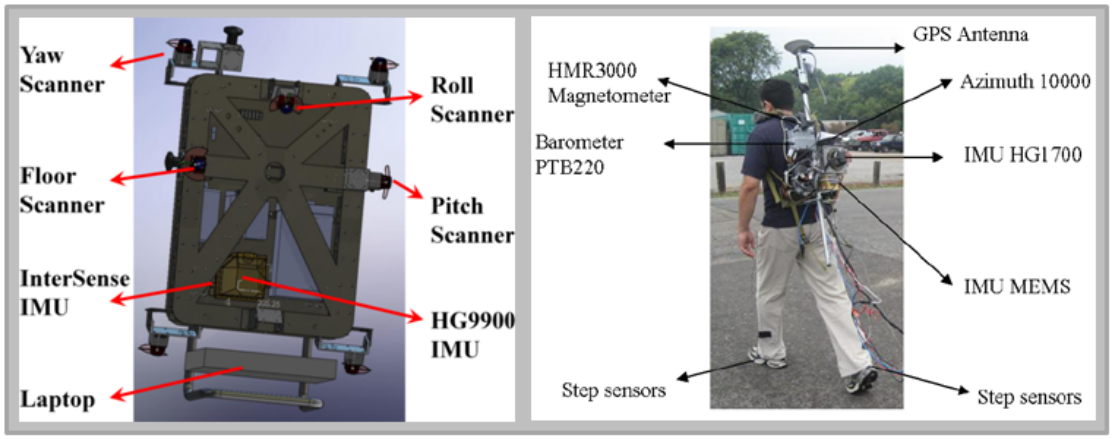


FIGURE 3.4 – (à gauche) Système de cartographie d'environnement intérieur. (à droite) Système d'aide à la navigation de personne *(Sources des illustrations : http ://berkeley.edu/ et http ://www.osu.edu/).*

- *Les Systèmes de Numérisation à Environnement de Navigation Restreint*. Dans des systèmes évoluant sur des rails (trains, métros. . .), la vérification d'anomalies pouvant affecter les équipements par des méthodes classiques (vérification par des opérateurs humains) est fastidieuse en terme de faisabilité et coute souvent très cher. L'utilisation d'un système de numérisation mobile 3D présenterait une solution plus efficace et moins coûteuse. *Le chariot Swiss* est un exemple de système de numérisation mobile permettant la détection de défauts de rails (cf. Figure 3.5).

FIGURE 3.5 – (à gauche) Système de cartographie mobile monté sur un chariot *Swiss trolley*. (à droite) Résultat de la numérisation 3D *(Source des illustrations : http ://www.terra.ch/).*

- *Les Systèmes de Numérisation 3D Embarqués sur des Véhicules*. Ces systèmes permettent la production de cartographie 3D d'environnements extérieurs, deux systèmes ont été déjà présentés à la section précédente (cf. Figure 2.23 et 2.28). Dans notre cas d'étude nous traitons une donnée 3D issue de ce type d'acquisition. Nous détaillons ces systèmes dans la section suivante.

3.3 Les MMS embarqués sur véhicules

3.3.1 État de l'art

Ces systèmes de cartographie sont embarqués sur des véhicules dédiés et équipés pour les acquisitions terrestres. Ils permettent d'acquérir les données soit pendant le déplacement du véhicule (*Drive method*), soit par une succession de pauses avec des acquisitions fixes (*Stop and Go method*). Cette phase d'acquisition est ensuite suivie par une phase de traitement des données collectées pour l'obtention de représentations 3D réalistes. Ce processus en deux étapes est réalisé par l'intermédiaire de plateformes logicielles dédiées à la synchronisation des données multi-capteurs en temps réel.

Les MMS terrestres sont dotés de deux modules matériels produisant les fonctionnalités de base du système :

Un module de positionnement, son rôle consiste à générer la position géo-référencée du véhicule par rapport à un référentiel terrestre tel que (WGS-84 [8], Lambert II. . .). La plupart des MMS utilise un géo-référencement direct consistant en l'utilisation de capteurs de positionnement (GPS, INS. . .) ; dans cette catégorie nous citons les véhicules présentés dans les travaux suivants (Zhao and Shibasaki, 2003; Abuhadrous, 2005; Goulette et al., 2006). Une deuxième catégorie est celle des véhicules se basant sur un géo-référencement indirect en utilisant des primitives de perception pour se localiser. Früh et Zakhor (Früh and Zakhor, 2004) utilisent des télémètres laser pour réaliser le géo-référencement indirect de leur système. Les lecteurs intéressés peuvent se référer à l'annexe B pour une description détaillée des référentiels de base et des principes du géo-référencement.

Un module de cartographie, son rôle est de produire les données de perception servant à la cartographie 2D ou 3D. Nous distinguons les MMS basés sur la lasergrammétrie tels que (Zhao and Shibasaki, 2003; Früh and Zakhor, 2004; Goulette et al., 2006). L'utilisation d'un télémètre laser 2D avec un sens de balayage perpendiculaire à la trajectoire du véhicule suffit pour une numérisation 3D. Néanmoins, il est possible de densifier le nuage de point résultant de ce type d'acquisition afin d'éviter les problèmes d'occultation. De rares travaux utilisent des scanners laser 3D. Une deuxième catégorie utilise la photogrammétrie. En combinant le résultat d'acquisition de plusieurs caméras calibrées par des approches de stéréoscopie la 3D est générée (cf. section 2.4.3). Dans cette catégorie nous pouvons citer la version 1 de *Stéréopolis* (Bentrah, 2006) ainsi que le véhicule de l'université de *South Carolina* (Pollefeys et al., 2008).
Pour une synthèse des MMS, le lecteur intéressé peut se référer à (Ellum and El-Sheimy,

8. World Geodetic System 1984.

2002; Schwarz and El-Sheimy, 2004; Tao and Li, 2007). La figure 3.6 présente la distribution des systèmes de cartographie mobile au niveau mondial, nous remarquons un intérêt particulier pour la production des MMS dans les pays avancés. Le continent africain avec toutes ses richesses patrimoniales et ses édifices touristiques allant du pays des *Pharaons* passant par *Carthage* et traversant l'Afrique noire, n'a pas vu le développement de ces technologies et se présente comme marché potentiel pour des MMS industrialisés tels que le produit *LYNX* d'*Optech*[9]. Le tableau 3.2 fait un état de l'art des MMS terrestres en catégorisant les deux modules principaux.

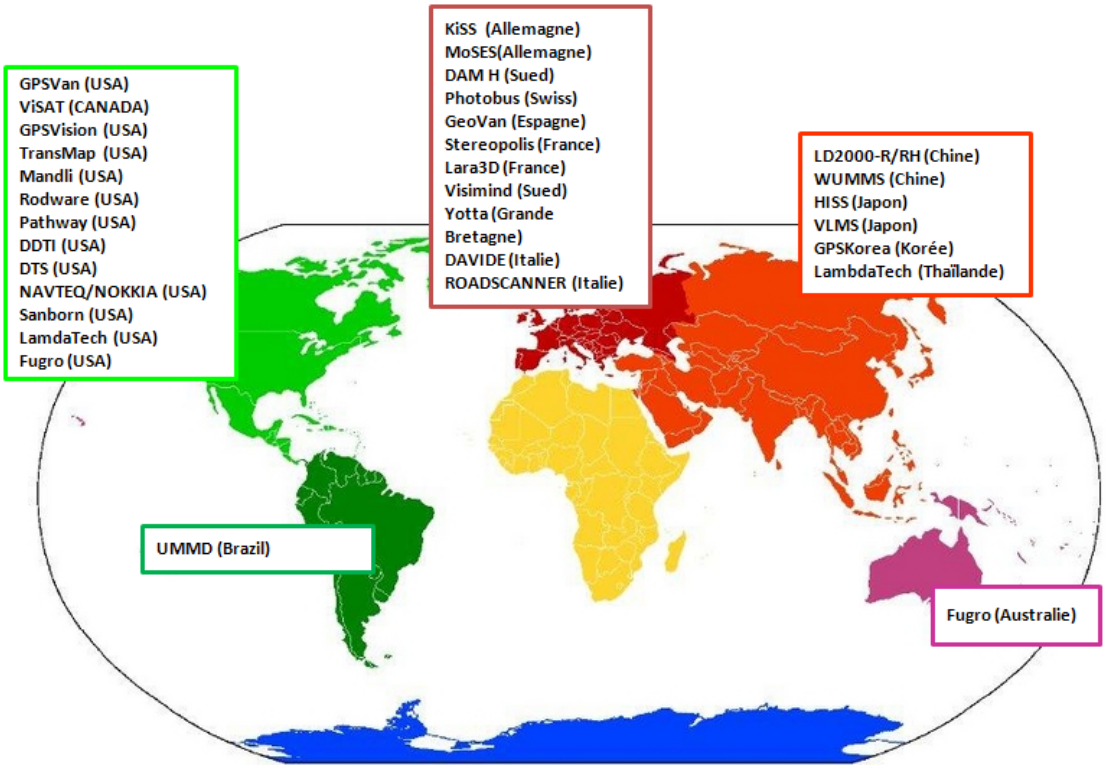


FIGURE 3.6 – Distribution des équipes de recherche travaillant sur les Systèmes de Cartographie Mobiles au niveau mondial.

Nom	Développeur	Navigation	Perception	Application
DAVIDE (Data Acquisition Vehicle with Inertial and DGPS Equipment)	GIOVE S.r.l. Italie, (Spagnol et al., 2004)	GPS/INS/odomètre	5 caméras vidéo télémètre laser TPL (Traverse Profile Logger)	Cartographie 3D
Suite page suivante				

9. http ://www.optech.ca/

Suite ...

Nom	Développeur	Navigation	Perception	Application
City Grid	GeoData, Autriche	GPS	Scanner laser, 2 caméras CCD	Numérisation et modélisation 3D urbain
GEOVAN^{TM}	Institut de cartographie de Catalogne, Espagne, (Talaya et al., 2004)	GPS/IMU/odomètre (POSPac Applanix système)	2 appareils photos 1 télèmetre laser	Cartographie 3D réaliste
GiGi (GPS Integrated with Glonass and Inertial navigation system)	Université de Trieste, Italie, (Baus et al., 2005)	GPS/IMU/odométre (POSPac Applanix système), GPS assisté	2 appareils photos n/b+couleur télémètre laser	Services de cartographie mobile
GPSVan^{TM}	Université d'Ohio, USA, (Grejner-Brzezinska, 1996)	GPS, 2 Gyros, 2 odomètres	Caméras CCD Monochrome, 2 Caméra couleur VHS	Cartographie des routes
GPSvision^{TM}	Lambda Tech, Inc., (Guangping, 2002)	GPS/INS	2 caméras CCD couleur	Cartographie 3D
GI-EYE TM	NAVSYS, USA	GPS, IMU	1 caméra CCD	Cartographie
Indoor MMS	Conseil National de recherche, Canada, (El-Hakim and Boulanger, 1999)	Codeurs de roues	8 caméras CCD, Scanner laser Biris	Navigation par robot mobile
Kiss^{TM} (Kinematic Survey System)	Université des forces armées, Allemagne	GPS, INS, 2 Gyros,3 accél, Odométrie, Baromètre, inclinomètre,Altimètre	2 caméra CCD monochrome,1 caméra couleur VHS	Cartographie des routes
Lara3D	Mines ParisTech, France,(Goulette et al., 2006)	GPS, INS, Odomètre	2 caméras CCD, 1 télémètre laser IBEO LD	Numérisation 3D
LD2000 RH, RE, RM series	Wuhan Leador Co.,Ltd, Chine, (Qingwu and Lizhong, 2008)	GPS/INS	2-8 appareils CCD couleur	Cartographie 3D
LYNX	Optech, Inc.	GPS/INS	2-4 scanners laser	Numérisation 3D
MoSES (Mobile road Mapping System)	Université de forces armées fédérales de Munich, Allemagne, (Grafe, 2007)	GPS, IMU baromètre numérique	2 scanners laser 2D et quatre caméras CCD	Cartographie 3D des routes
Navlab 18	CMU, USA, (Thorpe et al., 1988)	Doppler sonar	Caméras Stéréo CCD, Scanner laser, radar	Navigation

Suite page suivante

Suite ...				
Nom	**Développeur**	**Navigation**	**Perception**	**Application**
ON-SIGHT^{TM}	Transmap Corp., USA	GPS/INS	2 caméras CCD couleur	Cartographie couleur 3D
Photobus	Laboratoire de Topométrie EPFL, Suisse, (Gontran et al., 2004)	Odomètre optique, GPS	1 caméra horizontale pour le levé monoscopique des panneaux	Banque de données
RGIAS (Rapid GIS Acquisition Service)	Rowe Surveying and Engineering Company, Inc. Alabama, USA	GPS Multi-antennes	1 télémètre laser 1 caméra video	Cartographie 3D
ROADSCANNER	SITECO Informatica s.r.l., Italie	GPS/INS/odomètre	5 caméras vidéo 1 scanner laser 1 profilomètre	Cartographie des routes
SAM (Système d'Acquisition Mobile)	GeoInvent Sud et SODIPLAN S.A.	GPS/INS/odomètre	4-8 appareils photos	Numérisation 3D
StreetMapper	IGI GmbH et 3D Laser Mapping	GPS/INS	2-3 télémètres laser 1-2 caméras vidéo	Numérisation 3D
Stéréopolis V2	IGN, France	solution POS-LV	10 caméras CCD, 2 scanner laser 2D 1 scanner 3D	Géo-référencement indirect, cartographie 3D
Surveying Vehicle	Ecole Technique d'Aachen, Allemagne, (Benning and Aussems, 1998)	GPS, Baromètre, Compteur de roues	2 monochromes de roue CCD	Cartographie de routes
TruckMap^{TM}	John E. Chance, Inc., USA, (Reed et al., 1996)	GPS multi-antennes gyros	télémètre laser 1 caméra vidéo	Cartographie 3D
VISAT^{TM} (Video-Inertial-SATellite)	Université de Calgary, Canada, (Tao)	GPS INS	8 caméras CCD monochrome, 1 caméra couleur VHS	Cartographie des routes
VLMS (Vehicle borne Laser Mapping System)	Centre des informations spatiales de l'université de Tokyo (Manandhar and Shibasaki, 2001)	GPS/INS/odométre	3 télémètres laser 6 appareils photos linéaires	Cartographie 3D réaliste
WUMMS	Université de Wuhan., Chine, (Li, 1997)	GPS	3 appareils CCD couleur 1 télémètre laser	Cartographie 3D

TABLE 3.2: Systèmes de cartographie mobiles.

3.3.2 Stratégie de développement et coût engendré

Plusieurs stratégies de développement de MMS ont été adoptées par les équipes de recherche. Elles abordent différemment les deux modules principaux de traitement des MMS à savoir : la navigation et le géo-référencement des données de perception. Le diagramme 3.7 résume les différentes stratégies de développement des MMS.

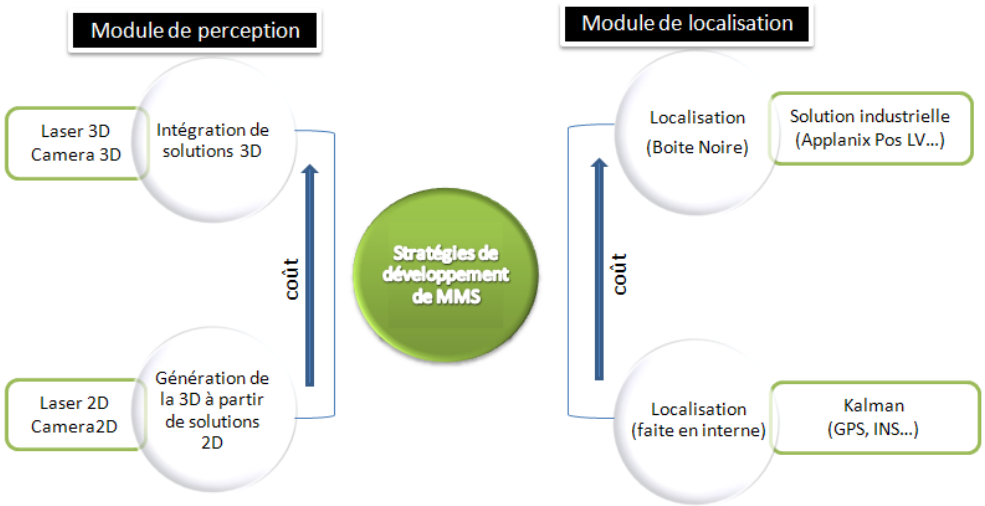


FIGURE 3.7 – Stratégies de développement des technologies de cartographie mobile et coût engendré.

En ce qui concerne le coût matériel des MMS, il est dépendant des stratégies de développement comme exposé dans le diagramme 3.7. Néanmoins, nous pouvons séparer les coûts en deux parties :

- Coût du module de localisation : en général c'est la composante la plus coûteuse dans un MMS. Il existe deux types de solutions : **(1)** Le coût d'une solution de navigation du type « boite noire » à base d'une solution industrielle, peut varier entre *4000 €* pour un *MTi-G* [10] à *120 K€* pour une solution *POS-LV* d'*Applanix* [11] (Whittaker and Nastro, 2006). Des illustrations de ces deux solutions sont présentées dans la figure 3.8 ; **(2)** Une solution de navigation du type « faite en interne » est dépendante des capteurs de positionnement utilisés. Les coûts des GPS peuvent varier d'une centaine d'euros pour une solution *WS5012* [12] à *35 K€* pour l'utilisation d'un *GPS RTK Sagitta* [13] (cf. Figure 3.9). En ce qui concerne les systèmes de navigation inertiels, la qualité du rendu du capteur est proportionnelle à son coût (cf. Figure 3.10).

10. http ://www.xsens.com
11. http ://www.applanix.com/
12. http ://www.wi-sys.com
13. http ://www.ashtech.com/

– Coût du module de perception : il existe deux familles de base : **(1)** Les MMS à base de photogrammétrie, leur coût est déterminé selon le nombre de caméras dont les gammes déterminent le coût du système de perception. Le prix d'une caméra peut varier entre *1000 €* pour une caméra *Marlin* simple et *10 K€* pour une caméra HD *Iconix* [14] (cf. Figure 3.12) ; **(2)** Les MMS à base de lasergrammétrie, le nombre et les types de scanners laser 2D déterminent le prix de la solution de perception finale. Il peut varier entre *10 K€* à *30 K€* selon la portée, la vitesse et la précision. (cf. Figure 3.11).
L'utilisation de solution 3D n'a pas été adoptée dans beaucoup de cas de MMS, néanmoins il est possible d'utiliser des caméras ou des appareils photos 3D (cf. Figure 3.13). Des scanners 3D haute définition ont été embarqués sur des véhicules de *DARPA* grand challenge. La figure 3.14 illustre un scanner *HDL-64E* [15] monté sur un véhicule participant au *DARPA grand challenge*.

FIGURE 3.8 – (à gauche) Système de positionnement bas coût *MTi-G*. (à droite) Système de positionnement à coût élevé *POS-LV*.

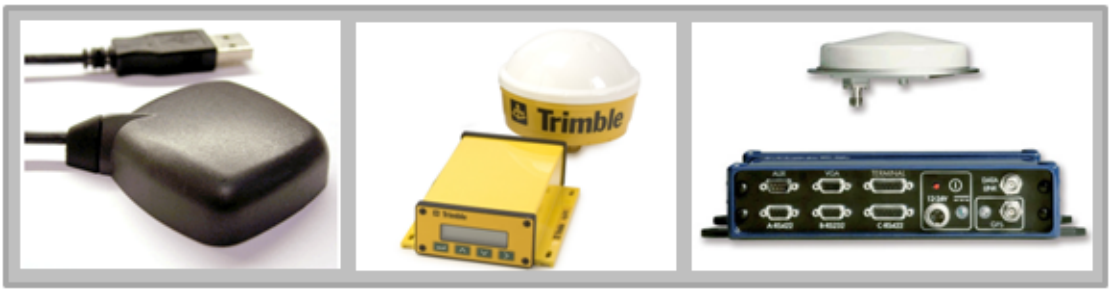


FIGURE 3.9 – (à gauche) GPS bas de gamme et faible coût *WS5012*. (au centre) *DGPS AG 132* moyen de gamme. (à droite) GPS haut de gamme et à coût élevé *RTK Sagitta*.

14. http ://www.iconixvideo.com/
15. http ://www.velodyne.com/

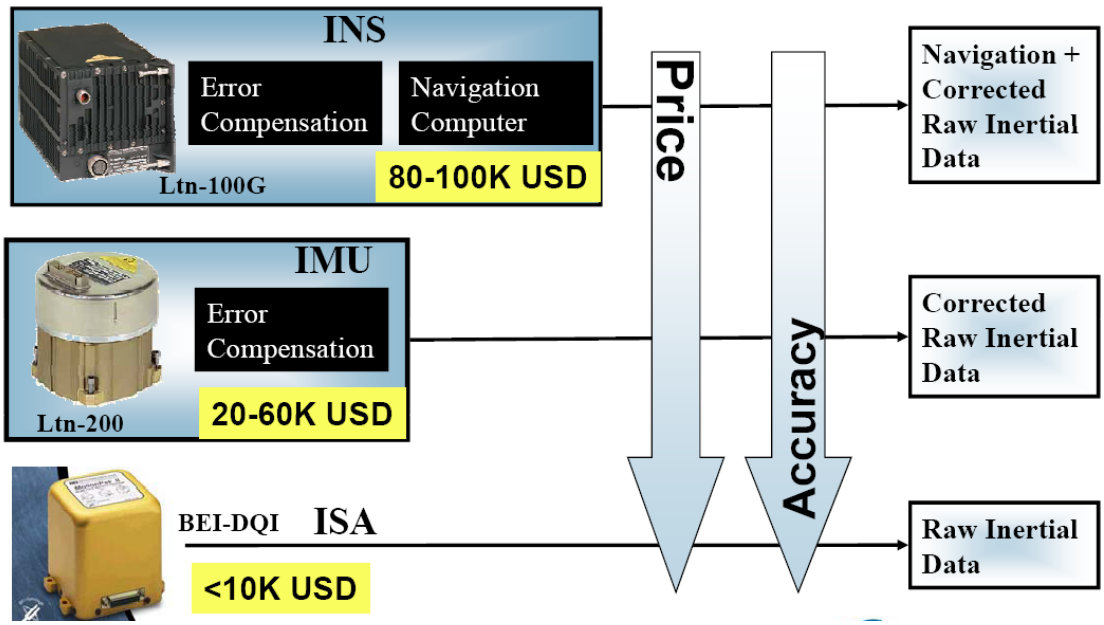


FIGURE 3.10 – Les prix des systèmes de navigation inertiels sont proportionnels à leurs précisions *(Source des illustrations : http ://mms.geomatics.ucalgary.ca/).*

FIGURE 3.11 – (à gauche) Télémètre nappe-simple *LD A* de chez *IBEO*. (au centre) Télémètre multi-nappe *LD multilayer* de chez *IBEO*. (à droite) télémètre nappe-simple *LMS 221* de chez *SICK*.

FIGURE 3.12 – (à gauche) Caméra bas de gamme *Marlin F-046B*. (au centre) Caméra moyen de gamme *AVT Pike F-145C*. (à droite) Caméra haut de gamme *Iconix HEAD-RH1* (supposée utilisée pour *Google Street view*).

FIGURE 3.13 – (à gauche) Appareil photo 3D. (à droite) Caméra *3D full-HD* de chez *Panasonic*.

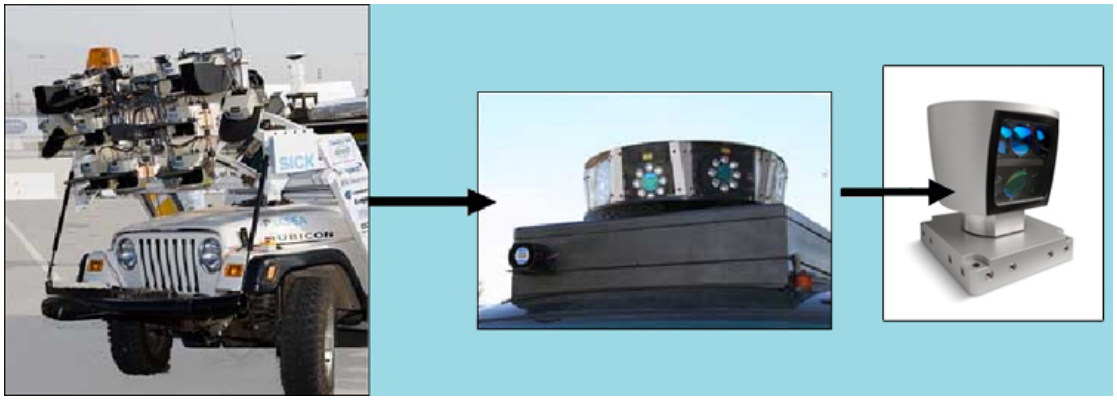


FIGURE 3.14 – Scanner laser 3D *HDL-64E* embarqué sur un véhicule participant au *DARPA grand challenge (Source des illustrations : http ://www.velodyne.com)*.

3.3.3 Synthèse du coût

Le tableau 3.3 résume les différents coûts selon les différentes gammes de MMS.

	Système de Cartographie Mobile Terrestre		
Matériel	Haut de gamme	Moyen de Gamme	bas de gamme
Véhicule	50 K€		
Navigation B.N	120K€ : *POS-LV*	3-10K€ : *MTi-G*	
INS	6K€ $\Longrightarrow$ 65K€ (cf. Figure 3.10)		
GPS	35K€ : *RTK Sagitta*	5-10K€ : *AG132*	100€ : *WS5012*
Scanner 2D	5-10K€ : *Sick LMS 221*		
Scanner 3D	15-30K€ : HDL-64E		
Caméra 2D	500€ $\Longrightarrow$ 10K€(cf. Figure 3.13)		
Caméra 3D	20K€ : *3D full-HD*		
Logiciels	5K€ : RT-Maps		
Sous-total	300K€	150K€	70K€
Coût intégration	variable		

TABLE 3.3 – Coût des Systèmes de Cartographie Mobile terrestres.

Pour les systèmes réalisés en interne, il ne faut pas négliger le coût de la mise en place et de l'intégration logicielle et matérielle. Cependant, le choix d'une solution industrielle (boîte noire) est souvent limitée par le verrouillage de l'accès aux données brutes des capteurs manipulés.

Le coût d'un système de numérisation mobile reste relativement élevé et il n'existe pas de solution à faible coût. Il existe différentes gammes dont le coût varie de *100K€* pour un système bas de gamme à *500K€* (coûts incluant les frais moyens d'intégration). Le coût d'un système dépendra de la précision recherchée.

Nous faisons un comparatif entre les trois familles de capteurs : INS, GPS et scanner laser dans l'annexe A.

3.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un état de l'art des technologies de cartographie mobile, en mettant le point sur les systèmes de cartographie mobile embarqués sur véhicule terrestre. Nous avons constaté l'accroissement de ces systèmes au niveau mondial proportionnellement aux nombreux besoins applicatifs dans différents domaines. La stratégie de développement des MMS est dépendante de l'objectif en terme de résultat. Les MMS sont basés sur l'intégration de différentes parties matérielles et logicielles et nécessite l'intervention d'une multitude d'acteurs. Nous présentons dans le chapitre suivant notre plateforme de numérisation *Lara3D*. Nous détaillons les erreurs pouvant affecter les MMS ainsi que leurs corrections, ceci a été synthétisé grâce à nos travaux d'expérimentation.

Chapitre 4

Relevés laser mobiles expérimentaux, analyse et amélioration

Sommaire

4.1 Introduction **90**
4.2 Le système de cartographie mobile *Lara3D* **90**
4.3 Détermination expérimentale des erreurs relatives aux MMS **93**
4.3.1 Caractérisation des erreurs des capteurs 93
4.3.2 Aspects opérationnels des acquisitions 100
4.4 Axes d'amélioration **103**
4.5 Consolidation du nuage de points laser **104**
4.5.1 Contexte de l'étude 104
4.5.2 Mise en hauteur du télémètre laser 104
4.5.3 Utilisation de télémètre *muti nappe* 104
4.5.4 Utilisation d'une configuration multi-télémètres 106
4.6 Amélioration du géo-référencement direct **106**
4.6.1 Contexte de l'étude 106
4.6.2 État de l'art de la fusion de données 108
4.6.3 Zone d'étude et observation des données de test 108
4.6.4 Approches de fusion développées 110
4.6.5 Résultats de la fusion 112
4.7 Approches de correction basée sur des données externes **113**
4.7.1 Contexte 113
4.7.2 Apport des images aériennes 114
4.7.3 Approche proposée basée sur le MNS 114
4.7.4 Apport de la *BD TOPO®* 115
4.8 Configuration optimale d'un MMS et approche de correction proposée **116**
4.9 Conclusion **116**

4.1 Introduction

Dans le contexte de cartographie 3D réaliste produite par une fusion de données hétérogènes, la qualité des données traitées est essentielle pour garantir la cohérence du résultat final. Ces données sont susceptibles d'être affectées par des déformations d'ordre local ou global. Nous présentons dans ce chapitre le MMS *Lara3D* et les travaux d'améliorations des *relevés laser mobiles* issus de celui-ci. Nous exposons nos travaux d'expérimentation et de recensement d'erreurs affectant les MMS. Ensuite, nous proposons nos différentes contributions pour la correction des erreurs rencontrées. Enfin, nous mettons l'accent sur une démarche centrale et innovante de notre travail, à savoir l'utilisation d'une approche de correction de *relevés laser mobiles* basée sur des données externes aux systèmes d'acquisition.

4.2 Le système de cartographie mobile *Lara3D*

Présentation de la plateforme

Le Centre de Robotique de l'école des Mines de Paris a acquis en 1998 un véhicule Renault Espace pour valider en situation réelle ses travaux sur la perception avancée et la fusion multi-capteurs (cf. Figure 4.2). Ce véhicule prototype baptisé LARA, acronyme de « La Route Automatisée », est configuré pour accueillir de nombreux capteurs permettant des configurations dynamiques d'acquisition dans un but de recherche expérimentale d'optimisation du processus. *Lara3D* permet également de mener des travaux de comparaison entre les différentes gammes de capteur de même fonctionnalité utilisées sur le véhicule. En particulier le véhicule comporte principalement :

- pour la perception : des caméras vidéos, des appareils photos haute résolution, un ou plusieurs radars, un ou plusieurs télémètres laser 2D.
- pour la navigation : une (plusieurs) centrale(s) inertielle(s), un (plusieurs) GPS, des ultrasons, des odomètres, des capteurs d'angles volant, une boussole numérique.

Le véhicule est doté également d'un ordinateur embarqué dénommé « *data logger* » qui est équipé du logiciel *RT-Maps* [1] (Nashashibi et al., 2000) (cf. Figure 4.1). Ce dernier permet le traitement de données datées et synchronisées provenant en temps réel des capteurs. L'un des principaux avantages de ce logiciel réside dans le fait qu'il est possible d'enregistrer ces données datées et synchronisées de manière à pouvoir effectuer un rejeu de ces dernières pour des tests « hors ligne » dans les mêmes conditions.

Dans le cadre de cette thèse et dans le but d'améliorer le rendu 3D de notre plateforme d'acquisition *Lara3D*, plusieurs capteurs ont été testés et comparés dans différentes campagnes d'acquisition. Les caractéristiques, les détails ainsi que les résultats de ces acquisitions sont exposés dans les annexes C, D, E et F.

1. Real Time Multisensor Advanced Prototyping Software. http ://www.intempora.com/

Principe de la numérisation 3D par télémétrie

La génération de nuage de points 3D à partir des acquisitions *Lara3D* s'effectue grâce à deux modules de traitement :

1. Module de localisation : il s'agit d'une fusion entre les capteurs de la localisation (INS, GPS, Odomètre. . .) via un filtrage de Kalman, pour générer la position géo-référencée du véhicule. Pour plus de détails, une étude comparative est exposée dans la section 4.6.
2. Module de géo-référencement des données de perception : en équipant judicieusement notre véhicule d'un (ou plusieurs) télémètres laser il était possible de reconstruire un modèle 3D de l'environnement. Dans notre approche, le télémètre laser a été installé de manière à numériser un plan perpendiculaire à la direction de conduite (cf. Figure 4.3). Les positions générées par le module de la localisation permet le recalage des profils successifs du laser 2D, ce qui a comme résultat un nuage de points 3D.

Le détail de notre système de numérisation est présenté dans (Goulette et al., 2006). Notre processus de traitement adopte le même principe que celui présenté dans (Wulf and Wagner, 2003). La figure 4.1 illustre le diagramme RT-Maps utilisé pour la génération des modèles 3D avec les deux principaux modules de traitement.

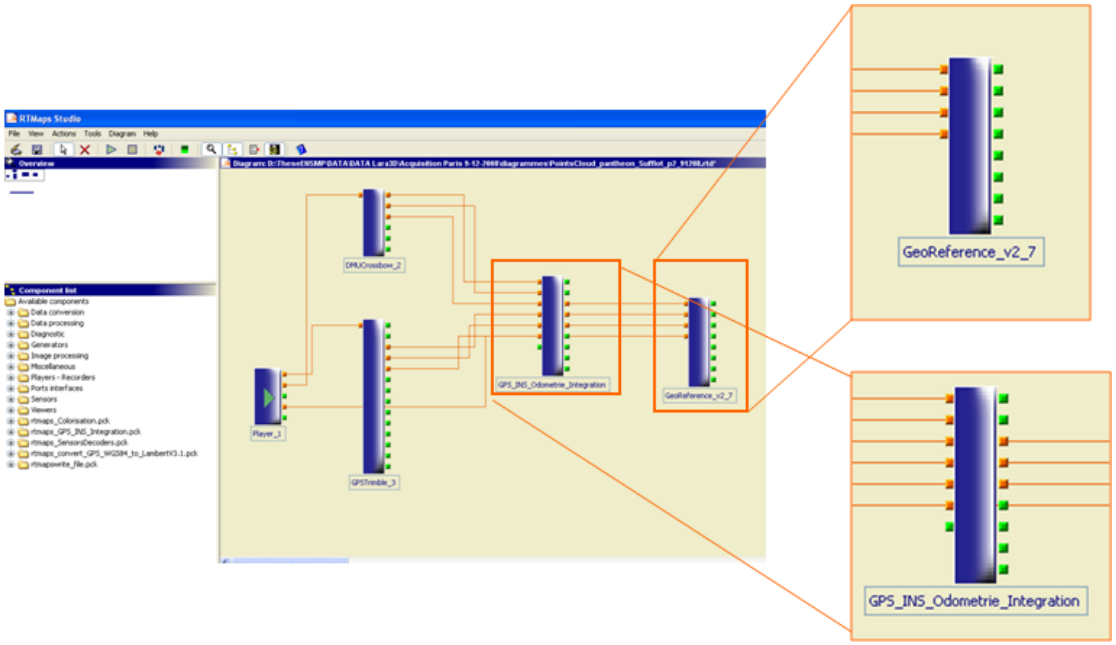


FIGURE 4.1 – Diagramme RT-Maps utilisé pour la génération des modèles 3D avec les deux principaux modules de traitement.

Dans une phase de colorisation ou de texturation des nuages de points 3D, les données images d'une caméra latérale avec un objectif œil de poisson (*Fish-Eye*) (Brun

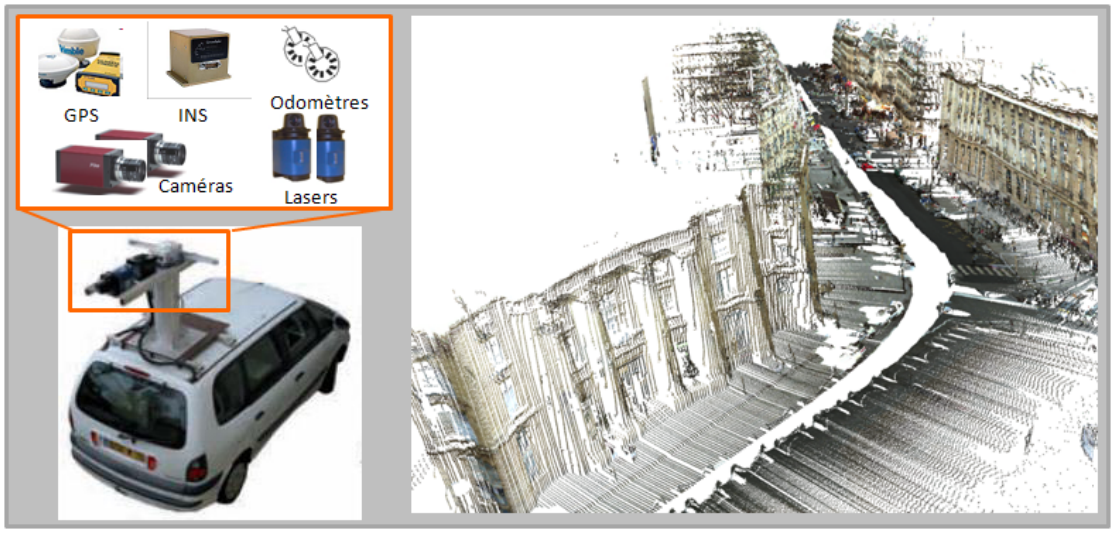


FIGURE 4.2 – (à gauche) Le prototype *Lara3D* avec sa configuration de capteurs de base. (à droite) Résultat de la numérisation 3D de la *Mairie de Paris 5ème*.

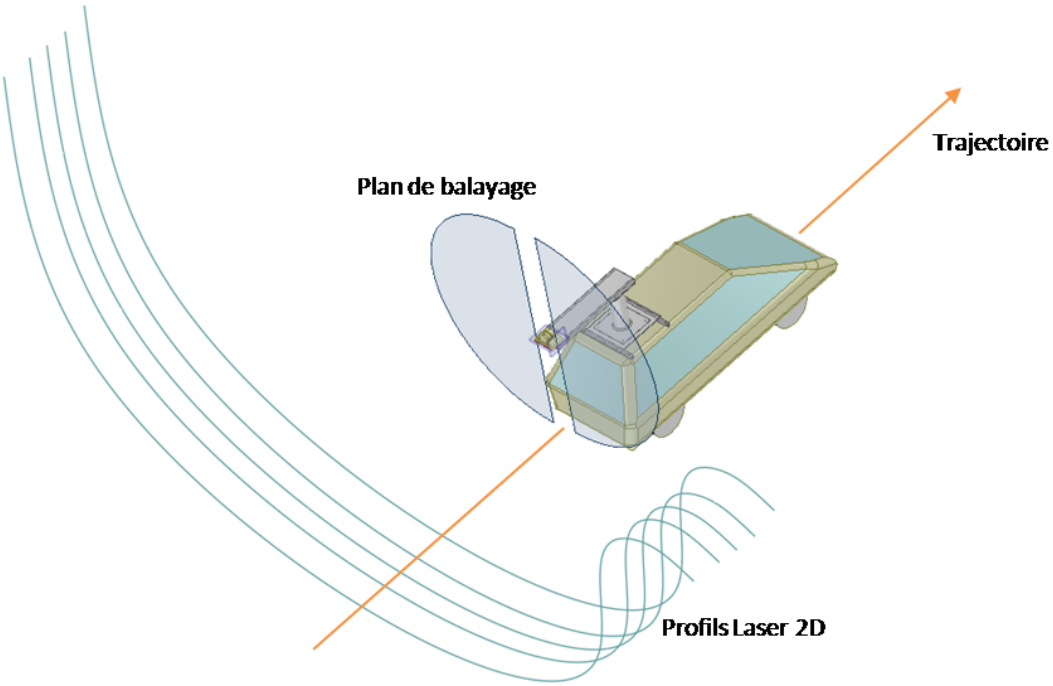


FIGURE 4.3 – Principe de fonctionnement du laser en balayage vertical.

and Goulette, 2007) ou bien par un couplage d'une caméra haute résolution avec un laser, ont été exploitées en plus des données laser (cf. Figure 4.4).

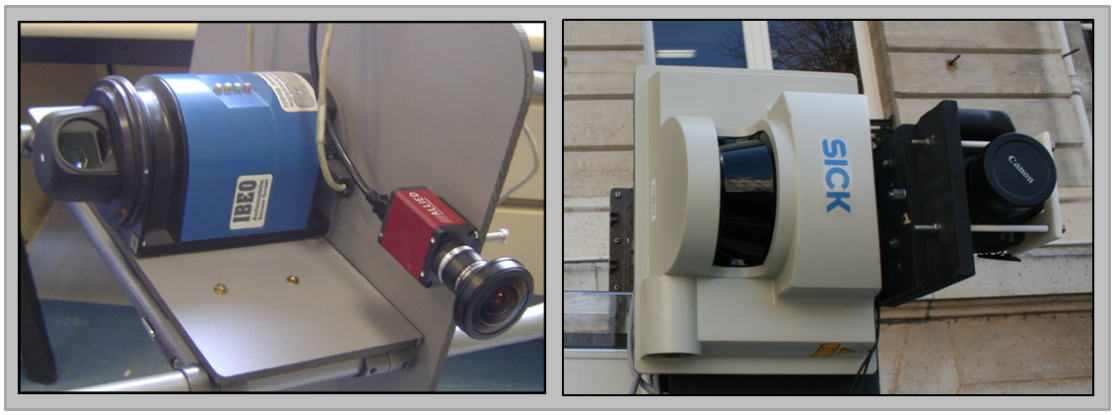


FIGURE 4.4 – (à gauche) Système de vision couplée : télémètre laser, Caméra CCD avec objectif œil de poisson (*Fish-Eye*). (à droite) Système de vision couplée : télémètre laser, appareil photo numérique haute définition.

4.3 Détermination expérimentale des erreurs relatives aux MMS

Comme déjà exposé dans le chapitre 3, un système de cartographie mobile est un système complexe, son développement se fait de manière modulaire. Les différents modules sont déterminés et départagés selon les compétences nécessaires à la réalisation de ces systèmes. Cette multitude d'éléments, d'acteurs et de sources d'information, peut produire plusieurs erreurs pouvant affecter les résultats. Nous présentons dans cette section les anomalies pouvant affecter la chaîne de traitement d'un MMS et leurs répercussions sur le résultat final d'une numérisation. En parallèle, nous exposons les éventuels recours pour pallier ces problèmes, qu'ils soient intrinsèques ou extrinsèques, matériels ou logiciels.

4.3.1 Caractérisation des erreurs des capteurs

Erreurs des systèmes GPS

La qualité du signal GPS est fortement liée à la configuration des satellites en vue durant l'acquisition (cf. Figure 4.5). Une constellation trop éparpillée ou trop rapprochée est à l'origine d'erreurs de positionnement. L'indice du DOP [2] détermine la qualité du signal.

Cependant, des problèmes de masquages dans des environnements urbains et des problèmes de multi-trajets provoquent des erreurs de positionnement GPS (95% du

2. Dillution of Precision.

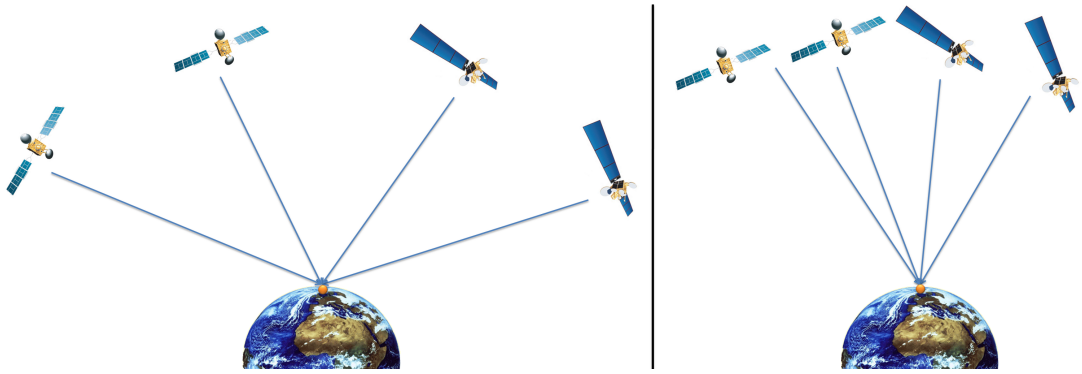


FIGURE 4.5 – (à gauche) Géométrie favorable des satellites. (à droite) Géométrie non favorable.

signal GPS non corrigé de la métropole *Tokyo* est biaisé (Chen and Shibasaki, 1999)). La propagation atmosphérique provoque aussi des retards et des erreurs dans les mesures GPS. La Figure 4.6 illustre les trois cas d'erreur cités.

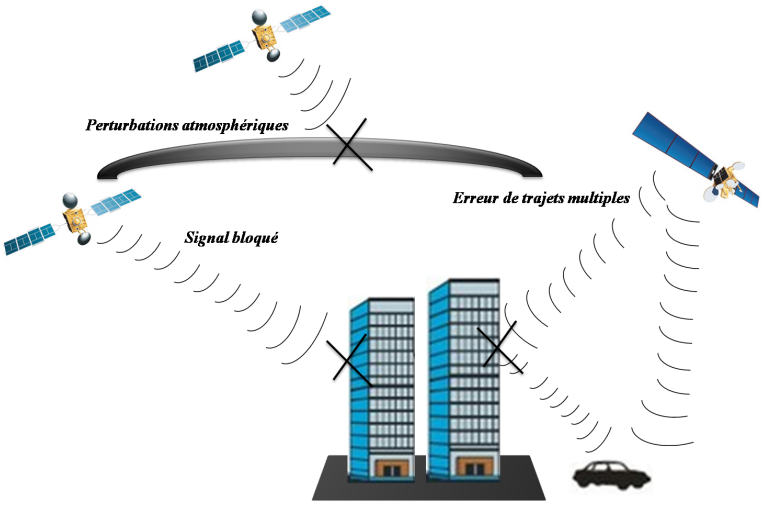


FIGURE 4.6 – Dérives du GPS : signaux non visibles, multi-trajets et perturbations atmosphériques.

Pour plus de détails sur le fondement du système GPS ainsi qu'un aperçu sur les différents types de correction et de réception, le lecteur peut se référer à (El-Rabbany, 2002).

Dans le cadre d'acquisition réalisée via notre plateforme *Lara3D* nous avons recensé différents cas d'erreur affectant les données GPS. Ces erreurs provoquent des déformations dans les nuages de points 3D résultants.

La figure 4.7 présente la répercussion d'un cas de saut du GPS dû à un problème de masquage dû au **blocage du signal** par des canyons urbains (acquisition *Paris 5eme* cf. Annexe D). La déformation est du type global et affecte toute la géométrie du nuage de point résultant. Une des solutions à ce problème pourrait être l'intégration d'un altimètre : ses données serviraient à la correction en continu de la valeur d'altimétrie dans le filtrage de Kalman (Labbe, 2007).

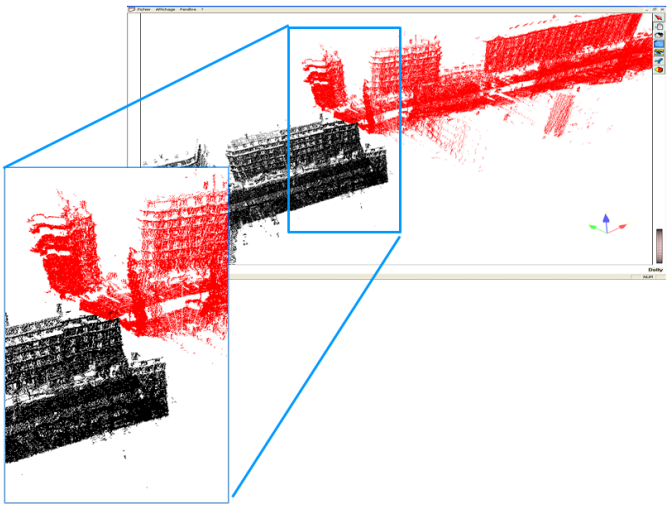


FIGURE 4.7 – Rue *Soufflot, Paris 5ème*. Erreur GPS due à un problème de masquage se traduit par une incohérence affectant les données issues du MMS *Lara3D*.

La partie (A) de la figure 4.9 illustre un cas de perte de GPS dû à des **perturbations atmosphériques** (acquisition *Magny-les Hameaux* cf. Annexe C). La figure 4.8 illustre un cas de trajectoire biaisée par une erreur de GPS dû à un problème de **trajets multiples.** Les déformations ont des répercussions partielles et locales sur les données 3D produites. L'intégration de l'information inertielle corrige ces cas d'erreur si sa durée n'est pas très longue (cf. section 4).

Erreurs des systèmes INS

Il existe un ensemble d'erreurs communes entre toutes les conceptions de centrale inertielle. Les capteurs de base constituant une centrale inertielle subissent des erreurs :

- Gyromètres/accéléromètres : il existe des erreurs de biais, de facteur d'échelle et de bruit ;
- Magnétomètres : il sont affectés des mêmes erreurs citées pour les Gyromètres et les accéléromètres, en plus d'erreurs ferromagnétiques.

Une fois l'assemblage des capteurs dans un système inertiel réalisé, d'autres erreurs peuvent apparaitre, comme la non-orthogonalité des capteurs ou l'oscillation de *Schuler*. L'effet de ces phénomènes sur la navigation inertielle et les méthodes de correction sont expliqués dans (Titterton and Weston, 2004).

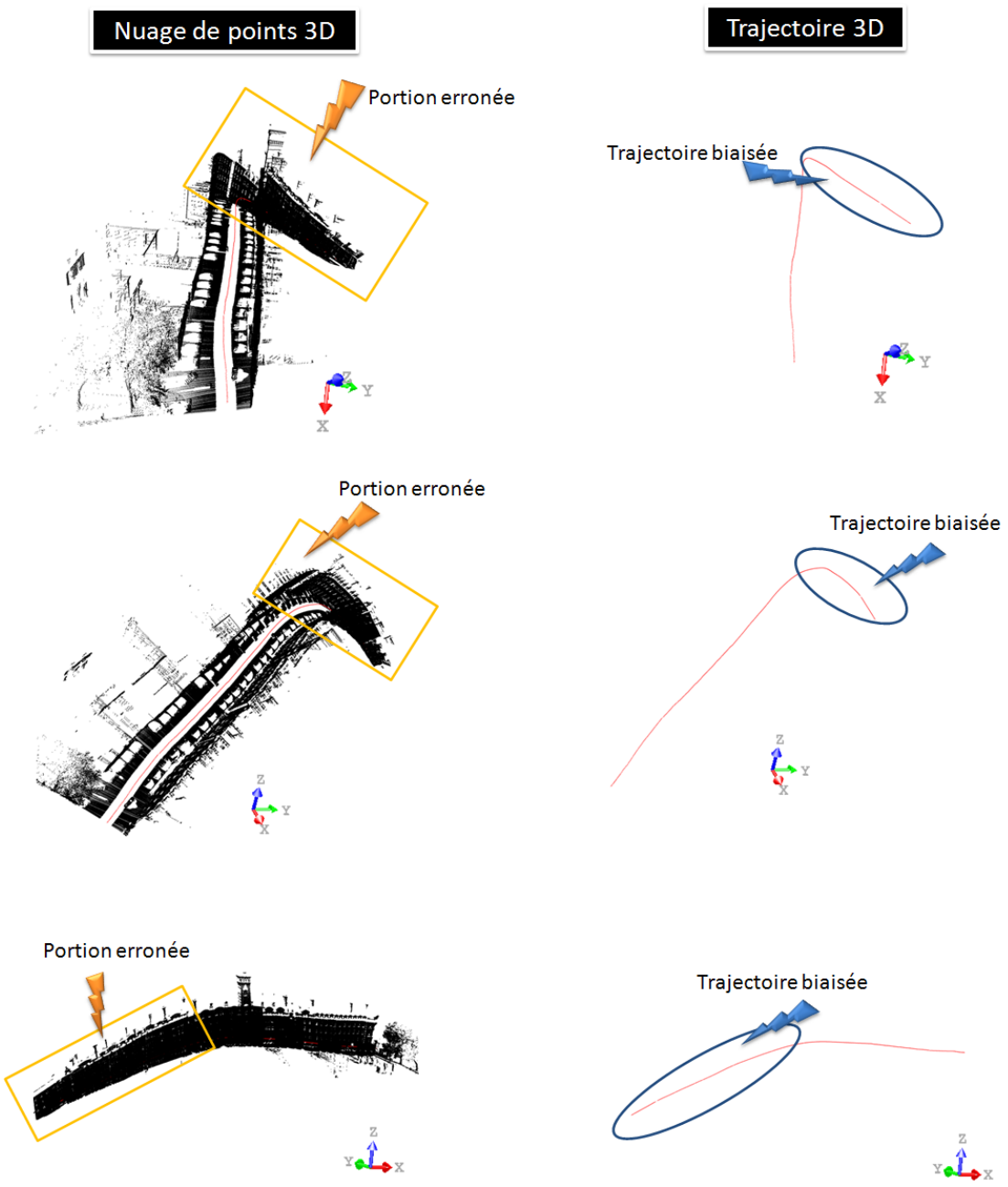


FIGURE 4.8 – La portion 1 de la rue *Saint Jacques, Paris 5ème*. Erreur GPS due à un problème de multi-trajets se traduit par une incohérence affectant le nuage de points 3D issues du MMS *Lara3D*.

FIGURE 4.9 – Acquisition à *Magny-Les-Hameaux*. (a) Erreur de saut GPS due à des perturbations atmosphériques et répercussion sur le nuage de points 3D. (b) Problème de dérive de centrale inertielle qui se traduit par des erreurs sur l'angle de lacet avec répercussion sur le nuage de points 3D.

Ces erreurs générées par le système inertiel produisent des déformations partielles dans les nuages de points résultant d'une acquisition terrestre. La figure 4.10 illustre le résultat 3D biaisé d'une acquisition marquée par une dérive de la centrale inertielle et par de la perte du signal GPS. La solution pour pallier à ce type d'erreur pourrait être l'intégration de l'information odométrique au niveau du filtre de Kalman (cf. section 4). Néanmoins, dans le cas où l'information de l'odométrie souffre du problème de glissement de roues, il existe d'autres types de solutions à base de recalage non rigide pour la correction du modèle 3D final.

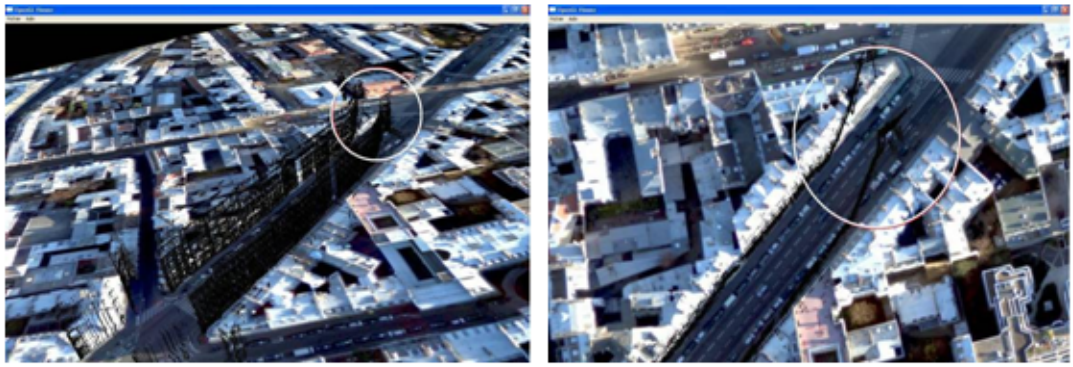


FIGURE 4.10 – Recalage rigide par changement de repère entre un nuage de points 3D et une photo aérienne sur la rue *Gay Lussac* à (Paris 5ème). Sur la fin du tronçon (partie encerclée), le résultat est aberrant et la déformation du modèle 3D est claire. Ceci est dû à une dérive de la centrale inertielle couplée à la perte des informations GPS. Une des solutions est la correction du modèle 3D en s'appuyant sur des techniques de recalage non rigide.

Erreurs des lasers

Les nuages de points produits par un télémètre laser sont affectés par des limites liées aux réflexions relatives aux objets numérisés. Par exemple la numérisation d'une fenêtre en mobilier urbain ne produit pas le résultat de la surface du verre mais plutôt l'intérieur de la pièce numérisée (cf. Figure 4.11). Ceci peut générer des anomalies pour des traitements particuliers tels que le recalage ou la modélisation 3D. L'une des solutions à ce problème pourrait être un traitement par filtrage sur les nuages de points résultant de l'acquisition initiale.

L'angle d'incidence du laser peut être source de perte d'informations pour des surfaces tangentielles. Des conflits peuvent être à l'origine d'une réflexion mixée de deux points 3D différents. Ces cas d'anomalies sont illustrés sur la figure 4.12.

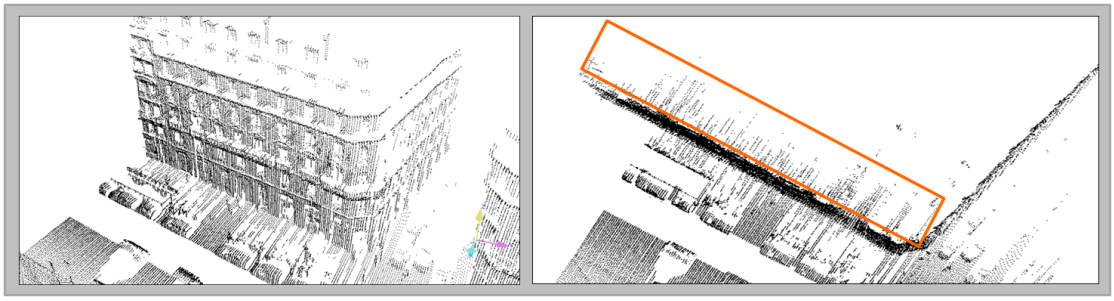


FIGURE 4.11 – Rue Soufflot Paris acquisition avec *Lara3D*. Problème de pénétration du laser par les surfaces en verre dans une acquisition urbaine.

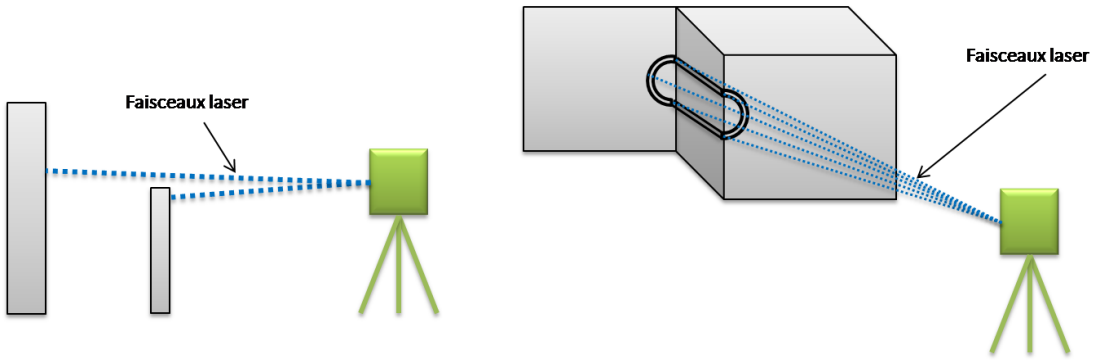


FIGURE 4.12 – (à gauche) Problème des réflexions mixées (*Mixed Pixels*). (à droite) Problème d'angles d'incidence dans le cas de numérisation des zones de contour *(Illustrations reproduites à partir de (Hebert and Krotkov, 1992) et (Dias et al., 2001)).*

Caractéristiques des caméras et limite de la mono-résolution

Au cours d'une acquisition dans un environnement urbain, la luminosité est très variable (ombres, variation de l'illumination. . .). Ceci se répercute sur la cohérence du rendu des caméras. Plus encore, dans des acquisitions alternées dans le temps de la même scène, le résultat en terme photogrammétrique ne sera pas le même. Pour des traitements à réaliser sur des données 3D résultantes (comme le recalage des nuages de points colorés) cette variation présente une source d'incertitude qui induit les algorithmes en erreur (cf. section 7).

Pour la colorisation des nuages de points 3D ou la texturation des modèles 3D, l'utilisation de données phtogrammétique mono-résolution et du même point de vue produit un résultat erroné en terme de cohérence de résolution (cf. Figure 4.13). Une des solutions à cette limite est d'utiliser plusieurs caméras de différentes résolutions ou bien une caméra multi-résolution pour le même point de vue.

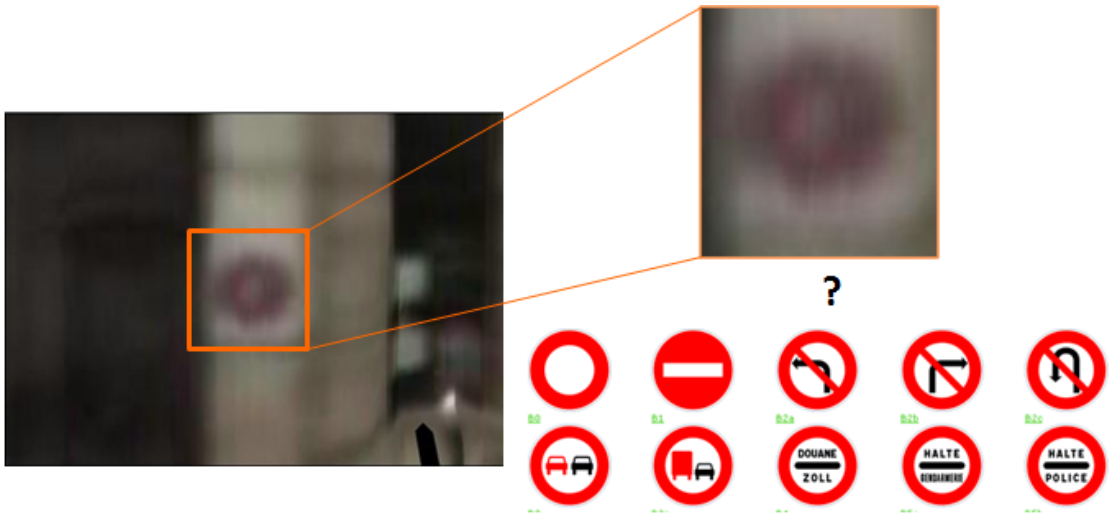


FIGURE 4.13 – Les textures ne sont pas multi-résolutions : un grand plan sur une primitive particulière est réalisé en géométrie mais la texture ne suit pas. C'est le même effet dans le cas d'une texturation de la même zone avec des distances du point vue variables.

4.3.2 Aspects opérationnels des acquisitions

Contraintes des environnements urbains

Dans des environnements urbains dynamiques, la planification des acquisitions est susceptible de rencontrer des difficultés liées à plusieurs facteurs :

- Le code de la route : *céder le passage* gêne la réalisation d'une acquisition urbaine à la même vitesse. Les arrêts (aux feux de signalisation et ou aux stops), empêchent l'acquisition d'une même zone en une seule fois. La solution est d'effectuer des

acquisitions planifiées par tronçons. Mais cette démarche est susceptible de générer des incohérences sur les données 3D produites (accumulation d'erreur des capteurs).

– Les éléments dynamiques : piétons, voitures ou autres éléments sont sources de perturbations d'acquisition et d'occultations qui dégradent le résultat final (cf. Figure 4.14).

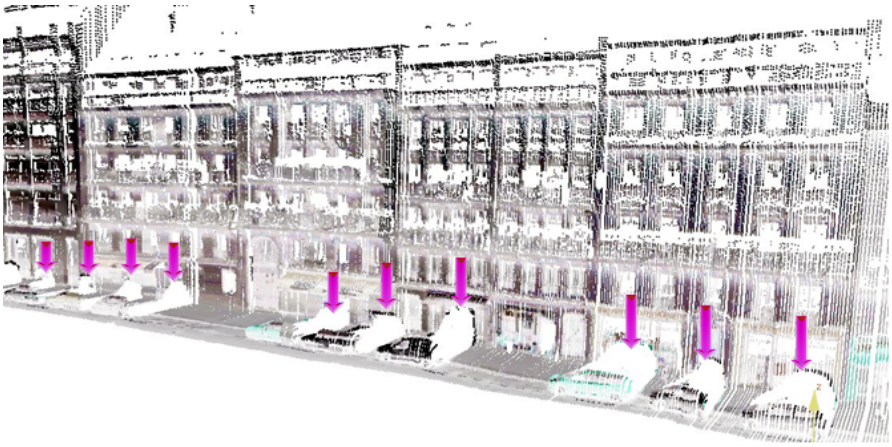


FIGURE 4.14 – Rue *Gay-Lussac* à *Paris 5ème* : les problèmes d'occultations du laser avec des véhicules en mouvement ou bien garés produisent des trous dans les façades des bâtiments.

La correction des anomalies observées sur les données 3D peut se faire par des algorithmes de recalage de données et de mise en cohérence (cf. section 7). Dans le cas des occultations, des algorithmes de bouchage de trous peuvent combler les manques d'informations 3D (Liepa, 2003; Früh et al., 2005).

Les configurations d'itinéraires difficiles

La planification d'acquisition dans un environnement urbain, peut comporter des itinéraires marqués par des zones particulièrement difficiles pour le module de la localisation ou pour le module de génération de la 3D. Typiquement, les circuits fermés font partie des itinéraires les plus difficiles pour la navigation : l'accumulation d'erreurs des capteurs de navigation empêche la correspondance entre la position de départ et la position d'arrivée (cf. Figure 4.15).

L'acquisition avec une trajectoire aléatoire non rectiligne, servira à la consolidation du nuage de points obtenu : une même zone peut être numérisée plus qu'une seule fois. Par contre ceci peut générer des erreurs de précision sur le nuage de points résultant du fait que les distances d'acquisition du télémètre laser ne sont pas les mêmes pour une même zone. La figure 4.16 illustre le comportement théorique d'une acquisition sur un trajet non rectiligne.

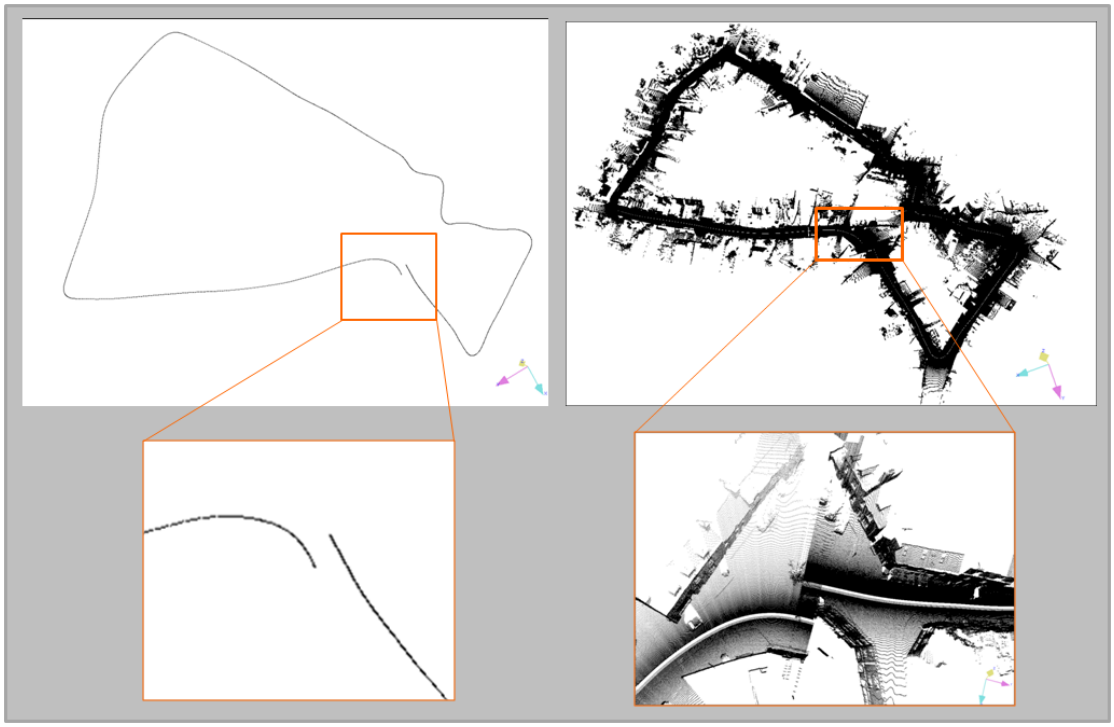


FIGURE 4.15 – Acquisition avec *Lara3D* au Village d'*Étables-sur-Mer* en *Côtes-d'Armor.* Problèmes d'acquisition en boucle : le point de départ ne correspond pas au point d'arrivée.

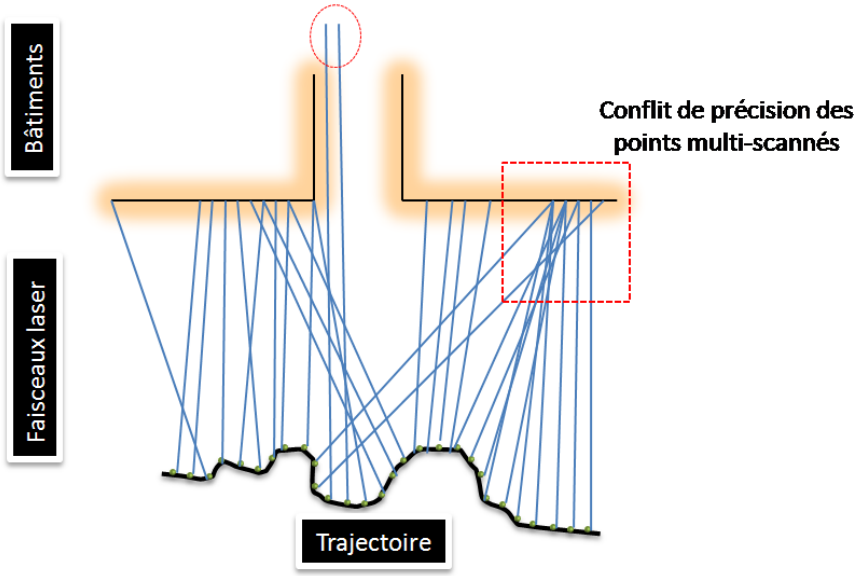


FIGURE 4.16 – Acquisition sur une trajectoire non rectiligne. Des erreurs de précision sur le nuage de points résultant peuvent être observées.

4.4 Axes d'amélioration

Comme déjà exposé dans la section 4.3, une acquisition utilisant les MMS est sujette à plusieurs déformations. Les sources d'erreurs étant nombreuses, un travail de caractérisation de l'erreur globale du système prendrait en compte toutes les anomalies intrinsèques et extrinsèques de la chaine de traitement dont quelques aspects ont été abordés au chapitre précédent. Ce type de quantification globale n'est pas traité dans le cadre de cette thèse. Le lecteur intéressé peut se référer aux travaux d'Alshawa (Alshawa, 2009) dans lesquels, il expose une étude des erreurs globales affectant un système de cartographie mobile terrestre embarqué sur un chariot. Cette étude pourrait être généralisée pour d'autres systèmes.

Néanmoins, nous nous sommes focalisés dans notre étude sur plusieurs axes d'amélioration des *relevés avec laser mobile*. Trois approches sont présentées dans la suite de ce chapitre :

- Densification et la consolidation du nuage de point laser ;
- Amélioration du géo-référencement direct ;
- Correction basée sur des sources images externes.

4.5 Consolidation du nuage de points laser

4.5.1 Contexte de l'étude

La consolidation du nuage de points issu d'un MMS a pour objectif de produire un modèle le plus complet possible en évitant le problème des occultations et en donnant plus de densité au nuage de points final. Ceci garantira une cartographie 3D finale de plus grande qualité. Nous exposons dans ce qui suit deux approches de consolidation des nuages de points issus d'un MMS.

4.5.2 Mise en hauteur du télémètre laser

Dans une étude de levée de voirie effectuée en collaboration avec un cabinet de géomètres experts, nous avons placé le télémètre laser à *3.1m* du sol. Cette hauteur permet d'augmenter l'angle d'incidence et éviter les erreurs dues à la multi-reflexion et aux surfaces tangentielles (cf. Figure 4.12). Les limites des« bas-côtés », non observables à une hauteur initiale du laser égale à 0.6m (cf. Figure 4.17), ont été numérisées grâce à la mise en hauteur du télémètre (cf. Figure 4.18). La figure 4.19 expose l'évolution des versions de *Lara3D*.

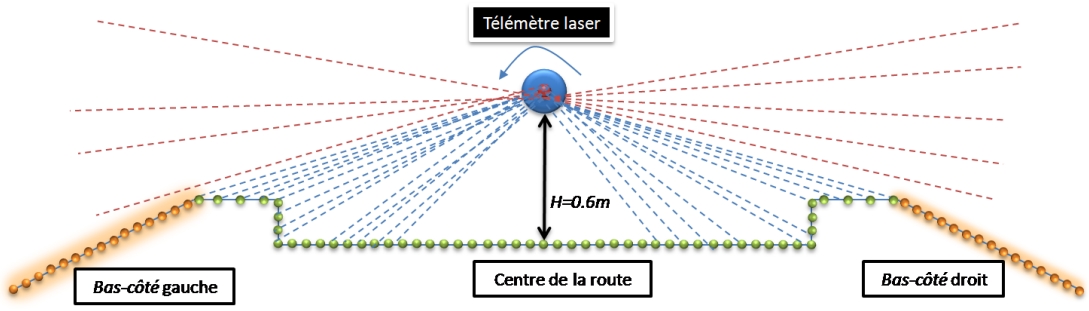


FIGURE 4.17 – Télémètre laser placé à une hauteur de 0.6m. Cette configuration ne permet pas de numériser les « bas-côtés ».

4.5.3 Utilisation de télémètre *muti nappe*

Nous avons embarqué un télémètre laser *multi-nappe* à la place de celui à *simple nappe*. Ce type de scanner est conçu initialement pour la détection d'obstacles (cf. Figure 4.20). Cette solution matérielle augmenterait la densité du nuage de points résultant (4 profils par position), et éviterait partiellement le problème d'occultation (ouverture angulaire 3.2°). Bien que l'approche théorique semblait convaincante, sur le plan pratique nous avons été confrontés à un problème lié à la nature du capteur utilisé : la précision des nappes n'étant pas suffisamment précise pour des mesures de distance. Ceci a généré un résultat de qualité insuffisante qui n'est pas exploitable pour la cartographie 3D.

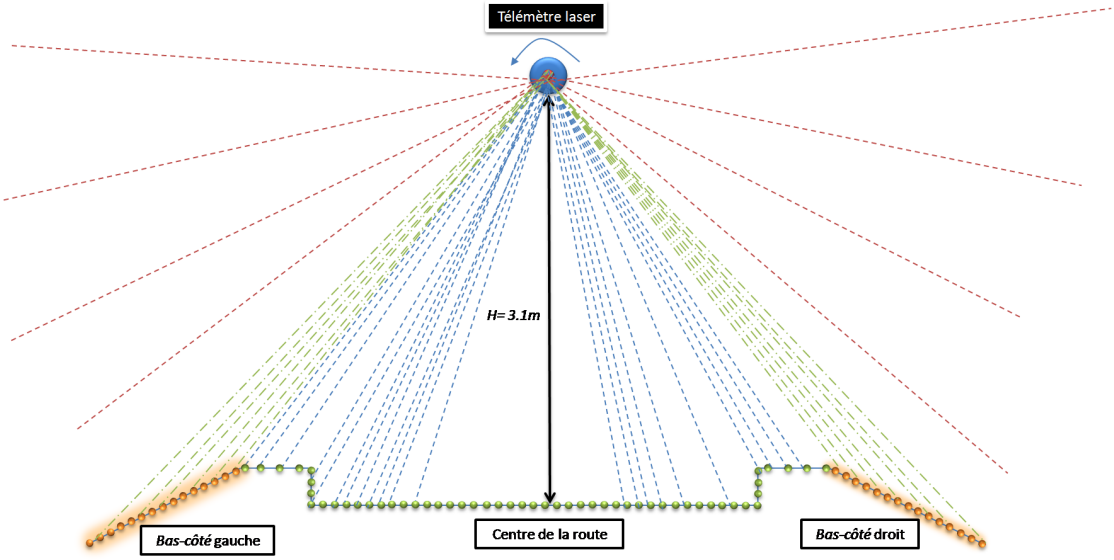


FIGURE 4.18 – Télémètre laser placé à une hauteur de 3.1m. Cette configuration permet d'effectuer correctement les relevés des « bas-côtés ».

FIGURE 4.19 – *Lara3D* : (à gauche) V1 avec télémètre à H = 0.6m. (au centre) V2 expérimentale avec télémètre à H = 3.1m. (à droite) Version actuelle avec validation du prototype expérimental de la V2.

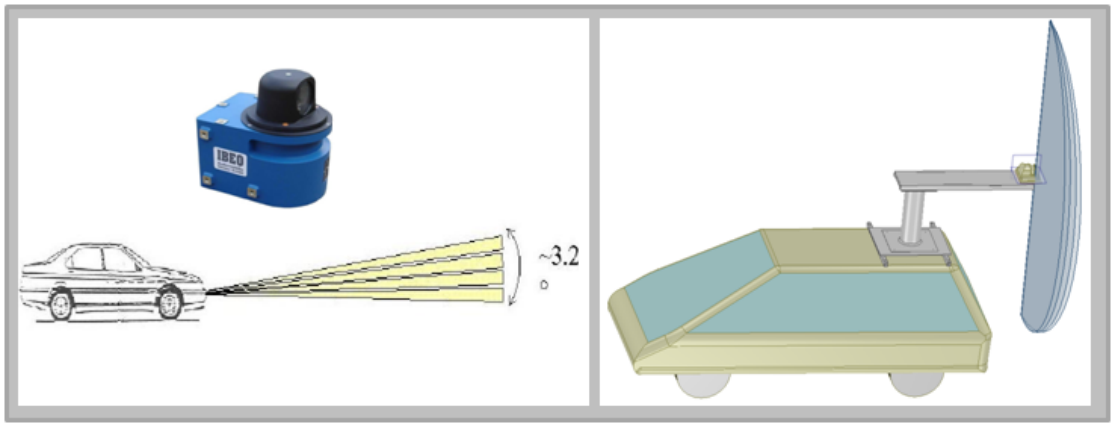


FIGURE 4.20 – (à gauche) Télémètre laser *IBEO multi nappe* utilisé initialement pour la détection d'obstacles. (à droite) Utilisation du télémètre pour la cartographie mobile 3D.

4.5.4 Utilisation d'une configuration multi-télémètres

Nous avons embarqué sur le véhicule *Lara3D* un scanner 3D *Trimble GX*. Ce scanner est conçu initialement pour les acquisitions terrestres. Nous avons bloqué la rotation horizontale du scanner pour avoir un comportement 2D. Différents angles de lacet[3] θ ont été choisis pour les acquisitions (−30°,30°,0°,−45°,45°) (cf. Figure 4.21). En observant les différents résultats recalés dans le même nuage de point, nous avons remarqué la complémentarité des différentes configurations d'acquisition. Celle-ci augmente la densité du nuage de points résultant et l'a consolidée par rapport aux problèmes d'occultations et de surfaces cachées. Pour plus de détails sur cette expérimentation le lecteur peut se référer à l'annexe F. Cette étude a permis de valider la nouvelle configuration de base de *Lara3D* avec six télémètres laser *Sick LMS 221* répartis comme indiqués dans la figure 4.22.

4.6 Amélioration du géo-référencement direct

4.6.1 Contexte de l'étude

L'amélioration du géo-référencement direct d'un MMS est une solution pour éviter les problèmes (erreurs des capteurs de localisation) qui peuvent affecter les modèles 3D issus de ces systèmes (cf. section 4.3). Cet axe de recherche a suscité l'intérêt de la majorité des équipes travaillant sur les MMS. De notre côté nous nous sommes intéressés dans le cadre du projet FUDOLO[4], au géo-référencement direct de données en temps

3. Le lacet est une rotation d'un mobile autour d'un axe vertical (l'axe de lacet) qui entraîne un changement de direction dans le plan horizontal.
4. FUsion de DOnnées pour la LOcalisation

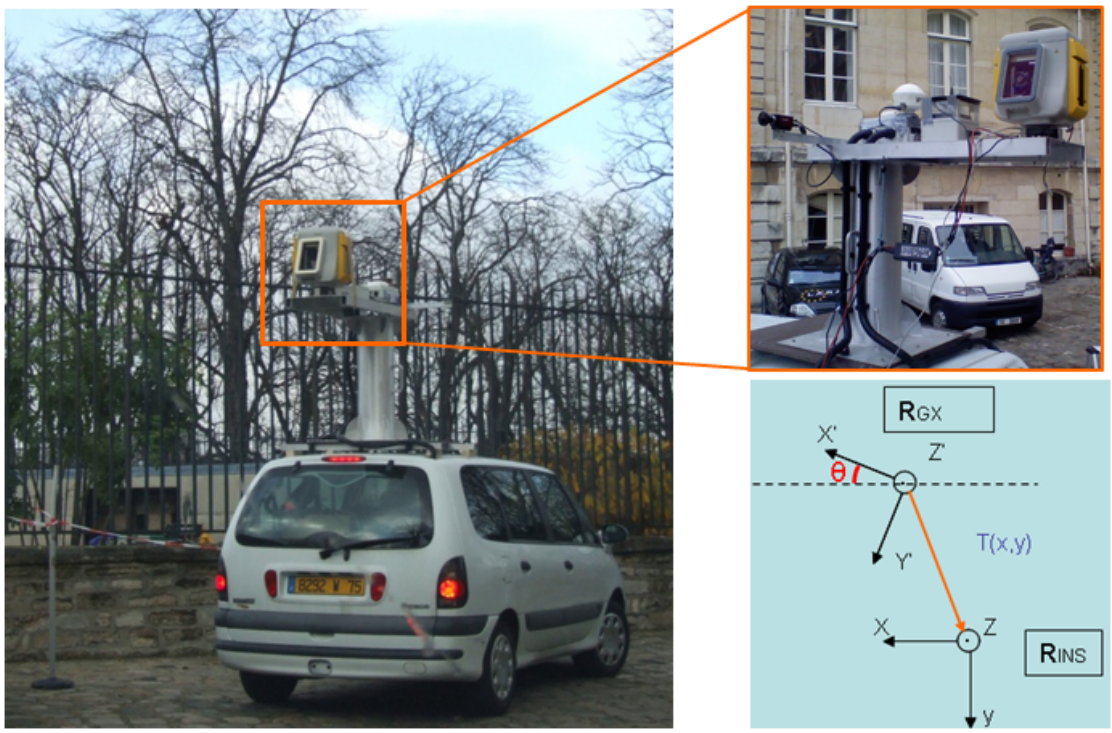


FIGURE 4.21 – Montage du scanner laser 3D *Trimble GX* sur le véhicule *Lara3D*.

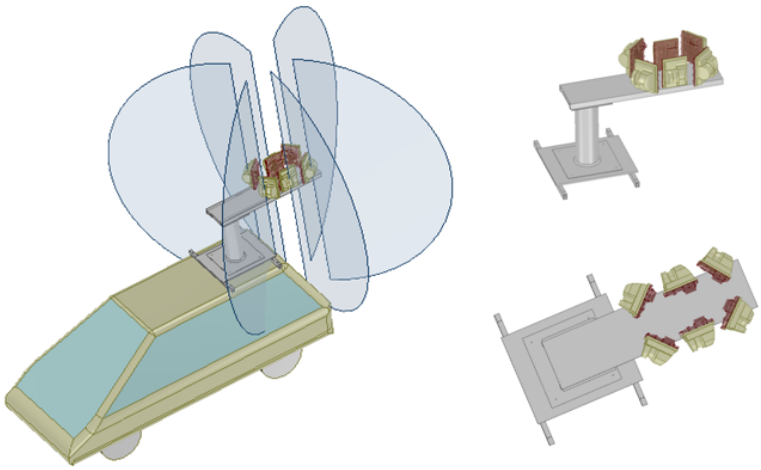


FIGURE 4.22 – Configuration des six télémètres *Sick LMS 221* sur *Lara3D*.

réel. Celui-ci sera utilisé comme un module de base dans la chaîne de traitement de notre système de cartographie mobile *Lara3D*, ce qui entrainera une correction des modèles 3D intégrés dans la cartographie finale.

4.6.2 État de l'art de la fusion de données

Pour obtenir une trajectoire fidèle à la réalité, des méthodes de fusion de données multi-capteurs doivent être appliquées. Nous nous focalisons ici sur les approches basées sur la théorie de l'estimation (Lehmann and Casella, 1998; Lehmann and Romano, 2005). Dans ce cadre une des méthodes les plus répandues est le filtrage de Kalman (Kalman, 1960; Kalman and Bucy, 1961) qui a révolutionné la théorie de l'estimation en fournissant le premier algorithme de filtrage récursif. Différentes variantes ont été développées depuis dans de nombreux domaines. Dans l'étude de trajectographie, le filtre de Kalman étendu EKF [5] est probablement le filtre le plus largement répandu pour les systèmes non linéaires.

Julier a proposé un nouvel algorithme (Julier and Uhlmann, 1996, 1997) appelé UKF [6] qui, en utilisant une approche d'échantillonnage déterministe, peut résoudre dans certaines conditions quelques imperfections du filtrage EKF . Cet algorithme a été étendu par (Wan and Van Der Merwe, 2000; Wan et al., 2000) pour estimer les paramètres et l'état du système. Pour plus de détails sur les fondements mathématiques de ces méthodes, le lecteur peut se référer à (Kay, 1993). Dans notre implémentation, nous nous sommes inspirés des travaux exposés dans (Grewal and Andrews, 2001).

4.6.3 Zone d'étude et observation des données de test

Zone d'acquisition

Dans le cadre de notre étude, nous avons mené des acquisitions dans le circuit du GIAT (cf. Figure 4.23). La trajectoire de référence est connue tout au long de ce circuit c'est l'une de ses particularités.

L'acquisition a été réalisée grâce au véhicule expérimental « LOLA » du laboratoire LIVIC [7] (cf. Figure 4.24). Différents capteurs de localisation ont été utilisés (GPS, INS, odomètre. . .) et l'enregistrement des données s'est fait grâce au logiciel *RT-Maps*. Une illustration détaillée de la configuration de l'acquisition est présentée dans la figure 4.24. Pour plus de détails, le lecteur peut se référer à (Kais et al., 2006).

Observation des données GPS

En analysant les données enregistrées nous avons remarqué quelques problèmes liés aux bruits des capteurs et aux conditions d'acquisition. Une illustration des observations faites sur les données GPS est présentée dans la figure 4.25. Ces observations illustrent

5. Extended Kalman Filter.
6. Unscented Kalman Filter.
7. Laboratoire sur les Interactions Véhicules-Infrastructure-Conducteurs.

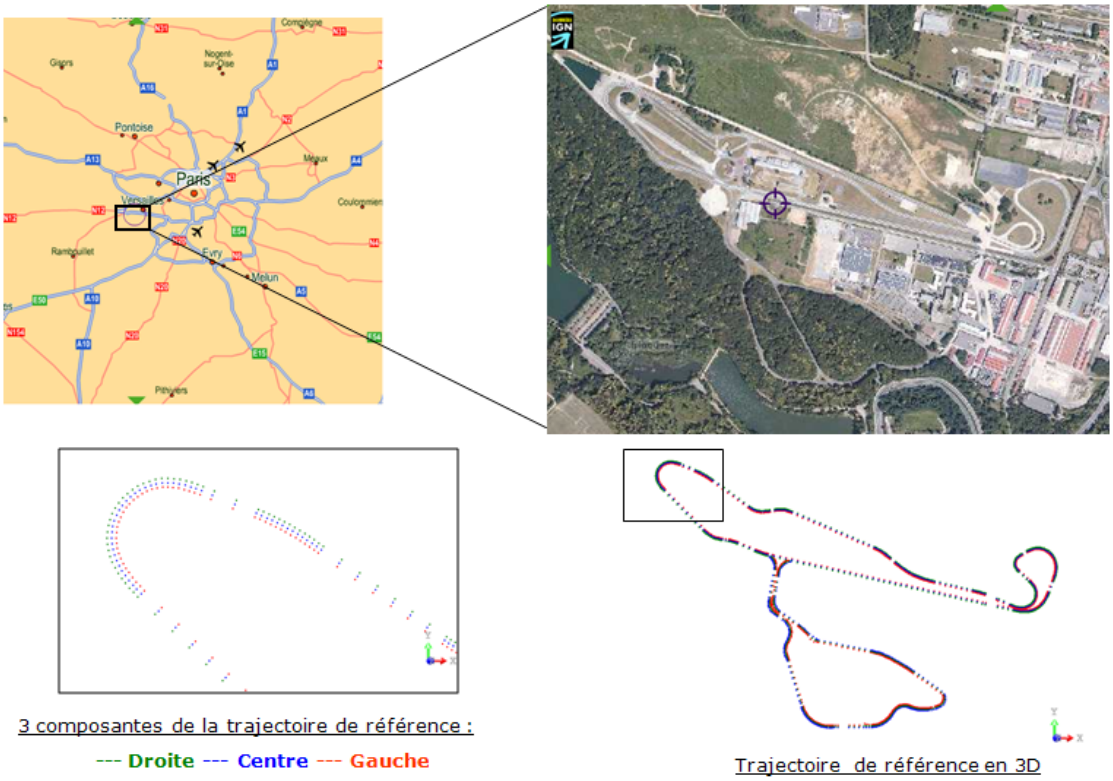


FIGURE 4.23 – Circuit d'acquisition du GIAT doté d'une trajectoire de référence tracée par l'intermédiaire d'un GPS-PPK (*Post Processing Kinematic*). Les trois composantes de la chaussée (gauche, droite, centre) sont représentées.

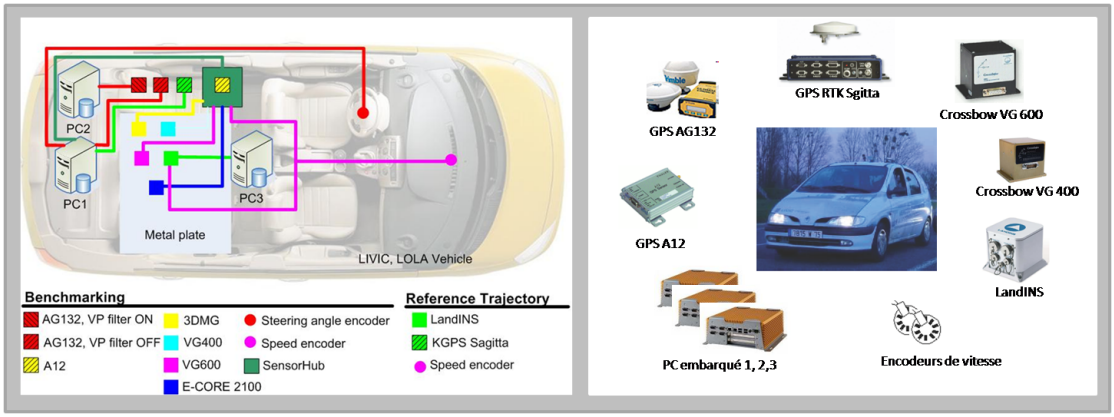


FIGURE 4.24 – (à gauche) Configuration des différents capteurs ainsi que les interfaces d'enregistrements. (à droite) Le véhicule « LOLA » utilisé pour l'acquisition avec les différents capteurs embarqués.

des sauts au niveau du signal du GPS pour les A12 et les AG132. Pour plus de détails sur les systèmes GPS mentionnés, le lecteur intéressé peut se référer à l'annexe A.

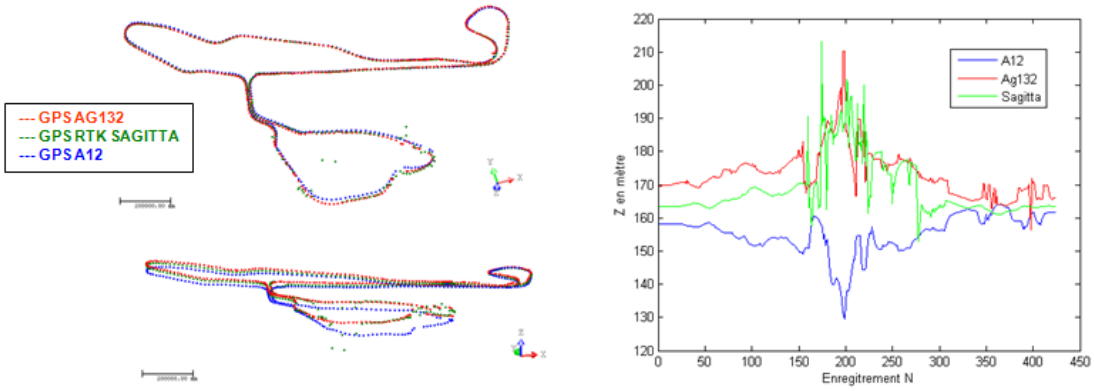


FIGURE 4.25 – Illustration du résultat d'acquisition des trois GPS (A12, AG123, Sagitta) sur le circuit. Nous remarquons une instabilité en Z dans l'intervalle [150-250] des positions enregistrées.

4.6.4 Approches de fusion développées

EKF fusion GPS/INS

Nous avons choisi un mode d'intégration faiblement couplé, intégrant les données GPS A12 à 5 Hz et INS VG400 à 84 Hz. Les estimations de latitude, de longitude, d'altitude et de vitesse calculées par le GPS constituent l'observation utilisée pour recaler l'INS. Les mesures du GPS sont relativement simples à manipuler parce ce qu'elles sont exprimées dans un système de coordonnées connu. Il suffit de les convertir dans le système de coordonnées de l'INS si ce dernier est différent. Le vecteur de mesure est la différence entre les données GPS (position et vitesse) et la solution inertielle résultant de l'étape de prédiction. Nous illustrons le fonctionnement de ce filtre dans la figure 4.26.

EKF fusion GPS/INS/Odometrie

L'information qui aide la navigation inertielle peut ne pas provenir uniquement de capteurs externes (comme le GPS). Une méthode alternative consiste à appliquer des contraintes sur les équations inertielles si le mouvement du véhicule est lui-même contraint d'une certaine manière. L'alternative est d'intégrer les données odométriques dans la phase de correction. Nous illustrons le fonctionnement du filtre dans la figure 4.27.

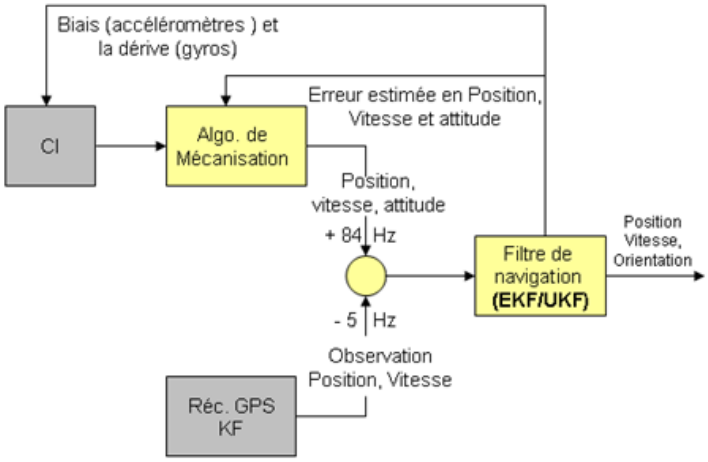


FIGURE 4.26 – Une approche d'intégration faiblement couplée EKF/UKF.

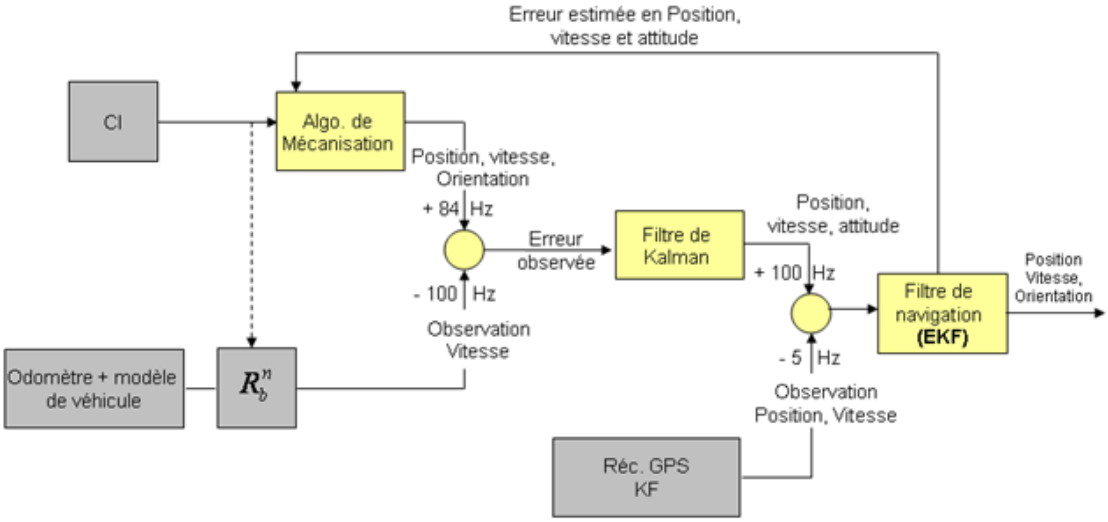


FIGURE 4.27 – Intégration GPS/INS/Odométrie (Implémentation des contraintes non holonomes).

4.6.5 Résultats de la fusion

Le résultat de l'EKF appliqué les données INS/GPS (cf. Figure 4.28) présente un comportement correct sur les zones à faible courbure, par contre sur les zones à forte courbure le filtre rencontre des difficultés. Pour pallier ce problème une alternative serait de donner plus de poids aux données GPS et de diminuer l'importance des données prédites.

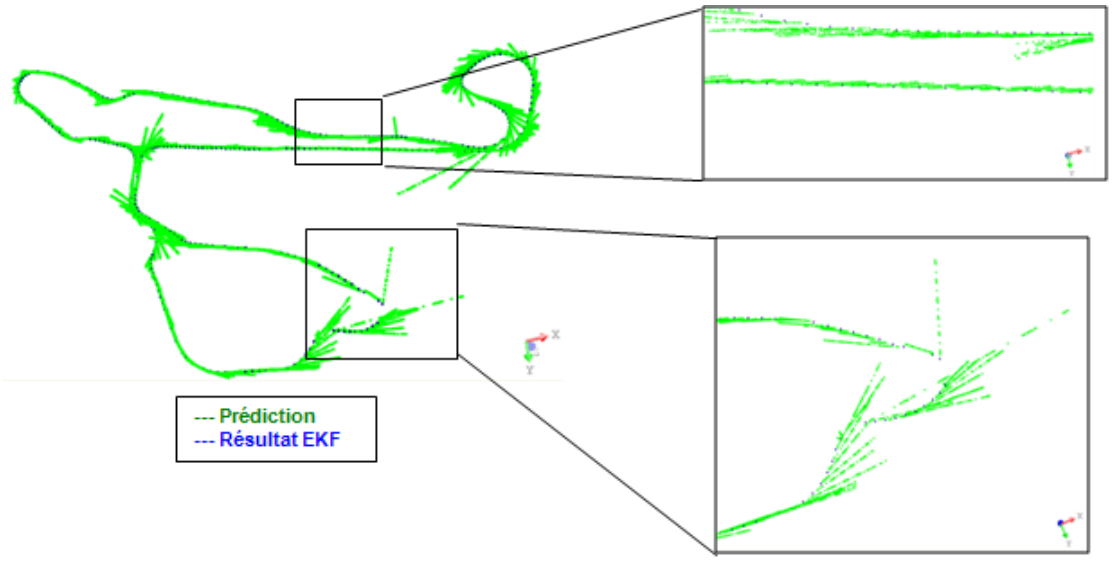


FIGURE 4.28 – Illustration du comportement du filtrage EKF intégrant les données de la centrale inertielle et du GPS A12. Résultat de la localisation sur le parcours global. Nous remarquons un comportement positif dans les zones présentant une courbure faible et des difficultés dans les zones présentant une courbure forte.

En intégrant les contraintes non holonomes (cf. Figure 4.27), les résultats sont plus satisfaisants et nous obtenons un comportement correct sur la totalité du circuit (cf. Figure 4.29), bien que les problèmes dus au glissement (provenant de l'odométrie) puissent apparaître sur certains tronçons du parcours.

Apport de l'amélioration du géo-référencement direct

Cette étude nous a permis d'intégrer les contraintes non holonomes dans le module de positionnement de notre MMS *Lara3D* (Ridene and Nashashibi, 2009). L'utilisation d'informations odométriques permet de corriger certain cas de trajectoire biaisée et, par conséquent, d'éviter les déformations du modèle 3D. Ce dernier sera intégré dans la cartographie 3D finale.

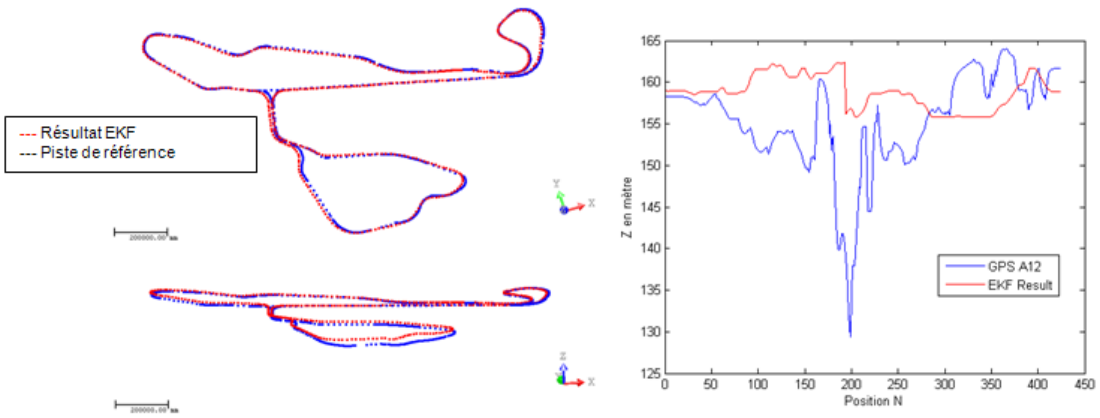


FIGURE 4.29 – Illustration du comportement du filtrage EKF intégrant les données de la centrale inertielle et du GPS A12 ainsi que l'information de l'odométrie. Nous remarquons un comportement positif dans les parcours présentant une courbure faible ainsi que les zones à courbure forte, les erreurs du GPS en Z ont été lissées par le filtrage.

4.7 Approches de correction basée sur des données externes

4.7.1 Contexte

La correction du géo-référencement direct est limitée par les erreurs affectant les capteurs. Dans un cas d'erreurs simultanées affectant tous les capteurs du module de positionnement (par exemple : perte du signal GPS, dérive de l'INS et glissement odométrique) le géo-référencement direct est mené en échec.

L'utilisation d'un module de positionnement haut de gamme tel que *POS-LV d'Applanix*, peut présenter une solution optimisée pour le problème du géo-référencement direct. Néanmoins, bien que les risques de déformations soient amoindris, ils sont toujours présents. Dans le cas d'un module de positionnement de coût moyen, le résultat 3D d'une acquisition est sujet à des imperfections, malgré l'optimisation des solutions algorithmiques.

Tous ces facteurs ont orienté nos recherches sur la mise en place d'une solution extrinsèque au MMS lui même. Il n'existe pas beaucoup de travaux dans la littérature présentant des ouvertures dans ce sens et, comme déjà évoqué à la section précédente, la communauté scientifique travaillant sur l'amélioration des résultats des MMS s'est focalisée principalement sur le perfectionnement du géo-référencement direct.

Ceci nous a motivé à proposer une solution de correction des MMS basée sur des données externes. Dans ce sens trois types de données ont été exploités à savoir : photographies aériennes, MNS et la trajectoire de la *BD TOPO®* [8]. Nous développons par la suite l'apport et la manière d'exploiter chaque donnée dans l'objectif de la correction des *relevés avec laser mobile*.

8. http ://www.ign.fr

4.7.2 Apport des images aériennes

L'utilisation de photographies aériennes géo-référencées permet principalement la vérification interactive de la qualité des données produites par MMS (cf. Figure 4.10). Techniquement, il s'agirait d'appliquer un recalage 2D−3D entre la photographie aérienne et le modèle 3D en question. Le détail de celui-ci est présenté dans l'annexe G. Ce résultat est possible aussi avec des données cartographiques publiques comme les images de *Google Earth* (cf. Figure 4.30). L'apport de ce recalage est visuellement qualitatif. Une phase d'automatisation est nécessaire pour produire des grandeurs quantitatives de vérification.

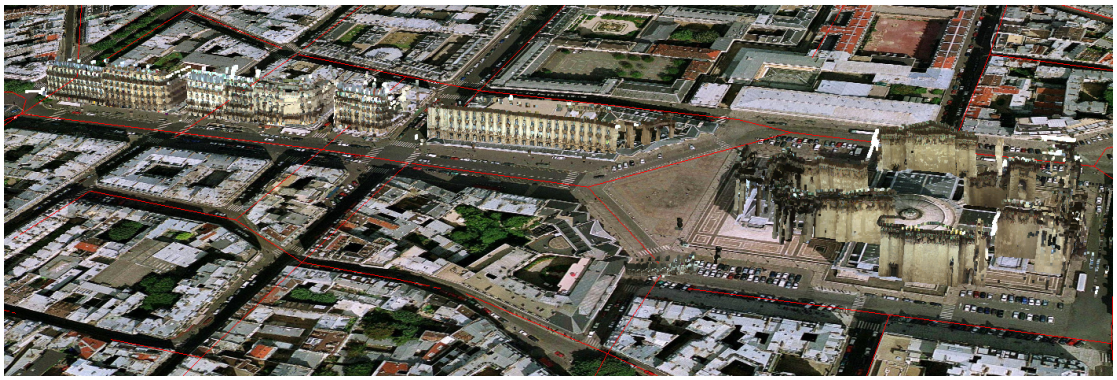


FIGURE 4.30 – Superposition des données 3D de *Lara3D* avec des images 2D de *Google Earth* via l'application *CAORTO (Source des illustrations : (Bargeton, 2009)).*

4.7.3 Approche proposée basée sur le MNS

Le Modèle Numérique de Surface est caractérisé par une large étendue de couverture (cf. Tableau 2.1 du chapitre 2). Nous proposons de lui attribuer un nouveau rôle, à savoir de l'utiliser comme base de référence pour la correction des résultats des acquisitions terrestres. Notre démarche consiste à appliquer des techniques de recalage à la déformation subie par les données 3D à corriger. Dans le cas d'une déformation globale (cas de déformation due à un saut de GPS (cf. Figure 4.7) des techniques de recalage rigide seront employées. Dans un cas de déformation locale ou partielle de la donnée 3D, le choix sera porté sur des techniques de recalage non rigide. Celles-ci prennent comme modèle de référence le MNS.

Le MNS présente une large étendue avec une résolution et précision inférieure à celle des *relevés avec laser mobile*, ceci complique la tâche des algorithmes de recalage appliqués sur le MNS. Pour réduire la probabilité d'erreur, nous essayerons de limiter les cas de recalage hétérogène tout en maintenant notre approche basée sur le MNS.

Dans ce sens nous avons établi des scénarios de recalage hétérogène : sur une acquisition d'une zone urbaine constituée de plusieurs tronçons acquis par un MMS

terrestre et ayant des recouvrements, nous proposons deux sous-étapes du processus du recalage :

- Une première sous-étape consiste à recaler un tronçon d'intérêt (tronçons présentant plusieurs recouvrements) sur le MNS. Une fois recalé, ce tronçon d'intérêt deviendra le tronçon de référence.
- Une deuxième sous-étape correspondra au recalage des différents tronçons présentant des recouvrements avec le tronçon de référence.

La figure 4.31 présente une simulation de l'application de ces deux sous-étapes de recalage hétérogène. Plus de détails peuvent être recueillis dans nos contributions : (Ridene and Goulette, 2009d,b).

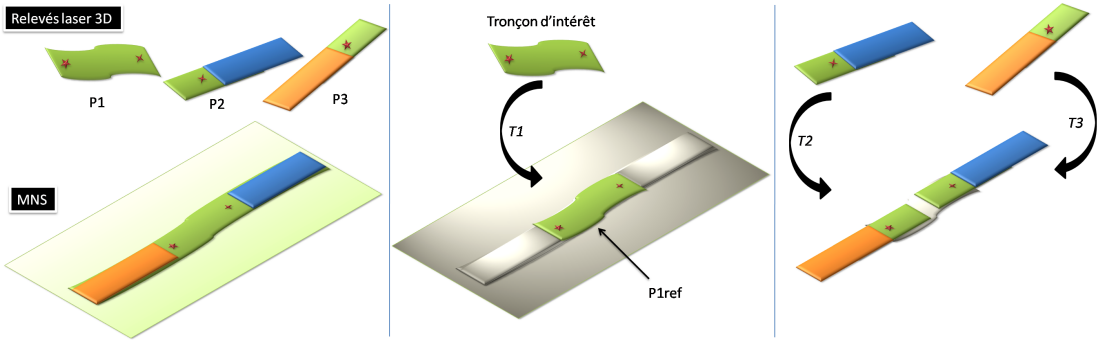


FIGURE 4.31 – Simulation d'un recalage en deux sous-étapes sur un ensemble de données composé de trois tronçons issus de *relevés laser fixe ou mobile* (P1,P2,P3) et un MNS. En observant les recouvrements entre (P1,P2,P3) P1 est considéré comme tronçon d'intérêt. La première sous-étape de recalage consiste à trouver la transformation *T1* résultante du recalage P1/MNS, nous obtenons un tronçon de référence intermédiaire P1ref. La deuxième sous-étape est de déterminer les transformations *T2* et *T3* à partir des recalages respectifs (P2/P1ref) et (P3/P1ref).

4.7.4 Apport de la *BD TOPO®*

L'utilisation des MNS comme référence pour la résolution des problèmes du recalage non rigide peut rencontrer des difficultés inhérentes à leurs qualités. Dans le cas d'un MNS produit par des approches de corrélation, ce type de recalage est très difficilement résolu. L'utilisation d'une source externe nous permettra d'agir sur la trajectoire résultante par des techniques de recalage non rigide, ce qui corrigera le modèle final.

La *BD TOPO®* est un produit de l'IGN constitué de données 2D de trois types : bâtiments, contour et tronçon de route. Toutes ces données sont géo-référencées en *Lambert-II* et en *WGS-84*[9] (cf. Figure 4.32).

Cette donnée pourra être utilisée pour la réalisation de techniques non rigides de recalage de trajectoire, pour la correction horizontale des déformations locales.

9. World Geodetic System, daté de 1984 et révisé en 2004.

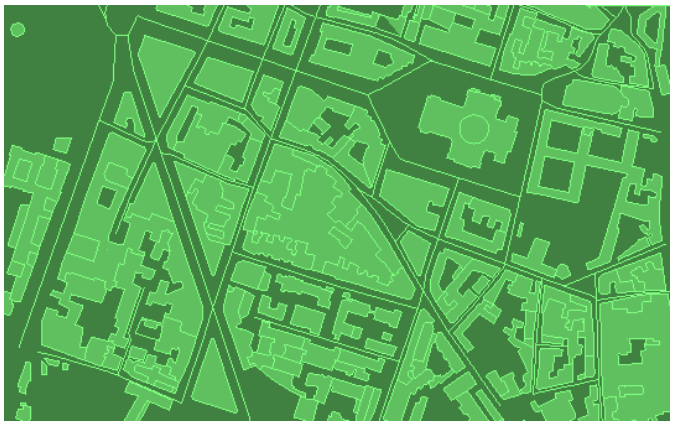


FIGURE 4.32 – *BD TOPO*® incluant bâtiments et axes centraux des routes.

4.8 Configuration optimale d'un MMS et approche de correction proposée

Le système que nous proposons, issu de différents travaux et réflexions entrepris pour la correction de résultats obtenus par MMS, est résumé dans le diagramme 4.33.

Nous proposons d'utiliser des données externes telles que le MNS pour la correction de résultats d'acquisition d'un MMS. Cette utilisation n'est pas classique et nous n'avons pas trouvé de travaux similaires utilisant le MNS pour ce rôle de géo-référencement.

Nous nous appuyons sur différentes techniques de recalage pour le développement de notre approche. Il s'agit d'un recalage hétérogène : d'une part du fait des données manipulées, mais d'autre part du fait des différentes modalités des données confrontées (2D-3D, 3D-3D). Dans la deuxième partie de ce manuscrit nous détaillons les algorithmes que nous proposons pour résoudre le recalage hétérogène.

4.9 Conclusion

Nous avons exposé dans ce chapitre nos travaux expérimentaux d'acquisition terrestre pour le recensement des erreurs pouvant affecter un MMS. Ensuite nous avons proposé nos travaux dans le cadre de l'amélioration de notre système d'acquisition *Lara3D*, avec des solutions matérielles et d'amélioration du géo-référencement direct.

Ces travaux nous ont permis de proposer une solution optimisée basée à la fois sur un module de positionnement moyen de gamme couplé à des corrections réalisées grâce à des données externes au système et sur des techniques de recalage. Dans la suite de ce manuscrit nous exposons nos contributions dans le cadre du recalage hétérogène pour mettre en œuvre ce problème par une démarche innovante.

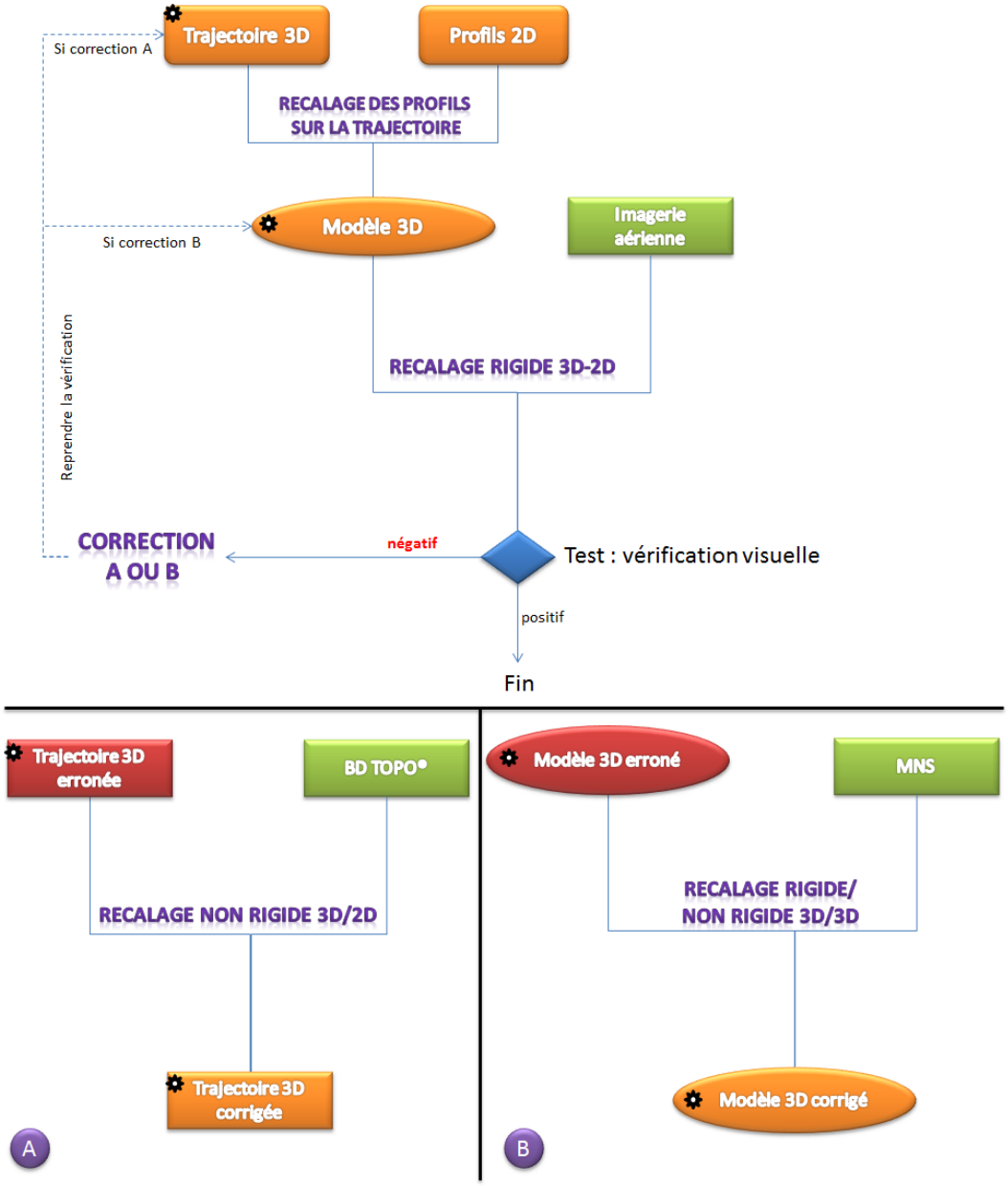


FIGURE 4.33 – Diagramme présentant notre démarche globale pour la correction des éventuelles déformations pouvant affecter les *relevés par laser mobile*.

Deuxième partie

Co-recalage de relevés hétérogènes, analyse et évaluation des résultats

Chapitre 5

État de l'art du recalage

Sommaire

5.1 Introduction **121**
5.2 Recalage et variantes **121**
5.2.1 Domaines d'application des techniques de recalage 122
5.2.2 Classification des méthodes de recalage 122
5.2.3 Synthèse de la littérature du recalage 125
5.2.4 Formulation du traitement du recalage 126
5.3 Recalage rigide 3D **127**
5.3.1 État de l'art 127
5.3.2 Étapes de l'algorithme ICP 128
5.3.3 Variantes de l'algorithme ICP 129
5.4 Recalage non rigide **131**
5.4.1 Besoin du recalage non rigide 131
5.4.2 État de l'art des modèles non linéaires 132
5.5 Conclusion **134**

5.1 Introduction

Le recalage de données 3D peut être vu comme un traitement préliminaire à la fusion de données 3D et se classe ainsi avec les opérateurs de filtrage ou de segmentation. Nous nous intéressons dans le cadre de notre travail au recalage de données hétérogènes 3D déjà présentées au chapitre 2. Dans ce chapitre nous faisons un état de l'art du recalage et ses variantes, ensuite nous faisons le point sur les méthodes de recalage 3D rigide et non rigide.

5.2 Recalage et variantes

Le recalage est une technique qui consiste en la mise en correspondance de données, l'objectif étant la comparaison ou la combinaison des informations respectives issues

de ces données. Dans un contexte de traitement d'images, la mise en correspondance se fait par la détermination d'une transformation géométrique permettant de passer d'une image à une autre. De nombreuses applications sont concernées par ce type de traitement. L'institut d'information scientifique (ISI [1]) recense plus de 4000 articles traitant du recalage, apparus pendant ces dix dernières années.

5.2.1 Domaines d'application des techniques de recalage

Le champ d'application des techniques de recalage est un champ vaste et parallèle aux domaines couverts par la vision par ordinateur :

- En reconnaissance de forme, le recalage a servi dans plusieurs applications : la reconnaissance d'objets (Chua and Jarvis, 1996) et le suivi d'objets *(tracking)* (Wiles and Peters, 2009) ;
- En traitement d'images médicales, le recalage a été utilisé pour des applications d'aide au diagnostic réalisées sur différent types d'images médicales : ultrason (Li et al., 2006), images microscopiques (Vercauteren, 2008)... Un état de l'art de l'application du recalage dans ce domaine peut être trouvé dans les travaux suivants : (Van den Elsen et al., 1993; Maintz and Viergever, 1998) ;
- En traitement de données de télédétection, le recalage a été exploité dans plusieurs contextes parmi lesquels l'agriculture (Erives and Fitzgerald, 2005; Erives et al., 2007), l'étude de phénomènes météorologiques et de la pollution, les changements forestiers (Waser et al., 2008) et urbanistes, la quantification des catastrophes naturelles ... Pour plus de détails sur l'application du recalage dans un contexte de télédétection le lecteur peut se référer à ces études : (Richards and Jia, 1993; Fonseca and Manjunath, 1996; Cole-Rhodes et al., 2003; Chen et al., 2003) ;
- En robotique, dans l'exemple de la navigation basée sur la localisation et la cartographie simultanées (SLAM), une étape de cette méthode utilise la mise en correspondance entre profils laser (Fairfield et al., 2009; Vu et al., 2010) ou bien entre points d'intérêt issus d'images (Davison et al., 2007) ;
- En cartographie, le traitement de recalage se positionne comme un pré-traitement à la fusion de données 3D pour la production des bases de données cartographiques réalistes 2D/3D (cf. section 2) ;
- En localisation et géo-référencement, une donnée 2D ou 3D peut être positionnée dans un référentiel terrestre en effectuant son recalage par rapport à une donnée géo-référencée. On parle alors de géo-référencement indirect (cf. Annexe B).

5.2.2 Classification des méthodes de recalage

La vaste application du recalage 3D nécessite une classification des différentes méthodes. Cette classification est réalisée selon différents critères liés au contexte applicatif. Dans ce qui suit, nous donnons un aperçu des critères principaux de classification des techniques de recalage sur lesquels nous nous basons pour situer les approches que nous proposons au chapitre 6.

1. http ://science.thomsonreuters.com/

Classification A

Se basant sur les travaux de Van-den-Elsen (Van den Elsen et al., 1993), Maintz et Viergever dans (Maintz and Viergever, 1998) les méthodes de recalage selon neuf critères. Sept sont indépendants du contexte applicatif et se répartissent ainsi :

c1. *Dimensionalité* : ce critère définit la confrontation des espaces des différentes données recalées : {2D−2D, 2D−3D, 3D−3D}.

c2. *Nature des bases du recalage* : ce critère est séparé en deux classes :

- (a) Les méthodes utilisant des bases extrinsèques, qui se résument par l'utilisation de primitives externes aux objets traités. Dans le cas médical par exemple, ces primitives peuvent être sous la forme de l'introduction d'un marqueur non invasif tel que les *stereotactic frame* (Lemieux et al., 1994) ou encore des marqueurs invasifs tel que les *screw mounted markers* (Maurer Jr et al., 1898). Dans le cas du recalage des *relevés avec laser fixe*, les géomètres experts se réfèrent dans leurs techniques d'aérotriangulation à des marqueurs externes sous forme de balises. Nous pouvons citer les travaux menés par Brenner dans (Brenner et al., 2008).
- (b) Les méthodes utilisant des bases intrinsèques : ces bases sont des primitives appartenant à l'objet traité ; qui représentent les structures saillantes des objets à recaler. Les structures significatives peuvent être sous trois formes : les points (les coins, les intersections, . . .) (Besl and McKay, 1992; Chen and Medioni, 1992; Zhang, 1993b) les régions (forêt, surface de stade. . .) (Ayache et al., 1993; Planitz et al., 2005; Akca, 2007) et les courbes (frontières maritimes, limites de voirie, rivières. . .) (Zhang, 1994; Li et al., 1995; Akca, 2007).

c3. *Nature de la transformation*, la transformation peut être : rigide, affine, de similarité, projective ou non rigide. Le tableau 5.1 présente les différentes transformations.

nD	transformation	p	paramètres
2D	Rigide	3	Rotation θ, 2D translation (tx, ty)
	Affine	6	Matrice (2 x 3)
	Projective (inclut similarité)	8	Matrice homographique (3 x 3) (défini à l'échelle)
	Non rigide	-	-
3D	Rigide	6	3 rotations (Rx, Ry, Rz), 3 translations (tx, ty, tz)
	Affine	12	Matrice (3 x 4)
	Similarité	7	3 rotations, 3 translations, 1 échelle
	Projective	15	Matrice (4 x 4) (défini à l'échelle)
	Non rigide	-	-

TABLE 5.1 – Transformations relatives au problème de recalage avec p le nombre de paramètres associé.

c4. *Domaine de la transformation*, le domaine peut être global si la transformation est appliquée à tout le modèle ou bien local si la transformation est appliquée seulement à une partie. La figure 5.1 illustre les quatre transformations en 2D.

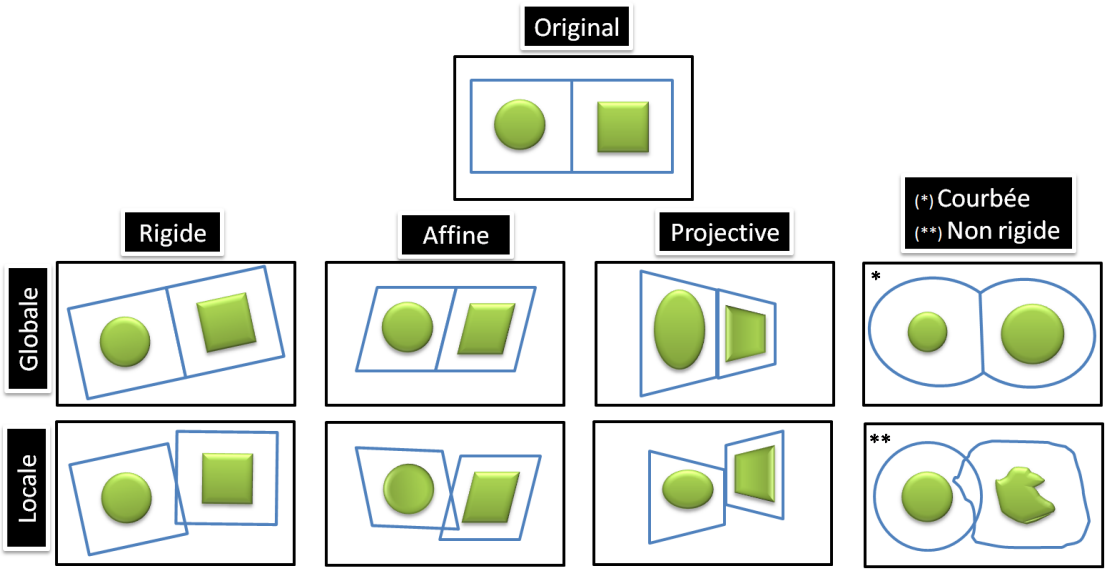


FIGURE 5.1 – Différents types de transformation en 2D.

c5. *Niveau de l'interaction*, le recalage peut avoir trois niveaux d'interaction : interactif, semi-automatique et automatique. Ce critère est souvent dicté par la sensibilité liée à l'aspect critique du contexte dans lequel le recalage est appliqué (cf. Figure 5.2).

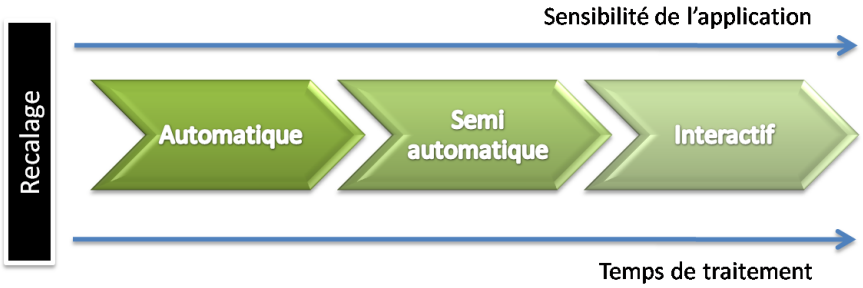


FIGURE 5.2 – Niveaux d'interaction selon la sensibilité du contexte du recalage.

c6. *Optimisation de la procédure du recalage*, l'optimisation peut s'effectuer selon deux stratégies : paramètres de calcul et paramètres des éléments recherchés.

c7. *Modalité* : ce critère correspond aux caractéristiques des données à recaler, deux cas se présentent :

– Le recalage Monomodal qui se traduit par l'utilisation de deux éléments du même

type, (PET [2]-PET, MNS/MNS. . .) ;
– Le recalage Multimodal qui correspond au recalage hétérogène faisant correspondre des données de type différents (MNS/*relevés avec laser fixe*, CT [3]-MR [4], Video-CT. . .).

Les deux autres critères, lesquels sont au cœur du sujet et de l'objet traités, ne sont pas pris en compte dans le cadre de notre étude.

Classification B

En tenant compte de l'implémentation des méthodes de recalage, Brown (Brown, 1992) classifie les algorithmes en se basant sur la combinaison de quatre composantes. Les deux premières correspondent respectivement aux critères **c2** et **c3** (Nature des bases du recalage et nature de la transformation). Se référant à la classification, A. Brown définit deux critères additionnels :

c8. Stratégie de recherche, permettant de trouver la transformation optimale.

c9. Métrique de similarité, correspondant à la métrique utilisée pour quantifier la similarité entre les données sélectionnées dans l'espace de primitives et employée par la stratégie de recherche. Nous appelons cette métrique « d » et nous la détaillons dans un contexte 3D dans la suite de ce chapitre.

Classification C

Zitova et Flusser (Zitova and Flusser, 2003) de leur côté classifient les méthodes de recalage en quatre critères. Les trois premiers correspondent aux critères **c2**, **c3** et **c9**. Un critère additionnel est défini :

c10. Ré-échantillonnage et transformation. Il s'agit de la définition de l'interpolation en valeurs entières des valeurs flottantes des éléments de l'objet recalé (pixels, coordonnées 3D, valeurs RGB. . .) .

Critères de classification adoptés

Pour situer les algorithmes que nous proposons dans le cadre de notre étude (cf. Chapitre 7), nous considérons les critères suivants : « c1, c2, c3, c4, c5, c7, c8, c9 ». Les critères **c6** et **c10** ne sont pas pris en compte.

5.2.3 Synthèse de la littérature du recalage

Un des premiers articles présentant un état de l'art des méthodes de recalage est celui de Ghaffary et Sawchuk (Ghaffary and Sawchuk, 1983) traitant essentiellement des méthodes basées sur la corrélation d'images.

2. Positron Emission Tomography.
3. Computed Tomography.
4. Magnetic Resonance.

Une revue générale des méthodes de recalage a été présentée par Brown (Brown, 1992), traitant 4 cas de recalage : recalage multimodal, *template matching*, recalage de point de vue (pose) et recalage temporel. Chaque cas a été testé sur deux exemples.

Zhang (Zhang, 1993a) présente une revue générale du problème de mise en correspondance en vision par ordinateur. Il traite particulièrement les cas de la stéréo-vision, la reconnaissance d'objets et l'analyse de séquences d'images.

Un état de l'art des méthodes de recalage en imagerie médicale depuis 1990 jusqu'à 1998 a été exposé par Maintz et Viergever dans (Maintz and Viergever, 1998). Des revues de l'existant antérieur à 1990 ont été initiées dans les travaux suivants : (Van den Elsen et al., 1993; Maurer and Fitzpatrick, 1993).

Une synthèse des méthodes de recalage appliquées en télédétection peut être trouvée dans : (Richards and Jia, 1993; Fonseca and Manjunath, 1996; Cole-Rhodes et al., 2003; Chen et al., 2003).

La synthèse qui nous paraît la plus complète est celle présentée par Zitova dans (Zitova and Flusser, 2003). Dans cette étude, Zitova partage le traitement du recalage en quatre étapes : la détection de primitive, la mise en correspondance, la transformation, et le ré-échantillonnage. Pour chacune de ces étapes, un état de l'art est présenté indépendamment des applications à la différence de ce qui a été présenté dans les travaux de Brown (Brown, 1992) et ceux de Maintz et Viergever (Maintz and Viergever, 1998).

D'autre travaux de synthèse dans des contextes particuliers ont été présentés dans la littérature. Nous présentons un aperçu pour le contexte du recalage de nuages de points 3D dans ce qui suit.

5.2.4 Formulation du traitement du recalage

Considérons deux ensembles de points représentés par $M = \{m_i\}_{i=1}^{N_m}$ et $Q = \{q_i\}_{i=1}^{N_q}$. Le traitement de recalage revient à déterminer la transformation géométrique optimale T_{op} à p paramètres qui permet le passage d'un repère à un autre. Les transformations T les plus répandues ainsi que leurs paramètres associés p sont exposés dans le tableau 5.1. Le problème du recalage est double. Dans une première étape, il faut identifier les éléments caractéristiques communs et les mettre en correspondance. Puis dans une seconde étape il faut estimer la transformation T_{op} en minimisant la fonction $F(T)$ selon l'équation 5.1. Cette minimisation s'appuie sur un ajustement par la Méthode des Moindres Carrés Moyens - *LMS* [5]. Pour plus de détail sur cette méthode, le lecteur intéressé peut se référer à (William et al., 1988).

$$F(T) = \sum_i d^2(T(q_i), m_i) \tag{5.1}$$

Dans la formule $F(T)$ d correspond à la distance entre deux éléments, il s'agit dans les cas les plus généraux de la distance euclidienne (cf. équation 5.2), mais d'autres distances peuvent être utilisées, elles seront présentées dans la section 5.3.3.

5. Least Mean Squares.

$$d^2(m_i, q_j) = \sum_{k=1}^{n} \left| m_{i_k} - T q_{j_k} \right|^2 \quad \text{avec } n \text{ la dimension de l'espace} \tag{5.2}$$

Considérons w_i les poids binaires associés à chaque point sur le critère de correspondance selon l'équation 5.3.

$$w_i = \begin{cases} 1 & \text{si } m_i \text{ possède un correspondant} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{5.3}$$

T_{op} s'écrit selon l'équation 5.4.

$$T_{op} = \arg\min_{T} \sum_{i=1}^{N_m} w_i \min_{j} d^2(m_i, T(q_j)) \tag{5.4}$$

Les étapes du recalage sont exposées dans la figure 5.3.

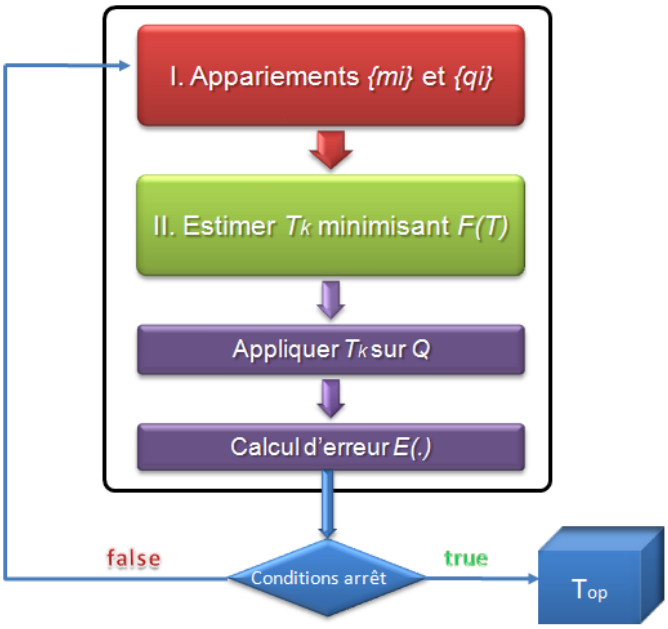


FIGURE 5.3 – Représentation des étapes du calcul itératif (ICP).

5.3 Recalage rigide 3D

5.3.1 État de l'art

Ce recalage consiste à estimer la transformation rigide entre deux ensembles de données, permettant ainsi de les représenter dans un référentiel unique. Les topologies des

représentations géométriques des objets à recaler ne sont pas modifiées. Les approches les plus utilisées dans le recalage de nuages de points sont les ICP (Iterative Closest Point), ces approches ont été initiées par (Besl and McKay, 1992; Chen and Medioni, 1992; Zhang, 1994). Le recalage entre plusieurs points de vue à la fois, a été initié par (Blais et al., 1995), d'autres travaux ont été proposés par la suite pour la modélisation des statues (Pulli, 1999). Dans notre étude nous ne traitons pas ce type de recalage.

5.3.2 Étapes de l'algorithme ICP

L'algorithme comporte deux étapes principales :

- Génération d'un ensemble d'appariements intermédiaires entre des points des deux nuages en entrée.
- Estimation de la transformation rigide 3D qui relie ces mises en correspondance.

La transformation rigide 3D exposée dans la table 5.1 peut être décrite en utilisant une matrice constante A satisfaisant : $y_i = a_{ij} x_j$, avec X et Y l'ancienne et la nouvelle valeur 3D du point. L'équation peut s'écrire sous la représentation *homogène* suivante :

$$\begin{pmatrix} y1 \\ y2 \\ y3 \\ 1 \end{pmatrix} = \left(\begin{array}{ccc|c} & R & & t \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right) \begin{pmatrix} x1 \\ x2 \\ x3 \\ 1 \end{pmatrix}$$

où *t (3x1)* vecteur de translation .
R (3x3) est une une matrice de rotation qui peut s'écrire sous la forme suivante :

$$r_{il} = r_{ij}^{(\xrightarrow{x})} r_{jk}^{(\xrightarrow{y})} r_{kl}^{(\xrightarrow{z})}$$

la rotation selon x :

$$r^{(\xrightarrow{x})} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_1 & -\sin\alpha_1 \\ 0 & \sin\alpha_1 & \cos\alpha_1 \end{pmatrix}$$

la rotation selon y :

$$r^{(\xrightarrow{y})} = \begin{pmatrix} \cos\alpha_2 & 0 & \sin\alpha_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha_2 & 0 & \cos\alpha_2 \end{pmatrix}$$

la rotation selon z :

$$r^{(\xrightarrow{z})} = \begin{pmatrix} \cos\alpha_3 & -\sin\alpha_3 & 0 \\ \sin\alpha_3 & \cos\alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Pour le recalage, d'un point de vue géométrique, on considère m_j le plus proche voisin (p.p.v) de q_i selon la formule 5.5 :

$$m_j = \arg\min_{m_k \in M} d(m_k, q_i) \tag{5.5}$$

Pour l'ensemble des paires de points appariés m_j et q_i, nous estimons une matrice de rotation $R(3x3)$ et un vecteur de translation $t(3x1)$ de la transformation rigide, tels que :

$$m_j = Rq_i + t = Tq_i \tag{5.6}$$

Cette procédure à deux étapes est itérée jusqu'à la correspondance des géométries des données en entrée. Soit E_k (cf. équation 5.7) une mesure d'erreur au sens de la variance entre deux ensembles de données à l'itération k.

$$E_k = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_m} \left| m_i - T^k q_{ji} \right|^2 \text{, avec } q_{ji} \text{ le p.p.v du point } m_i \tag{5.7}$$

La correspondance se traduit par la satisfaction de l'un de ces 3 critères :
– Stabilisation de l'erreur moyenne :

$$|E_k - E_{k-1}| < \epsilon_1 \quad et \quad |E_{k+1} - E_k| < \epsilon_1 \tag{5.8}$$

– Atteindre une borne inférieure avec $E_k < \epsilon_2$.
– Atteindre le nombre maximal d'itérations avec $k = k_{max}$

Il a été démontré dans (Besl and McKay, 1992) que l'algorithme converge de façon monotone vers un minimum local, mais cette convergence est fortement conditionnée par l'initialisation. Dans le cas de données urbaines géo-référencées dans un référentiel commun, le géo-référencement peut être utilisé comme initialisation du recalage et il n'est pas nécessaire d'appliquer une transformation initiale.

Plusieurs variantes de l'ICP ont été développées se caractérisant par différentes implémentations des sous-étapes de l'algorithme. Dans ce qui suit nous exposons quelques points principaux des variations entre les différentes variantes d'ICP.

5.3.3 Variantes de l'algorithme ICP

Détermination des correspondances selon « d »

Différents critères de détermination de correspondances peuvent être mis en place :
– la distance « d » entre points de mesure : point à point (Besl and McKay, 1992; Zhang, 1994), point à surface (Blais et al., 1995), point à plan (tangent) (Chen and Medioni, 1992; Bergevin et al., 1996; Park and Subbarao, 2003),
– la comparaison des normales estimées en chaque point d'une part, ou des normales et orientations (spin) d'autre part (Zhang, 1999; Johnson and Hebert, 1999),
– l'utilisation de polygones associés aux points,

- l'identification des contours passant par ces points (Specht, 2005),
- la comparaison de l'information photométrique : luminance (Weik, 1997), texture et couleur (Johnson and Kang, 1997; Edie et al., 1999; Douadi et al., 2006).

La combinaison de plusieurs de ces critères au sein de la même distance « d » est envisageable. Un état de l'art est présenté dans (Veltkamp and Hagedoorn, 2001; Planitz et al., 2005). Les métriques de corrélation ont été résumées par Brown dans (Brown, 1992), ces métriques sont très peu utilisées avec les ICP.

Méthodes de rejet

Plusieurs méthodes de rejet des fausses correspondances des paires de points sélectionnées peuvent être utilisées dans les variantes de l'ICP. Les appariements erronés nuisent au bon comportement de l'algorithme. Les erreurs sont plus fréquentes dans les cas de données très bruitées. L'application d'un seuil de distance entre les paires de correspondance est utile pour limiter la zone de recherche et pour diminuer les appariements erronés. Le seuil peut être déterminé sous différentes formes :

- Seuil constant : le seuil est fixé à une valeur constante au lancement de l'algorithme, cette valeur est déterminée en général en fonction d'une connaissance *a priori* des données traitées (Turk and Levoy, 1994; Zhang, 1994; Blais et al., 1995; Guehring, 2001; Dalley and Flynn, 2002) ;
- Seuil variable adaptatif : le seuil est déterminé selon des méthodes robustes d'estimation paramétrique qui modélisent la distribution des points parasites. Il est mis à jour à chaque itération. (Masuda and Yokoya, 1995; Fitzgibbon, 2003; Gruen and Akca, 2005) ;
- Seuil basé sur l'orientation des normales (Zhang, 1994; Guehring, 2001) ;
- Seuil déterminé par RANSAC (*RANdom SAmple Consensus)* (Fischler and Bolles, 1981) : il s'agit d'une détermination aléatoire du seuil. Une revue détaillée est présentée par Bae et Lichti dans (Bae and Lichti, 2008).

Une application d'une étape supplémentaire de rejet peut être réalisée. Elle consiste à garder un seul correspondant pour chaque point du nuage de référence, et de rejeter les points dupliqués (Almhdie et al., 2007). Le choix du meilleur appariement dépend de la distance utilisée.

Détermination de la transformation

Différentes méthodes de détermination des paramètres de la transformation rigide à partir des correspondances sélectionnées ont été employées :

- utilisation de la Décomposition en Valeurs Singulières SVD[6] (Arun et al., 1987; Horn et al., 1988),
- utilisation de la méthode des quaternions (Faugeras and Hebert, 1986; Horn, 1987; Kanatani, 1993),
- utilisation des méthodes de descente de gradient (Szeliski and Lavallée, 1996; Neugebauer, 1997),

6. Singular Value Decomposition

– intégration d'une mesure statistique d'erreur sur le point (Zhang, 1994) ou l'estimation d'un modèle anisotropique (Williams et al., 1999; Guehring, 2001). Bae et Lichiti (Bae and Lichti, 2008) considèrent une mesure sur l'espace de covariance.

Des études comparatives entre les méthodes d'estimation de la transformation ont été traitées dans (Eggert et al., 1997; Williams et al., 1999).

Accélération

Plusieurs stratégies d'accélération ont été mises en œuvre dans les différentes implémentations de l'algorithme ICP. Le traitement peut être lourd dans les cas de données hétérogènes volumineuses et le temps de calcul conséquent. Ceci représente une limitation pour des applications nécessitant de la rapidité (estimation de pose en robotique). Dans ce sens vont des travaux sur la parallélisation de l'algorithme ICP (Langis et al., 2001) mais cela reste fortement dépendant de l'architecture matérielle utilisée.

Une autre stratégie d'accélération se traduit par la réduction du nombre de points utilisés pour le recalage. Cette réduction est réalisable par différents types de sous-échantillonnage : sélections des points dans la zone d'intérêt (Zhang, 1994; Turk and Levoy, 1994), sous-échantillonnage aléatoire (Masuda and Yokoya, 1995; Masuda et al., 1996), sous-échantillonnage régulier (Guehring, 2001), sélection des points selon la distribution des normales (Rusinkiewicz and Levoy, 2001).

Une des techniques d'accélération la plus commune est celle de l'utilisation des K-D Tree[7] (Bentley, 1975) pendant la phase de la recherche des plus proches voisins. Cette technique nous fait passer d'une complexité de $O(n^2)$ à $O(nlog(n))$.

Différents travaux comparatifs de ces variantes ont été menés dans la littérature, nous pouvons citer (Jokinen and Haggrén, 1998; Williams et al., 1999; Campbell and Flynn, 2001; Rusinkiewicz and Levoy, 2001; Gruen and Akca, 2005; Akca, 2007).

5.4 Recalage non rigide

5.4.1 Besoin du recalage non rigide

Le recalage rigide peut être efficace dans des cas de géométries correctes des modèles en entrée. Par contre, il existe des cas de déformations locales affectant les données à recaler, qui nécessitent des transformations d'ordre supérieur aux transformations rigides.

Par exemple dans les cas urbains, les modèles 3D générés par les MMS peuvent être déformés localement par des problèmes liés aux masquages des GPS et aux dérives des centrales inertielles (cf. section 4.3). Ces déformations étant non paramétriques et parfois aléatoires, le recalage rigide est inopérant. Pire encore, ce type de recalage appliqué à des modèles présentant des déformations locales peut provoquer des déformations encore plus importantes sur le modèle final. D'ou la nécessité du recalage non rigide,

7. K Dimensional binary search Tree.

dont plusieurs travaux ont démontré la supériorité dans le cas des déformations locales (Ehlers and Fogel, 1994; Flusser, 1995; Wiemker et al., 1996).

5.4.2 État de l'art des modèles non linéaires

Le recalage non rigide se base sur la modélisation des déformations non linéaires, nous exposons dans ce qui suit les modèles non linéaires les plus répandus et leurs applications pour le recalage.

Approche radiale

Cette approche est principalement utilisée pour le recalage géométrique, les fonctions radiales permettent, à partir de plusieurs appariements de points, de définir le champ de déformation sur l'ensemble du modèle. Le qualificatif radial vient du fait que ces fonctions ne privilégient aucune direction. Considérons un ensemble de n points de coordonnées $(x_i; y_i; z_i)$ et g une fonction radiale. La transformation correspondante définie sur l'ensemble du modèle est exprimé par :

$$\begin{cases} x' = P_x^m(x,y,z) + \sum_{i=1}^{n} \alpha_{i;x} g(d_i(x,y,z)) \\ y' = P_y^m(x,y,z) + \sum_{i=1}^{n} \alpha_{i;y} g(d_i(x,y,z)) \\ z' = P_z^m(x,y,z) + \sum_{i=1}^{n} \alpha_{i;z} g(d_i(x,y,z)) \end{cases}$$

avec $P_\cdot^m(x,y,z)$ des formes polynomiales d'ordre m donnant le comportement global de la transformation,
$\alpha_{i;\cdot}$ les coefficients caractérisant le comportement local de la transformation,
et $d_i(x,y,z)$ la distance euclidienne du point de coordonnées (x,y,z) au i^{eme} point de coordonnées (x_i, y_i, z_i).
Le tableau 5.2 résume les fonctions radiales les plus utilisées dans la littérature.

Les fonctions multiquadratiques ont été appliquées dans plusieurs contextes de recalage, nous pouvons citer l'application dans un cadre de recalage en télédétection par Ehlers et Fogel dans (Ehlers and Fogel, 1994) et dans un cadre médical par (Little et al., 1996).

Les fonctions de Wendland's ont été appliquées dans un cadre médical par Fronefett dans (Fornefett et al., 2001).

L'approche la plus utilisée dans le cadre du recalage est celle des *TPS*[8] dont les fondements mathématiques sont détaillés dans (Duchon, 1976; Wahba, 1990). Nous distinguons un travail détaillé de recalage non rigide dans le domaine médical utilisant les *TPS* (Rohr et al., 2001). L'inconvénient de *TPS* est le temps de calcul très lourd ;

8. Thin-Plate Splines

Fonction radiale	$g(r_i)$
Linéaire	r_i
Thin-Plate Spline (TPS)	$r_i^2 \log r_i^2$
Spline cubique	$\|r_i\|^3$
Elastic Body Spline (EBS)	
Multiquadratique (MQ)	$(r_i^2 + \delta)^{\mu}$
Multiquadratique inverse	$(r_i^2 + \delta)^{-\mu}$
Gaussienne	$\exp^{r_i^2/\sigma}$
Méthode de Wendland's	
Shifted-LOG	$\log (r_i^2 + \delta)^{3/2}$

TABLE 5.2 – Fonctions radiales les plus utilisées.

beaucoup de travaux d'accélération de cette méthode ont été mis en œuvre. Nous pouvons citer le travail de Flusser dans (Flusser, 1992) qui a proposé une solution adaptative d'approximation.

La méthode *Cubic B-splines* a été utilisée aussi dans plusieurs travaux de recalage parmi lesquels le travail entrepris par Akca dans (Akca, 2007). La figure 5.4 illustre le résultat du recalage non rigide entre une surface et un contour 3D.

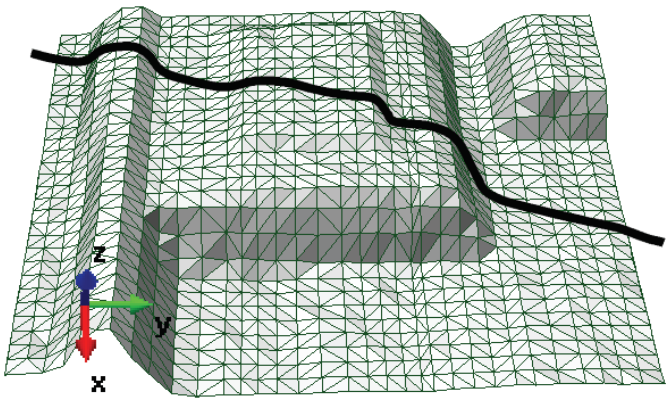


FIGURE 5.4 – Recalage non rigide entre une surface et un contour 3D utilisant les *Cubic B-Spline (Source des illustrations : (Akca, 2007)).*

Les méthodes de recalage EBS sont supérieures théoriquement aux méthodes TPS.

Approches élastiques

L'idée a été introduite initialement par (Bajcsy and Kovacic, 1989) ; il s'agit dans les approches élastiques d'éviter la complexité des modèles paramétriques en estimant la transformation géométrique par la recherche des meilleurs paramètres. Ceci consiste à considérer deux énergies, une interne à l'élément élastique dans son état d'équilibre

et une énergie externe qui déforme cet élément. Dans le cas du recalage cet élément représente l'image (2D ou 3D). Les transformations élastiques sont généralement locales et très efficaces pour la modélisation des petites déformations. Le comportement d'un élément élastique est exprimé comme suit :

$$\mu\nabla^2 v(x,y,z) + (\sigma + \mu)\nabla(\nabla v(x,y,z) + g(x,y,z)) = 0 \tag{5.9}$$

Avec
∇^2 et ∇ correspondant respectivement aux opérateurs du laplacien et du gradient,
v(.) et g(.) le champ de déplacement et l'énergie externe,
et μ et σ les coefficients de *Lamé*.

Pour plus de détails sur les définitions de l'élasticité ainsi que sur les coefficients de Lamé, le lecteur intéressé peut se référer à (Lamé, 1852).

Gee et al. dans (Gee et al., 1997) décrient l'implémentation de l'approche de mise en correspondance élastique.

Peckar et al dans (Peckar et al., 1997, 1999) ont détaillé les paramètres de la déformation élastique applicables pour résoudre le problème du recalage 2D-3D.

Vemuri dans (Vemuri et al., 2003) a proposé une méthode de recalage élastique basée sur l'évolution des *level sets* en mouvement par rapport à leurs normales respectives.

Andriamanampisoa dans (Andriamanampisoa, 2008) a exposé un travail de résolution de recalage multimodale 3D par approche élastique.

Synthèse

Le recalage non rigide est très sensible à son initialisation ; pour obtenir une bonne convergence, il est généralement précédé par une phase de recalage rigide. Si la déformation locale est très importante et affiche une très grande différence avec le modèle de référence, le résultat du recalage sera biaisé. Les méthodes de recalage non-rigide sont très liées au type de données traitées. Les travaux poussés ont été menés spécialement dans le domaine médical en 2D ou en 3D volumétrique. L'application des méthodes de recalage non rigide dans un contexte de production de cartographie 3D a été rarement abordée dans la littérature.

5.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un état de l'art du recalage de données ainsi que ses différentes applications. Nous avons exposé les différentes variantes du recalage rigide et non rigide 3D, ainsi que les fondements de chaque classe de recalage. Dans le chapitre suivant nous présentons les algorithmes développés dans le cadre de notre travail pour traiter la démarche innovante de correction de relevés laser terrestres en utilisant des méthodes de recalage hétérogène.

Chapitre 6

Approches de recalage proposées

Sommaire

6.1 Introduction **135**
6.2 Algorithmes de base profitant au recalage **135**
6.2.1 L'algorithme RANSAC 135
6.2.2 Extraction des traces au sol à partir de données hétérogènes . . 136
6.3 Méthodes de recalage rigide proposées **139**
6.3.1 ICP-SA : recalage ICP avec Seuil Adaptatif 140
6.3.2 R-ICP : recalage ICP avec initialisation via RANSAC 144
6.3.3 HPS-ICP : recalage ICP avec initialisation via segmentation de plans horizontaux 145
6.4 Conclusion **147**

6.1 Introduction

Le recalage hétérogène 3D consiste à traiter des données différenciées dans leurs caractéristiques intrinsèques et se présentant sous la forme mono ou multimodale. Dans le cadre de notre étude, le recalage est exploité afin de corriger des relevés laser mobiles par le biais de données externes. Dans ce chapitre nous présentons nos contributions se rapportant à la thématique du recalage. Nous exposons les différentes méthodes proposées dans le cadre du recalage rigide.

6.2 Algorithmes de base profitant au recalage

6.2.1 L'algorithme RANSAC

L'algorithme RANSAC a été proposé par Fischler et Bolles dans (Fischler and Bolles, 1981). Contrairement aux techniques de régression classiques qui consistent à prendre autant de points que possible, la technique RANSAC est basée sur l'estimation d'un modèle à partir d'un nombre minimal s de points (ex : s=2 points pour une translation, s=4

points pour une homographie, s=7 points une matrice fondamentale, etc.) ; ces points sont tirés au hasard. L'estimation est répétée sur plusieurs itérations. Le modèle qui sera retenu correspondra à celui ayant le support le plus grand. Le support correspond au nombre de points ayant une distance au modèle inférieure à un certain seuil.

Supposons que la proportion de contamination des données par des faux points vaille ϵ et que la probabilité qu'au moins un des m sous-ensembles tirés aléatoirement ne contienne pas un faux point soit P. On a alors :

$$(1-(1-\epsilon)^s)^m = 1-P \tag{6.1}$$

On déduit ainsi le nombre d'itérations nécessaire pour le bon fonctionnement de l'algorithme :

$$m = \frac{\log(1-P)}{\log(1-(1-\epsilon)^s)} \tag{6.2}$$

Une description détaillée de RANSAC est exposée dans (Hartley and Zisserman, 2003). Différents travaux se sont servis de l'algorithme RANSAC pour des applications différentes. Nous pouvons citer prioritairement :

- En recalage (Chen et al., 1999; Bae and Lichti, 2008; Ridene and Goulette, 2009c) ;
- En reconnaissance de forme 2D (Fischler and Bolles, 1981) ;
- En segmentation 3D (Tao et al., 2003; Bretar and Roux, 2005).

6.2.2 Extraction des traces au sol à partir de données hétérogènes

L'extraction des traces au sol peut être considérée comme une composante de la segmentation (nD). Le processus de segmentation en traitement d'images a pour but de rassembler des pixels suivant des critères prédéfinis. Les pixels sont ainsi regroupés en régions qui constituent une partition de l'image. Il existe de nombreuses approches de segmentation basées sur différents fondements (régions, contours, classification, seuillage . . .). Un état de l'art sur les méthodes de segmentation est présenté par Pal et Pal dans (Pal and Pal, 1993).

Dans le cas de données hétérogènes, le même algorithme de segmentation ne peut pas s'appliquer de la même manière aux différentes données : nous sommes amenés à utiliser différentes méthodes de segmentation adaptées aux cas traités.

L'extraction de plans horizontaux représentés par les limites des traces au sol des bâtiments est un traitement important exploité par les approches de recalage basées sur des régions (cf. section 5.2.2). Nous avons séparé les méthodes d'extraction de plans horizontaux selon la dimension des données traitées : 3D et 2.5D. Nous avons utilisé deux méthodes pour les données 3D et une méthode pour les données 2.5D. La Figure 6.1 illustre les trois approches adoptées. Nous les détaillons par la suite.

Extraction de plan horizontaux à partir de données 3D

L'extraction d'un plan 2D à partir d'une donnée 3D peut être considérée comme une composante de la segmentation 3D. Pour le traitement de données 3D, la segmentation

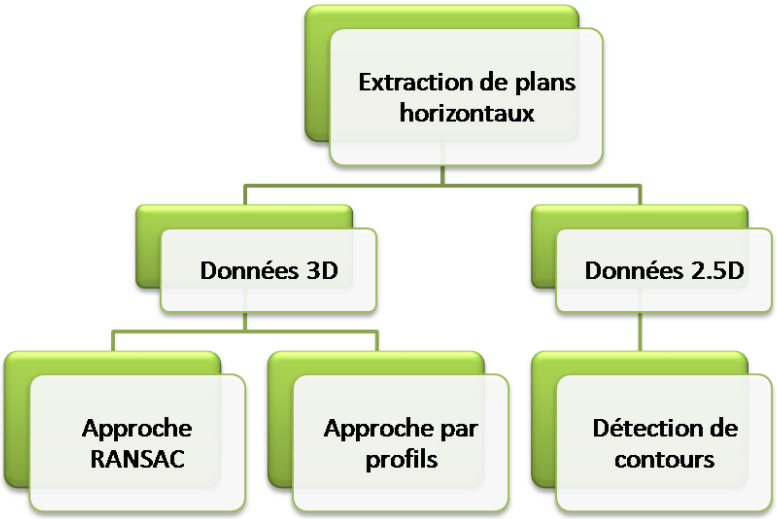


FIGURE 6.1 – Méthodes adoptées pour l'extraction de plans horizontaux à partir de données 3D et 2.5D.

est différente de celle adoptée pour les images 2D. Plusieurs méthodes de segmentation de nuages de points 3D ont été exposées dans l'état de l'art parmi lesquelles nous pouvons citer (Woo et al., 2002; Rabbani et al., 2006). La Figure 6.1 illustre les approches adaptées à notre contexte d'étude.

A1

La première approche de segmentation, utilise les connaissances *a priori* des relevés laser issus des acquisitions via Lara3D. L'approche d'extraction de plans horizontaux est constituée de trois étapes illustrées sur la figure 6.2.

- La première étape consiste à appliquer un seuillage adaptatif en vertical (axe des Z). Ce seuillage est réalisé par profil. Le seuil est déterminé selon la valeur moyenne de la pente au point de la trajectoire correspondant au profil traité. Ce traitement permet d'alléger l'algorithme proposé ;
- La deuxième étape consiste alors, en la récupération de la trace au sol des façades (cf. Figure 6.3) ;
- La deuxième étape peut être affectée par des bruits locaux (véhicules, arbres . . .), ceci produit des traces au sol erronées (cf. Figure 6.4). La troisième étape consiste en l'application d'un filtrage des traces aux sol biaisées.

A2

La deuxième approche consiste en la détermination locale de plans par RANSAC, plusieurs travaux ont été proposés dans ce sens parmi lesquels nous pouvons citer

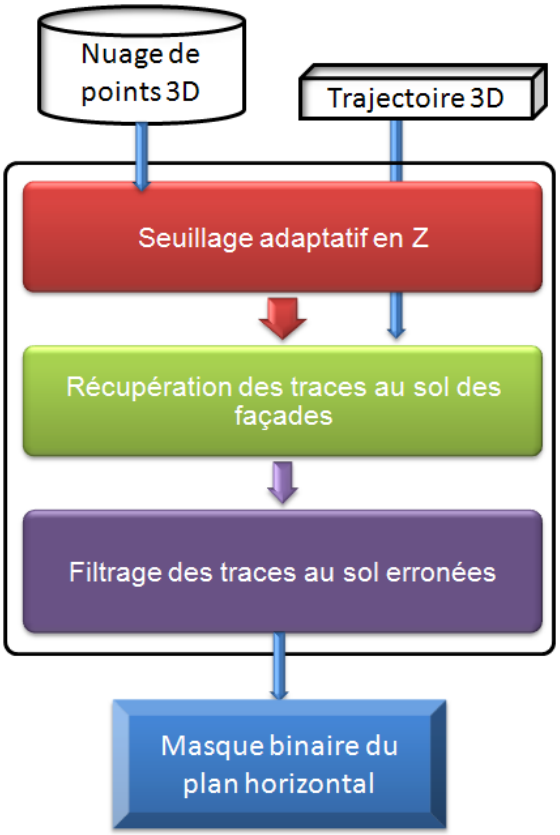


FIGURE 6.2 – Algorithme de segmentation par profil.

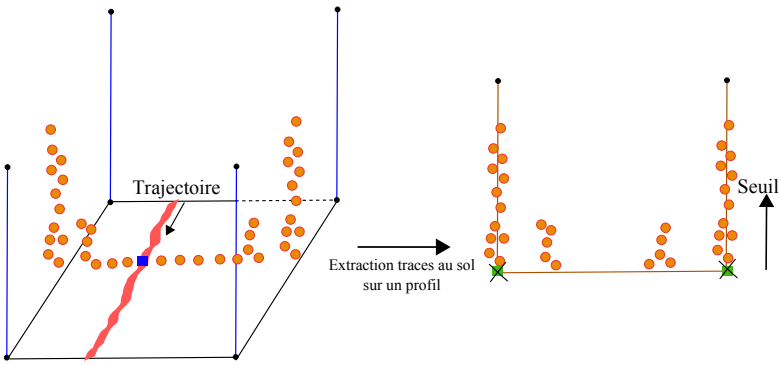


FIGURE 6.3 – Principe de la récupération de la trace au sol des façades.

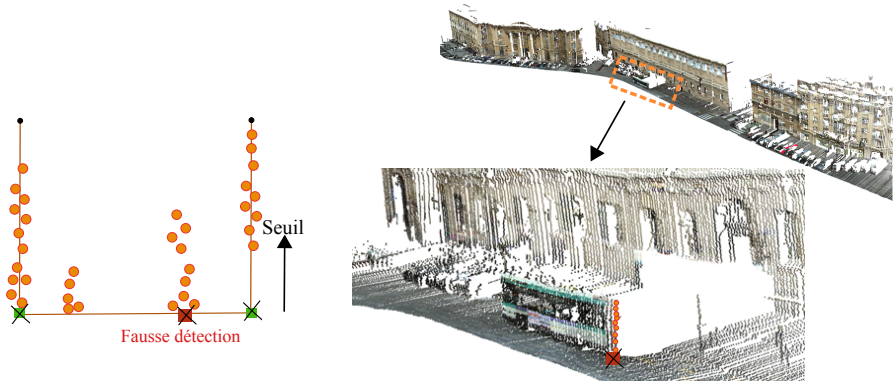


FIGURE 6.4 – (à gauche) Problèmes causés par des bruits locaux dans les nuages de points et répercussion sur la détection des traces au sol. (à droite) Illustration de ce cas d'erreur causé par un passage de bus lors de la numérisation de bibliothèque *Sainte-Geneviève Paris 5ème* (Bus 84).

(Bauer et al., 2003; Bretar and Roux, 2005; Boulaassal et al., 2007; Schnabel et al., 2007). L'implémentation utilisée dans le cadre de nos travaux a été effectuée par Deschaud en s'inspirant des travaux de Schnabel et al. (Schnabel et al., 2007) pour se comparer à la méthode qu'il propose dans (Deschaud and Goulette, 2010).

Extraction de plan horizontaux à partir de données 2.5D

Comme déjà présenté dans le chapitre 2, les données 2.5D se présentent sous forme de grille d'élévation sur laquelle des traitements 2D peuvent être appliqués. Pour l'extraction de plans horizontaux 2D nous effectuons une segmentation pour obtenir les traces au sol des bâtiments, nous utilisons pour cela un filtre de type laplacien de gaussienne (Marr and Hildreth, 1980). D'autres filtres peuvent être utilisés, un état de l'art ainsi qu'un comparatif est exposé par Ziou et Tabbone dans (Ziou and Tabbone, 1998).

6.3 Méthodes de recalage rigide proposées

Nous traitons dans cette section des algorithmes de recalage rigide proposés dans le cadre de notre étude. Ces travaux ont fait l'objet des publications suivantes : (Ridene and Goulette, 2008, 2009e,b,c,a,d). Nous détaillons les trois variantes développées :

- ICP-SA : recalage ICP avec seuil adaptatif (cf. Algorithme 1, Annexe H) ;
- R-ICP : recalage ICP avec initialisation via RANSAC (cf. Algorithme 2, Annexe H) ;
- HPS-ICP : recalage ICP avec initialisation via segmentation de plans horizontaux (cf. Algorithme 4, Annexe H).

En se basant sur les critères de classification présentés dans la section 5.2.2, la classification des méthodes proposées est exposée dans le tableau 6.1.

Critère	ICP-SA	R-ICP	HPS-ICP
c1. Dimensialité	3D/3D		3D/3D, 2D/2D
c2. Primitives de bases	Point 3D		Point 3D, Plan 2D/3D
c3. Nature transformation	Rigide		
c4. Domaine transformation	Global		Global, local
c5. Niveau interaction	Semi-automatique		
c7. Modalité	Hétérogène		
c8. Stratégie recherche	Itérative avec KD-Tree		
c9. Métrique similarité	euclidienne, couleur		

TABLE 6.1 – Classification des méthodes de recalage rigide proposées dans le cadre de notre étude.

6.3.1 ICP-SA : recalage ICP avec Seuil Adaptatif

Nous avons implémenté notre variante de l'algorithme ICP : ICP-SA utilisant un seuil adaptatif pour restreindre l'espace de recherche. La figure 6.5 illustre l'apport de ce seuil par rapport au seuil constant.

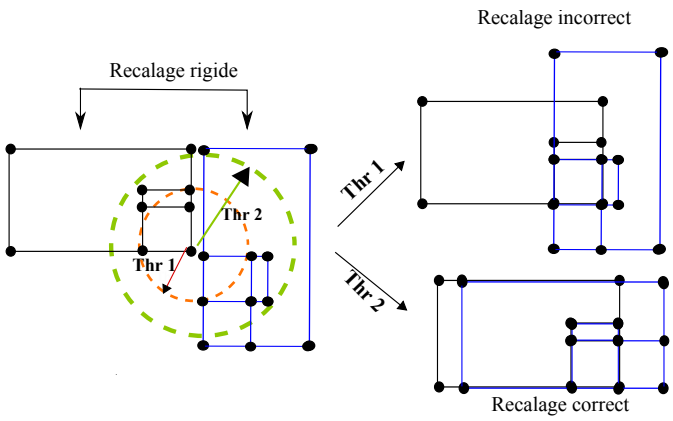


FIGURE 6.5 – Technique de rejet réussie localement mais biaisée globalement, selon le seuil utilisé. Cas de recalage utilisant un seuil statique : le recalage peut échouer en utilisant un seuil faible. Un seuil élevé est coûteux en temps de calcul. La solution est d'utiliser un seuil adaptatif, initialement élevé, qui diminue au fur et à mesure des itérations.

Nous avons utilisé différentes métriques « d » pour le calcul de distance. La première approche est basée sur des mesures géométriques, dans la seconde, nous intégrons l'information de la couleur.

Distance géométrique « d_g »

Deux distances géométriques ont été prises en compte dans notre implémentation (cf. Figure 6.6).

La première mesure est celle utilisant la distance euclidienne en exploitant la distance Point à Point (P-to-P). L'erreur à minimiser à l'itération k est de la forme suivante :

$$E^k = \sum_{i=1}^{N_m} \left| m_i - T^k q_{j.i} \right|^2 \text{ avec } q_{j.i} \text{ le p.p.v de } m_i \tag{6.3}$$

La deuxième exploite la distance d'un point à une surface (P-to-S) (cf. Figure 6.6). L'erreur à minimiser devient alors :

$$E^k = \sum_{i=1}^{N_m} d_s^2(S_i^k, T^k.q_j) \tag{6.4}$$

avec

$$S_i^k = \{s | n_k^{m_i}.(m'^k_i - s) = 0\}, \{m'^k_i = (T^{k-1}.l_i) \cap M\} \tag{6.5}$$

avec l_i la ligne normale à M au point $q_{j.i}$,

$n_{m_i}^k$ la surface normale à M au point m'_i,

et $(T^{k-1}.l_i) \cap M$ l'intersection de la normale l_i avec la surface M.

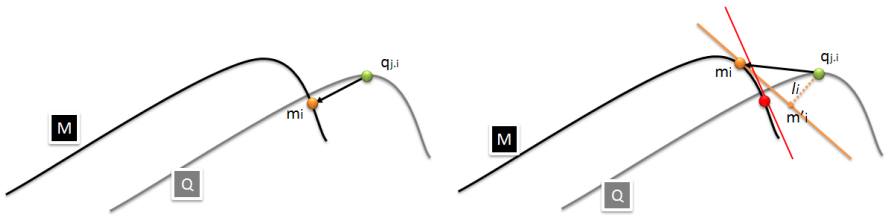


FIGURE 6.6 – Représentation en 2D : (à gauche) Distance point à point (P-to-P). (à droite) Distance point à plan tangent ou à surface (P-to-S).

Distance intégrant la couleur « d_c »

Dans un environnement urbain caractérisé par une architecture *Hausmanienne* homogène, le recalage basé sur les primitives géométriques utilisant la métrique de la distance euclidienne peut ne pas être déterminante dans certains cas et le recalage se trouve dans des situations de conflit. L'utilisation de la couleur peut être discriminante dans ces cas. La figure 6.7 illustre l'apport de la primitive de la couleur dans le recalage. La formule de la distance « d » s'écrira sous la forme d_c selon l'équation 6.6.

$$d_c(p1, p2) = [(1 - \lambda).DE(p1, p2) + \lambda.DC(p1, p2)] \tag{6.6}$$

avec

$$\begin{cases} \text{p1 et p2 des points 3D colorés en } RGB^{\,1} \\ \lambda \in [0, 1] \\ DE(p1, p2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \\ DC(p1, p2) = \sqrt{(x_{1.R} - x_{2.R})^2 + (y_{1.G} - y_{2.G})^2 + (z_{1.B} - z_{2.B})^2} \end{cases}$$

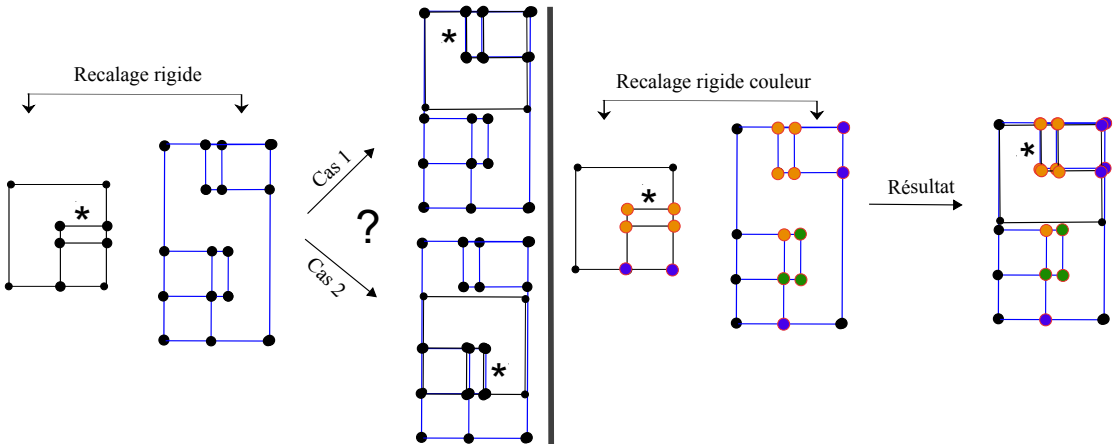


FIGURE 6.7 – Apport de la primitive de la couleur dans le recalage hétérogène 3D. (à gauche) Cas de conflit de recalage dû à l'utilisation de la distance euclidienne uniquement. (à droite) L'ajout de la primitive de la couleur est déterminante pour réussir un recalage correct.

La détermination de la transformation rigide T est fonction de 6 paramètres de mouvement incluant une matrice de rotation $R(3x3)$ et un vecteur de translation $t(3x1)$. Elle s'exécute par une minimisation via SVD.

Calcul itératif et adaptation du seuil

En prenant en compte le bruit et les défauts d'acquisition présents dans les nuages de points, des erreurs de mise en correspondance subsistent. Pour estimer les paramètres de la transformation rigide en coordonnées homogènes T (cf. Tableau 5.1) ; nous faisons appel à une technique de filtrage des appariements en introduisant w_i (cf. équation 5.3) en fonction d'un seuil adaptatif th_{ad} (cf. équation 6.7).

$$w_i = \{d(m_i, q_j) < th_{ad}\} \tag{6.7}$$

Après la phase de pré-traitement nous passons à la phase de calcul itératif. Au lancement de l'algorithme, nous appliquons une initialisation du seuil adaptatif égale à κ fois la résolution (*res*) du nuage de points le plus grossier (cf. équation 6.8). Ceci offre à l'algorithme une zone de recherche initiale bien large.

$$th_{ad} = \kappa.max(res(M); res(Q)) \tag{6.8}$$

Nous utilisons pour la mise à jour de th_{ad} la moyenne et l'écart type sur l'erreur selon l'équation 6.9.

$$th_{ad} = \mu + \sigma \; avec \;\; \{\mu, \sigma\} \;\; \{moyenne, cart\ type\} \tag{6.9}$$

Nous appliquons ensuite la recherche des plus proches voisins selon la distance euclidienne en 3D.

Rejet des faux appariements

Le rejet est réalisé via l'utilisation d'un seuil adaptatif comme dans (Gruen and Akca, 2005). Ce type de rejet est adapté à notre cas d'application dans la mesure où il permet de commencer le traitement itératif par un espace de recherche relativement grand. Au fur et à mesure des itérations, le seuil diminue et l'espace de recherche se réduit en conséquence, limitant la probabilité de faux appariements. En revanche la réduction de la zone de recherche peut amener un résultat de recalage correct localement mais complètement biaisé de manière plus globale (cf. Figure 6.5). C'est pour cela que les pré-traitements réalisés en amont du traitement itératif (filtrage morphologique, sous échantillonnage...) sont d'une grande importance. Un traitement de rejet complémentaire est appliqué en éliminant la duplication des paires sélectionnées (cf. Figure 6.8).

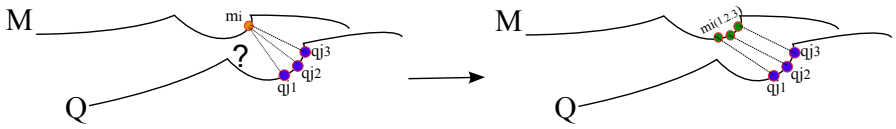


FIGURE 6.8 – Elimination des duplications de mise en correspondance. Ceci est réalisé par l'enregistrement dans un tampon mémoire d'une liste des plus proches voisins (p.p.v) pour chaque point mis en correspondance.

Accélération

Le nombre de points traités étant très important, l'implémentation d'ICP sans accélération présente des limites considérables en termes de temps de calcul. En conséquence, nous avons optimisé le processus de recherche du plus proche voisin en utilisant un k-D Tree, selon la méthode décrite dans (Mount and Sunil, 2006). La complexité de la

phase de recherche passe de $O(nb1.nb2)$ à $O(nb1.log(nb2))$, avec $nb1$ et $nb2$ les nombres de points de chaque nuage.

L'algorithme est détaillé dans la figure 6.9. Pour plus de détails sur l'implémentation, le lecteur peut se référer à l'annexe H.

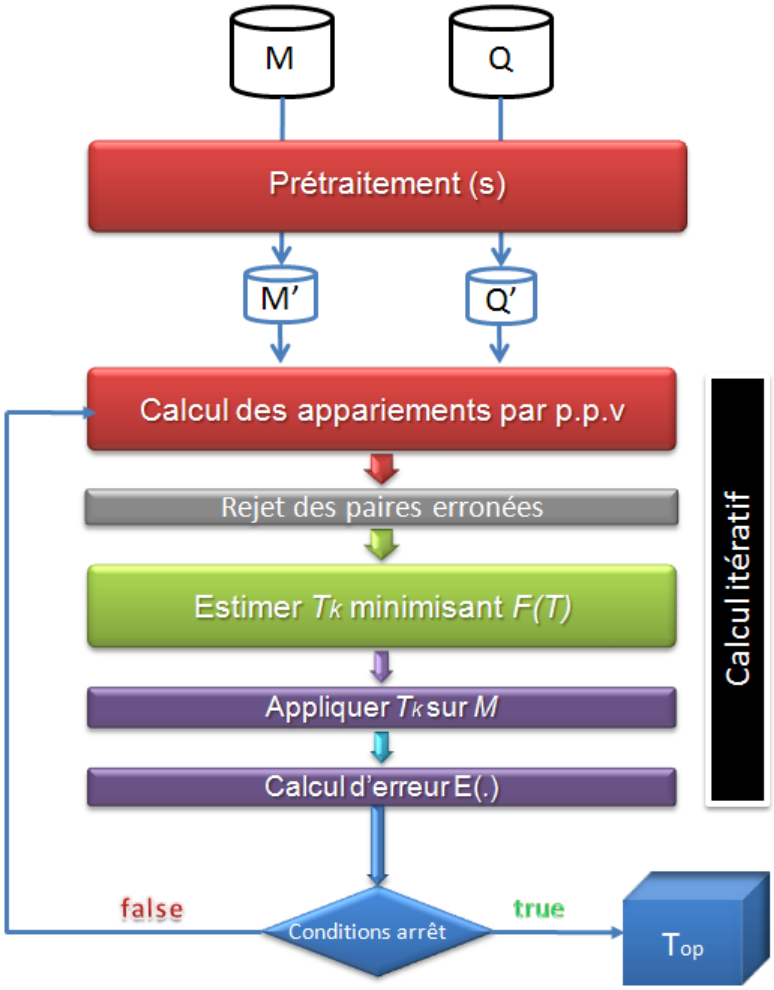


FIGURE 6.9 – Notre implantation d'ICP-SA (ICP avec seuil adaptatif th_{ad}). L'algorithme est précédé par des pré-traitements permettant de restreindre l'espace de recherche en se focalisant sur la zone de recouvrement et de réduire le bruit sur les données brutes.

6.3.2 R-ICP : recalage ICP avec initialisation via RANSAC

Si le géo-référencement est fortement erroné, la solution des « Moindres Carrés » sera relativement affectée par les faux appariements. La convergence vers un minimum local

ne sera pas optimale. L'application d'une étape d'initialisation est nécessaire. Dans le cas de traitement des données hétérogènes nous avons besoin de supprimer le maximum de faux appariements vu que la qualité des données est variable. Pour ce faire, nous appliquons une initialisation du recalage en utilisant RANSAC. Une présentation de l'utilisation de RANSAC pour le recalage est exposée dans (Bae and Lichti, 2008).

Dans notre cas, nous appliquons RANSAC dans une phase de pré-traitement avant le lancement de la phase itérative de l'ICP. Cette étape nous permet de faire l'initialisation de la transformation rigide initiale T_{init} et celle du seuil adaptatif th_{ad}. Les phases principales de R-ICP sont exposées dans l'algorithme 6.10. Pour les détails de l'implémentation, le lecteur peut se référer à l'annexe H.

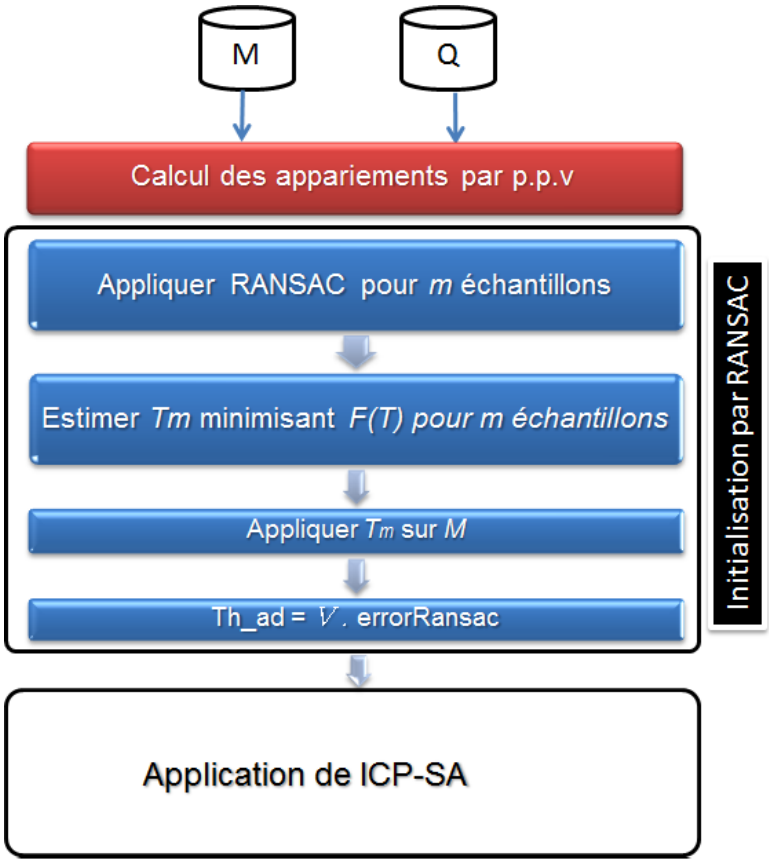


FIGURE 6.10 – Algorithme ICP précédé par une phase d'initialisation par RANSAC.

6.3.3 HPS-ICP : recalage ICP avec initialisation via segmentation de plans horizontaux

À la différence de R-ICP dans lequel la détermination de la transformation d'initialisation se fait par le traitement aléatoire effectué sur des primitives de base (les points

3D), dans HPS-ICP, la phase d'initialisation de l'algorithme ICP est réalisée en premier par la détermination de la zone de recouvrement entre les deux nuages de points traités. En l'occurrence, dans le cas de recalage MNS et relevés avec laser mobile, il s'agit des surfaces limitées par les traces au sol des bâtiments. L'initialisation du recalage via HPS-ICP est d'autant plus efficace que les surfaces de recouvrement sont correctement inscrites. Toutefois, il est possible que le module d'initialisation échoue, si les surfaces de recouvrement sont relativement petites, non déterministe ou bien si les erreurs sur les mesures d'entrée sont importantes.

L'approche adoptée permet de réaliser le recalage en deux sous-étapes :

- Recalage entre les plans horizontaux segmentés ce qui permet de déterminer la transformation initiale ;
- Recalage des nuages de points après l'application de l'initialisation.

Transformation initiale par mise en correspondance de HPS

La Figure 6.13 illustre la chaîne de traitement à suivre pour le module d'initialisation du recalage. Le but de ce module étant de trouver au mieux la zone de recouvrement entre les deux ensembles de points :

- Extraction des plans horizontaux à partir des nuages de points 3D ;
- Extraction des contours des plans horizontaux à partir des données 2.5D (MNS) ;
- Projection 2D des plans 3D extraits ;
- Estimation de la transformation 2D entre les plans à apparier. Le choix de travailler en 2D permet d'accélérer la phase d'initialisation du recalage. Ceci permet d'estimer trois degrés de liberté : un vecteur de translation 2D $T_{2D}(X, Y)$ et une rotation autour de l'axe des Z $R_{2D}(Z)$ (cf. Figure 6.11).

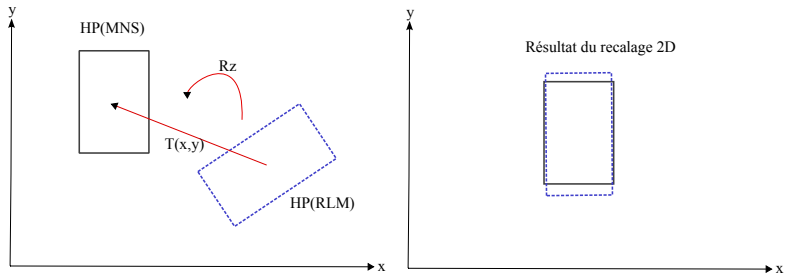


FIGURE 6.11 – Détermination des trois degrés de liberté selon le plan (X,Y) et la rotation autour de l'axe des Z. Avec HP(Plan Horizontale) et RLM (Relevé Laser Mobile).

- Une étape parallèle à l'étape précédente consiste à trouver la translation verticale (axe des Z) T_z de vecteur égal à la différence entre les valeurs z_{moyen} des deux ensembles de points (cf. Figure 6.12).
- La transformation finale T_{init} pour l'initialisation sera alors égale à la combinaison de la transformation 2D(R_z,$T_{(x,y)}$) et cette translation verticale T_z.

$$T_{init} = R_z \circ T_{(x,y)} \circ T_z \tag{6.10}$$

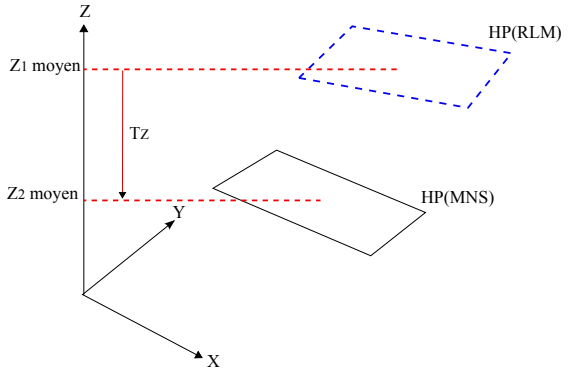


FIGURE 6.12 – Détermination du quatrième degré de liberté selon l'axe des Z. Avec HP(Plan Horizontale) et RLM (Relevé Laser Mobile).

La réalisation de ce travail a été effectuée en partie dans le cadre d'un encadrement de stage de *M2* [2] Recherche (Jebbari et al., 2009). Nous trouvons un contexte d'initialisation de recalage semblable au nôtre réalisé sur *Verona City Centre* par Fiocco et al. dans (Fiocco et al., 2005; Sequeira et al., 2007).

6.4 Conclusion

Nous avons implémenté trois variantes d'ICP : ICP-SA (ICP à seuil adaptatif), R-ICP (ICP avec initialisation par RANSAC) et HPS-ICP (ICP avec initialisation par segmentation et mise en correspondance de plans horizontaux). Les algorithmes tirent partie d'une phase de pré-traitements spécifiques sur les données en entrée, ce qui permet d'augmenter leur score de réussite.

Nous exposons dans le chapitre 7 la validation des algorithmes développés sur des zones de test.

2. Diplôme de Master 2.

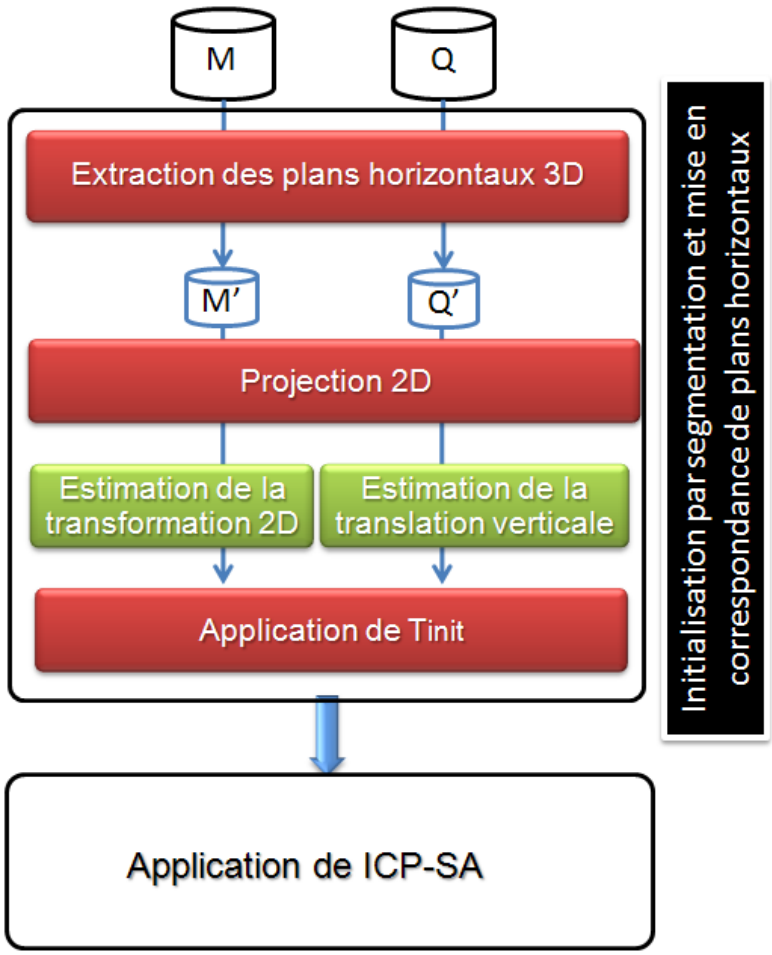


FIGURE 6.13 – Algorithme ICP précédé par une phase d'initialisation basée sur la segmentation et la mise en correspondance des plans horizontaux (représentant la voirie).

Chapitre 7

Correction de relevés laser par recalage hétérogène

Sommaire

7.1 Introduction **149**
7.2 Scénarios de recalage recensés **150**
7.2.1 Présentation des scénarios 150
7.2.2 Présentation des zones de test 150
7.2.3 Considérations générales 152
7.3 Résultats et discussions **152**
7.3.1 Recalage de relevés laser mobiles sur MNS 152
7.3.2 Recalage entre relevés laser mobiles 154
7.3.3 Recalage de relevé laser fixe sur MNS 161
7.3.4 Synthèse du résultat de correction obtenu par R-ICP et ICP-SA 161
7.3.5 Recalage par HPS-ICP 167
7.3.6 Discussion 173
7.4 Conclusion **175**

7.1 Introduction

Nous exposons dans ce chapitre les résultats de l'application des méthodes de recalage exposées dans le chapitre 6. Nous organisons les traitements sous forme de scénarios applicables sur deux zones de test. Ceci nous amènera à la validation de l'approche de correction de relevés laser mobile par des données externes. Nous effectuons une analyse quantitative des performances des approches proposées.

7.2 Scénarios de recalage recensés

7.2.1 Présentation des scénarios

Nous avons recensé trois scénarios de recalage relatifs aux données traitées dont les caractéristiques sont exposées au chapitre 2 :

- Données laser mobile sur MNS : l'objectif est de générer des tronçons de référence (cf. section 4.7.3). Il s'agit de sélectionner pour chaque tronçon d'intérêt issu des relevés laser mobile la zone correspondante du MNS et de le recaler par la suite.
- Données laser mobile entre elles : l'objectif est de recaler les tronçons de relevés laser mobile sur les tronçons de référence correspondants (cf. section 4.7.3). Nous effectuons ce recalage en prenant en compte les différents cas de recouvrement : partiel, partiel en extrémités, global et intersection.
- Données laser fixe sur MNS : l'objectif est de recaler les relevés avec scanner fixe sur MNS, particulièrement sur les zones non couvertes par relevés laser mobiles.

7.2.2 Présentation des zones de test

Zone du *Panthéon, Paris 5ème*

Nous avons réalisé des acquisitions dans la zone du *Panthéon* à *Paris 5ème*, choisie comme première zone de test dans le cadre du projet *TerraNumerica*. Les détails des campagnes de test sont exposés dans l'annexe D. La figure 7.1 illustre la répartition des différentes données de la zone traitée.

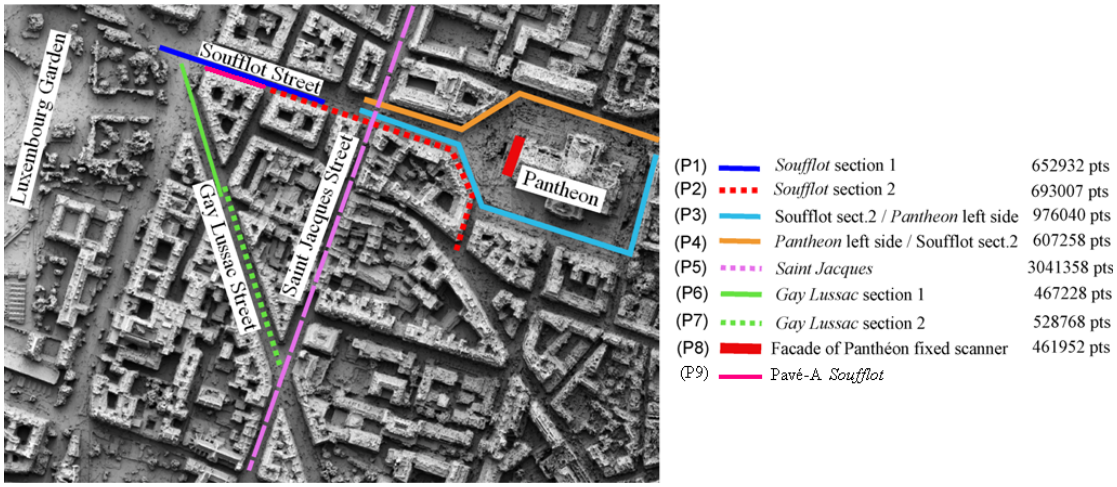


FIGURE 7.1 – Zone du *Panthéon, Paris 5ème* : répartition sur le MNS en 2.5D des différents tronçons acquis par *Lara3D* et par scanner fixe.

Cette zone comprend toutes les catégories des scénarios de recalage recensées. Le tableau 7.1 énumère les différentes paires de tronçons à recaler.

	Couple	Recouvrement	Commentaire
Laser mobile/MNS	P2/MNS P6/MNS	Global Global	résultat $P2_{ref}$ résultat $P6_{ref}$
Laser mobile/Laser mobile	P1/$P2_{ref}$ P7/$P6_{ref}$ P5/$P2_{ref}$ P3/$P2_{ref}$ P4/$P3_{ref}$	Partiel en extrémité Partiel en extrémité Intersection Partiel Partiel	non traitée résultat $P3_{ref}$
Laser fixe/MNS	P8/MNS P9/MNS	Global Global	non traitée

TABLE 7.1 – Zone de test à *Paris, 5ème* : liste des différents couples du recalage hétérogènes. Les cas de P5/$P2_{ref}$ n'est pas traité pour des raisons de déformations majeures affectant le tronçon P5. Le couple P9/MNS n'est pas traité, P9 ne représente pas d'anomalies de géo-référencement.

Zone de l'*INRIA Rocquencourt*

Pour la validation de nos algorithmes de recalage sur des données laser mobile, nous avons effectué des acquisitions à l'*INRIA* [1] Rocquencourt. La campagne d'expérimentation est détaillée dans l'annexe E.

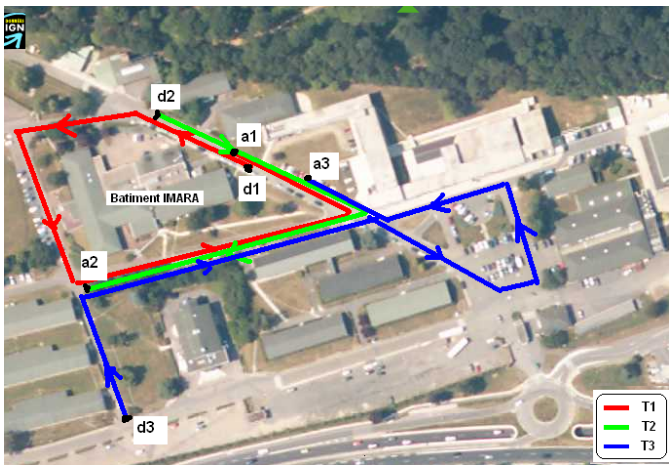


FIGURE 7.2 – Zone de l'*INRIA Rocquencourt*. Répartition sur une image aérienne des différents tronçons acquis par *Lara3D*.

Nous exposons les différents tronçons acquis dans la figure 7.2. Les deux couples de recalage sont présentés dans le tableau 7.2.

1. Institut National de Recherche en Informatique et Automatique.

	Couple	Recouvrement	Commentaire
Laser mobile/Laser mobile	T2/T1 T3/T1	Global Partiel	T1 Tronçon de référence

TABLE 7.2 – Zone de l'*INRIA Rocquencourt* : liste des différents couples du recalage.

7.2.3 Considérations générales

Nous considérons pour les données en entrée :
- Un recouvrement partiel.
- Un géo-référencement qui constitue l'initialisation du recalage.

L'application des algorithmes proposés est précédée par des pré-traitements sur les données brutes :
- L'application d'opérateurs morphologiques 2D sur le MNS représenté en 2.5D. Ceci permet de réduire le bruit : nous appliquons un filtrage alterné séquentiel (Serra and Chermant, 1997; Soille, 2003) qui permet de simplifier le MNS en préservant les contrastes majeurs correspondant aux façades.
- Lors de l'application d'opérateurs 3D, nous opérons un sous-échantillonnage aléatoire sur les nuages de points pour alléger les données traitées. Une segmentation 3D à la main est appliquée sur la façade du *Panthéon* produite par le scanner fixe au sol. Cette segmentation nous permet de limiter l'espace de recherche et de se focaliser sur la zone d'intérêt.

7.3 Résultats et discussions

Nous avons appliqué les trois méthodes de recalage exposées dans le chapitre 6 sur les différents scénarios. Le résultat global sur la zone de test est illustré sur la figure 7.3. Nous présentons, dans ce qui suit, des illustrations des différents résultats partiels réalisés pour la génération de ce résultat. Nous organisons les illustrations par cas traité et non par algorithme. L'initialisation du recalage ICP-SA a été réalisée selon les cas traités, les différentes configurations sont représentées dans le tableau 7.3. Les valeurs d'initialisation de l'algorithme RANSAC utilisées pour R-ICP sont fournies dans le tableau 7.4. Une évaluation quantitative de la complexité algorithmique des différentes implémentations accompagne les résultats. Une comparaison qualitative entre les algorithmes proposés est traitée dans le chapitre 8.

7.3.1 Recalage de relevés laser mobiles sur MNS

Ce recalage sert à la détermination du tronçon de référence à partir d'un tronçon d'intérêt (cf. section 4.7). Nous présentons sur la figure 7.4 le résultat du recalage obtenu par ICP-SA avec les deux distances P-to-P et P-to-S opérées sur le couple P2/MNS. Nous avons appliqué des opérateurs de filtrage morphologique en utilisant la bibliothèque

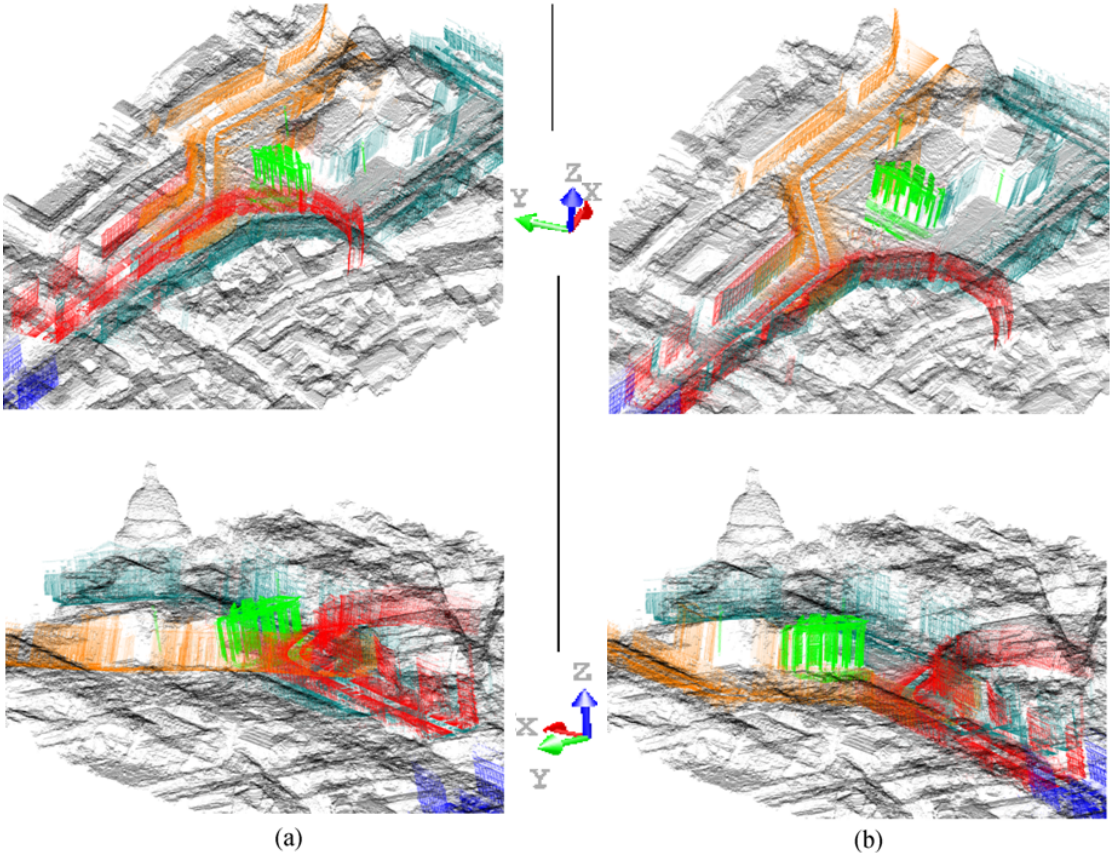


FIGURE 7.3 – Zone de test dans *Paris 5ème* autour du *Panthéon*, données MNS en noir, données scanner fixe en vert clair et les données des relevés laser mobiles sont dans les couleurs illustrées sur la figure 7.1. (à gauche) Illustration des données géo-référencées en entrée : nous observons des décalages en 3D. (à droite) Résultat final du recalage des trois types de données de la zone de test (combinaison des meilleurs résultats de ICP-SA et R-ICP).

Variable	ϵ_1	ϵ_2	κ	K_{max}
Relevés fixes et mobiles /MNS	0.01 m	0.3 m	50	100
Recouvrement en extrémités	0.01 m	0.15 m	30	50
Recouvrement partiel	0.01 m	0.15 m	20	50
Recouvrement global	0.01 m	0.15 m	10	50

TABLE 7.3 – Initialisation des variables de ICP-SA relativement aux cas de recalage hétérogène traités.

s	P	ϵ
50	95%	0.1

TABLE 7.4 – Valeurs d'initialisation du RANSAC pour le recalage.

Morph-M [2]. La figure 7.5 expose le comportement de l'algorithme jusqu'à la convergence en utilisant les deux distances géométriques. Le résultat obtenu par P-to-P amène à une stabilisation de l'erreur moyenne d'une valeur de 1.5m à partir de la 25ème itération. Nous illustrons dans la figure 7.6 l'évolution de l'erreur moyenne des algorithmes R-ICP et ICP-SA utilisant la distance P-to-P. Avec R-ICP nous obtenons une convergence à partir de la 33ème itération pour une valeur de 0.28m. L'application de T_{init} obtenue par RANSAC sur le cas traité, diminue largement l'erreur moyenne qui passe de 7.08m à 2.45m à l'initialisation, ce qui améliore nettement la convergence.

7.3.2 Recalage entre relevés laser mobiles

Le recalage entre relevés laser mobile sert à la validation de la deuxième étape de notre approche de correction (cf. section 4.7). Nous avons effectué plusieurs tests pour ajuster nos algorithmes ICP-SA et R-ICP sur les deux zones de test présentées au début de ce chapitre. Les deux distances P-to-P et P-to-S ont été utilisées. Dans ce qui suit, nous avons choisi, pour chaque cas de recouvrement, une illustration accompagnée du comportement de l'erreur moyenne jusqu'à la convergence.

Recouvrement partiel

Nous illustrons dans la figure 7.7 un cas de recalage entre le tronçon de référence $P2_{ref}$ (obtenu après le recalage P2/MNS) présentant un recouvrement partiel. Nous exposons dans la figure 7.8 le comportement de l'erreur moyenne de l'algorithmes ICP-SA en utilisant les distances P-to-P et P-to-S. La distance P-to-P nous permet de converger vers la valeur de 0.12m à partir de la 36ème itération.

2. http ://cmm.ensmp.fr/Morph-M/

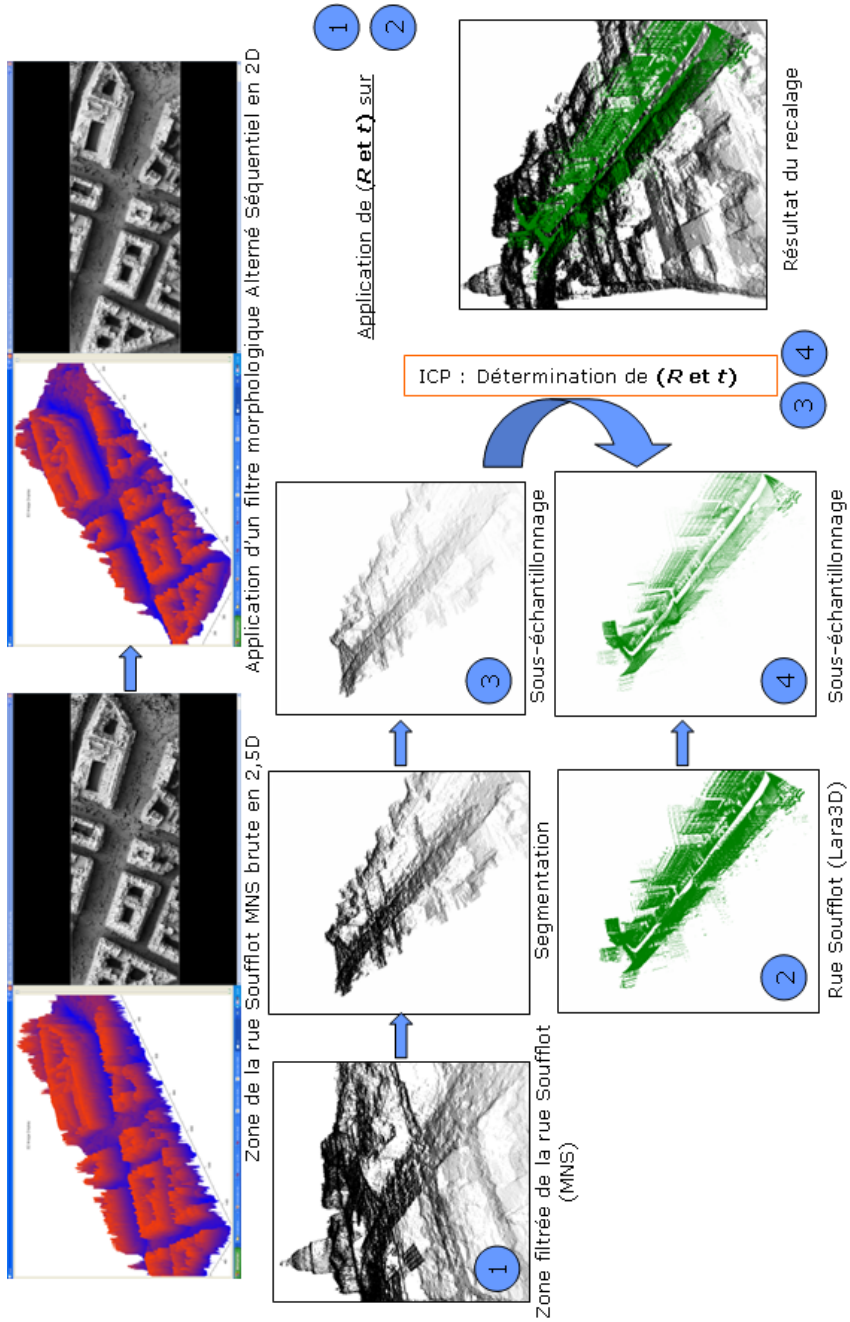


FIGURE 7.4 – Rue Soufflot dans la zone de *Paris 5ème*. Illustration des différentes étapes de pré-traitement et de recalage automatique via ICP-SA des données laser mobile de *Lara3D* sur le MNS.

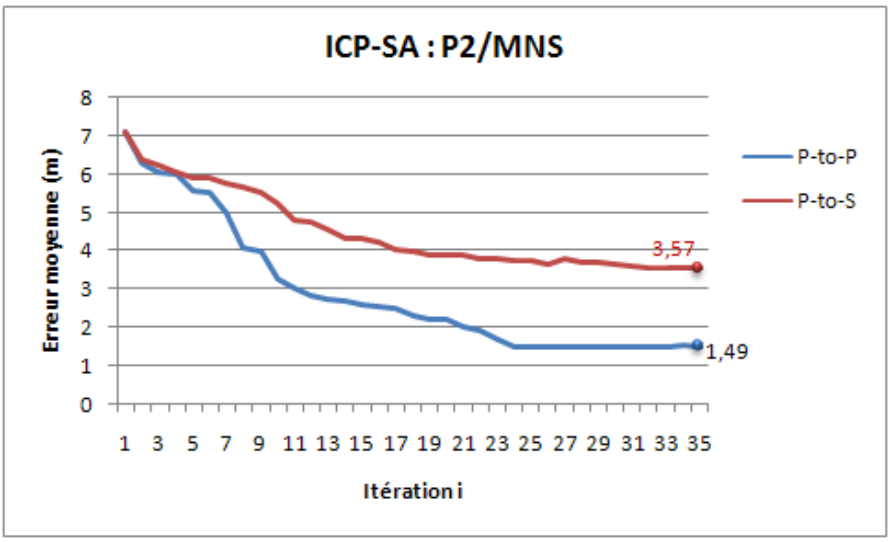


FIGURE 7.5 – Comportement de l'algorithme ICP-SA dans le cas du recalage sur la rue *Soufflot* (P2/MNS). Utilisation de la ditance P-to-P et P-to-S.

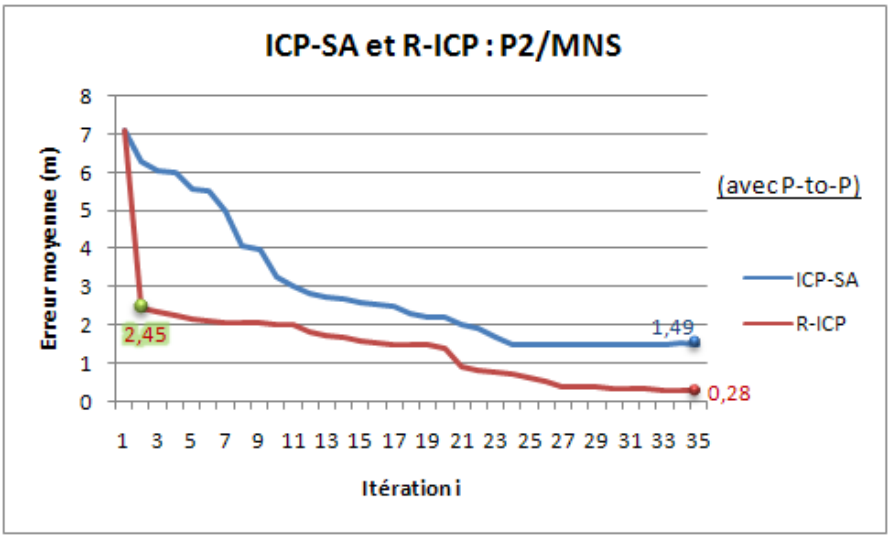


FIGURE 7.6 – Cas de recalage de données sur la rue *Soufflot* P2/MNS. Comportement de l'erreur moyenne avec les algorithmes ICP-SA et R-ICP. L'initialisation de R-ICP (de 7.01->2.45(m)) influe fortement sur le comportement de l'algorithme et le ramène à la convergence après 33 itérations.

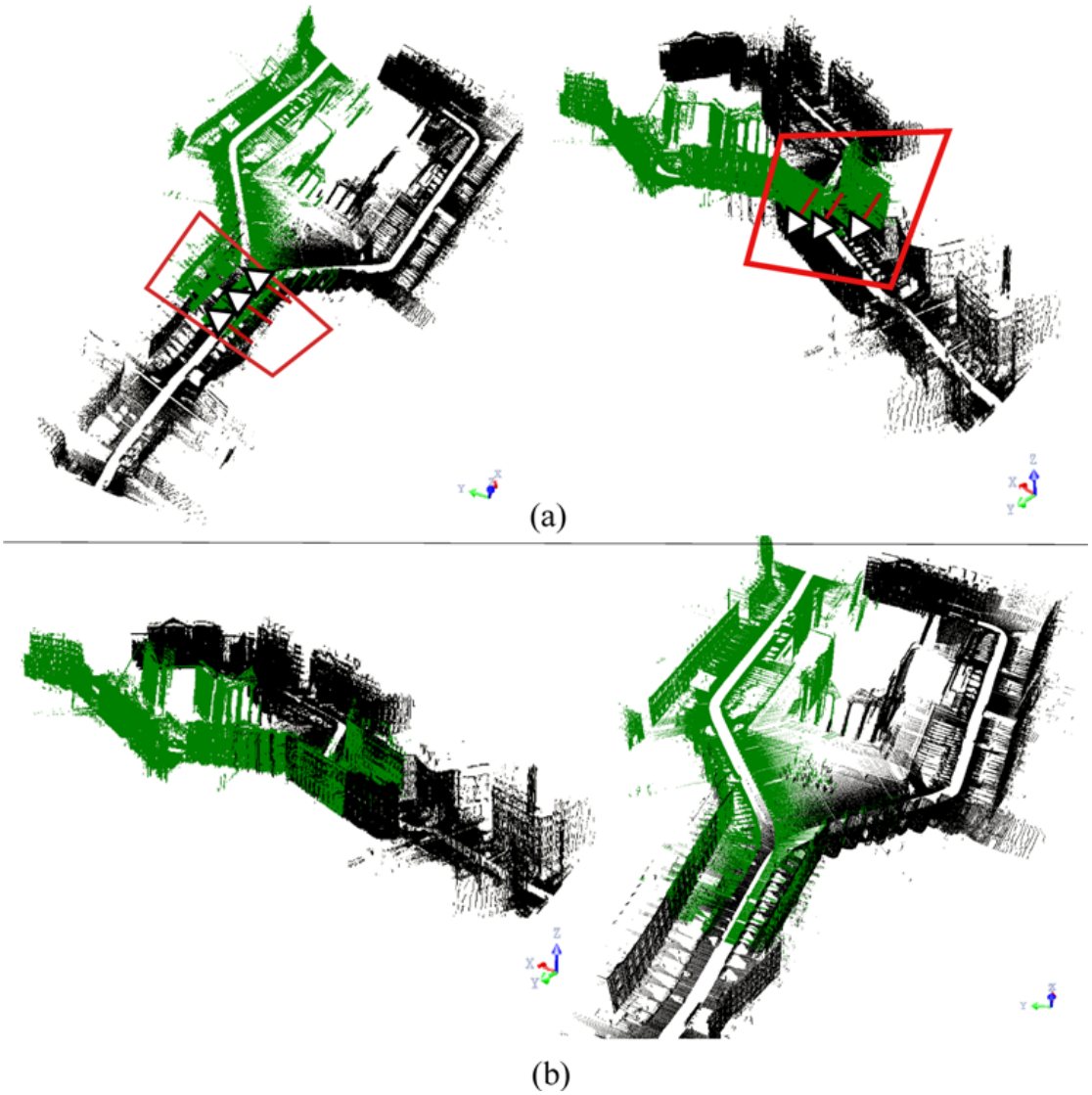


FIGURE 7.7 – Tour du *Panthéon, Paris 5ème*. Cas de recalage de données *Lara3D/Lara3D* présentant un recouvrement partiel. (en haut) Problèmes d'offset et de décalage en 3D avant le recalage. (en bas) Résultat après l'application du recalage automatique avec ICP-SA utilisant la distance P-to-S.

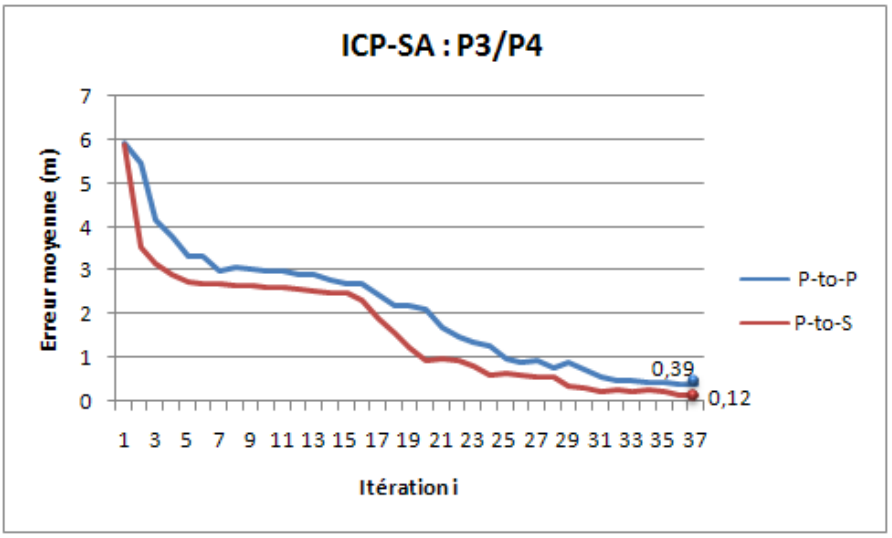


FIGURE 7.8 – Cas du recalage du couple P3/P4. Illustration du comportement de l'algorithme du recalage ICP-SA en termes de convergence. Utilisation des distances P-to-P et P-to-S.

Recouvrement partiel en extrémités

La figure 7.9 représente le résultat du recalage dans un cas de recouvrement en extrémités du tronçon P1 et le tronçon de référence $P2_{ref}$. Le comportement de l'algorithme ICP-SA avec les deux distances P-to-P et P-to-S est exposé sur la figure 7.10. Nous obtenons un convergence correspondante à la valeur de 0.14m à partir de la 24ème itération pour la distance P-to-P. En contre partie, l'application de P-to-S est marquée par un échec de convergence, ceci est traduit par une stabilisation à une erreur moyenne = 0.44m à partir de la 21ème itération.

Recouvrement total

La figure 7.11 représente le résultat du recalage dans un cas de recouvrement total T1/T3 sur la zone de l'*INRIA*. Seul l'algorithme ICP-SA a été appliqué dans ce cas de figure du fait que les données ne présentent pas de problèmes de saut de GPS important, les décalages sont petits et le recouvrement est assez grand. Le comportement de la convergence de l'algorithme est exposé sur la figure 7.12. Nous remarquons que l'algorithme n'arrive pas à converger et se stabilise à une erreur moyenne de 0.2 m à partir de la 19ème itération. Ceci est dû essentiellement aux erreurs de déformation subies par le tronçon T3 et dues à la configuration en boucle de l'acquisition. Ce cas d'erreur a été exposé dans la section 4.3.2.

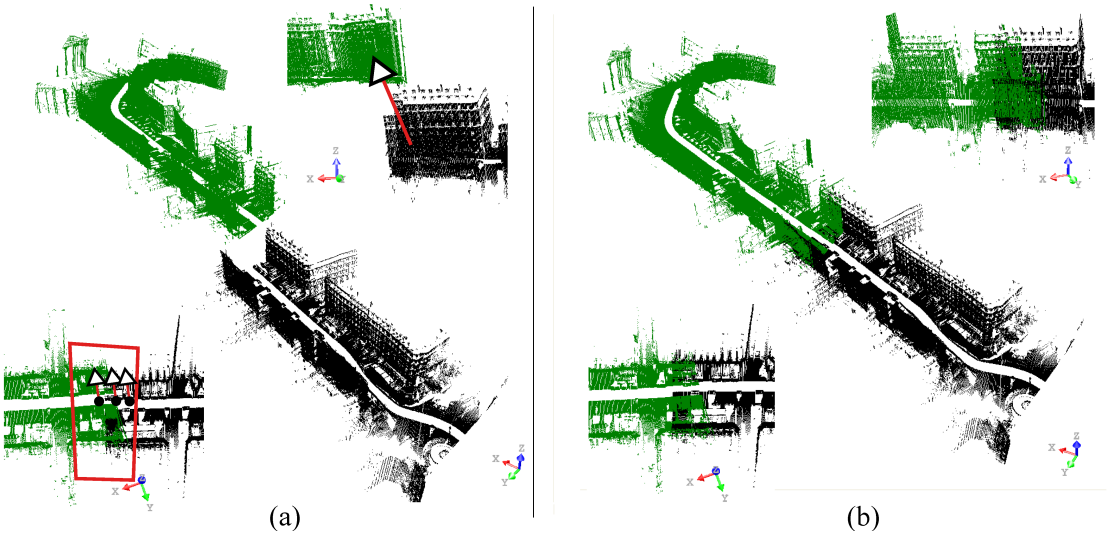


FIGURE 7.9 – Rue *Soufflot* dans la zone de *Paris 5ème* P1/P2. Cas de recalage de données *Lara3D/Lara3D* présentant un recouvrement en extrémités. (à gauche) Problèmes d'offset et de décalage en 3D avant le recalage. (à droite) Résultat après l'application du recalage automatique avec ICP-SA utilisant la distance P-to-S.

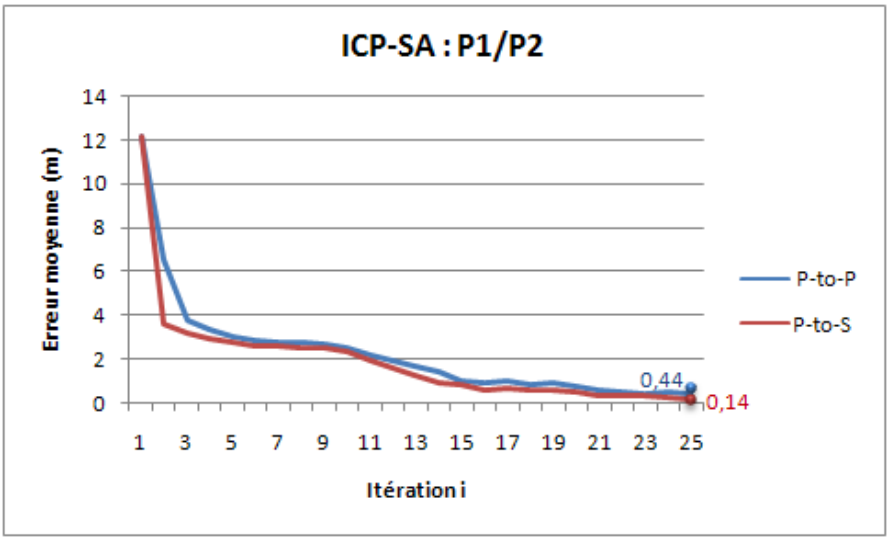


FIGURE 7.10 – Cas de recalage du couple P1/P2. Illustration du comportement de l'algorithme du recalage en termes de convergence. Utilisation de ICP-SA avec les distances P-to-P et P-to-S.

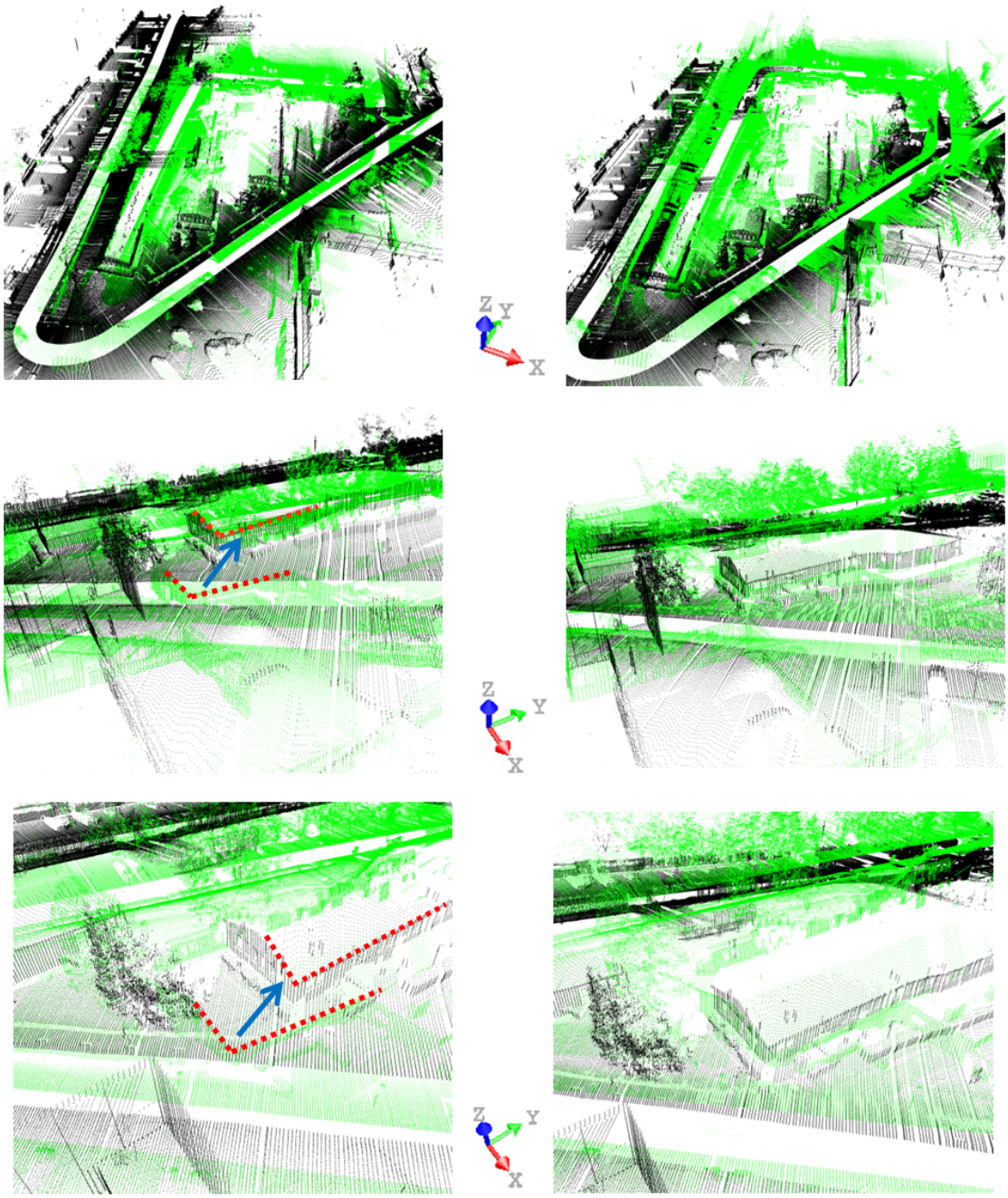


FIGURE 7.11 – Zone *INRIA* couple T2/T1. Cas de recalage présentant un recouvrement total de données issues de relevés laser mobile. (à gauche) Avant le recalage. (à droite) Après le recalage via ICP-SA.

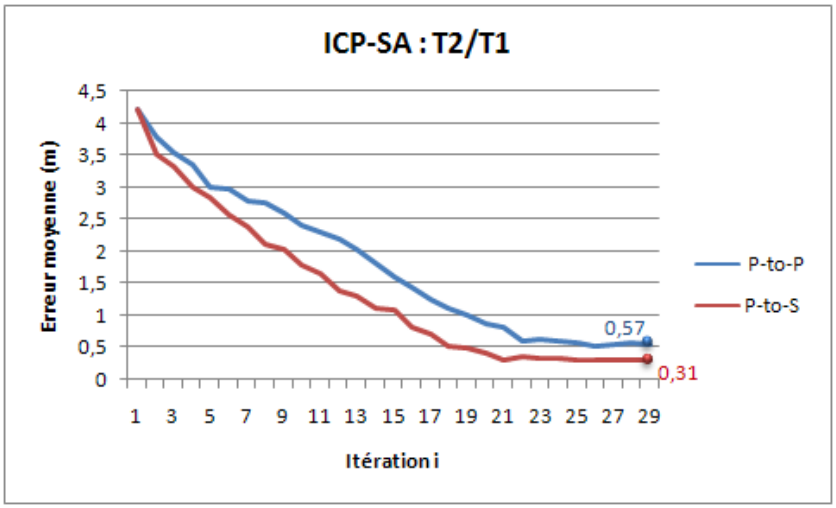


FIGURE 7.12 – Cas du recalage du couple T2/T1. Illustration du comportement de l'algorithme du recalage en termes de convergence. Utilisation de ICP-SA avec les deux distances P-to-P et P-to-S.

7.3.3 Recalage de relevé laser fixe sur MNS

Nous avons appliqué les algorithmes ICP-SA et R-ICP sur un cas de recalage laser fixe/MNS. Les différentes étapes de traitement ainsi que le résultat sont exposés sur la figure 7.13. La figure 7.14 illustre le comportement de l'algorithme ICP-SA utilisant les distances P-to-P et P-to-S. Nous remarquons que la distance P-to-P nous amène à une stabilisation de l'erreur moyenne à la valeur de 0.31m à partir de la 25ème itération comparé à 0.57m à partir de la 26ème itération pour P-to-S. L'application de R-ICP nous amène à la convergence pour la valeur de 0.29m à partir de la 34ème itération (cf. Figure 7.15). La transformation initiale T_{init} obtenue par RANSAC diminue spectaculairement l'erreur moyenne (de 8.13 à 3.54m). Ceci amène l'algorithme à la convergence.

7.3.4 Synthèse du résultat de correction obtenu par R-ICP et ICP-SA

Le résultat de notre approche de correction (cf. section 4.7) est exposé couplé au MNS sur la figure 7.16 et sans MNS sur la figure 7.17. Nous pouvons remarquer l'ajustement du géo-référencement des différents tronçons initialement biaisés.

La taille des données traitées étant très grande (*6 millions de points*), nous avons adopté une stratégie d'accélération via KD-Tree. Nous obtenons un facteur d'accélération moyen de 32 fois par rapport à notre première implémentation sans KD-Tree. Le tableau 7.5 illustre le facteur d'accélération pour chaque type des recalages traités. L'architecture d'expérimentation est la suivante : *PC Intel(R) Xeon (R) CPU 5130 @2.00GHZ avec 2Go de RAM.* Le résultat exposé sur les figures 7.16 et 7.17 a été obtenu en un peu plus de 3min (197.24 sec) (cf. tableau 7.6).

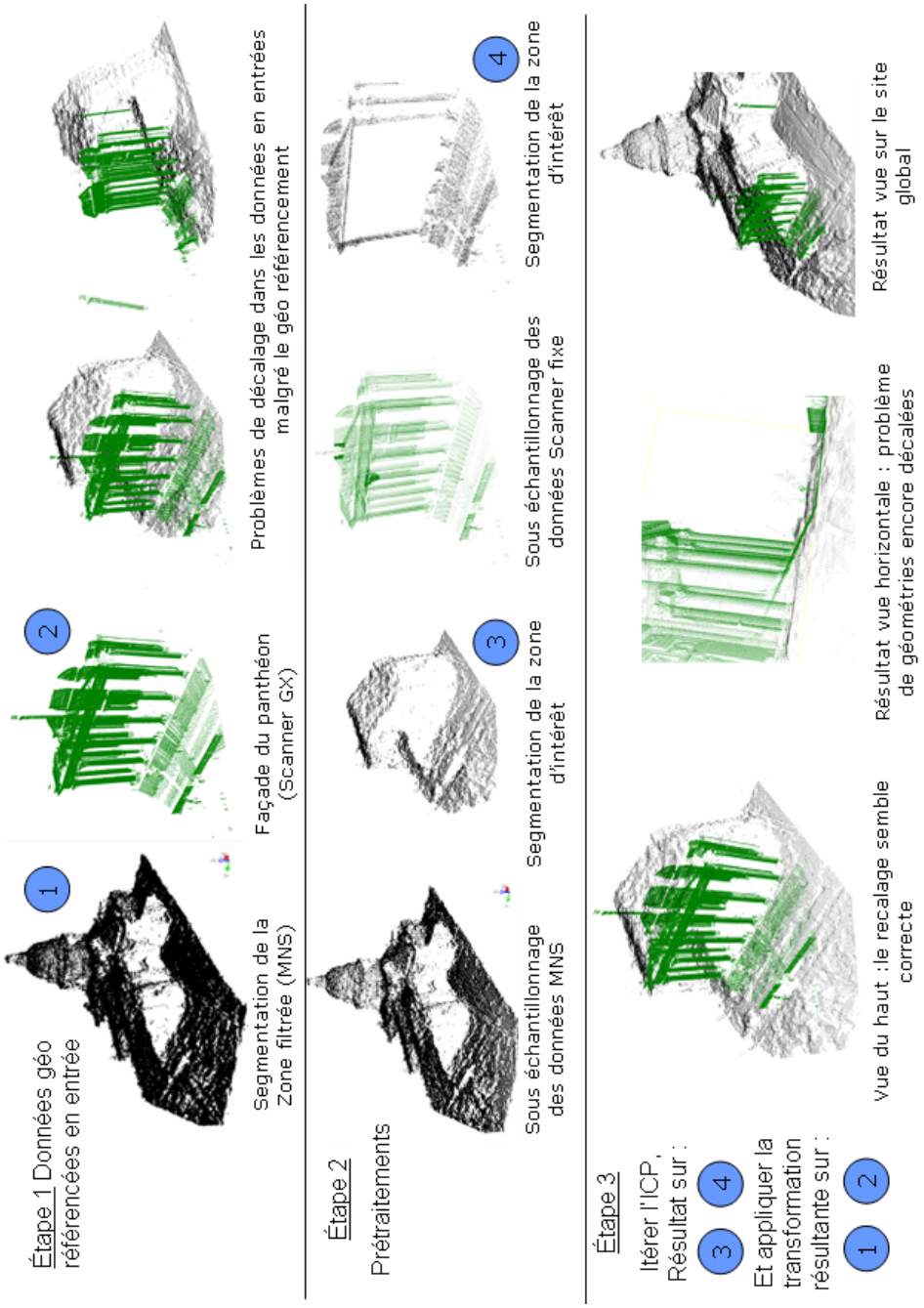


FIGURE 7.13 – Illustration des différents pré-traitements et du recalage via ICP-SA de la façade du *Panthéon* dans *Paris 5ème* produite par scanner fixe au sol, sur la zone extraite du MNS.

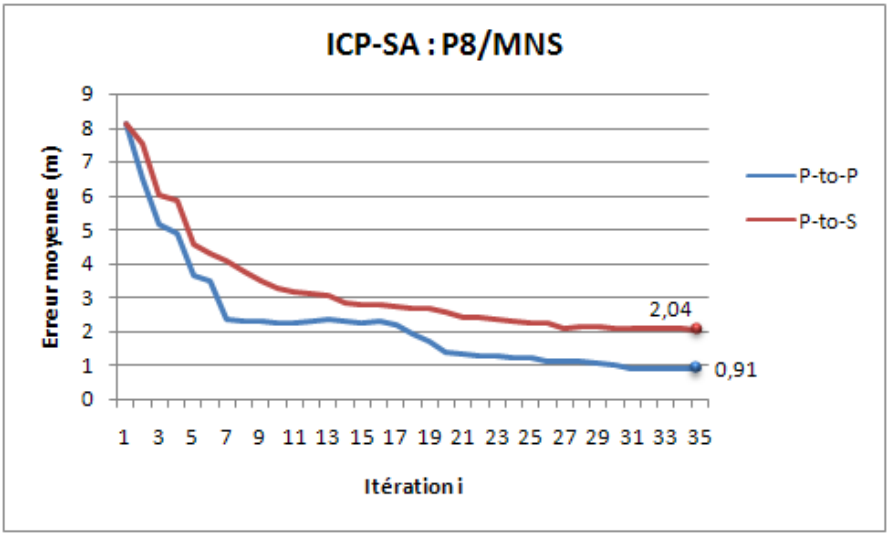


FIGURE 7.14 – Comportement de l'algorithme ICP-SA dans le cas du recalage sur le *Panthéon* (Scanner-GX/MNS).

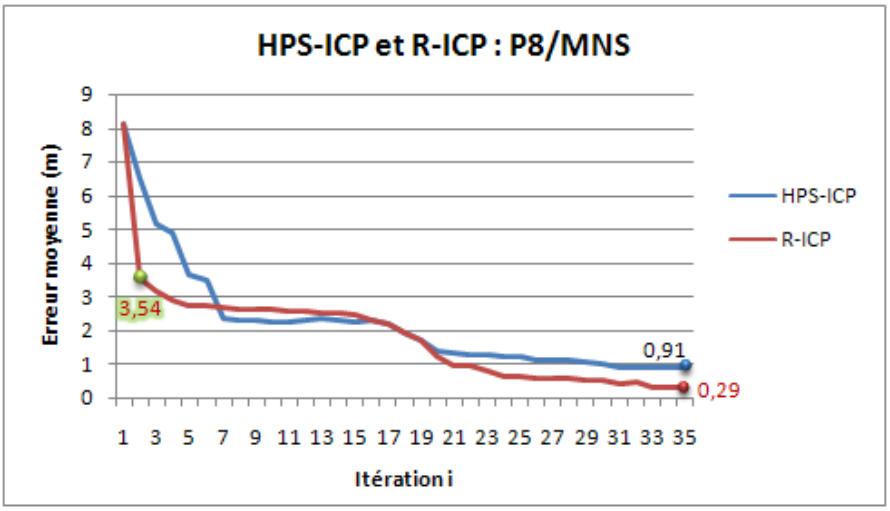


FIGURE 7.15 – Façade du *Panthéon*, cas de recalage de données scanner fixe GX sur MNS. Evolution de l'erreur moyenne avec les algorithmes ICP-SA et R-ICP. Nous remarquons l'influence de l'initialisation par RANSAC au lancement de l'algorithme.

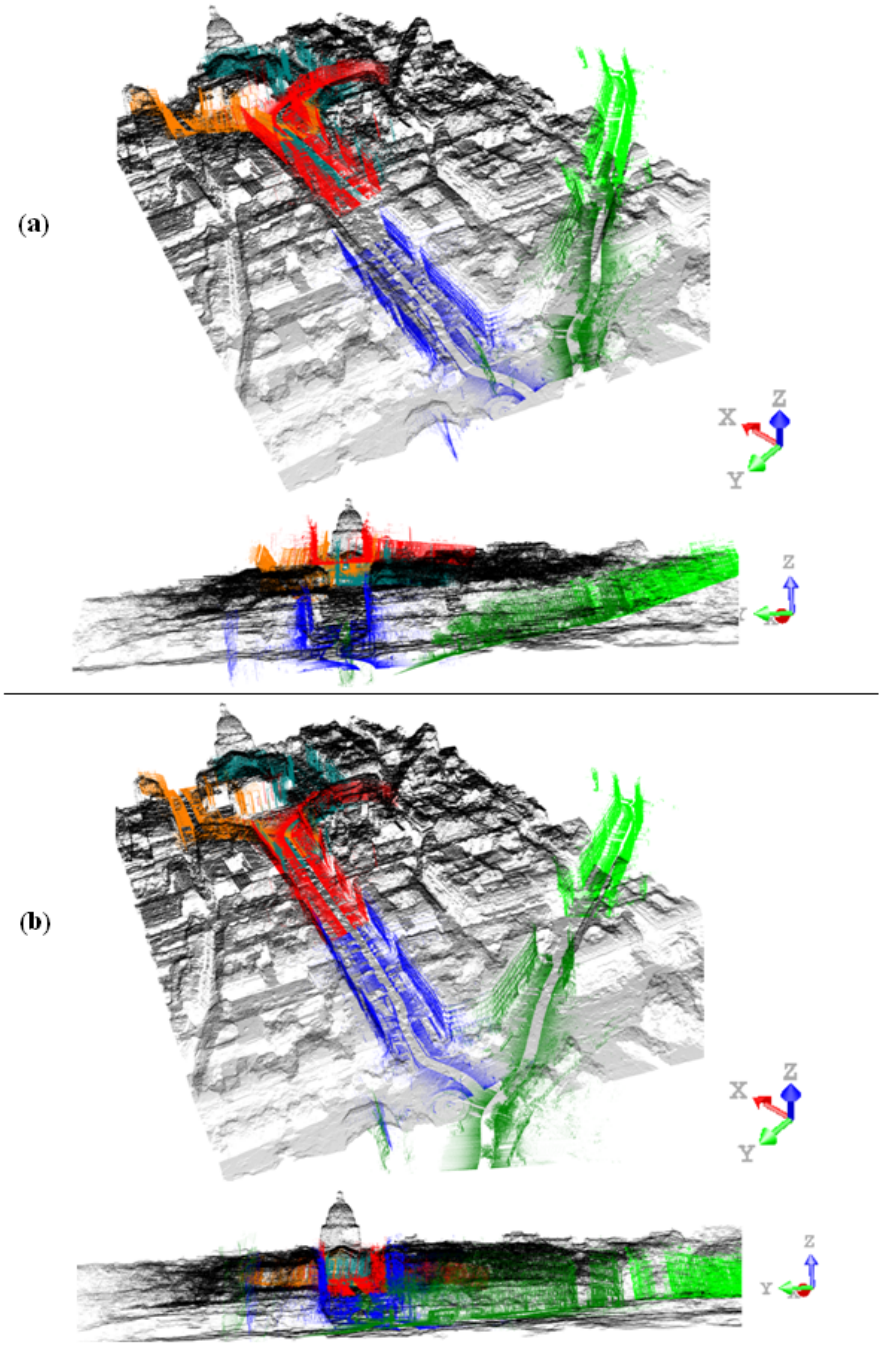


FIGURE 7.16 – Zone de test *Paris 5ème* autour du *Panthéon*. Données MNS en noir, les différents tronçons des relevés laser mobiles distingués par les couleurs correspondant à celles dans la figure 7.1. (en haut) Illustration des données géo-référencées en entrée : nous observons des décalages en 3D. (en bas) Résultat final du recalage utilisant le MNS comme référence (combinaison des meilleurs résultats de ICP-SA et R-ICP).

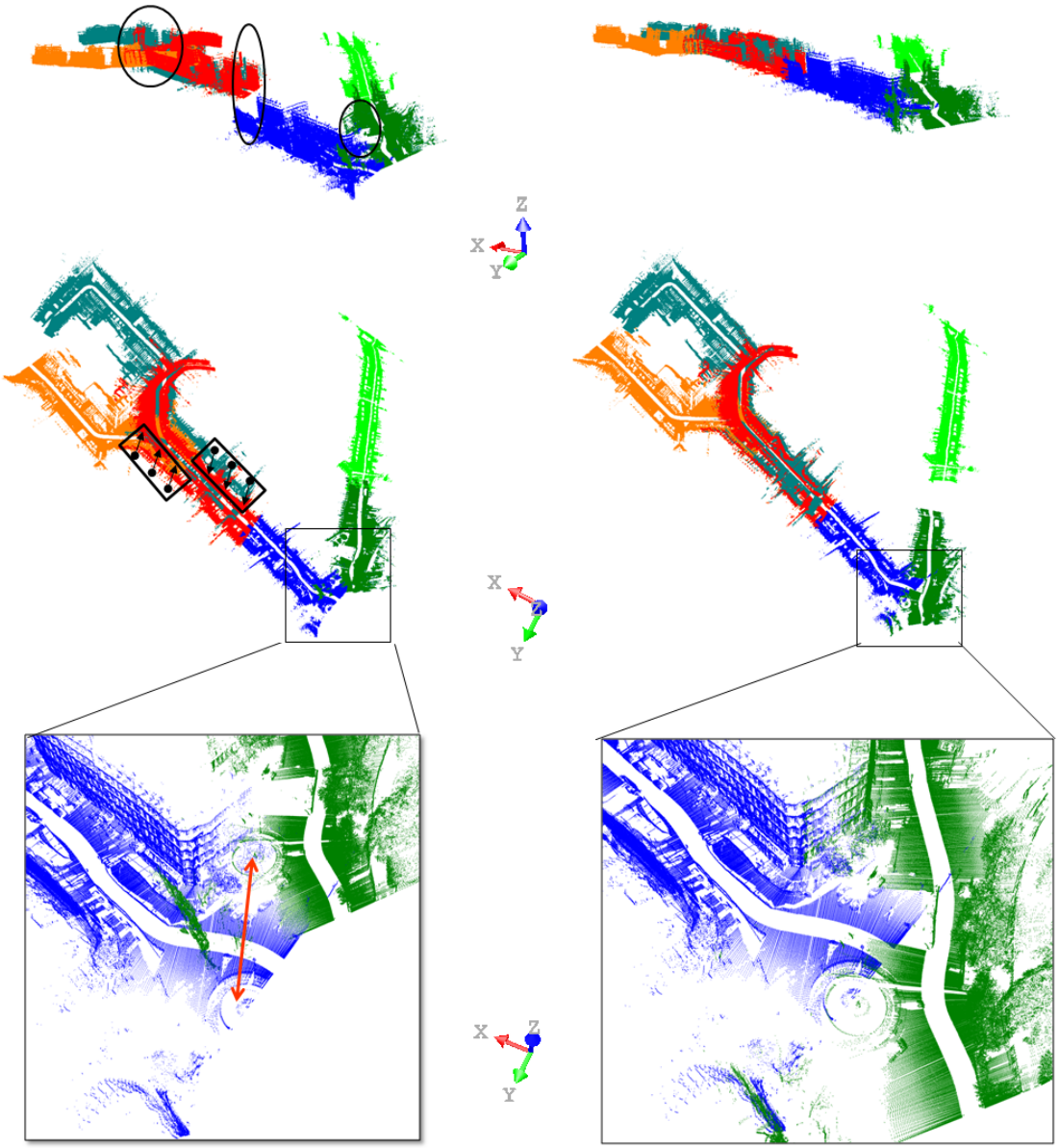


FIGURE 7.17 – Zone de test *Paris 5ème* autour du *Panthéon*. Observation des relevés laser mobiles : (à gauche) avant la correction, (à droite) après correction. Grand plan sur le carrefour de la place *Edmond Rostand*.

	Nbr itérations	Temps CPU / itération (s)		Temps CPU total (s)			F(acc)
		sans K-D Tree	avec K-D Tree	sans K-D Tree	avec K-D Tree	K-D Tree (s)	
P2/MNS	33	19,4	0,549	620,8	18,08	0,046	34,2
P8/MNS	35	6,853	0,214	18,08	7,49	0,031	31,3
P1/$P2_{ref}$	24	47,48	1,45	1139,52	34,8	0,057	32,74

TABLE 7.5 – Comparaison en terme d'accélération de nos deux implantations d'ICP-SA : avec et sans accélération. Nous obtenons une accélération d'un facteur 32.

	Nombre de points de contrôle	Nombre d'itérations	Temps CPU (s)
P1/$P2_{ref}$	18709	24	34,8
P6/P7	156690	22	31,4
P3/$P2_{ref}$	292339	35	52,21
P3/P4	179018	37	48,1
P2/MNS	69300	33	18,08
P8/MNS	24245	35	12,65
Total du temps CPU (étapes itératives)			197,24

TABLE 7.6 – Temps CPU pour l'implantation optimisée de l'ICP utilisant les KD-Tree sur la zone globale traitée. Nous obtenons un facteur d'accélération de 32 fois, nous traitons toute la zone en un peu plus de 3min.

7.3.5 Recalage par HPS-ICP

Nous exposons dans ce qui suit les différents traitements effectués pour la réalisation du recalage via HPS-ICP.

Segmentation par RANSAC

Nous avons appliqué l'algorithme de détection de plans par RANSAC sur des tronçons de test de relevés laser mobile sur la zone de *Paris 5ème*. La figure 7.18 illustre le résultat de cet algorithme sur le *Bvd Saint Michel*. La segmentation a été réalisée avec les paramètres exposés dans le tableau 7.7. Nous avons opéré un traitement par morceau, le tronçon en question a été traité en deux portions.

s	P	1-ϵ	n_{min}
3	95%	$\frac{n_{min}}{n_{pts}}$	500

TABLE 7.7 – Valeurs d'initialisation du RANSAC pour la détection des plans, avec n_{pts} le nombre de points du nuage traité.

Segmentation par profils

Nous avons appliqué l'approche de la segmentation par profil sur les relevés laser mobiles *Lara3D*. La figure 7.19 illustre le résultat de l'application de cet opérateur sur une portion de la rue *Soufflot* à *Paris 5ème*. Le résultat de l'extraction des traces au sol par approche de profils nécessite un traitement de filtrage sur le résultat final bruité.

Filtrage 2D

Nous avons appliqué une détection de contour 2D reposant sur un filtre *DoG*. La figure 7.20 illustre le résultat du filtrage sur la zone de *Paris 5ème*. Un grand plan sur la zone de l'*Ecole des Mines de Paris* est exposé.

Recalage HPS-ICP sur le *Bvd Saint Michel*

La Figure 7.21 illustre les relevés laser *Lara3D* et les données du MNS sur le *Bvd Saint Michel* à *Paris 5ème*. Dans un premier temps nous appliquons une segmentation dont le résultat affiche un décalage en Z observable. La segmentation des relevés laser est effectuée grâce à l'approche profils tandis que la segmentation 2D est réalisée par une détection de contours *DoG*.

Le résultat du recalage via HPS-ICP est exposé dans la figure 7.22. Les éléments de la transformation T_{init} sont listées dans le tableau 7.8.

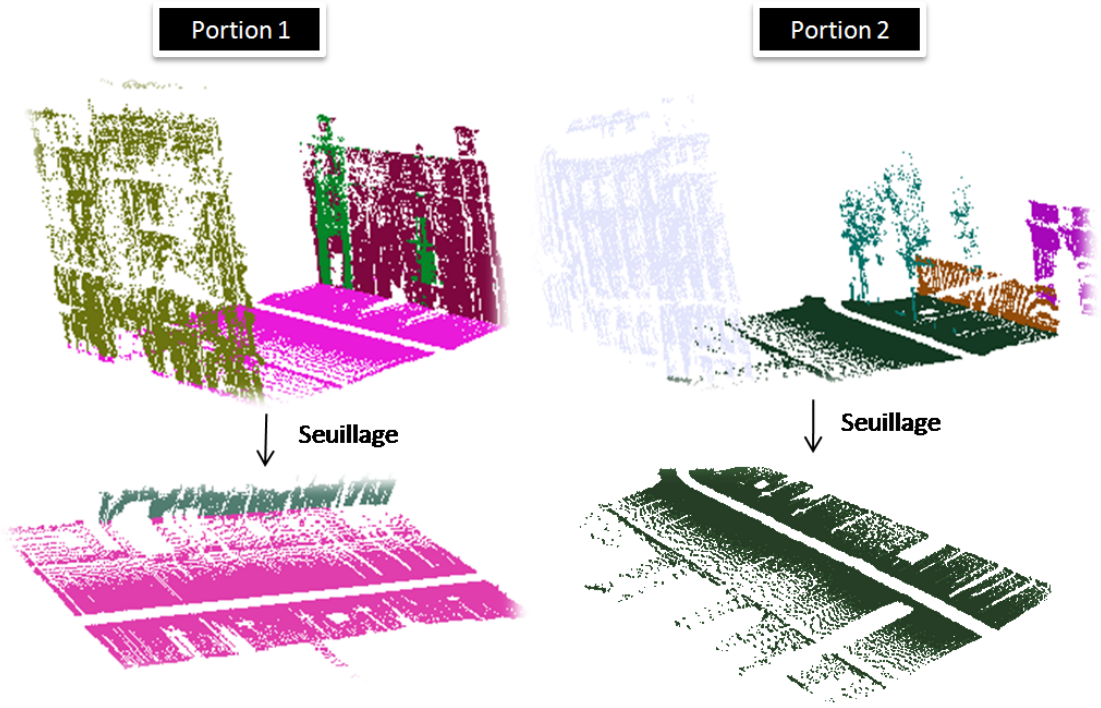


FIGURE 7.18 – Segmentation par RANSAC sur le *Bvd Saint Michel*. La segmentation est effectuée par morceau sur la partition traitée (Portion 1 et 2). Application d'une étape de seuillage après la segmentation.

t_{2D} (m)	R_{2D}	t_Z (m)
$\begin{pmatrix} -0.009373 \\ 0.013383 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & -4.2842.10^{-5} \\ 4.28849.10^{-5} & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 3.17395 \end{pmatrix}$

TABLE 7.8 – Différentes composantes de T_{init}.

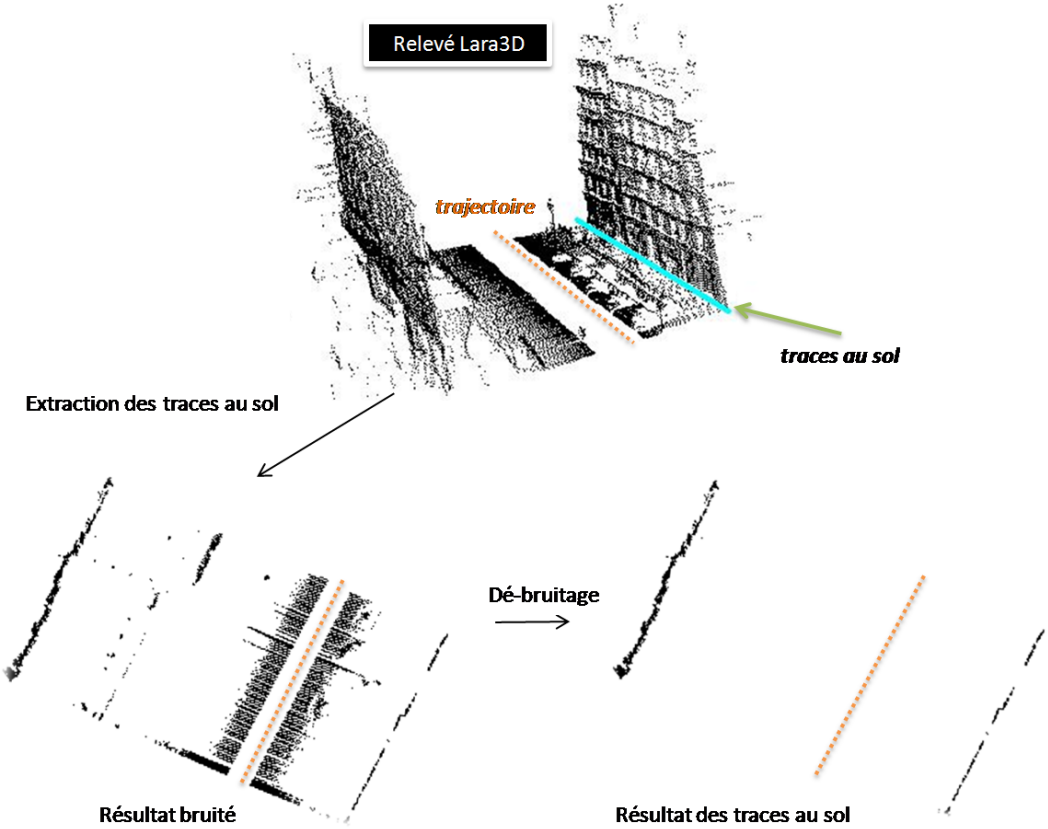


FIGURE 7.19 – Relevés *Lara3D* sur une portion de la rue *Soufflot* à *Paris 5ème*. Représentation de la trace au sol extraite par l'algorithme de segmentation par profils.

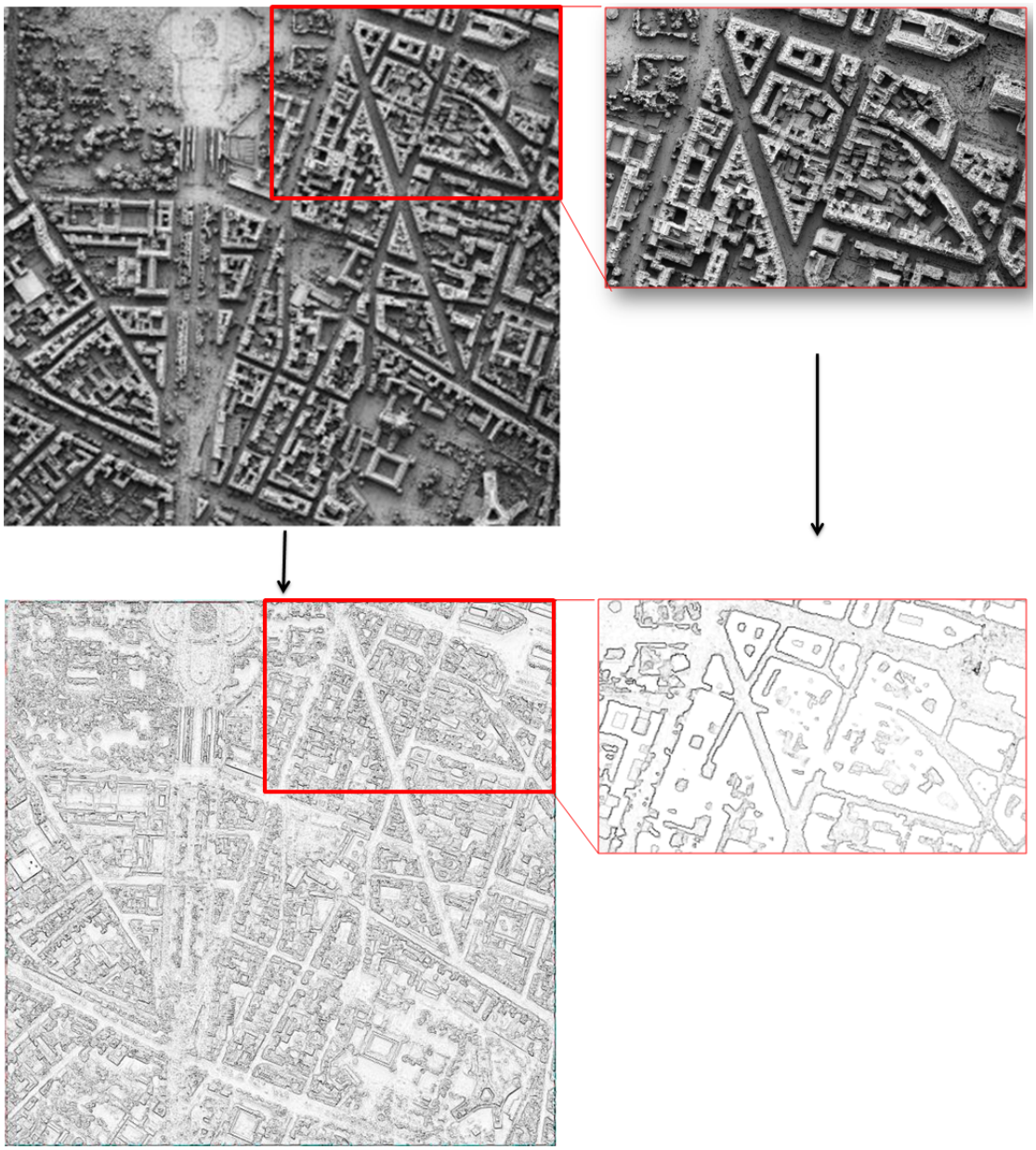


FIGURE 7.20 – Détection de la trace au sol des données MNS : filtrage *DoG*.

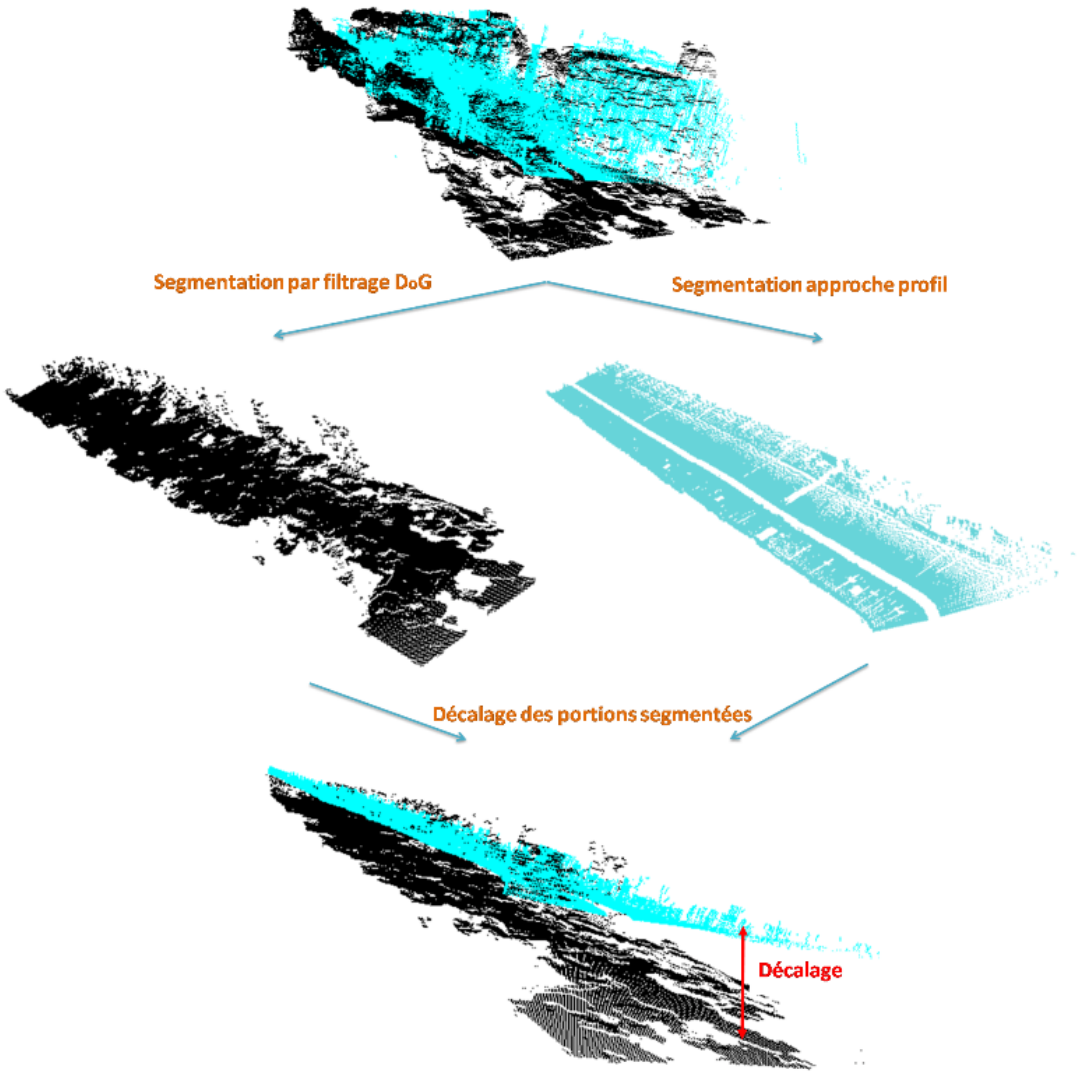


FIGURE 7.21 – *Bvd Saint Michel, Paris 5ème*. Superposition des données 3D de MNS (noir) et les relevés *Lara3D* (bleu). Données segmentées par filtrage *DoG* et par approche profils. Superposition des résultats de segmentation avec l'observation du décalage 3D.

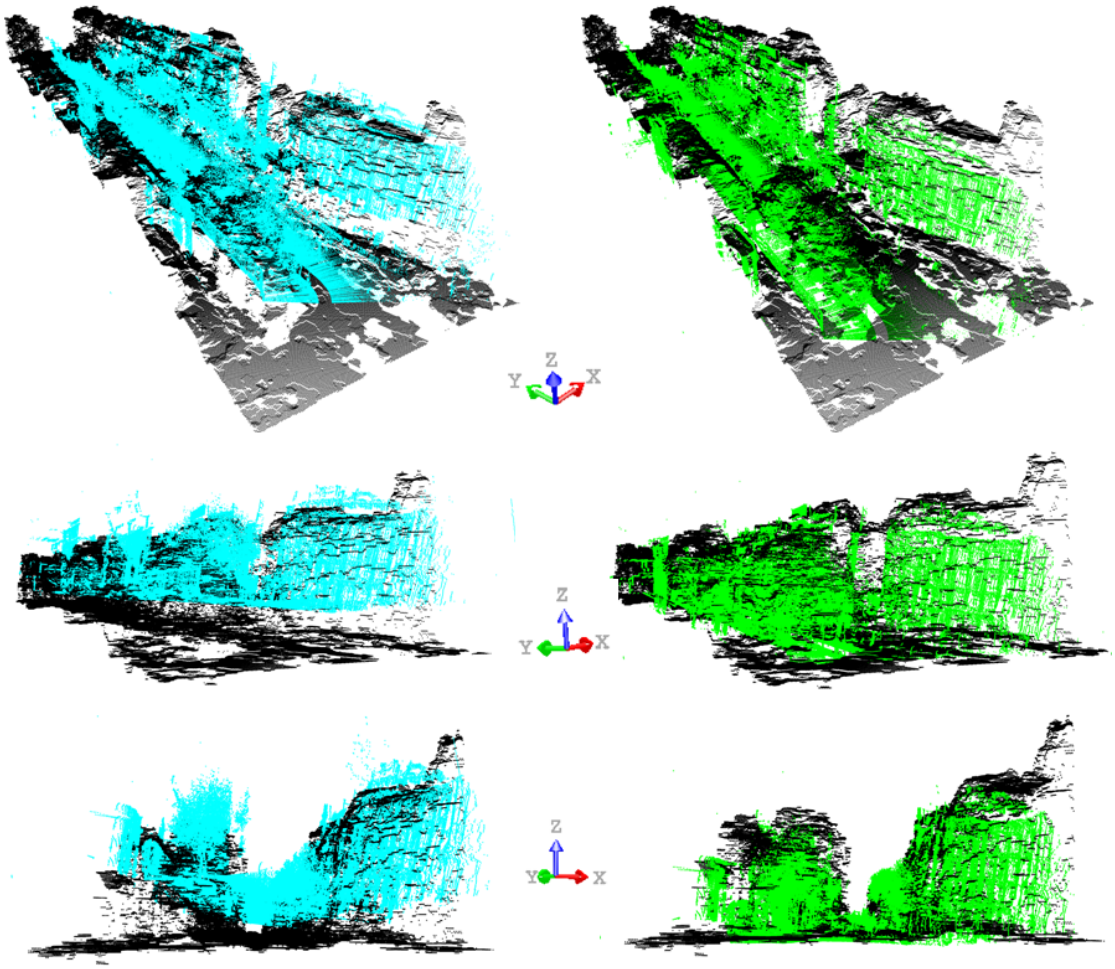


FIGURE 7.22 – *Bvd Saint Michel, Paris 5ème* : (à gauche) Données avant recalage. (à droite) Résultat du recalage via HPS-ICP.

L'estimation de la transformation T_{3D} est donnée par :

$$t_{3D}\ (\mathrm{m}) = \begin{pmatrix} -0.027025 \\ 0.091125 \\ 0.160889 \end{pmatrix} \quad R_{3D} = \begin{pmatrix} 0.999753 & 0.0002969 & 0.0003910 \\ -0.0002956 & 0.999996 & -0.0030237 \\ -0.0003919 & 0.0030237 & 0.999995 \end{pmatrix} \tag{7.1}$$

7.3.6 Discussion

Validation de l'approche de correction

Nous avons pu valider l'approche de correction utilisant des données externes et s'appuyant sur des techniques de recalage. Différents scénarios de recalage ont été élaborés se caractérisant par un jeu de paramètres pour chaque cas traité. Différentes variantes d'ICP ont été proposées et testées (ICP-SA, R-ICP, HPS-ICP) utilisant deux types de distances géométriques P-to-P et P-to-S. L'application de ICP-SA avec P-to-P est plus adaptée pour les cas du recalage entre des données ayant des résolutions différentes (relevé fixe/MNS et relevé mobile/MNS). Le recalage entre données ayant les mêmes résolutions et distributions géométriques est plus adapté en utilisant la distance P-to-S. L'utilisation de l'initialisation du recalage via RANSAC dans R-ICP aide l'algorithme à trouver une bonne convergence avec plus de rapidité par rapport aux autres variantes. R-ICP correspond bien pour recaler les tronçons d'intérêt sur le MNS. Grâce à une accélération via KD-Tree, nous avons traité toute la zone en 3min. Les résultats de HPS-ICP et de R-ICP sont comparables en terme de convergence (cf. Figure 7.23). Par contre HPS-ICP, nécessite plusieurs pré-traitements additionnels par rapport à R-ICP ; ceci peut être une source d'accumulation d'erreurs et de ralentissement du recalage. Certaines configurations des données en entrée peuvent être contraignantes pour HPS-ICP et la transformation initiale sera biaisée. La figure 7.24 illustre un cas de configuration difficile pour HPS-ICP.

Recalage couleur

Nous avons fait des tests en intégrant la primitive de la couleur d_c. Ces tests ont été insatisfaisants pour les raisons suivantes :

- Les relevés laser mobile colorés que nous avons traités ont été acquis avec une caméra à basse résolution (*Marlin* 720x582), ce qui présente une limite ;
- L'algorithme de colorisation implémenté pour la génération de la couleur (Brun, 2007) n'utilise pas le principe du multi-échelle, ce qui provoque les erreurs que nous avons exposées à la section 4.3.1 ;
- Les tests sont réalisés avec la base de couleur *RGB*. L'utilisation de la base *HSV*[3] pourra améliorer les performance de l'algorithme. Dans un contexte de détection de visages, Sedlácek dans (Sedláček, 2004) a démontré les performances de la base HSV par rapport à *RGB*.

Pour ces raisons nous fûmes amenés à reporter le traitement de la primitive de la couleur pour des travaux futures.

3. Hue, Saturation and Value.

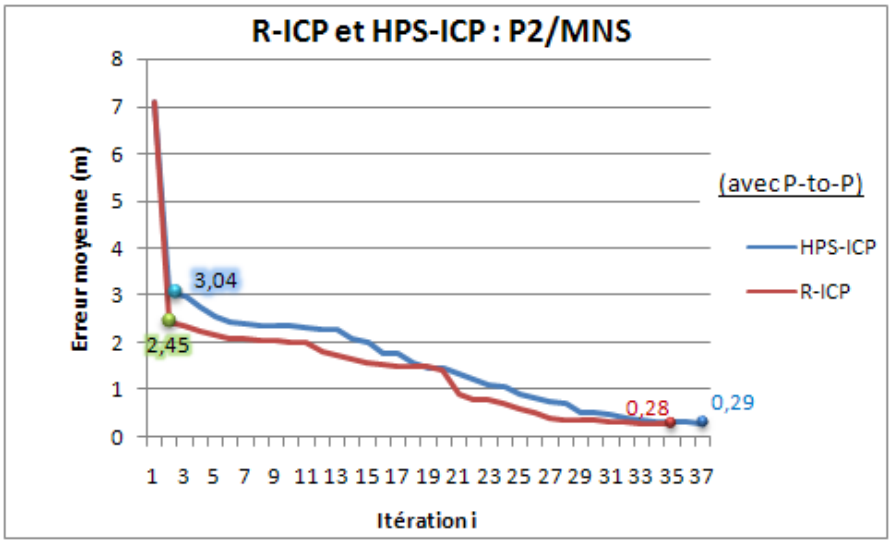


FIGURE 7.23 – Comportement de l'algorithme R-ICP et HPS-ICP dans le cas du recalage sur la rue *Soufflot*.

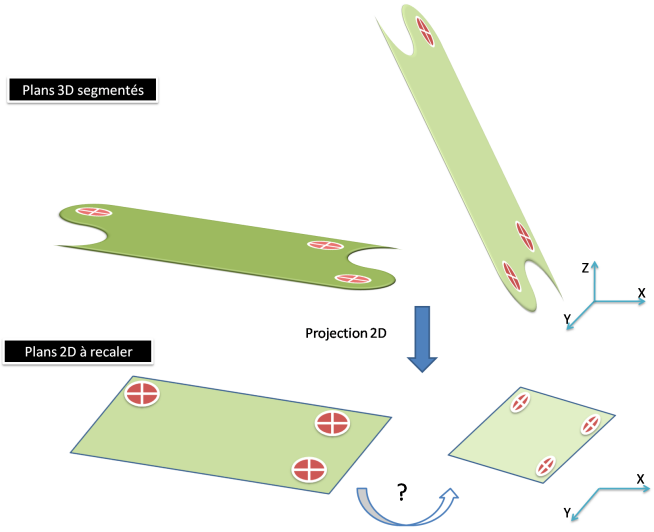


FIGURE 7.24 – Configuration difficile pour HPS-ICP. Le passage de la représentation 3D à celle en 2D génère une perte d'informations, ce qui est contraignant pour le bon fonctionnement de HPS-ICP.

7.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre nos contributions se rapportant au recalage hétérogène de données 3D. Dans cette étude nous avons recensé différents cas de recalage hétérogène sur des données 3D réelles d'environnement urbain dans deux zones de test : *Paris 5ème* et *INRIA Rocquencourt*. Trois scénarios de recalage ont été traités : relevés laser mobile sur Modèle numérique de Surface, données scanner fixe sur Modèle Numérique de Surface et relevés laser mobile entre eux. Ceci a permis de valider l'approche de correction de relevés laser mobiles par données externes proposée dans la section 4.7.

Le traitement de données 3D réelles de représentations urbaines est caractérisé par un temps d'exécution très important : l'adoption d'une stratégie d'accélération est nécessaire. Dans notre cas, nous avons utilisé les K-D Tree pour réduire la complexité de notre implémentation algorithmique dans la phase de recherche des voisins les plus proches. Nous avons quantifié le comportement de nos algorithmes en termes de convergence et de temps d'exécution. Ces métriques ne permettent pas la validation de la précision des algorithmes présentés.

Dans le chapitre 8 nous mettons l'accent sur une problématique de recherche ouverte dans le domaine de la 3D, à savoir l'évaluation qualitative de la précision des algorithmes de recalage 3D.

Chapitre 8

Évaluation des recalages 3D effectués

Sommaire

8.1 Introduction **177**
8.2 Présentation de l'évaluation 3D **178**
8.3 Évaluation du recalage : État de l'art **178**
8.3.1 Évaluation quantitative 178
8.3.2 Évaluation qualitative : validation 179
8.4 Méthodes proposées **181**
8.4.1 Matériel à disposition 181
8.4.2 Validation basée sur les primitives : approche binaire $FBQ - E_b$ 183
8.4.3 Détermination de l'incertitude σ 185
8.4.4 Validation basée sur les primitives : approche floue $FBQ - E_f$. 187
8.5 Résultats et discussions **189**
8.5.1 Évaluation binaire 189
8.5.2 Évaluation floue 190
8.5.3 Discussion 195
8.6 Limites de l'évaluation proposée **195**
8.6.1 Extraction interactive 195
8.6.2 Cas du décalage vertical 195
8.7 Conclusion **196**

8.1 Introduction

L'évaluation de la qualité du recalage 3D permet la validation des algorithmes développés. Cependant, cette tâche n'est pas triviale. Dans le cadre de notre étude nous nous intéressons à cette problématique dans un objectif de quantification de notre approche de correction des rendus 3D issus de MMS (cf. section 4.7). Dans ce chapitre,

nous faisons un état de l'art de l'évaluation du recalage 3D et présentons par la suite les approches proposées.

8.2 Présentation de l'évaluation 3D

Il existe différentes classes d'évaluation d'un traitement 3D groupées selon leur champs d'application :

- Niveau quantitatif : il s'agit de dégager une quantification globale du traitement 3D sans se préoccuper de la signification réelle des valeurs estimées ;
- Niveau qualitatif : l'évaluation sur le plan qualitatif est appelée aussi la validation du traitement 3D (Maintz and Viergever, 1998). L'objectif est de donner une validation sémantique de la qualité du résultat du traitement 3D.

Cette classification obéit à plusieurs critères et métriques de quantification des algorithmes en question et des résultats qui en résultent tels que :

- Précision : il s'agit de dégager des valeurs numériques significatives, d'ordre qualitatif ou quantitatif, des résultats obtenus ;
- Robustesse et Stabilité : cela consiste à étudier l'adaptation des algorithmes aux changements des données en entrée ;
- Ressource et Complexité : il est question de l'architecture sur laquelle sont développés les algorithmes (architecture parallèle. . .) et de leur complexité algorithmique.

8.3 Évaluation du recalage : État de l'art

8.3.1 Évaluation quantitative

L'évaluation quantitative est basée sur plusieurs indices parmi lesquels nous pouvons citer en priorité :

- L'étude de la complexité algorithmique du processus de recalage et l'évaluation du coût de calcul de ce traitement ;
- L'étude de la convergence des algorithmes en utilisant une quantification d'erreur, comme par exemple l'écart-type dans un cas de distance euclidienne.

Nous avons présenté dans la section 7 une étude quantitative de l'erreur globale par itération jusqu'à convergence des algorithmes de recalage proposés. Nous avons par ailleurs estimé le temps de calcul et l'accélération des approches étudiées. Plusieurs études relatives aux variantes ICP ont utilisé ces méthodes d'évaluation quantitatives ; nous pouvons citer : (Besl and McKay, 1992; Zhang, 1994; Rusinkiewicz and Levoy, 2001; Akca, 2007; Ridene and Goulette, 2009d,c). Ces grandeurs indiquent la qualité globale du traitement du recalage, cependant elles ne permettent pas de mesurer la précision des résultats.

8.3.2 Évaluation qualitative : validation

Les travaux de recalage sont très nombreux et concernent un vaste domaine d'application, mais rares sont ceux présentant une validation de la qualité de leurs résultats. La majorité des travaux est dénuée d'évaluation qualitative. Ceci est dû en partie au fait que la méthode la plus utilisée pour la validation est basée sur l'expertise d'un opérateur humain. Ceci est d'autant plus compréhensible dans le cas des applications de recalage liées à des domaines sensibles pour lesquels une décision erronée peut avoir de lourdes conséquences (applications médicales). Toutefois, il existe d'autres applications nécessitant une rapidité de décision et une efficacité du résultat (certaines applications dans le domaine militaire) faisant appel à une validation automatique.

La validation du recalage est donc une tâche sensible. La manière de réaliser cette tâche est guidée par les spécificités de l'application en question. Le diagramme 8.1 résume les niveaux d'interactivité dans le processus de validation du recalage, selon les contraintes de l'application.

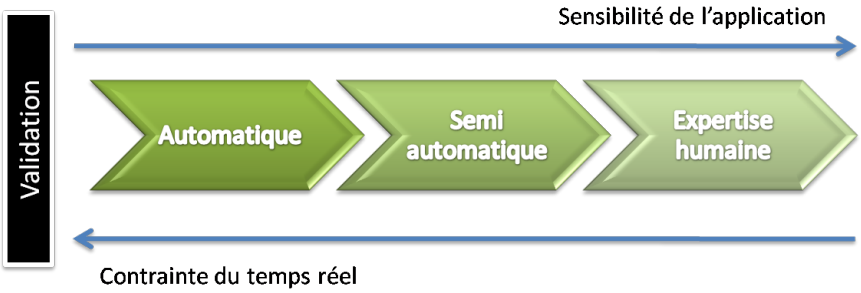


FIGURE 8.1 – Niveaux d'interaction selon la sensibilité du contexte de l'évaluation du recalage.

Pour le cas de la validation automatique ou semi-automatique, une bonne validation nécessite la comparaison avec une vérité terrain (un modèle 3D de référence dans le cas de la cartographie 3D). Si la référence est de même modalité que la donnée à valider, la problématique devient alors celle de la comparaison entre modèles (2D/2D ou 3D/3D).

Comparaison entre modèles 3D

Peu nombreux sont les travaux construits autour de la comparaison des modèles 3D, néanmoins il en existe quelques uns :

Le premier travail de référence est celui de Mémoli et Sapiro dans (Mémoli and Sapiro, 2004) appliqué sur des nuages de points simples et uniformément échantillonnés. L'application de ces méthodes sur des cas complexes n'est pas possible.

Shih a évoqué dans (Shih et al., 2004) une méthode de comparaison booléenne entre nuages de points 3D. Le contexte de l'étude est celui du suivi de la construction d'un site urbain scanné en 3D. L'étude consiste alors à recenser la progression et les changements dans le cycle de vie de la construction. Les changements traités étant temporels, on parle alors de contexte 4D.

Girardeau-Montaut a présenté dans (Girardeau-Montaut, 2006) des techniques de comparaison entre nuages de points 3D dans le domaine industriel. Les approches proposées sont basées sur la détection des changements géométriques 3D et la caractérisation des changements structurels. Celle-ci a été appliquée sur des cas complexes tels que les modèles 3D des centrales nucléaires et des plateformes pétrolières.

Les méthodes décrites en amont ne peuvent pas être appliquées dans des cas d'environnements 3D dynamiques. En effet, la qualité et la résolution des données traitées sont requises pour le bon fonctionnement de ces méthodes très sensibles aux bruits.

Logiciel de comparaison de modèles 3D

Plusieurs logiciels sont apparus sur le marché, incluant un traitement de comparaison entre nuages de points. La comparaison est basée sur la métrique de l'estimation de l'erreur entre les deux nuages de points, métrique utilisée par l'algorithme ICP. Celle-ci est aussi appelée « l'exactitude » et exprimée dans le chapitre 5 par l'équation :

$$E_k = \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} \left\| m_i - T.q_{ji} \right\|^2 \text{ avec } q_{ji} \text{ le p.p.v de } m_i \tag{8.1}$$

L'estimation de l'exactitude correspond à la valeur d'erreur retournée par l'application d'une seule itération de l'ICP. Parmi les logiciels utilisant cette métrique, on peut citer : *RealWorks* [1] et *3DReshaper®* [2]. L'utilisation interactive de ces logiciels peut se faire de deux manières :

- Estimation globale de la distance entre deux nuages de points en entrée, ce qui a comme résultat une estimation de l'exactitude d'ordre global et non de la précision du nuage de points 3D à évaluer.
- Estimation interactive par morceau, ce qui revient à découper le nuage de points en plusieurs sous objets. Par la suite, la comparaison entre ces sous-objets permet d'indiquer la précision du nuage de points traité. Cette tâche de calcul est très coûteuse en temps de traitement et n'est pas adaptée à des cas de données complexes.

1. http ://www.trimble.com/realworks.shtml
2. http ://www.3dreshaper.com

Astuces de validation du recalage 3D

Des travaux ont été proposés pour l'estimation de la précision consistant à appliquer sur des données de test, des déformations (rigides ou non rigides) préalablement enregistrées sous forme d'une transformation de référence T_{ref}. Cette transformation peut aussi être connue à l'avance par l'enregistrement des positions relatives des capteurs lors des acquisitions (Zhang, 1993b).

Ensuite, l'évaluation correspond à la comparaison entre la transformation qui résulte du processus du recalage T_{req} et de la transformation de référence T_{ref}.

Ces méthodes de validation sont fortement liées au contexte applicatif et sont généralement utilisées pour la validation partielle du comportement des algorithmes et non pour l'évaluation de la précision des résultats obtenus.

Validation de recalage 3D dans le domaine médical

Dans le domaine médical, plusieurs travaux de validation ont été menés. Néanmoins, à l'exception de la dernière partie de l'article présenté par Maintz (Maintz and Viergever, 1998) nous n'avons pas trouvé de travaux qui ont fait un état de l'art des méthodes existantes de validation de recalage dans ce domaine. Dans ce qui suit, nous présentons un aperçu des études de validation les plus pertinentes dans un contexte médical.

Des approches de validation basées sur des marqueurs externes ont été proposées dans les travaux suivants : (Simon et al., 1995; Arteaga and Kybic, 2007).

Des méthodes d'évaluation qualitative basées sur les TPE [3] ont été menées dans les références suivantes : (Fitzpatrick et al., 1998; Nicolau et al., 2003).

Lie et al. dans (Li et al., 2008) ont proposé une étude d'évaluation et de comparaison de sept méthodes de recalage multimodales (CT-MR et MR-MR).

L'utilisation de *phantom* pour la validation a été largement adoptée dans le domaine médical. Nous pouvons dans ce contexte citer les travaux suivants : (Nicolau et al., 2005; Reinertsen et al., 2007).

Ces méthodes d'évaluation du recalage ne sont pas applicables directement dans un contexte de cartographie 3D, en raison de différences de caractéristiques des données traitées (en général les données médicales sont volumétriques). Néanmoins, l'idée d'utiliser des TEP peut être une source d'inspiration pour les méthodes de validation de nuages de points 3D.

8.4 Méthodes proposées

8.4.1 Matériel à disposition

Comme déjà évoqué dans la section précédente, la bonne évaluation de la précision d'un modèle 3D issu du recalage passe par sa comparaison avec des modèles 3D de référence. Dans notre cas, n'étant pas en possession de modèles 3D de la zone traitée,

3. Target Point Evaluation

il nous a fallu trouver une alternative. En effet, la production d'une zone de test de référence avec une précision élevée est très difficile à réaliser avec nos compétences et déléguer cette tâche à des experts géomètres est très coûteux (facturation au point [4]).

En revanche, nous sommes en possession d'une carte de référence 2D [5], avec une précision centimétrique, de la zone du 5ème arrondissement de Paris autour du Panthéon (cf. Figure 8.2). La carte contient des primitives remarquables géo-référencées de la vérité terrain (lampadaires, trottoirs, voirie. . .). Nous proposons d'utiliser cette carte 2D pour l'évaluation des modèles 3D issus du recalage hétérogène.

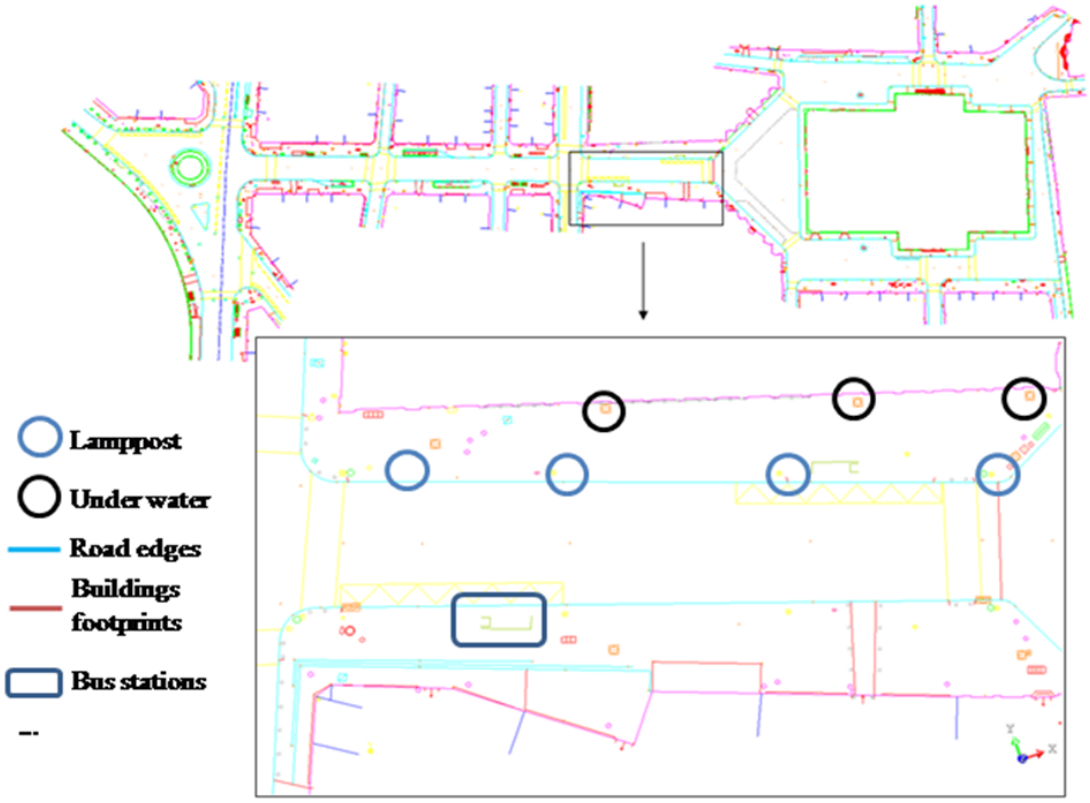


FIGURE 8.2 – Carte de référence 2D à une échelle (1/200e) sur la zone du *Panthéon, Paris 5ème*.

Pour choisir la primitive géométrique la plus saillante pour un traitement d'évaluation, nous avons analysé les données 3D (relevés laser mobiles). Après analyse, la primitive la plus présente et ayant la meilleure distribution dans la zone traitée est le « lampadaire ». La carte de référence contient 139 positions de « lampadaires » avec une résolution centimétrique, que nous considérons comme les éléments de base de notre méthode d'évaluation.

4. Environ 1 €/point (information partenaires prix moyen en France 2010.)
5. Carte fournie par la Division Plans de Voirie de la Mairie de Paris.

Nous présentons dans ce qui suit deux approches d'évaluation de qualité du recalage basées sur les primitives : $FBQ{-}E_b$ [6] et $FBQ{-}E_f$ [7]. La figure 8.3 illustre le principe général de ces deux approches.

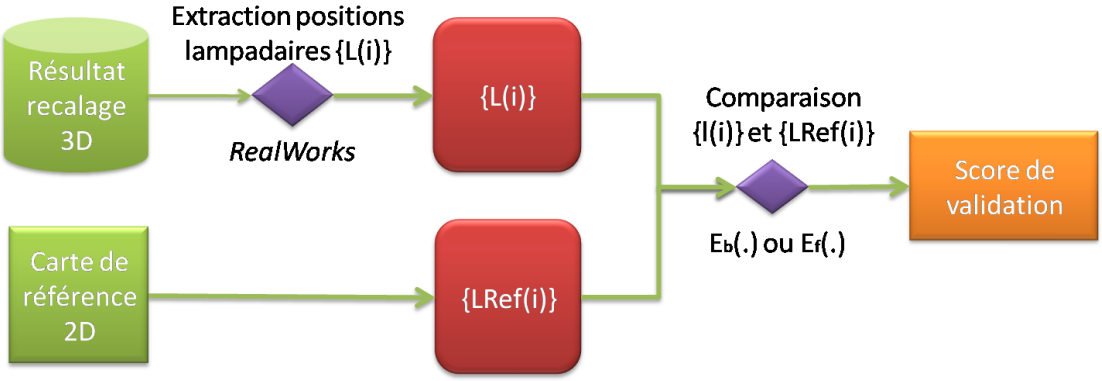


FIGURE 8.3 – Principe général des approches de validation proposées.

8.4.2 Validation basée sur les primitives : approche binaire $FBQ - E_b$

Notre évaluation qualitative du recalage se base sur le calcul d'un score de succès de correspondance calculé en deux étapes principales :

- Extraction de positions de lampadaires dans les données recalées ;
- Comparaison binaire avec les positions dans la base de références 2D.

L'extraction a été réalisée selon une méthode manuelle interactive utilisant le logiciel *RealWorks*. La figure 8.4 illustre le processus d'extraction de « lampadaires » sur une portion de la zone étudiée. La validation de notre métrique a été réalisée selon $E_b(.)$:

$$E_b(L_i) = \begin{cases} true & \text{si } d(L_i, LRef_i) < \sigma + \theta \\ false & \text{sinon} \end{cases} \tag{8.2}$$

$$FBQ - E_b = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} E_b(L_i) \text{ avec n = Nb. lampadaires identifiés} \tag{8.3}$$

L_i et $LRef_i$ correspondent aux positions respectives du lampadaire extrait et de sa référence. La variable σ représente l'incertitude du point sélectionné et θ le rayon moyen du modèle des « lampadaires ». La figure 8.5 illustre le fonctionnement de notre méthode d'évaluation. Une description de cette approche est explicitée par l'algorithme 5 de l'annexe H. Pour plus de détails le lecteur peut aussi se référer à (Ridene and Goulette, 2010b).

6. Feature-Based Quality Evaluation : binary.
7. Feature-Based Quality Evaluation : fuzzy.

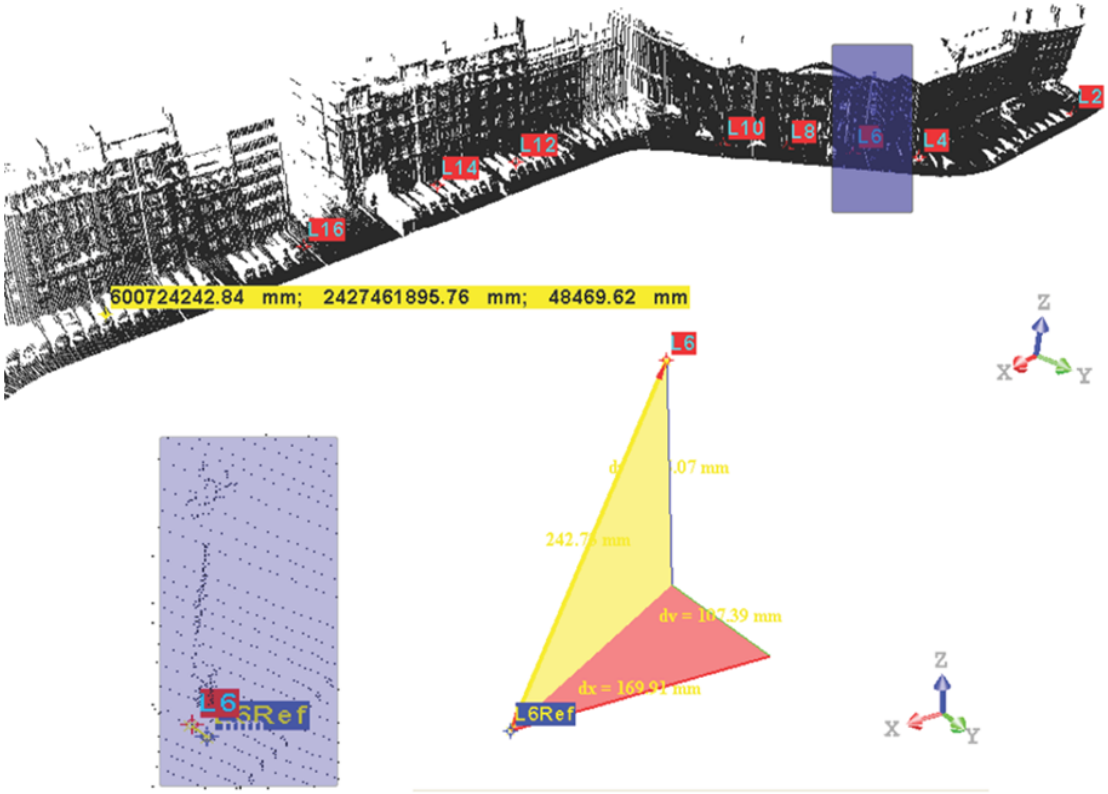


FIGURE 8.4 – Processus d'extraction de « lampadaires » sur la rue *Soufflot* et devant la façade de la mairie, *Paris 5ème*.

8.4.3 Détermination de l'incertitude σ

La valeur de σ est déterminée selon l'équation :

$$\sigma = \sigma_d + \mu \tag{8.4}$$

Concernant la valeur de σ_d, elle est déterminée selon la méthode d'évaluation des erreurs des TLS[8] présentée dans la thèse de Reshetyuk (Reshetyuk, 2006). Lui-même s'est basé sur les travaux sur la quantification du géo-référencement des TLS menés par Gordon et Lichti dans (Lichti and Gordon, 2004; Lichti et al., 2005). Reshetyuk prend en compte trois types de correction :

- Les corrections de la direction horizontale $\Delta\phi_{corr}$ et de la direction verticale $\Delta\theta_{corr}$ sont données par les formules 8.5 et 8.6.

$$\Delta\varphi_{corr} = -(\frac{c}{\cos\theta_{scan}} + i\tan\theta_{scan}) \tag{8.5}$$

$$\Delta\theta_{corr} = -(\theta_0 + \theta_{scan}\delta\theta) \tag{8.6}$$

  avec c, i, θ_0 et $\delta\theta$ correspondent respectivement aux collimations, l'indice de l'axe vertical, l'axe horizontal et l'erreur d'échelle. φ_{scan} et θ_{scan} sont les mesures de la direction horizontale et verticale. La précision des directions des deux (vertical et horizontal) est donnée par les formules 8.7 et 8.8.

$$\sigma^2_{\varphi_{acc}} = \sigma^2_{\varphi} + \frac{\sigma^2_c}{\cos^2\theta_{scan}} + \tan^2\theta_{scan}.\sigma^2_i \tag{8.7}$$

$$\sigma^2_{\theta_{acc}} = \sigma^2_{\theta} + \sigma^2_{\theta_0} + \sigma^2_{scan}.\sigma^2_{\varphi_\theta} \tag{8.8}$$

- La correction du rayon de distance r_{corr} donnée par la relation :

$$\Delta r_{corr} = -\Delta r_{inst} - \Delta r_{reflect} + \Delta r_{ref.ss} - \Delta r_{mult.ret} \tag{8.9}$$

  avec Δr_{inst}, $\Delta r_{reflect}$, $\Delta r_{ref.sc}$ et $\Delta r_{multi.ret}$ correspondant respectivement aux corrections : instrumentales, en relation avec les conditions environnementales, avec la scène scannée et du multi-pixel. D'où la variance sur cette mesure :

$$\sigma^2_{r.acc} = \sigma^2_{inst} + \sigma^2_{reflect} + \sigma^2_{ref.sc} + \sigma^2_{multi.ret} \tag{8.10}$$

Dans notre cas nous prenons en compte seulement la correction du rayon de distance r_{corr} ce qui donnera la relation suivante :

$$\sigma^2_d = \sigma^2_{r.acc} \tag{8.11}$$

$\sigma_{\varphi_{acc}}$ n'est pas prise en compte dans la mesure où notre approche de correction opère en 2D. La valeur de μ (cf. équation 8.4) correspond à l'incertitude causée par le bruit produit par la vibration du véhicule ce qui remplace $\sigma_{\theta_{acc}}$.

8. Terrestrial Laser System

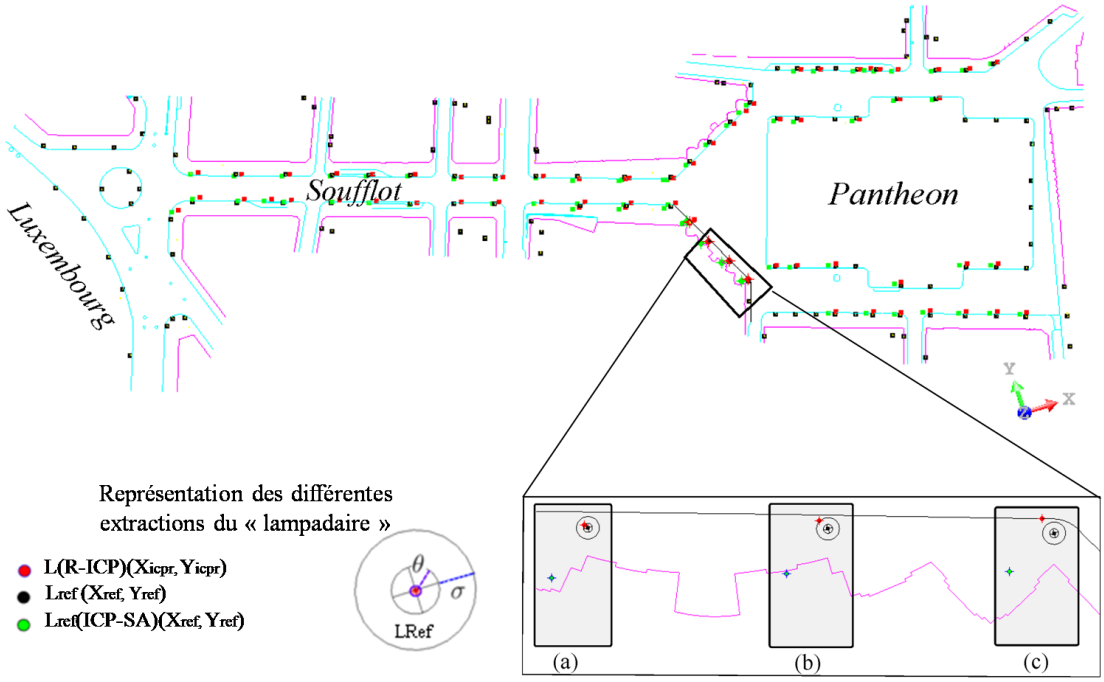


FIGURE 8.5 – Méthode d'évaluation basée sur l'extraction de primitives de référence. Nous faisons l'extraction des positions des « lampadaires » L_i dans les données résultant du recalage avec ICP-SA et R-ICP, puis comparons ces positions avec les positions de référence $LRef_i$ selon la formule $E_b(.)$. **(a)** $E_b(L(R-ICP))$ = true et $E_b(L(ICP-SA))$ = false. **(b)** $E_b(L(R-ICP))$ = true et $E_b(L(ICP-SA))$ = false. **(c)** $E_b(L(R-ICP))$ = false and $E_b(L(ICP-SA))$= false.

8.4.4 Validation basée sur les primitives : approche floue $FBQ - E_f$

L'approche $FBQ - E_b$ est basée sur une réponse binaire de l'évaluation pour chaque primitive extraite. Nous pouvons faire évoluer cette métrique en utilisant des méthodes probabilistes ayant une réponse dans l'intervalle [0-1]. À cette fin, nous proposons une méthode d'évaluation floue $FBQ - E_f$. La validation de l'approche floue est alors effectuée grâce à la métrique $E_f(.)$ décrite dans l'équation suivante :

$$E_f(L_i) = E_b(L_i).F(L_i, LRef_i) \tag{8.12}$$

$$FBQ - E_f = \sum_{i=1}^{n} E_f(L_i) \text{ avec n = Nb. lampadaires identifiés} \tag{8.13}$$

avec F fonction floue définie dans]0,1] et exprimée dans l'équation 8.14.

$$F(L_i, LRef_i) = \varphi.\frac{(\sigma + \theta) - d(LRef_(i), L(i))}{(\sigma + \theta)} \tag{8.14}$$

avec d représentant la distance euclidienne.

Un « lampadaire » est représenté par 1 à 5 profils laser dans le nuage de points issu de Lara3D (cf. Figure 8.7). Nous remplaçons la fonction de sélection initialement sous forme binaire par une forme floue traduite par l'incertitude φ, ce passage de forme de fonction est illustré dans la figure 8.6. φ est exprimé dans l'équation 8.15.

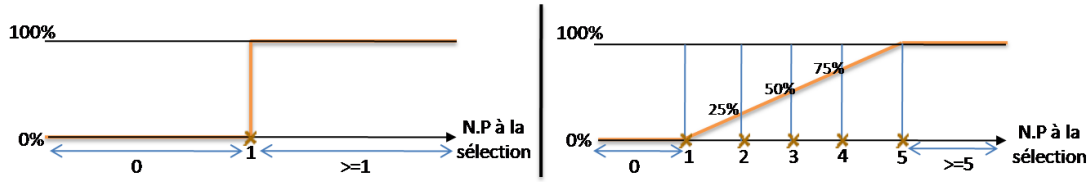


FIGURE 8.6 – (à gauche) Fonction de sélection binaire. (à droite) Fonction de sélection floue exprimée selon le nombre de profil (N.P) représentatif du lampadaire à la sélection.

$$\varphi = \begin{cases} 0 & \text{N.P à la sélection = 0 ou 1} \\ 0.25 & \text{N.P à la sélection = 2} \\ 0.5 & \text{N.P à la sélection = 3} \\ 0.75 & \text{N.P à la sélection = 4} \\ 1 & \text{N.P à la sélection = 5} \end{cases} \tag{8.15}$$

Une description de l'approche floue est représentée par l'algorithme 6 de l'annexe H.

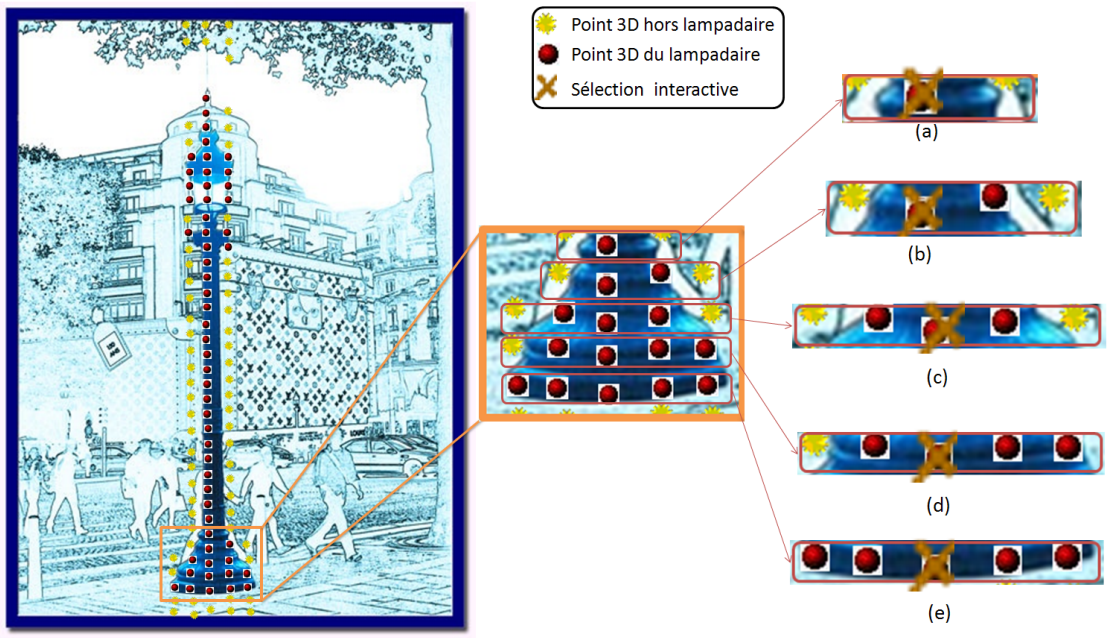


FIGURE 8.7 – Illustration de l'incertitude de la sélection du point représentant le « lampadaire ». **(a)** Cas d'une sélection sur base d'un seul profil : φ=0. **(b)** Cas d'une sélection sur base de deux profils : φ=0.25. **(c)** Cas d'une sélection sur base de trois profils : φ=0.5. **(d)** Cas d'une sélection sur base de quatre profils : φ=0.75. **(e)** Cas d'une sélection sur base de cinq profils : φ=1.

8.5 Résultats et discussions

Sur toute la zone traitée, 103 « lampadaires » ont été identifiés dans les nuages de points 3D traités sur 139 en vérité terrain. Ceci est dû au problème du bruit d'acquisition dans un environnement urbain dynamique (cf. section 4.3). Les valeurs requises pour l'initialisation de la méthode d'évaluation (binaire, floue) sont exprimées dans le tableau 8.1. θ est exprimée selon la connaissance *a priori* des modèles des « lampadaires » du 5ème arrondissement de Paris. μ a été établi d'après une campagne d'acquisition réalisée en collaboration avec *Mensi Trimble* (cf. Annexe F). σ_{inst} est fixé selon les caractéristiques du scanner utilisé. $\sigma_{reflect}$ n'est pas pris en considération dans notre cas en raison de l'hétérogénéité des conditions d'acquisition. $\sigma_{ref.sc}$ et $\sigma_{multi.ret}$ sont fixés par expérimentation. Pour la validation de notre approche sur les résultats de recalage, nous avons adopté trois jeux de variables avec des configurations tolérante, modérée ou exigeante.

Aspect	θ^2	μ^2	σ^2_{inst}	$\sigma^2_{reflect}$	$\sigma^2_{ref.sc}$	$\sigma^2_{multi.ret}$
A+	15	2.22	1.5	0	1.5	1.5
A	15	1	1	0	1	1
A-	15	0.23	0.5	0	0.5	0.5

TABLE 8.1 – Valeurs requises pour l'initialisation du traitement de la validation.

8.5.1 Évaluation binaire

$FBQ - E_b$ cas du recalage Lara3D/MNS sur toute la zone

Nous avons appliqué $FBQ - E_b$ sur les résultats des algorithmes opérant sur toute la zone traitée, à savoir ICP-SA et R-ICP (cf. chapitre 7). Le tableau 8.2 illustre le résultat du score de l'évaluation pour ces deux algorithmes. En termes de précision, nous obtenons une précision plus élevée pour R-ICP comparé à ICP-SA, cette supériorité est de (31%, 18% et 20%) respectivement aux configurations (A+,A et A-).

	ICP-SA			R-ICP		
Aspect	A+	A	A-	A+	A	A-
Nb.# $E_b(.)$ = true	48	43	37	80	61	57
Nb.# $E_b(.)$ = false	55	60	66	23	42	46
$FBQ - E_b$	46.6%	41.74%	35.59%	**77.66%**	59.22%	55.33%

TABLE 8.2 – Evaluation qualitative des résultats du recalage *relevés laser mobile sur MNS* en terme de précision. Comparaison des résultats des deux algorithmes ICP-SA et R-ICP sur toute la zone traitée.

$FBQ - E_b$ cas du recalage Lara3D/MNS sur la rue *Soufflot*

Dans l'objectif d'appliquer la méthode d'évaluation qualitative sur les trois algorithmes de recalage rigide proposés : ICP-SA, R-ICP et HPS-ICP (cf. chapitre 7), nous avons sélectionné la rue *Soufflot* comme tronçon de validation. Sur cette portion 25 lampadaires de référence ont été recensés sur 32 en vérité terrain. Le tableau 8.3 illustre le résultat du score de l'évaluation retourné par $FBQ - E_b$ pour les trois algorithmes. Les taux de succès sont nettement supérieurs du côté de R-ICP et HPS-ICP comparés à ceux de ICP-SA. Les scores de HPS-ICP et R-ICP sont proches avec un avantage pour R-ICP. Ceci correspond à (4%, 12% et 8%) respectivement aux configurations (A+, A et A-).

$E_b(.)$	ICP-SA			R-ICP			HPS-ICP		
Aspect	A+	A	A-	A+	A	A-	A+	A	A-
Nb.# $E_b(.)$ = true	16	12	8	21	20	18	20	17	16
Nb.# $E_b(.)$ = false	9	13	18	4	5	7	5	8	9
$FBQ - E_b$	64%	48%	32%	**84%**	80%	72%	80%	68%	64%

TABLE 8.3 – Évaluation qualitative des résultats du recalage *relevés laser mobile sur MNS* en terme de précision. Comparaison des résultats des deux algorithmes ICP-SA, R-ICP et HPS-ICP sur le recalage du tronçon rue *Soufflot* P2.

8.5.2 Évaluation floue

Nous avons appliqué l'évaluation floue $FBQ - E_f$ en utilisant la fonction de sélection floue basée sur l'opérateur φ déterminé d'une manière interactive (cf. figure 8.7). Nous avons aussi simulé quatre cas de sélection artificiels qui remplacent à chaque fois φ. Ces cas correspondent à une variation uniforme appliquée sur toute les positions sélectionnées (*all=0.25, all=0.5, all = 0.75, all = 1*). Ces quatre cas permettent d'évaluer les performances de l'approche de validation proposée dans des conditions particulières de sélection. Par exemple, le cas de *(all=1)* correspondra à la sélection d'un opérateur dans un cas de nuage de points très dense (représentation d'un « lampadaire » par plus de 5 profils).

Sélection floue sur toute la zone

Sur les 139 « lampadaires » de vérité terrain seulement 69 ont été pris en considération par la sélection floue. 36 « lampadaires » n'ont pas été retrouvés (comme le cas du binaire) et 34 correspondant à un représentativité par un seul profil (cf. Figure 8.7 (a)) ont été rejetés. Le tableau 8.4 illustre le détail de la sélection floue sur toute la zone.

Toute la zone						
Nb. lampadaires		Détail sélection φ				
Masquées	Considérées	$\varphi = 0$	$\varphi = 0.25$	$\varphi = 0.5$	$\varphi = 0.75$	$\varphi = 1$
36	103	34	21	34	11	3

TABLE 8.4 – Zone de Paris 5ème : valeurs obtenues par la sélection floue interactive.

$FBQ - E_f$ cas du recalage Lara3D/MNS sur toute la zone

Les résultats de comparaison artificielle entre R-ICP et ICP-SA ont montré des scores plus élevés pour le premier algorithme, ceci pour les trois configurations (A-, A et A+) et dans les quatre cas de sélection *(all=0.25, all=0.5, all=0.75 et all=1)*.

Concernant la comparaison guidée φ nous avons obtenu un score plus élevé moyenné autour de 20% pour R-ICP comparé à ICP-SA dans les configurations A+ et A. Par contre, avec une configuration plus stricte A-, nous obtenons un score plus élevé de 51%.

Les figures 8.8, 8.9 et 8.10 illustrent les résultats de l'évaluation floue sur toute la zone pour R-ICP et ICP-SA et relativement aux configurations (A-, A et A+).

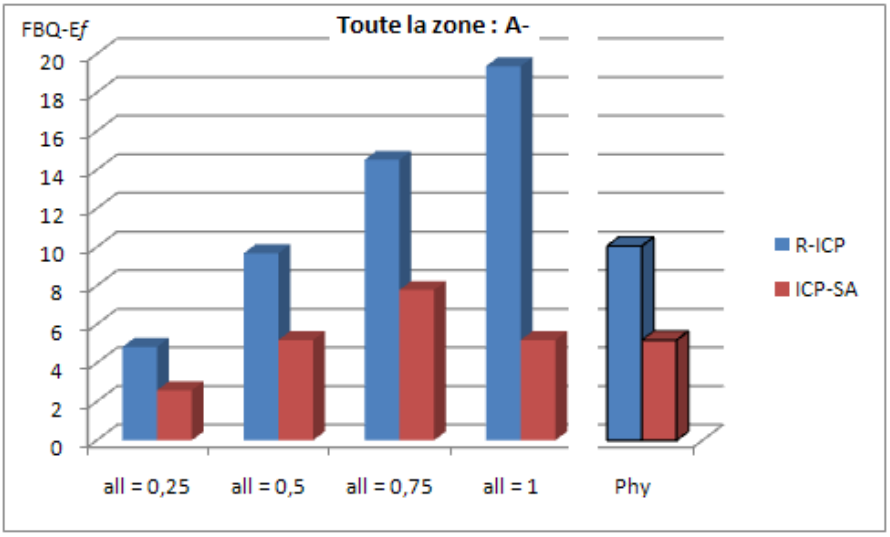


FIGURE 8.8 – Toute la zone d'acquisition. Score retourné par $FBQ - E_F$ pour les résultats de R-ICP et ICP-R. Cas de configuration A-.

Sélection floue sur la rue *Soufflot*

Sur les 32 « lampadaires » de vérité terrain, seulement 23 ont été considérés dans la sélection floue. 7 « lampadaires » sont non représentés dans le nuage de points 3D et 2

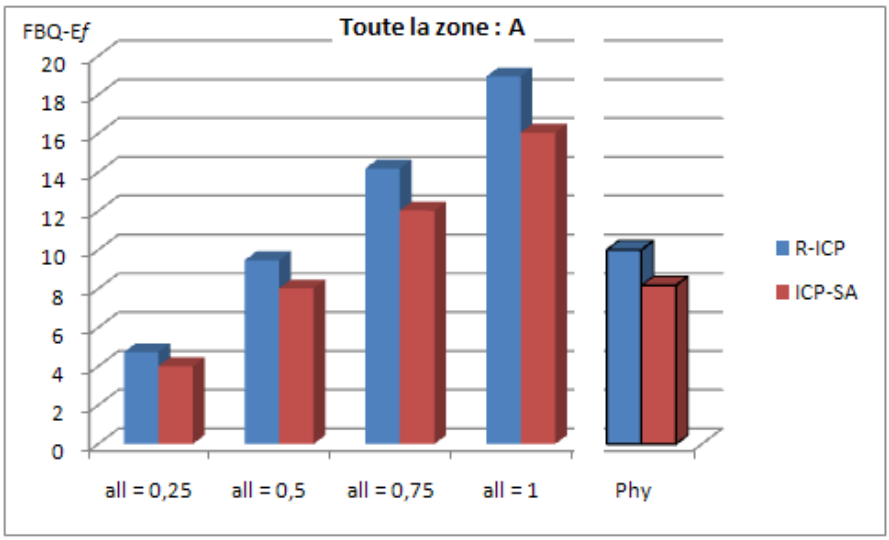


FIGURE 8.9 – Toute la zone. Score retourné par $FBQ - E_F$ pour les résultats de R-ICP et ICP-R. Cas de configuration A.

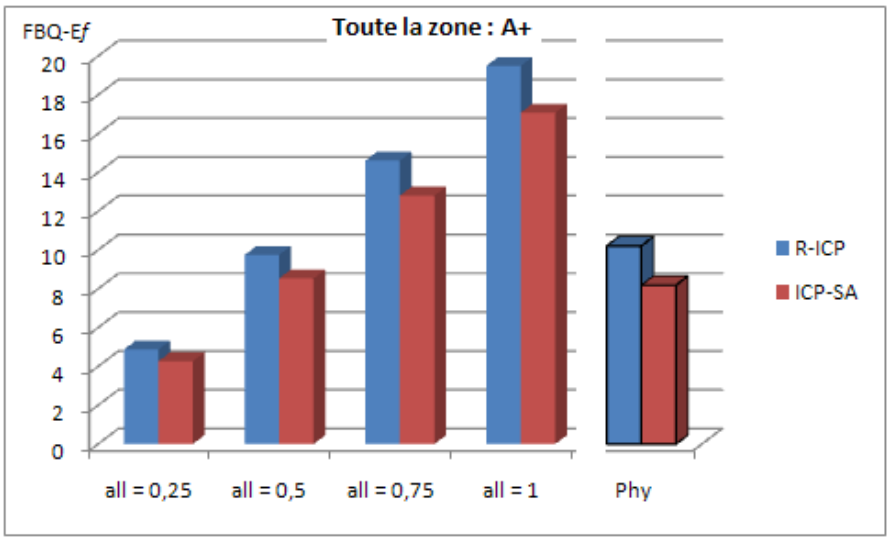


FIGURE 8.10 – Toute la zone. Score retourné par $FBQ - E_F$ pour les résultats de R-ICP et ICP-R. Cas de configuration A+.

représentés par un seul profil. Le tableau 8.5 expose la distribution de la sélection floue interactive.

Rue *Soufflot*						
Nb. lampadaires		Détail sélection φ				
Masquées	Considérées	$\varphi = 0$	$\varphi = 0.25$	$\varphi = 0.5$	$\varphi = 0.75$	$\varphi = 1$
7	25	2	7	11	5	1

TABLE 8.5 – Rue *Soufflot* : valeurs obtenues par la sélection floue interactive.

$FBQ - E_f$ cas du recalage *Lara3D*/MNS sur la rue *Soufflot*

La comparaison des configurations artificielles *(all =0.5, all=0.5, all=0.75, all=1)* montre une large supériorité en terme de score du couple R-ICP et HPS-ICP comparé à ICP-SA, sur la dominance des cas (A, A-, A+) croisés avec les quatre cas de configurations artificiels la différence de score est supérieure à 60%.

Pour la sélection φ, nous obtenons des scores relativement élevés pour R-ICP et HPS-ICP comparé à ICP-SA. La comparaison entre R-ICP et HPS-ICP montre une supériorité de R-ICP avec (16%,20%, et 21%) relativement aux configurations (A-, A, A+).

Les figures 8.11, 8.12 et 8.13 exposent les scores de $FBQ{-}E_F$ relatifs aux configurations (A-, A et A+) pour le recalage sur la rue *Soufflot* par R-ICP, HPS-ICP et ICP-SA.

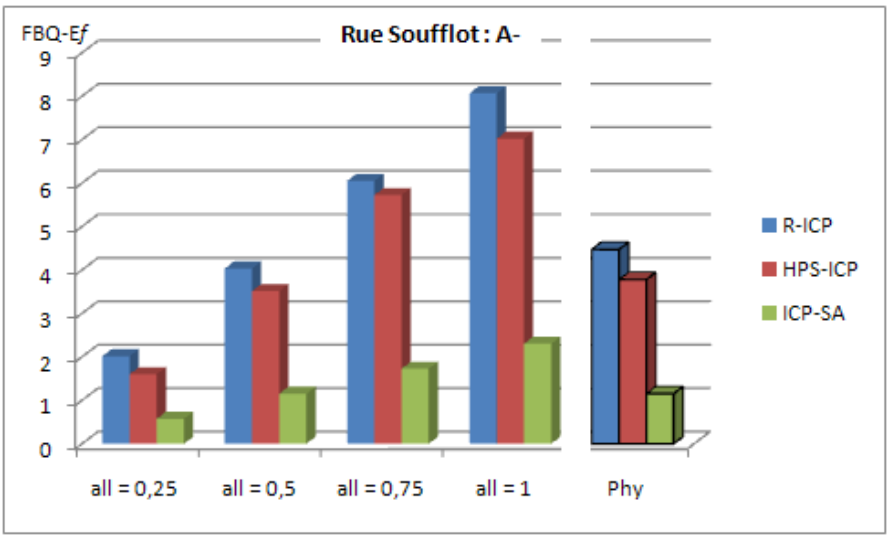


FIGURE 8.11 – Rue *Soufflot*. Score retourné par $FBQ - E_F$ pour les résultats de R-ICP, HPS-ICP et ICP-SA. Cas de configuration A-.

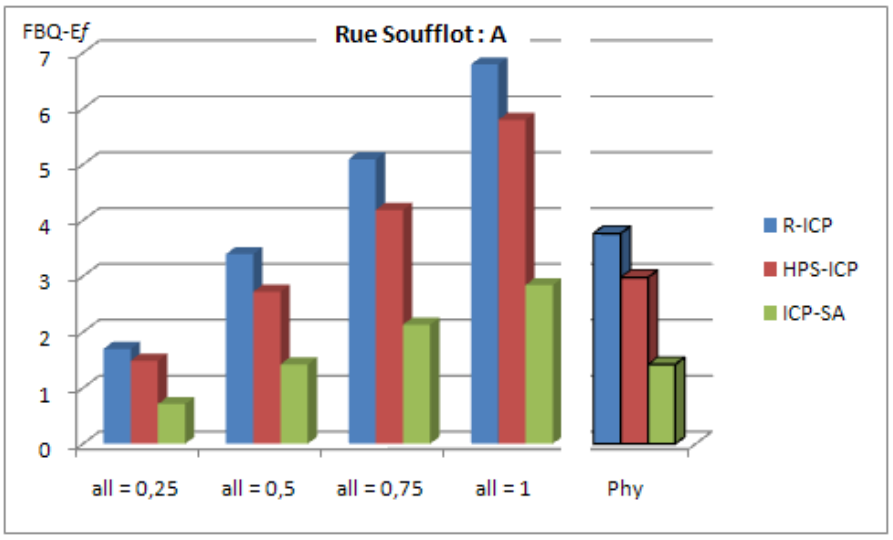


FIGURE 8.12 – Rue *Soufflot*. Score retourné par $FBQ - E_F$ pour les résultats de R-ICP, HPS-ICP et ICP-SA. Cas de configuration A.

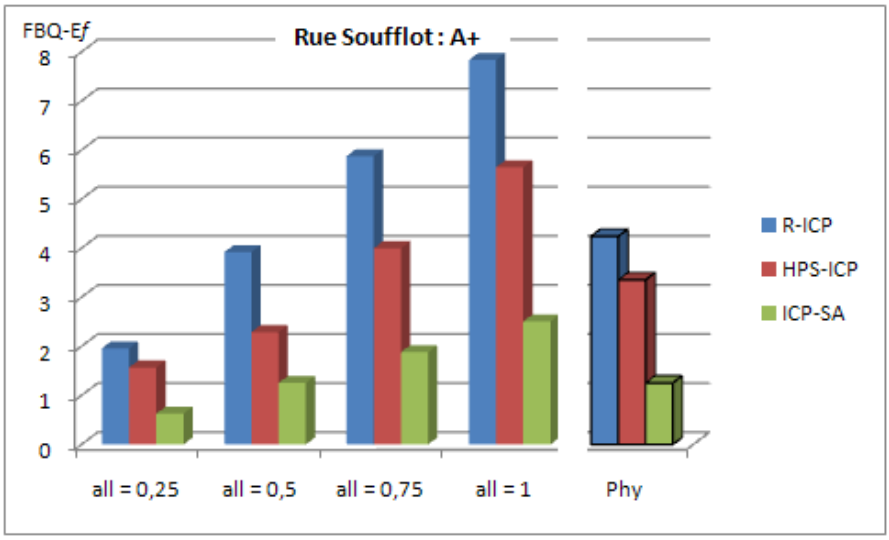


FIGURE 8.13 – Rue *Soufflot*. Score retourné par $FBQ - E_F$ pour les résultats de R-ICP, HPS-ICP et ICP-SA. Cas de configuration A+.

8.5.3 Discussion

La validation binaire $FBQ - E_b$ nous a permis de distinguer largement la supériorité des algorithmes R-ICP et HPS-ICP par rapport à ICP-SA. Le score retourné sur la rue *Soufflot* de HPS-ICP est proche de celui de R-ICP mais avec un avantage pour ce dernier d'une moyenne de 8%.

L'utilisation de la validation floue $FBQ - E_f$ a confirmé les performances du couple R-ICP et HPS-ICP par rapport à ICP-SA. La supériorité en terme de score de R-ICP comparé à HPS-ICP est plus accentuée et plus claire avec la métrique floue, passant d'une moyenne de 8% pour le cas binaire à 19% pour le cas flou. Ceci est dû à l'utilisation des plan horizontaux bruités dans les MNS pour réaliser le recalage HPS-ICP, ce qui provoque des anomalies dans le recalage final. L'utilisation d'une initialisation par RANSAC est plus adaptée dans notre cas.

La comparaison entre les trois algorithmes est réalisée pour l'instant sur une zone contenant 32 « lampadaires » de vérité terrain. L'extension de cette comparaison sur toute la zone incluant 139 « lampadaires » sera très intéressante pour confirmer la supériorité de R-ICP par rapport à HPS-ICP.

8.6 Limites de l'évaluation proposée

8.6.1 Extraction interactive

L'évaluation, qu'elle soit binaire ou floue, repose sur une tâche de sélection de primitives réalisée de manière interactive. Cette tâche peut être fastidieuse dans les cas de nuages de points complexes et nécessite un temps de traitement conséquent. Une amélioration de cette contrainte pourrait être obtenue par l'utilisation de méthode automatique d'extraction de « lampadaires ». Des méthodes d'extraction automatique développées dans le cadre de la thèse de Hernandez (Hernandez, 2009) correspondent à ce type d'amélioration.

8.6.2 Cas du décalage vertical

Une des limites principales de la méthode proposée résulte du fait que nous utilisons des données de référence 2D pour l'évaluation de modèle 3D. Ceci est contraignant dans le cas de comparaison de deux résultats de recalage différenciés par un décalage vertical (axe des Z). Dans ce cas de figure, le score retourné par l'approche binaire ou floue est un score d'égalité entre les deux méthodes de recalage alors qu'il existe une différence. La figure 8.14 illustre la limite décrite.

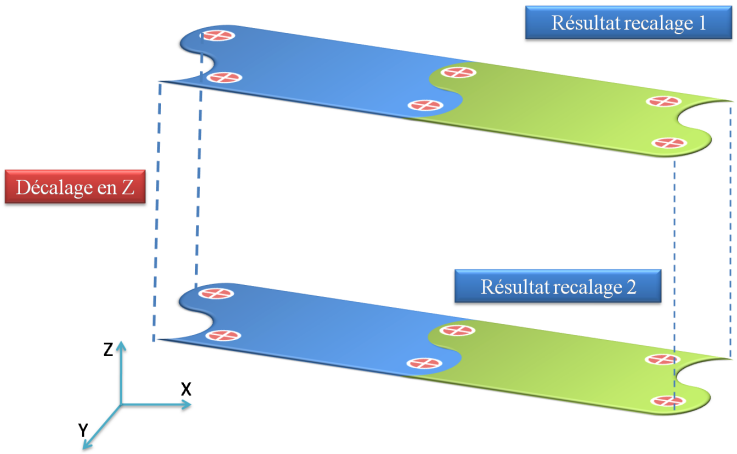


FIGURE 8.14 – Limite principale de la méthode $FBQ - E_{.}$. Dans ce cas de figure, $FBQ - E_{.}$ retourne le même score d'évaluation des deux résultats de recalage malgré le décalage visible en Z.

La solution générale à ce problème consiste en l'utilisation d'un modèle de référence 3D. Toutefois, dans notre cas une autre issue peut être adoptée selon les conditions suivantes :

- Enrichissement du modèle de référence par des valeurs en Z des positions des « lampadaires » dans la zone traitée (détermination des positions par GPS PPK) ;
- Ajout d'une condition de validation pour l'extraction des bases des « lampadaires » ;
- Utilisation de la distance euclidienne en 3D dans les équations 8.3 et 8.13.

8.7 Conclusion

Nous avons proposé dans ce chapitre une nouvelle méthode de validation de techniques de recalage 3D. Deux extensions ont été exposées : binaire et floue. Il s'agit de méthodes d'évaluation semi-automatique. L'utilisation d'autres primitives différentes des « lampadaires » n'est pas contraignante pour les méthodes proposées.

Nous avons appliqué ces méthodes de validations sur les résultats des algorithmes de recalage rigide proposés dans le chapitre 6, l'objectif étant l'évaluation qualitative et la comparaison entre les différents algorithmes. Nous avons obtenu des scores élevés pour notre approche R-ICP comparés à ICP-SA et HPS-ICP, ce qui a démontré la supériorité de cette méthode par rapport aux deux autres dans notre cas d'application.

L'application de ces approches sur d'autres données ayant des caractéristiques différentes est requise pour vérifier la généricité. Le recalage non rigide peut à son tour être évalué par ces méthodes, le but étant de comparer plusieurs variantes développées.

Chapitre 9

Conclusions et Perspectives

9.1 Conclusions

Nous avons présenté dans cette thèse nos travaux se rapportant à la production de cartographie numérique 3D. La méthode que nous avons adoptée est celle basée sur l'intégration de données hétérogènes 3D. L'ensemble de données traitées est constitué de MNS produit par corrélation et des relevés avec laser mobile et fixe. Cette approche est confrontée à des problèmes d'incohérence dans les données fusionnées. Nous nous sommes focalisés dans une première partie sur l'identification des erreurs des Systèmes de Cartographie Mobile (MMS). Ceci a été réalisé par un travail expérimental sur la plate-forme *Lara3D* traitant des deux composantes principales des MMS : géo-référencement et génération de la 3D.

En ce qui concerne le géo-référencement direct des données, nous avons présenté une étude de fusion de données pour la trajectographie basée sur le filtrage de Kalman, ce qui a contribué au choix optimal d'un filtrage EKF intégrant les données issues de Centrale Inertielle, GPS et Odomètre.

Par ailleurs, pour résoudre les anomalies affectant la génération des données 3D, nous avons effectué plusieurs configurations matérielles de calibration de télémètres laser. Quatre types de télémètres ont été testés. Ceci a contribué au choix d'une configuration optimale de disposition de ces capteurs.

Cette première partie fortement applicative, nous a permis de converger vers une démarche innovante de correction de relevés laser terrestres en nous basant sur des données externes au système d'acquisition.

Dans la seconde partie, nous avons élaboré une démarche innovante de correction de relevés laser terrestres par l'utilisation de données externes. Ceci a été à l'origine de plusieurs réalisations et contributions.

Nous avons proposé trois méthodes de recalage rigide de la famille ICP pour le traitement de cas de déformations rencontrées. Ces algorithmes ont été testés et affinés par un traitement sur des données hétérogènes sur deux zones de test. Ces tests ont été précédés par un travail de planification des traitements de recalage sous la forme

de scénarios. Nous avons exposé également une étude d'évaluation quantitative des performances des algorithmes en terme de convergence. La taille des données traitées étant importante (*6 millions de points*), un travail d'accélération des implémentations algorithmiques a été mené. Nous avons obtenu un facteur d'accélération de 32 fois, ce qui nous a permis de traiter la zone principale de test à *Paris 5ème* en *3min*.

Cette étude a permis la validation de l'approche de correction proposée : correction de relevés laser terrestres sur base de données externes. Sur le plan pratique, nous avons fait une étude de coût d'un traitement de correction de ce type, et nous proposons une solution basée sur la location de données externes (MNS).

Nous nous sommes intéressés finalement à une problématique de recherche ouverte dans le domaine de la 3D : l'évaluation des résultats du recalage 3D. Sur cet aspect une nouvelle méthode d'évaluation ayant deux variantes a été proposée : binaire et floue. Cette méthode consiste en la comparaison qualitative entre les primitives géométriques issues de données de référence 2D et des données 3D résultantes du recalage. Il s'agit d'une méthode d'évaluation multimodale, que nous avons testée et validée pour la comparaison en précision et en performance des trois variantes de recalage rigide proposées. Un travail d'analyse des différentes configurations des paramètres de cette méthode a été détaillé.

9.2 Améliorations

L'étude de trajectographie présentée dans la première partie peut être complétée par l'implémentation d'un filtre de Kalman UKF, présenté par Julier dans (Julier and Uhlmann, 1996, 1997). Par la suite, les résultats du géo-référencement direct issus de l'UKF peuvent être comparés à ceux obtenus avec l'EKF (retenu dans le cadre de notre étude).

Les algorithmes de recalage proposés peuvent être testés sur d'autres types de données. Dans un premier temps, ceci peut être réalisé sur des données issues du MMS *Stéréopolis V2* de l'IGN ayant des relevés laser mobiles de résolution supérieure à ceux obtenus par *Lara3D*. Par la suite, nous pouvons réaliser un travail complémentaire de test sur des données de nature différentes, relevant du domaine médical par exemple.

Les approches de recalage présentées ne traitent q'un couple de nuages de points à la fois. Une extension pour le traitement de multi-vues peut être envisagée. Les travaux présentés par Blais et al. dans (Blais et al., 1995) peuvent être une piste d'appui.

Le traitement des données couleur a été développé, mais les tests ont été insatisfaisants pour des raisons liées essentiellement aux données traitées. Effectuer le test sur des données couleur de haute résolution, peut être une piste à creuser dans des travaux futurs. Ceci contribuera à la quantification de l'apport de la primitive couleur dans le traitement de recalage. Dans cette même lignée, l'information de luminance retournée par le laser peut aussi être intégrée pour effectuer le recalage ; le travail de Weik dans (Weik, 1997) pourrait être une base d'inspiration future. Ces mêmes primitives peuvent être exploitées en tant que critères de filtrage et non pas directement dans l'équation de

distance.

La méthode d'évaluation testée utilise des données multimodales (2D-3D), ce qui présente des limitations dans certains cas. Afin de pallier à cette limitation, l'utilisation d'un modèle de référence 3D serait une solution. Une étape principale de cette méthode étant basée sur la sélection de primitives géométriques, nous avons présenté un traitement interactif pouvant être remplacé par un traitement automatique, tel que présenté dans le cadre de la thèse de Hernandez (Hernandez, 2009).

9.3 Perspectives

Nous avons recensé des cas de déformations nécessitant une correction non rigide (cf. Figure D.1). L'élaboration d'algorithmes de recalage non rigide serait la première perspective à ce travail. Une première approche consisterait à la correction de la trajectoire du véhicule en effectuant un recalage non rigide par rapport à une trajectoire de référence (*BD TOPO®*, trajectoire construite par GPS PPK ...). Des méthodes basées sur les *Splines* (cf. section 5.4) correspondront à la réalisation de ces types de traitement.

L'objectif initial de notre étude est la génération d'une cartographie 3D réaliste à partir de données hétérogènes. Une seconde perspective de ce travail correspond à la réalisation du traitement de la fusion de données hétérogènes (cf. Figure 2.33). Des méthodes de fusion floue et possibiliste introduites par Dubois et Prade dans (Dubois and Prade, 1991; Dubois et al., 1991) pourront être appliquées dans le contexte de données hétérogènes traitées.

L'une des nouvelles méthodes les plus originales de reconstruction 3D est celle présentée par Furukawa et al. dans (Furukawa et al., 2010). Elle est basée sur la collecte d'images 2D publiques (multi-caractéristiques) à partir de la toile du web et sur la réalisation de la reconstruction 3D par des techniques de stéréoscopie. Nous espérons, dans un futur proche, avoir un partage de l'information 3D sur le web : dans ce cas, cette idée pourra être étendue à la génération de cartographie 3D à partir de techniques de recalage et de fusion hétérogènes. Ceci profitera, en plus, à la génération de cartographies 4D qui prennent en compte les différentes versions des modèles avec une dimension temporelle.

Liste des publications

Journaux à comité de lecture

1. T. Ridene and F. Goulette. *Coregistration of DSM and 3D point clouds acquired by a mobile mapping system*. Geodetic sciences bulletin - Special Issue on Mobile Mapping Technology, 15(5) :824-838, 2009d.
2. T. Ridene and F. Goulette. *Recalage de relevés laser fixes et mobiles sur MNS pour la cartographie numérique 3D*. Revue Française de photogrammétrie et de télédétection, Jan. 2009a.

Conférences avec actes

1. T. Ridene and A. Manzanera. *Mécanismes d'attention visuelle sur rétine artificielle*. TAIMA'07., Hammamet, May. 2007.
2. T. Ridene and F. Goulette. *Recalage hétérogène de données 3D d'environnements urbains*. MajecSTIC'08 (IEEE France), Oct. 2008.
3. T. Ridene and F. Goulette. *Recalage de relevés laser fixes et mobiles sur MNS pour cartographie numérique 3D*. Colloque Techniques Laser Pour l'Etude des Environnements Naturels et Urbains, Jan. 2009.
4. T. Ridene and F. Nashashibi. *Localisation précise d'un système de cartographie mobile pour la numérisation 3D d'environnement Urbain*. ATEC-ITS, Feb. 2009.
5. T. Ridene and F. Goulette. *Registration together and to DSM of several 3D point clouds issued from a Mobile Mapping System*. Mobile Mapping Technologies, jul. 2009b.
6. T. Ridene and F. Goulette. *Registration of fixed-and-mobile- based terrestrial laser data sets with DSM*. pages 375-380, dec. 2009c. doi : 10.1109/CIRA.2009.5423176.
7. T. Ridene and F. Goulette. *Feature-based quality evaluation of 3D heterogeneous data registration*. In Proceedings of SPIE, volume 7526, page 75260Z, 2010.
8. T. Ridene and F. Goulette. *Usage de la cartographie 3D pour l'urbanisme et le service de proximité -exemple d'application au diagnostic d'accessibilité-*. GéoTunis2010, dec, 2010.

Bibliographie

I. Abuhadrous. *Système embarqué temps réel de localisation et de modélisation 3D par fusion multi-capteur*. PhD thesis, Centre de Robotique, Mines de Paris, 2005.

F. Ackermann. Airborne laser scanning-present status and future expectations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2-3) :64–67, 1999.

D. Akca. *Least Squares 3D surface matching*. PhD thesis, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidgenössische Technische Hochschule, 2007.

A. Almhdie, C. Léger, M. Deriche, and R. Lédée. 3D registration using a new implementation of the ICP algorithm based on a comprehensive lookup matrix : Application to medical imaging. *Pattern Recognition Letters*, 28(12) :1523–1533, 2007.

M. Alshawa. *Contribution to mobile mapping : developpement and caracterisation of a terrestrial laser scanner based system. Contribution à la cartographie mobile : développement et caractérisation d'un système basé sur un scanner laser terrestre*. PhD thesis, Université de Strasbourg, 2009.

F.T. Andriamanampisoa. *Recalage multimodal 3D utilisant le modèle élastique, la méthode des éléments finis et l'information mutuelle dans un environnement parallèle*. PhD thesis, Université Toulouse III, Paul Sabatier, 2008.

J.D.G. Arteaga and J. Kybic. Automatic landmark detection for cervical image registration validation. In *Proceedings of SPIE*, volume 6514, page 65142S, 2007.

F. Artes and L. Nastro. Applanix POS LV 200 Generating continuous positioning accuracy in the absence of GPS reception. *Applanix Corporation*, august 2005.

K. S. Arun, T. S. Huang, and S. D. Blostein. Least-squares fitting of two 3-d point sets. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 9(5) :698–700, 1987. ISSN 0162-8828. doi : http://dx.doi.org/10.1109/TPAMI.1987.4767965.

N. Ayache, A.P. Gueziec, J.P. Thirion, A. Gourdon, and J. Knoplioch. Evaluating 3D registration of CT-scan images using crest lines. In *Proceedings of SPIE*, volume 2035, page 60, 1993.

K.H. Bae and D.D. Lichti. A method for automated registration of unorganised point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(1) :36–54, 2008.

R. Bajcsy and S. Kovacic. Multiresolution elastic matching*. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 46(1) :1–21, 1989.

E.P. Baltsavias. Airborne laser scanning : basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2) :199, 1999a.

E.P. Baltsavias. A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2-3) :83–94, 1999b.

G. Barbu. Gnss appliqué au domaine ferroviaire. In *Les journées des applications spatiles de toulouse Conf.*, Toulouse, France, décembre 2006.

A. Bargeton. *Fusion multi sources pour l'interprétation de l'environnement routier*. PhD thesis, Centre de Robotique, Mines de Paris, 2009.

J. Bauer, K. Karner, K. Schindler, A. Klaus, and C. Zach. Segmentation of building models from dense 3D point-clouds. In *Proc. 27th Workshop of the Austrian Association for Pattern Recognition*, pages 253–258. Citeseer, 2003.

J. Baus, K. Cheverst, and C. Kray. A survey of map-based mobile guides. *Map-based Mobile Services*, pages 193–209, 2005.

W. Benning and T. Aussems. Mobile mapping by a car driven survey system (CDSS). *Proceedings of the Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering. H. Kahmen, E. Brückl and T. Wunderlich, eds. International Association of Geodesy (IAG). April*, pages 20–22, 1998.

J.L. Bentley. Multidimensional binary search trees used for associative searching. *Communications of the ACM*, 18(9) :517, 1975.

O. Bentrah. *Reconstruction de la géométrie d'acquisition de séquence d'images acquises par un véhicule en milieu urbain*. PhD thesis, IGN, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006.

R. Bergevin, M. Soucy, H. Gagnon, and D. Laurendeau. Towards a general multi-view registration technique. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 18(5) :540–547, 1996.

P.J. Besl and H.D. McKay. A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 14(2) :239–256, 1992.

G. Blais, M.D. Levine, et al. Registering multiview range data to create 3D computer objects. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 17(8) :820–824, 1995.

W. Boehler, M. Bordas Vicent, and A. Marbs. Investigating laser scanner accuracy. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(Part 5) :696–701, 2003.

H. Boulaassal, T. Landes, P. Grussenmeyer, and F. Tarsha-Kurdi. Automatic segmentation of building facades using terrestrial laser data. In *Proceedings of the ISPRS Workshop 'Laser Scanning and SilviLaser'*, pages 65–70, Espoo, Finland, 2007.

C. Brenner, C. Dold, and N. Ripperda. Coarse orientation of terrestrial laser scans in urban environments. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(1) :4–18, 2008.

F. Bretar. *Couplage de Données Laser Aéroporté et Photogrammétriques pour l'Analyse de Scènes Tridimensionnelles*. PhD thesis, IGN, École Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris, 2006.

F. Bretar and M. Roux. Hybrid image segmentation using lidar 3D planar primitives. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(Part 3), 2005.

L.G. Brown. A survey of image registration techniques. *ACM computing surveys (CSUR)*, 24(4) :376, 1992.

X. Brun. *Numérisation et Modélisation 3D d'environnements routiers*. PhD thesis, Centre de Robotique, Mines de Paris, 2007.

X. Brun and F. Goulette. Modeling and Calibration of Coupled Fish-Eye CCD Camera and Laser Range Scanner for Outdoor Environment Reconstruction. In *6th International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM 2007).*, Montréal, Canada, August 2007.

X. Brun, F. Goulette, P. Charbonnier, C. Bertocini, and S. Blaes. Modélisation 3d de routes par télémètrie laser embarquée pour la mesure de distance de visibilité. 2006.

P. Campagne. Etat et tendances du marché des applications de positionnement. In *Les journées des applications spatiles de toulouse Conf.*, Toulouse, France, décembre 2006.

R.J. Campbell and P.J. Flynn. A survey of free-form object representation and recognition techniques. *Computer Vision and Image Understanding*, 81(2) :166–210, 2001.

C.S. Chen, Y.P. Hung, and J.B. Cheng. RANSAC-based DARCES : A new approach to fast automatic registration of partially overlapping range images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 21(11) :1229–1234, 1999.

G. Chen, J. Kua, S. Shum, N. Naikal, M. Carlberg, and A. Zakhor. Indoor Localization Algorithms for a Human-Operated Backpack System. *3D Data Processing, Visualization and Transmission*, 2010.

H. Chen, M.K. Arora, and P.K. Varshney. Mutual information-based image registration for remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 24(18) :3701, 2003.

T. Chen and R. Shibasaki. Development of a Vision-Based Positioning System for High Density Urban Areas. In *Asian Conference on Remote Sensing*, 1999.

Y. Chen and G. Medioni. Object modeling by registration of multiple range images. 10 : 145–155, 1992.

C.S. Chua and R. Jarvis. 3D free-form surface registration and object recognition. *International journal of computer vision*, 17(1) :77–99, 1996.

CITTA. Commission interministérielle de terminologie de la télédétection aérospatiale. *Journal officiel*, septembre 1988.

W.J. Clinton. Statement by the President Regarding the United States Decision to Stop Degrading Global Positioning System Accuracy. *Office the the Press Secretary, The White House*, may 2000.

A.A. Cole-Rhodes, K.L. Johnson, J. LeMoigne, and I. Zavorin. Multiresolution registration of remote sensing imagery by optimization of mutual information using a stochastic gradient. *IEEE transactions on image processing*, 12(12) :1495–1511, 2003.

G. Dalley and P. Flynn. Pair-wise range image registration : a study in outlier classification. *Computer Vision and Image Understanding*, 87(1) :104–115, 2002.

A.J. Davison, I.D. Reid, N.D. Molton, and O. Stasse. MonoSLAM : Real-time single camera SLAM. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 29(6) : 1052, 2007.

F. de Blomac. *ARC/INFO : concepts et applications en géomatique*. Hermès, 1994.

J.E. Deschaud and F. Goulette. A Fast and Accurate Plane Detection Algorithm for Large Noisy Point Clouds Using Filtered Normals and Voxel Growing. *3D Data Processing, Visualization and Transmission*, 2010.

P. Dias, V. Sequeira, J.G.M. Convolves, and F. Vaz. Combining intensity and range images for 3d architectural modelling. In *Virtual and augmented architecture (VAA'01) : proceedings of the International Symposium on Virtual and Augmented Architecture (VAA'01)*, page 139. Springer Verlag, 2001.

L. Douadi, M.J. Aldon, and A. Crosnier. Pair-wise Registration of 3D/Color data sets with ICP. In *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 663–668, 2006.

D. Dubois and H. Prade. Fuzzy sets in approximate reasoning, part 1 : inference with possibility distributions. *Fuzzy sets and systems*, 40(1) :143–202, 1991.

D. Dubois, J. Lang, and H. Prade. Fuzzy sets in approximate reasoning, part 2 : logical approaches. *Fuzzy Sets and Systems*, 40(1) :203–244, 1991.

J. Duchon. Interpolation des fonctions de deux variables suivant le principle de la flexion des plaques minces. *MathSciNet| View Record in Scopus| Cited By in Scopus (110)*, pages 5–12, 1976.

A. Edgard. Les systèmes d'aides à l'exploitation et d'information voyageurs de 3eme génération. In *Les journées des applications spatiles de toulouse Conf.*, Toulouse, France, décembre 2006.

A. Edie, J. Sing, and B. Kang. Registration and Integration of Textured 3-D Data. *Image and Vision Computing*, 17(2) :135–147, 1999.

D.W. Eggert, A. Lorusso, and R.B. Fisher. Estimating 3-D rigid body transformations : a comparison of four major algorithms. *Machine Vision and Applications*, 9(5) :272–290, 1997.

M. Ehlers and D.N. Fogel. High-precision geometric correction of airborne remote sensing revisited : the multiquadric interpolation. In *Proceedings of SPIE*, volume 2315, page 814, 1994.

S.F. El-Hakim and P. Boulanger. Mobile system for indoor 3-D mapping and creating virtual environments, 1999. US Patent 6,009,359.

A. El-Rabbany. *Introduction to GPS : the global positioning system*. Artech House Publishers, 2002.

C. Ellum and N. El-Sheimy. Land-based mobile mapping systems. *PE and RS- Photogrammetric Engineering and Remote Sensing(0099-1112)*, 68(1) :13–17, 2002.

H. Erives and G.J. Fitzgerald. Automated registration of hyperspectral images for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 47(2) :103–119, 2005.

H. Erives, G.J. Fitzgerald, and T.R. Clarke. Non-rigid registration of hyperspectral imagery for analysis of agronomic scenes. *Biosystems Engineering*, 98(3) :267–275, 2007.

N. Fairfield, D. Wettergreen, and G. Kantor. Segmented SLAM in three-dimensional environments. *Journal of Field Robotics*, 2009.

O.D. Faugeras and M. Hebert. The representation, recognition, and locating of 3-d objects. *International Journal of Robotics Research*, 5(3) :27–52, 1986. ISSN 0278-3649. doi : http://dx.doi.org/10.1177/027836498600500302.

M. Fiocco, G. Bostrom, J. Gonçalves, and V. Sequeira. Multisensor fusion for volumetric reconstruction of large outdoor areas. In *Proceedings of the Fifth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pages 47–54. IEEE Computer Society Washington, DC, USA, 2005.

M.A. Fischler and R.C. Bolles. Random sample consensus : A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. 1981.

A.W. Fitzgibbon. Robust registration of 2D and 3D point sets. *Image and Vision Computing*, 21(13-14) :1145–1153, 2003.

J.M. Fitzpatrick, J.B. West, and C.R. Maurer Jr. Predicting error in rigid-body point-based registration. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 17(5) :694–702, 1998.

J. Flusser. An adaptive method for image registration. *Pattern Recognition*, 25(1) :45–54, 1992.

J. Flusser. Object matching by means of matching likelihood coefficients. *Pattern Recognition Letters*, 16(9) :893–900, 1995.

L.M.G. Fonseca and B.S. Manjunath. Registration techniques for multisensor remotely sensed imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9) :1049–1056, 1996.

M. Fornefett, K. Rohr, and H.S. Stiehl. Radial basis functions with compact support for elastic registration of medical images. *Image and Vision Computing*, 19(1) :87–96, 2001.

C. Früh and A. Zakhor. Constructing 3D city models by merging ground-based and airborne views. *Computer Vision and Pattern Recognition, 2003. Proceedings. 2003 IEEE Computer Society Conference on*, 2, 2003(b).

C. Früh and A. Zakhor. An Automated Method for Large-Scale, Ground-Based City Model Acquisition. *International Journal of Computer Vision*, 60(1) :5–24, 2004.

C. Früh, S. Jain, and A. Zakhor. Data processing algorithms for generating textured 3D building facade meshes from laser scans and camera images. *International Journal of Computer Vision*, 61(2) :159–184, 2005.

Y. Furukawa, B. Curless, S.M. Seitz, and R. Szeliski. Towards Internet-scale Multi-view Stereo. *CVPR*, 1 :I2, 2010.

J. Gee, D. Haynor, L. Le Briquer, and R. Bajcsy. Advances in elastic matching theory and its implementation. In *CVRMed-MRCAS'97*, pages 63–72. Springer, 1997.

B.K. Ghaffary and A.A. Sawchuk. A survey of new techniques for image registration and mapping. *Applications of digital image processing VI*, pages 222–239, 1983.

D. Girardeau-Montaut. *Détection de changement sur des données géométriques tridimensionnelles*. PhD thesis, TSI/TII, ENST, 2006.

H. Gontran, J. Skaloud, and PY Gilliéron. Photobus : Towards Real-time Mobile Mapping. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istanbul*, 35(Part B), 2004.

F. Goulette and C. Laurgeau. Capteur et numérisation 3D, Images de Profondeur. *Hermès*, 318, 2002.

F. Goulette, F. Nashashibi, I. Abuhadrous, S. Ammoun, and C. Laurgeau. An Integrated On-board Laser Range Sensing System for On-the-way City and Road Modelling. In *Proceedings of the ISPRS Commission I Symposium, From Sensors to Imagery, Paris*, pages 3–5, 2006.

G. Grafe. Quality management in kinematic laser scanning applications. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5-C55) :6, 2007.

D.A. Grejner-Brzezinska. Positioning Accuracy of the GPSVanTM. *Proceedings of 52nd Annual ION Meeting*, pages 19–21, 1996.

D.A. Grejner-Brzezinska, C.K. Toth, and S. Moafipoor. Performance Assessment of a Multi-Sensor Personal Navigator Supported by an Adaptive Knowledge Based System. *ISPRS Archives, XXXVII (B5)*, pages 857–867, 2008.

M.S. Grewal and A.P. Andrews. *Kalman filtering : theory and practice using MATLAB*. Wiley New York, 2001.

A. Gruen and D. Akca. Least squares 3D surface and curve matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59(3) :151–174, 2005.

H. Guangping. Design and Application of the GPSVision Mobile Mapping System. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(2) :163–168, 2002.

J. Guehring. Reliable 3D surface acquisition, registration and validation using statistical error models. In *Proc. 3DIM*. Citeseer, 2001.

R. Hartley and A. Zisserman. *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge university press, 2003.

M. Hebert and E. Krotkov. 3D measurements from imaging laser radars : how good are they ? *Image and Vision Computing*, 10(3) :170–178, 1992.

J. Hernandez. *Analyse morphologique d'images pour la modélisation d'environnements urbains*. PhD thesis, Centre de Morphologie Mathématique, Mines de Paris, 2009.

B.K.P. Horn. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. *Journal of the Optical Society of America A*, 4(4) :629–642, 1987.

B.K.P. Horn, H.M. Hilden, and S. Negahdaripour. Closed-form solution of absolute orientation using orthonormal matrices. *Journal of the Optical Society of America A*, 5 (7) :1127–1135, 1988.

A. Huertas, R. Nevatia, and D. Landgrebe. Use of hyperspectral data with intensity images for automatic building modeling. In *Proc. Second International Conference on Information Fusion*, pages 680–687, 1999.

I. Jebbari, T. Ridene, A. Manzanera, and F. Goulette. Initialisation du recalage de données hétérogènes 3D par segmentation et mise en correspondance de plans horizontaux. Master's thesis, ISTI d'Angers, Mines de Paris, 2009.

A.E. Johnson and M. Hebert. Using spin images for efficient object recognition in cluttered 3D scenes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 21 (5) :433–449, 1999.

A.E. Johnson and S.B. Kang. Registration and integration of textured 3-D data. In *3dim*, page 234. Published by the IEEE Computer Society, 1997.

O. Jokinen and H. Haggrén. Statistical analysis of two 3-D registration and modeling strategies. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53(6) :320–341, 1998.

S. Julier and J.K. Uhlmann. A general method for approximating nonlinear transformations of probability distributions. *Dept. of Engineering Science, University of Oxford, Tech. Rep*, 1996.

S.J. Julier and J.K. Uhlmann. A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems. In *Int. Symp. Aerospace/Defense Sensing, Simul. and Controls*, volume 3, page 26. Citeseer, 1997.

M. Kais, D. Millescamps, D. Bétaille, B. Lusetti, and A. Chapelon. A multi-sensor acquisition architecture and real-time reference for sensor and fusion methods benchmarking. In *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2006.

R.E. Kalman. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of basic Engineering*, 82(1) :35–45, 1960.

R.E. Kalman and R.S. Bucy. New results in linear filtering and prediction theory. *Kalman Filtering : Theory and Application*, page 34, 1961.

K. Kanatani. Unbiased estimation and statistical analysis of 3-D rigid motion from two views. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 15(1) :37–50, 1993.

M. Kasser and Y. Egels. *Digital photogrammetry*. Taylor & Francis, 2002. ISBN 9780748409457.

S.M. Kay. *Fundamentals of statistical signal processing : estimation theory*. 1993.

K. Kost, M. Loddenkemper, and J. Petring. Airborne laserscanning, a new remote sensing method for mapping terrain. In *Third EARSeL Workshop on LiDAR remote sensing of land and sea*, 1997.

K. Kraus and P. Waldhäusl. Manuel de photogrammétrie : principes et procédés fondamentaux. *Hermès*, 1997.

C. Kray and J. Baus. A survey of mobile guides. In *Workshop on HCI in mobile guides, 5th Int. Symposium on HCI with Mobile Devices and Services. Udine, Italy*, 2003.

Dale A. Li L. Ying G. Labbe, P. Self-aware/situation aware - Integrated handhelds for dispersed civilian and military urban operations. 2007.

G. Lamé. *Leçons sur la théorie mathématique de l'élasticité des corps solides*. Bachelier, 1852.

C. Langis, M. Greenspan, and G. Godin. The parallel iterative closest point algorithm. In *Proceedings of the Third International Conference on*, pages 195–202, 2001.

E.L. Lehmann and G. Casella. *Theory of point estimation*. Springer Verlag, 1998.

E.L. Lehmann and J.P. Romano. *Testing statistical hypotheses*. Springer Verlag, 2005.

L. Lemieux, N.D. Kitchen, S.W. Hughes, and D.G.T. Thomas. Voxel-based localization in frame-based and frameless stereotaxy and its accuracy. *Medical physics*, 21 :1301, 1994.

J.J. Levallois. *Géodésie Générale,*. 4 tomes, Eyrolles, 1970.

D. Li, Y. Wang, Z. Liu, and J. Jin. 3D Registration of Ultrasound Images Based on Morphology Skeleton. In *Engineering in Medicine and Biology Society, 2005. IEEE-EMBS 2005. 27th Annual International Conference of the*, pages 6309–6312, 2006.

H. Li, B.S. Manjunath, and S.K. Mitra. A contour-based approach to multisensor image registration. *IEEE transactions on image processing*, 4(3) :320–334, 1995.

H. Li, W. Thorstad, J. Zhu, B. Wu, D. Yang, D. Low, and W. Lu. SU-GG-I-99 : Validation and Comparison of 3D Image Registration Approaches for Adaptive IMRT in Head-And-Neck Cancer. *Medical Physics*, 35 :2664, 2008.

R. Li. Mobile mapping : An emerging technology for spatial data acquisition. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63(9) :1085–1092, 1997.

D.D. Lichti and S.J. Gordon. Terrestrial laser scanners with a narrow field of view : the effect on 3D resection solutions. *Survey Review*, 37 :292, 2004.

D.D. Lichti, S.J. Gordon, and T. Tipdecho. Error models and propagation in directly georeferenced terrestrial laser scanner networks. *Journal of Surveying Engineering*, 131 :135, 2005.

P. Liepa. Filling holes in meshes. In *Proceedings of the 2003 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing*, pages 200–205. Eurographics Association, 2003.

JA Little, DLG Hill, and DJ Hawkes. Deformations incorporating rigid structures. In *mmbia*, page 0104. Published by the IEEE Computer Society, 1996.

H.G. Maas. The suitability of airborne laser scanner data for automatic 3D object reconstruction. *Automatic Extraction of Man-made Objects from Aerial and Space Images (III)*, page 291, 2001.

J.B.A. Maintz and M.A. Viergever. A survey of medical image registration. *Medical image analysis*, 2(1) :1–36, 1998.

D. Manandhar and R. Shibasaki. Vehicle-borne laser mapping system (VLMS) for 3-D GIS. In *IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS'01*, volume 5, 2001.

D. Marr and E. Hildreth. Theory of edge detection. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 207(1167) :187–217, 1980.

T. Masuda and N. Yokoya. A robust method for registration and segmentation of multiple range images. *Computer Vision and Image Understanding*, 61(3) :295–307, 1995. ISSN 1077-3142. doi : http://dx.doi.org/10.1006/cviu.1995.1024.

T. Masuda, K. Sakaue, and N. Yokoya. Registration and integration of multiple range images for 3-D modelconstruction. In *Pattern Recognition, 1996., Proceedings of the 13th International Conference on*, volume 1, 1996.

Y. Matsumoto, K. Fujimura, and T. Kitamura. Shape-from-silhouette/stereo and its application to 3-d digitizer. In *Discrete Geometry for Computer Imagery*, pages 177–188. Springer, 1999.

C.R. Maurer and J.M. Fitzpatrick. A review of medical image registration. *Interactive image-guided neurosurgery*, pages 17–44, 1993.

C.R. Maurer Jr, J.J. McCrory, and J.M. Fitzpatrick. Estimation of accuracy in localizing externally attached markers in multimodal volume head images. In *Proceedings of SPIE*, volume 43, 1898.

P. Müller, T. Vereenooghe, P. Wonka, I. Paap, and L. Van Gool. Procedural 3D reconstruction of Puuc buildings in Xkipché. In *Eurographics Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (VAST)*, pages 139–146. Citeseer, 2006.

F. Mémoli and G. Sapiro. Comparing point clouds. In *Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing*, page 40. ACM, 2004.

D. Mount and A. Sunil. Ann : A library for approximate nearest neighbor searching. Website, 2006. URL http://www.cs.umd.edu/~mount/ANN/.

N. Naikal, J. Kua, G. Chen, and A. Zakhor. Image augmented laser scan matching for indoor dead reckoning. In *Intelligent Robots and Systems*, pages 4134–4141, 2009.

F. Nashashibi, B. Steux, P. Coulombeau, and C. Laurgeau. RTMAPS a framework for prototyping automotive multi-sensor applications. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2000.

W. Neubauer, M. Doneus, N. Studnicka, and J. Riegl. Combined high resolution laser scanning and photogrammetrical documentation of the pyramids at Giza. In *CIPA XX International Symposium*, pages 470–475, 2005.

P.J. Neugebauer. Reconstruction of real-world objects via simultaneous registration and robust combination of multiple range images. *International Journal of Shape Modeling*, 3 :71–90, 1997.

S. Nicolau, X. Pennec, L. Soler, and N. Ayache. Evaluation of a new 3D/2D registration criterion for liver radio-frequencies guided by augmented reality. *Surgery Simulation and Soft Tissue Modeling*, pages 270–283, 2003.

S. Nicolau, A. Garcia, X. Pennec, L. Soler, and N. Ayache. An augmented reality system to guide radio-frequency tumour ablation. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 16 (1) :1–10, 2005.

N.R. Pal and S.K. Pal. A review on image segmentation techniques. *Pattern recognition*, 26(9) :1277–1294, 1993.

S.Y. Park and M. Subbarao. An accurate and fast point-to-plane registration technique. *Pattern Recognition Letters*, 24(16) :2967–2976, 2003.

W. Peckar, C. Schn
"orr, K. Rohr, and H. Stiehl. Two-step parameter-free elastic image registration with prescribed point displacements. In *Image Analysis and Processing*, pages 527–534. Springer, 1997.

W. Peckar, C. Schn
"orr, K. Rohr, and H.S. Stiehl. Parameter-free elastic deformation approach for 2D and 3D registration using prescribed displacements. *Journal of mathematical imaging and vision*, 10(2) :143–162, 1999.

N. Pfeifer and C. Briese. Geometrical aspects of airborne laser scanning and terrestrial laser scanning. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(Part 3) :12–14, 2007.

M. Pierrot-Deseilligny and N. Paparoditis. A multiresolution and optimization-based image matching approach : an application to surface reconstruction from SPOT5-HRS stereo imagery. In *Workshop ISPRS commission I, Ankara, Turkey*, 2006.

B.M. Planitz, A.J. Maeder, and J.A. Williams. The correspondence framework for 3D surface matching algorithms. *Computer Vision and Image Understanding*, 97(3) :347–383, 2005.

M. Pollefeys, D. Nistér, J.M. Frahm, A. Akbarzadeh, P. Mordohai, B. Clipp, C. Engels, D. Gallup, S.J. Kim, P. Merrell, et al. Detailed real-time urban 3d reconstruction from video. *International Journal of Computer Vision*, 78(2) :143–167, 2008.

J.P. Prenel. Physique du laser. *Techniques de l'ingénieur. Sciences fondamentales*, (AF 3270), 1999.

K. Pulli. Multiview registration for large data sets. In *3-D Digital Imaging and Modeling, 1999. Proceedings. Second International Conference on*, pages 160–168, 1999.

P. Qingwu and Z Lizhong. City component data collection based on mobile mapping technology. *Journal of Geomatics*, page 06, 2008.

T. Rabbani, F. van den Heuvel, and G. Vosselmann. Segmentation of point clouds using smoothness constraint. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5) :248–253, 2006.

M.D. Reed, C.E. Landry, and K.C. Werther. The application of air and ground based laser mapping systems totransmission line corridor surveys. In *IEEE Position Location and Navigation Symposium*, pages 444–451, 1996.

I. Reinertsen, M. Descoteaux, K. Siddiqi, and D.L. Collins. Validation of vessel-based registration for correction of brain shift. *Medical image analysis*, 11(4) :374–388, 2007.

R. Rempel. Anomaly detection using magnetic flux leakage technology. In *BJ Pipeline Inspection Services, Instituto Brasileiro de Petroleo e Gas. Rio Pipeline Conference and Exposition, Rio de Janeiro*, 2005.

Y. Reshetyuk. *Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners*. PhD thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Department of Transport and Economics Division of Geodesy, Stockholm, 2006.

J.A. Richards and X. Jia. *Remote sensing digital image analysis*. Springer Berlin etc., 1993.

T. Ridene and F. Goulette. Recalage hétérogène de données 3D d'environnements urbains. *IEEE France, MajecSTIC'08*, Oct. 2008.

T. Ridene and F. Goulette. Recalage de relevés laser fixes et mobiles sur MNS pour la cartographie numérique 3D. *Revue Française de photogrammétrie et de télédétection*, jan. 2009a.

T. Ridene and F. Goulette. Registration together and to DSM of several 3D point clouds issued from a Mobile Mapping System. *Mobile Mapping Technologies*, jul. 2009b.

T. Ridene and F. Goulette. Registration of fixed-and-mobile- based terrestrial laser data sets with dsm. pages 375 –380, dec. 2009c. doi : 10.1109/CIRA.2009.5423176.

T. Ridene and F. Goulette. Coregistration of DSM and 3D point clouds acquired by a mobile mapping system. *Geodetic sciences bulletin - Special Issue on Mobile Mapping Technology*, 15(5) :824–838, 2009d.

T. Ridene and F. Goulette. Recalage de relevés laser fixes et mobiles sur MNS pour cartographie numérique 3D. *Colloque Techniques Laser Pour l'Etude des Environnements Naturels et Urbains*, Jan. 2009e.

T. Ridene and F. Goulette. Usage de la cartographie 3D pour l'urbanisme et le service de proximité -exemple d'application au diagnostic d'accessibilité-. *GéoTunis 2010*, dec. 2010a.

T. Ridene and F. Goulette. Feature-based quality evaluation of 3D heterogeneous data registration. In *Proceedings of SPIE*, volume 7526, page 75260Z, 2010b.

T. Ridene and F. Nashashibi. Localisation précise d'un système de cartographie mobile pour la numérisation 3D d'environnement Urbain. *ATEC-ITS*, Feb. 2009.

K. Rohr, H.S. Stiehl, R. Sprengel, T.M. Buzug, J. Weese, and M.H. Kuhn. Landmark-based elastic registration using approximating thin-plate splines. *IEEE Transactions on medical imaging*, 20(6) :526–534, 2001.

S. Rusinkiewicz and M. Levoy. Efficient variants of the ICP algorithm. In *3-D Digital Imaging and Modeling, 2001. Proceedings. Third International Conference on*, pages 145–152, 2001.

R. Schnabel, R. Wahl, and R. Klein. Efficient RANSAC for point-cloud shape detection. In *Computer Graphics Forum*, volume 26, pages 214–226. Citeseer, 2007.

K.P. Schwarz and N. El-Sheimy. Mobile Mapping Systems–State of the art and future trends. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(Part B) :10, 2004.

M. Sedláček. Evaluation of RGB and HSV models in Human Faces Detection. In *Proceedings of the 74h Central European Seminar on Computer Graphics. TU Vienna and UK Bratislava*, pages 125–131, 2004.

V. Sequeira, G. Bostrom, and J.G.M. Gon9alves. 3D site modelling and verification. *3D imaging for safety and security*, page 225, 2007.

J. Serra and J.L. Chermant. Mathematical morphology : A historical overview. *Acta Stereologica*, 16 :157–166, 1997.

N.J. Shih, M.C. Wu, and J. Kunz. The inspections of as-built construction records by 3D point clouds. *Center for Integrated facility engineering (CIFE)*, 2004.

P. Sillard. Les projections et référentiels. Technical report, ENSG, Septembre 2000.

D.A. Simon, R.V. O'toole, M. Blackwell, F. Morgan, A.M. DiGioia, and T. Kanade. Accuracy validation in image-guided orthopaedic surgery. In *Proceedings of the Second International Symposium on Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, pages 185–192. Citeseer, 1995.

M.I. Skolnik. Introduction to Radar systems. *Radar handbook*, pages 1–1, 2003.

D. Smith and D.G. Smith. Operational experiences of digital photogrammetric systems. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 31 :357–362, 1996.

P. Soille. *Morphological Image Analysis : Principles and Applications*. Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA, 2003. ISBN 3540429883.

C. Spagnol, R. Muradore, M. Assom, A. Beghi, and R. Frezza. Trajectory reconstruction by integration of GPS and a swarm of MEMS accelerometers : model and analysis of observability. In *Proceedings on The 7th International IEEE Conference in Intelligent Transportation Systems*, pages 64–69, 2004.

J.A.R. Specht. *Modélisation d'objets 3D par construction incrémentale d'un maillage triangulaire, dans un contexte robotique*. PhD thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 2005.

R. Szeliski and S. Lavallée. Matching 3-D anatomical surfaces with non-rigid deformations using octree-splines. *International journal of computer vision*, 18(2) :171–186, 1996.

J. Talaya, R. Alamus, E. Bosch, A. Serra, W. Kornus, and A. Baron. Integration of a terrestrial laser scanner with GPS/IMU orientation sensors. In *Proceedings of the Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*. Citeseer, 2004.

C.K. Tang, G. Medioni, and M.S Lee. N-dimensional tensor voting and application to epipolar geometry estimation. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 23(8) :829–844, 2001. ISSN 0162-8828. doi : http://dx.doi.org/10.1109/34.946987.

C.V. Tao. Mobile Mapping Technology for Road Network Data Acquisition. *Proc. Journal of Geospatial Engineering*, 2(2) :1–13.

C.V. Tao and J. Li. Advances in mobile mapping technology. 2007.

L. Tao, U. Castellani, A. Fusiello, and V. Murino. 3D acoustic image segmentation by a RANSAC-based approach. In *IEEE OCEANS-CONFERENCE*, volume 2, pages 1098–1101, 2003.

O. Teboul, L. Simon, P. Koutsourakis, and N. Paragios. Segmentation of Building Facades Using Procedural Shape Priors.

C. Thorpe, M.H. Hebert, T. Kanade, and S.A. Shafer. Vision and navigation for the Carnegie-Mellon Navlab. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 10(3) :362–373, 1988.

S. Thrun, M. Montemerlo, H. Dahlkamp, D. Stavens, A. Aron, J. Diebel, P. Fong, J. Gale, M. Halpenny, G. Hoffmann, et al. Stanley : The robot that won the DARPA Grand Challenge. *Journal of field Robotics*, 23(9) :661–692, 2006.

D.H. Titterton and J.L. Weston. *Strapdown inertial navigation technology*. Peter Peregrinus Ltd, 2004.

S. Tosovic and R. Sablatnig. 3D modeling of archaeological vessels using shape from silhouette. In *3dim*, page 51. Published by the IEEE Computer Society, 2001.

G. Turk and M. Levoy. Zippered polygon meshes from range images. In *Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, page 318. ACM, 1994.

A. Ullrich, N. Studnicka, J. Riegl, and S. Orlandini. Long range high performance time of flight based 3D imaging sensors. In *Proc. 1st Int'l Sym. 3-D Data Processing Visualization and Transmission*, pages 852–855, 2002.

P.A. Van den Elsen, E.J.D. Pol, and M.A. Viergever. Medical image matching-a review with classification. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 12(1) :26–39, 1993.

R.C. Veltkamp and M. Hagedoorn. State of the art in shape matching, Principles of visual information retrieval. *Series in Advances in Pattern Recognition, Springer*, 2001.

B.C. Vemuri, J. Ye, Y. Chen, and C.M. Leonard. Image registration via level-set motion : Applications to atlas-based segmentation. *Medical Image Analysis*, 7(1) :1–20, 2003.

T. Vercauteren. *Image Registration and Mosaicing for Dynamic In Vivo Fibered Confocal Microscopy*. PhD thesis, Mines de Paris, 2008.

T.D. Vu, J. Burlet, and O. Aycard. Grid-based Localization and Local Mapping with Moving Object Detection and Tracking. *Information Fusion*, 2010.

G. Wahba. *Spline models for observational data*. Society for Industrial Mathematics, 1990.

E.A. Wan and R. Van Der Merwe. The unscented Kalman filter for nonlinear estimation. In *The IEEE 2000 Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium 2000. AS-SPCC*, pages 153–158, 2000.

E.A. Wan, R. Van Der Merwe, and A.T. Nelson. Dual estimation and the unscented transformation. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 12 :666–672, 2000.

L.T. Waser, E. Baltsavias, K. Ecker, H. Eisenbeiss, E. Feldmeyer-Christe, C. Ginzler, M. Küchler, and L. Zhang. Assessing changes of forest area and shrub encroachment in a mire ecosystem using digital surface models and CIR aerial images. *Remote Sensing of Environment*, 112(5) :1956–1968, 2008.

S. Weik. Registration of 3-D partial surface models using luminance and depth information. In *Proc. Int. Conf. on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling*, pages 93–100. Citeseer, 1997.

W. Whittaker and L. Nastro. Utilization of Position and Orientation Data for Preplanning and Real Time Autonomous Vehicle Navigation. In *2006 IEEE/ION Position, Location, And Navigation Symposium*, pages 372–377, 2006.

R. Wiemker, K. Rohr, L. Binder, R. Sprengel, and H.S. Stiehl. Application of elastic registration to imagery from airborne scanners. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 31 :949–954, 1996.

A. Wiles and T. Peters. Real-Time Estimation of FLE Statistics for 3D Tracking With Point-Based Registration. *IEEE transactions on medical imaging*, 2009.

H. William, S.A. Teukolsky, and W.T. Vetterling. *Numerical Recipes in C : The art of scientific computing*. Cambridge university press New York, NY, USA, 1988.

J.A. Williams, M. Bennamoun, and S. Latham. Multiple view 3D registration : A review and a new technique. In *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. IEEE SMC'99 Conference Proceedings*, volume 3, 1999.

A. Winter. *Apports de l'approche multiechelle pour l'analyse automatique d'images satellitaires*. PhD thesis, École Nationale Supérieure des Telécommunications, 1997.

H. Woo, E. Kang, S. Wang, and K.H. Lee. A new segmentation method for point cloud data. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(2) :167–178, 2002.

O. Wulf and B. Wagner. Fast 3D scanning methods for laser measurement systems. In *International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS14)*, 2003.

D. Zhang. *Harmonic Shape Images : A 3D free-form surface representation and its applications in surface matching*. PhD thesis, Carnegie Mellon University, 1999.

Z. Zhang. Le Probleme de la mise en correspondance : l'etat de l'art. *Rapport de recherche, INRIA*, 1993a.

Z. Zhang. Recalage de deux nuages de points 3D. *Traitement du Signal*, 10(4) :263–282, 1993b.

Z. Zhang. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. *International Journal of Computer Vision*, 13(2) :119–152, 1994.

H. Zhao and R. Shibasaki. Reconstructing a textured CAD model of an urban environment using vehicle-borne laser range scanners and line cameras. *Machine Vision and Applications*, 14(1) :35–41, 2003.

D. Ziou and S. Tabbone. Edge detection techniques-an overview. *International Journal*, 8 :537–559, 1998.

B. Zitova and J. Flusser. Image registration methods : a survey. *Image and vision computing*, 21(11) :977–1000, 2003.

Annexe A

Caractérisation des données et des capteurs

Nous exposons dans cette annexe les différents types de données et de capteurs en lien avec notre étude et non traités dans le corps du mémoire.

A.1 Imagerie satellitaire

Notre classification des différentes images satellites a été construite sur la base des critères suivants :

1. Résolutions : couleurs ou noir et blanc ;
2. Fauchée (cf. Figure A.1).

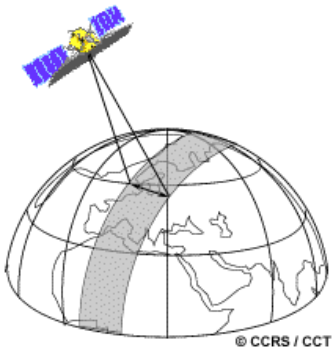


FIGURE A.1 – Lorsqu'un satellite est en orbite autour de la Terre, le capteur « observe » une certaine partie de la surface. Cette surface porte le nom de *couloir-couvert* ou *fauchée (Source des illustrations : http ://www.ccrs.nrcan.gc.ca)*.

La table A.1 et le diagramme A.2 résume notre classification.

Image satellitaire	Résolution N&B (m)	Résolution Couleur (m)	Fauchée (km)
QuickBird	61 cm	2.44	16.5
KOMPSAT-2	1	1	15
Ikonos	1	4	11
Eros	1.8		13.5
Cosmos(KVR 1000)		2	40
FORMOSAT-2	2	8	24
Spot 5	2.5 - 5	10	60 - 120
IRS 1c	5.8	23	70 - 810
Spot 1-4	10	20	60
RADARSAT	8 - 25	50 - 100	50 - 500
Cosmos (TK 350)	10		200
ENVISAT/ERS	25 - 150		56 -100 à 400
Landsat 7	15	30	185

TABLE A.1 – Comparatif d'images satellitaires *(Source du tableau : http ://www.spotimage.com)*.

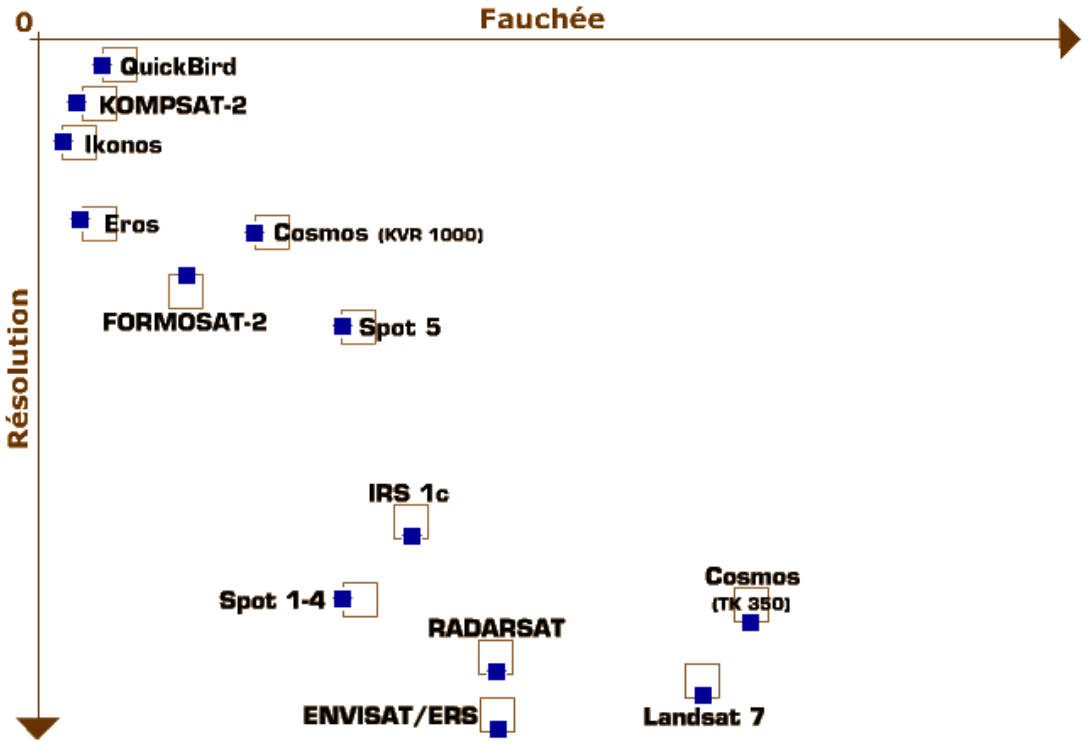


FIGURE A.2 – Diagramme comparatif des images satellitaires les plus connues.

A.2 Caméra aéroportée

Modèle	UCD et UCX Vexcel	DMC ZI	ADS 40	Cam IGN	Cam V2 IGN	Cam V2 IGN
Aspect						
Panchro+XS	11500x7500 (14430x9420)	13824x7680	12 000	6720x3930	14 000x5400	14 000x10 000
angle d'ouv.⊥	55°	69.4°	62°	Suivant focale	Suivant focale	Suivant focale
Image couleur réelle	4008x2672 (4992x3328)	3072x2048	12 000	4096x4096	7216x5412	7216x5412
Fauchée avec 1/6 de dévers	3550 (4450)	3327	3230	2220 (60 mm)	4900 (100mm) 5880 (120mm)	4900 (100mm) 5880 (120mm)
Pixel matrice	9 (7.2) µm	12 µm	6.5µm	9µm	6.8µm	6.8µm
Pixel sol stéréo mini à 100m/s	2.5 (2.2) cm	6.5 cm	12 cm	19.5 cm	9cm	4.5cm
Technologie	Juxtaposée Pansharp : 13 (9)	Juxtaposée Pansharp : 23	barrette	matrice	Juxtaposée Pansharp < 4	Juxtaposée Pansharp ~ 4
Compensation de filé	Oui jusqu'à 50 pixels	Oui	Sans objet	Oui	Oui	Oui
cadence	1 im. / 0.75 s	1 im. / 2 s	1 I/ 1.2 ms	1 im. / 3.2s	1 im./2s	1 im./2s
Prix	650 000 $	940 000 $	1 300 000 $	Sans objet	TBD	TBD

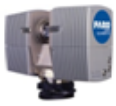
TABLE A.2: Liste des caméras aéroportées *(sources des illustrations : projet TerraNumerica)*.

A.3 Scanner laser 2D

Fabriquant	Référence	Portée	Champ	Cadence	Aspect
Ibeo	Alasca	80 m	270°	10 à 40hz	
Ibeo	LD SDA	256 m	270°	10hz	
Ibeo	LD multilayer	128 m	270°	10 à 40 Hz	
Riegl	LD automobile	128 m	270°	10 à 40 Hz	
Riegl	LMS-Q120	150 m	80°	10k mesures/s	
Leuze electronic	Rotoscan RS4-4	4 m	190°		
Riegl	LMS-Z210i	120 à 400 m	80°	8000 pt / s max	
Faro	Laser Tracker Xi	70 m	270°	10 k points /s	
Acuity	AccuRange 4000	16,5 m		200 Khz (770 Hz pour la sortie analogique)	

TABLE A.3: Liste des télémètres laser 2D.

A.4 Scanner laser 3D

Fabriquant	Référence	Portée	Champ vertical	Champ horizontal	Aspect
Faro	LS 420	20 m	320°	360°	
Faro	LS 880	75 m	320°	360°	
LEICA	HDS 3000	50 m	270°	360°	
LEICA	HDS 4500	53 m	310°	360°	
LEICA	HDS 6000	75 m	310°	360°	
ACUITY TECHNOLOGIES	SRI 500	150 m	130°	360°	
RIEGL	LMS-Z390	300 m	80°	360°	
RIEGL	LMS-Z210 II	200 m	80°	360°	
Trimle	GX 200	200 m	60°	360°	

Suite page suivante

Suite ...					
Fabriquant	**Référence**	**Portée**	**Champ vertical**	**Champ horizontal**	**Aspect**
Trimble	VX	150 m	60°	360°	
Trimble	GS 200	200 m	60°	360°	
3RD TECH	DELTASPHERE 3000	16 m	110°	360°	
OPTECH	ILRIS 3D	350 m	110°	360°	
ZF Laser	IMAGER 5003 + LARA 53500	53,5 m	310°	360°	
ZF Laseer	IMAGER 5006	79 m	310	360°	

TABLE A.4: Liste des télémètres laser 3D.

A.5 Capteurs GPS

Fabriquant	Référence	PPK-RTK-Précision	Précision		Cadence	Aspect
			Avec DGPS	Sans DGPS		
Trimble	AG 132	--	20 cm, XY ; 50 cm, Z	50 cm, XY ; 1 m, Z	10hz	
Trimble	AG 332	--	20 cm, XYZ	50 cm, XY ; 1 m, Z	10hz	
Thales	A12	--	80 cm, XY ; 1.5 m, Z	3 m, XY ; 5 m, Z	1-5Hz	
Wi-Sys	WS5012	--	--	2 m, XYZ ;	1hz	
Ashtech	Z-Xtreme	**- Mode PPK** 10 mm + 1.0 ppm, XY; 20 mm + 1.0 ppm, Z **- Mode RTK** 10 mm + 1.0 ppm, XY; 20 mm + 2.0 ppm, Z	Position Différentielle T.R : < 1m	--	10-20hz	
MAGELLAN	Sagitta™	**Mode KART (RTK) L1/L2** **-Mode Rapide KR** (20Hz max., 5ms latence): 10 mm + 0.5 ppm, XY; 20 mm + 1.0 ppm, Z **-Mode synchrone KA** (1 Hz, 1-s latence): 5 mm + 0.5 ppm, XY; 10 mm + 1.0 ppm, Z	Position Différentielle T.R : 20 cm + 2 ppm, XYZ	--	10-20hz	

TABLE A.5: Liste des capteurs GPS cités dans le manuscrit.

A.6 Centrales inertielles

Fabriquant	Référence	Heading : Précision (°)	Attitude dynamique Roulis, Tangage : Précision (°)	Cadence	Aspect
Crossbow	VG 600	< 2.0 °	<0.25°	84 Hz	
Crossbow	*VG 400*	< 1.0 °	< 0.1°	> 75 Hz	
Crossbow	VG 440	< 1.0°	<0.2°	25 Hz	
IXSEA	LANDINS	0. 1°	0.01°	1-200 Hz	

TABLE A.6: Liste des Centrales Inertielles citées dans le manuscrit.

A.7 Système *Applanix POS-LV*

IARTK: Inertially-Aided RTK *PP: Post-processed* *DGPS: Real-time DGPS*	GPS Outage Duration (IARTK/PP/DGPS)														
	0 sec.			15 sec.			30 sec.			60 sec.			120 sec.		
	IARTK	PP	DGPS	IARTK	PP	DGPS	IARTK	PP	DGPS	IARTK	PP	DGPS	IARTK	PP	DGPS
POS LV 220															
X, Y Position (m)	0.035	0.02	1.0	0.20	0.05	1.13	0.35	0.08	1.25	0.70	0.15	1.5	1.0	0.60	1.75
Z Vertical Position (m)	0.05	0.03	1.5	0.20	0.08	1.63	0.30	0.12	1.75	0.50	0.20	2.0	0.90	0.70	2.2
Roll & Pitch (deg)	0.07	0.06	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07	0.06	0.07
True Heading (deg)	0.07	0.025	0.07	0.07	0.025	0.07	0.07	0.025	0.07	0.07	0.025	0.07	0.07	0.03	0.08
POS LV 320															
X, Y Position (m)	0.035	0.02	1.0	0.10	0.05	1.13	0.20	0.08	1.25	0.35	0.15	1.5	0.60	0.40	1.63
Z Vertical Position (m)	0.05	0.03	1.5	0.10	0.07	1.63	0.15	0.10	1.75	0.25	0.20	2.0	0.40	0.50	2.2
Roll & Pitch (deg)	0.05	0.02	0.05	0.05	0.02	0.05	0.05	0.02	0.05	0.05	0.02	0.05	0.05	0.02	0.05
True Heading (deg)	0.05	0.025	0.05	0.05	0.025	0.05	0.05	0.025	0.05	0.05	0.025	0.05	0.06	0.03	0.06
POS LV 420															
X, Y Position (m)	0.035	0.02	1.0	0.07	0.05	1.13	0.13	0.07	1.25	0.20	0.12	1.5	0.30	0.27	1.63
Z Vertical Position (m)	0.05	0.03	1.5	0.07	0.06	1.63	0.10	0.09	1.75	0.15	0.15	2.0	0.20	0.35	2.13
Roll & Pitch (deg)	0.02	0.005	0.02	0.02	0.005	0.02	0.02	0.005	0.02	0.02	0.005	0.02	0.02	0.005	0.02
True Heading (deg)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03

Positional accuracy are RMS values. The above accuracy specifications assume good GPS mission planning (when GPS is available.) IARTK performance values valid at baselines out to 40km.

FIGURE A.3 – Spécifications des résolutions et des précisions du système *POS-LV (Source des illustrations : http ://www.applanix.com)*.

Annexe B

Géo-référencement

Le géo-référencement des données peut se définir comme la détermination de leur localisation (positions, orientations) précise dans un référentiel terrestre.

La construction des bases de données cartographique 2D/3D, nécessite bon géo-référencement des différentes données images à intégrer dans la base en question. Dans cette annexe nous présentons un état de l'art du géo-référencement.

B.1 Systèmes de coordonnées et de projection

Pour décrire la position d'un point A à la surface de la Terre, nous avons besoin d'une représentation du globe par une surface de référence, et ensuite, de différents systèmes de coordonnées et de projection peuvent être utilisés.

B.1.1 Surface de référence

La surface de la Terre ne s'écarte que de quelques dizaines de kilomètres de celle d'une sphère : cette surface est aussi appelée *topographie*. Il s'agit à proprement parler de l'interface entre la partie solide de l'écorce terrestre (ou les océans) et l'atmosphère.

L'une des surfaces représentatives, proche en général du niveau moyen de la mer, a été prise pour origine des altitudes : on l'appelle *géoïde*. Le *géoïde* est voisin d'un *ellipsoïde* de révolution, par rapport auquel il présente des irrégularités plus ou moins corrélées avec la *topographie*, n'excédant pas 100 m. On recherche donc l'*ellipsoïde* qui est le plus proche du *géoïde*, et on privilégie cette nouvelle surface parce qu'elle se décrit mathématiquement par deux paramètres seulement : le demi-grand axe « a » et le demi-petit axe « b ». On va donc repérer de manière fiable tout point par rapport à sa position sur l'*ellipsoïde* par trois nombres (par exemple une longitude, une latitude et une hauteur).

Mais, pour beaucoup d'opérations, il faut en arriver à une représentation cartographique plane, permettant de travailler sur papier, et l'*ellipsoïde* n'est bien évidemment pas une surface développable. On va donc définir une dernière surface de référence,

souvent cylindrique ou conique (donc développable), et on déterminera une transformation amenant le point de l'*ellipsoïde* sur cette surface. Cette transformation est appelée « représentation plane ».

De nombreux *ellipsoïde*s nationaux, voire régionaux, ont été établis par le passé, chacun approximant au mieux le *géoïde* sur sa zone de travail, et parfaitement confondu avec lui au point fondamental (pour la France, l'*ellipsoïde* est dit de « Clarke » et date de 1880, le point fondamental étant au Panthéon à Paris). Aujourd'hui, on a souvent recours à un *ellipsoïde* général dit international, ce qui simplifie les conversions de coordonnées qui restent malgré tout, d'un pays à un autre et pour des travaux frontaliers par exemple, un véritable problème technique et une source considérable d'ennuis. Les demi-grand axe et demi-petit axe de l'*ellipsoïde* international (adopté en 1924) valent respectivement 6 378 388 et 6 356 912 m.

B.1.2 Systèmes de coordonnées

Pour décrire la position d'un point A à la surface de la Terre, différents systèmes de coordonnées sont utilisés, dont nous faisons un aperçu dans ce qui suit, pour plus de détails le lecteur intéressé peut se référer à (Sillard, 2000).

Coordonnées cartésiennes tridimensionnelles

Elles sont fréquemment utilisées comme intermédiaire de calcul lorsque l'on emploie des méthodes de positionnement spatial. Les axes X et Y sont orthogonaux dans le plan de l'équateur, l'axe Z est confondu avec l'axe de rotation terrestre moyen. (cf. Figure B.1(a)).

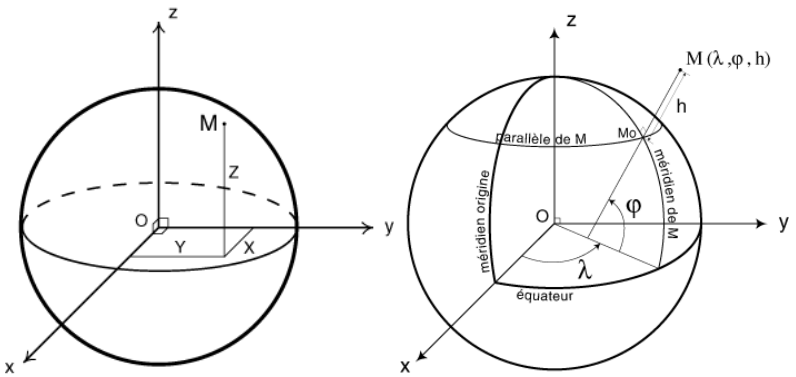


FIGURE B.1 – (a)Coordonnées cartésiennes . (b) Coordonnées géographiques.

Coordonnées géographiques

Les coordonnées géographiques d'un point M de la surface de la Terre sont la longitude λ et la latitude ϕ de la projection de M sur l'ellipsoïde suivant la normale et la distance algébrique h de Mo à M. (cf. Figure B.1(b))

- La longitude λ : est l'angle orienté entre le plan méridien origine et le plan méridien contenant le point M. Le méridien origine international est celui de Greenwich mais de nombreux systèmes utilisent d'autres méridiens origines (par exemple, celui de Paris en France).
- La latitude ϕ : est l'angle orienté entre le plan de l'équateur et la normale à l'*ellipsoïde* passant par le point M.
- La hauteur h : est la distance algébrique [MoM] entre le point M et l'*ellipsoïde*.

Le système de coordonnées du GPS : WGS-84 [1] est un exemple.

Coordonnées rectangulaires planes

Employées sur le plan de représentation plane, l'axe des Y est dans la direction du Nord pour au moins un méridien donné, et l'axe des X lui est perpendiculaire ; X étant croissant vers l'Est et Y vers le Nord.

Déviation de la verticale

Ce terme désigne l'écart angulaire existant à un endroit donné entre la verticale physique du lieu (direction de la pesanteur matérialisée par exemple par un fil à plomb) et la direction orthogonale à la surface de l'*ellipsoïde* passant par ce point. Lorsqu'elle est inconnue (ce qui est fréquent), c'est une cause d'imprécisions dans les calculs de triangulation puisque, par nécessité, on est amené à supposer que l'on travaille sur l'*ellipsoïde* et non sur le *géoïde*.

B.1.3 Système de projection

La représentation cartographique du terrain sur un plan passe par l'intermédiaire de l'*ellipsoïde*. La représentation des points du terrain projeté à l'*ellipsoïde* sur la surface cartographique (qui est développable) peut prendre un grand nombre de variantes différentes, selon que l'on préfère que les angles entre deux visées soient conservés (représentations conformes), ou plutôt que les surfaces le soient (représentations équivalentes), ou que les surfaces ou les angles soient quelconques.

Nous présenterons ici les projections les plus courantes : Lambert (employée pour la carte de France), UTM (Universal Transverse Mercator, très employée dans le monde) et stéréographique (emploi fréquent pour des travaux scientifiques). La répartition mondiale des différents systèmes de projections est exposée sur la Figure B.5.

1. WGS-84 : World Geodetic System 1984.

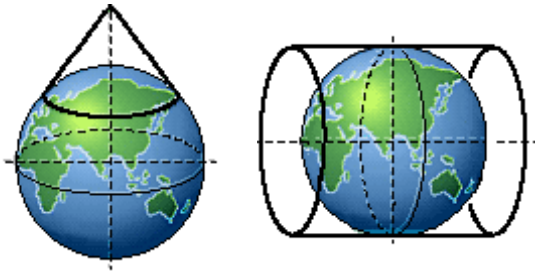


FIGURE B.2 – (a) Projection conique. (b) Projetion cylindrique.

Représentation ou projection Lambert

La représentation Lambert utilisée pour la France consiste à projeter, avec pour pôle le centre de la Terre, les points de l'*ellipsoïde* de référence sur un cône ayant pour axe celui de la Terre (cf. Figure B.2(a)), ce cône étant tangent à l'*ellipsoïde* le long d'un parallèle de latitude ϕ_0. Dans ces conditions, on constate qu'à la distance d de ce parallèle, une longueur projetée sur ce cône subit une « altération linéaire »[2] de valeur m, et R étant le rayon moyen de courbure de l'*ellipsoïde* en ce lieu :

$$m = 1 + d^2/2R^2$$

Cette valeur de m étant toujours supérieure à 1. On a donc jugé utile de multiplier m par une valeur constante inférieure à l'unité, souvent notée e_0 , et qui vaut en France :

$$e_0 = 0,9998774$$

de sorte que l'altération linéaire varie à peu près entre −12 et +16 cm/km lorsque l'on passe de la proximité du parallèle de latitude à celle correspondant à ϕ_0 + 1,5 gr, ce qui aboutit à des valeurs dont la moyenne est centrée sur ϕ_0. Grâce à cet artifice, il y a deux parallèles le long desquels l'altération linéaire est nulle (à environ 1 grad de ϕ_0), et la France est ainsi découpée en 4 zones, ayant pour largeur chacune une bande de 3 grad en latitude (cf. Figure B.2(b)). Pour plus de détail sur les formules décrivant la projection Lambert, le lecteur peut se référer à (Levallois, 1970).

Il faut préciser par ailleurs qu'en France, le méridien de référence (Paris) est à $2,5969213 grad$ à l'est de Greenwich. L'image de ce méridien est parallèle à l'axe des Y.

Les coordonnées Lambert pour la géodésie[3] sont obtenues en attribuant à l'intersection du méridien de référence et du parallèle de latitude ϕ_0 les coordonnées $X = 600km$ et $Y = 200km$, sauf pour la zone IV (Corse) où l'on utilise $X = 234358m$ et $Y = 185861,669m$. L'axe des Y est parallèle au Nord lorsque l'on est sur ce méridien.

2. On appelle altération linéaire la variation relative d'une longueur passant de l'*ellipsoïde* à la représentation cartographique.

3. La géodésie a pour objet initial l'étude et la mesure de la forme générale de la Terre, de sa rotation, de son champ de pesanteur et des différents systèmes de référence employables pour se repérer.

Les coordonnées Lambert pour la cartographie sont les mêmes, excepté la valeur de Y qui est augmentée de 1000*km* pour la zone I, 2000*km* pour la zone II, 3000*km* pour la zone III et 4000*km* pour la zone IV. Dans la projection Lambert, l'image des parallèles donne des arcs de cercle centrés sur S et celle des méridiens, des droites concourantes en S.

Néanmoins, il faut signaler que le Lambert officiel en France depuis plus de dix ans est le Lambert 93.

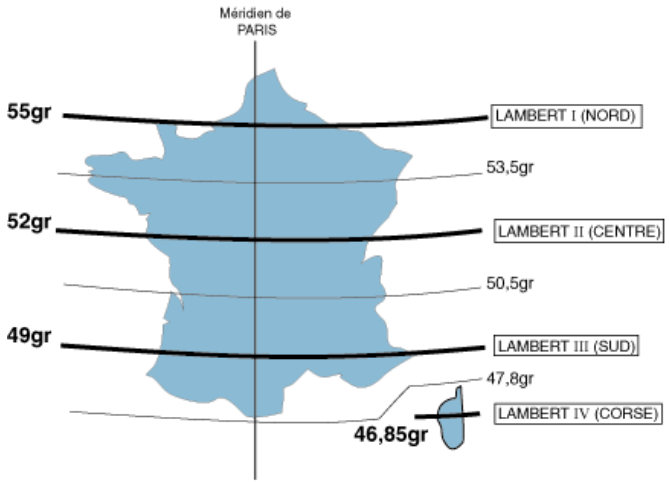


FIGURE B.3 – Etendue de la projection Lambert sur la france, la zone I est centrée sur ϕ_0 = 55 gr, la zone II sur 52 gr, la zone III sur 49 grad et la zone IV (pour la Corse) sur 46,85 gr.

Projection UTM (Universal Transverse Mercator)

En français, on utilise le terme de Mercator Transverse Universelle. Cette projection conforme est très employée dans le monde, en particulier pour les cartes internationales. C'est une projection, ayant pour pôle le centre de la Terre, de l'*ellipsoïde* sur un cylindre (cf. Figure B.2(b)) qui est tangent à celui-ci tout le long d'un méridien de longitude λ, et ceci sur une zone s'étendant entre les longitudes λ -3°et λ +3°, soit donc sur un secteur de l'*ellipsoïde* de 6° de longitude (cf. Figure B.4). Hors de cette zone, on utilise un nouveau cylindre dont l'axe, compris dans le plan de l'équateur, est tourné lui aussi de 6° par rapport au précédent. Pour couvrir l'ensemble de la Terre, on emploie donc 60 fuseaux. Le rapport d'échelle serait ainsi toujours au moins égal à 1 mais jamais inférieur, on applique en outre un facteur d'échelle supplémentaire valant $0,9996$. Ceci fait que l'altération linéaire varie autour de l'unité, comme pour la projection Lambert. Les images des parallèles et des méridiens forment des faisceaux de courbes assez difficiles à calculer. Pour plus de détails se reporter à (Levallois, 1970).

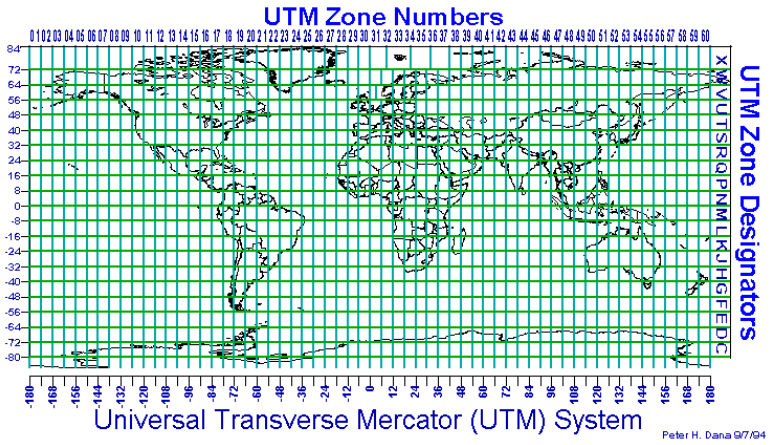


FIGURE B.4 – Etendue mondiale de la projection UTM

Projection stéréographique

Il s'agit d'une projection ayant pour pôle un point de la surface de la Terre, et l'*ellipsoïde* est alors projeté sur un plan tangent à celui-ci en un point diamétralement opposé au pôle de projection. Le cas le plus fréquent est celui de la projection stéréographique polaire, le pôle de projection étant l'un des pôles de l'*ellipsoïde*. Ce cas est employé en particulier pour compléter dans les zones polaires (latitudes supérieures à 80°) la projection UTM. De ce fait, les images des parallèles sont des cercles et celles des méridiens un faisceau de droites concourantes au pôle, seul point par ailleurs où l'altération linéaire vaut 1. L'équateur est représenté en particulier par un cercle de rayon double de celui de la Terre. Cette projection est fréquemment employée pour des modèles simples représentant des phénomènes à la surface de la Terre, considérée alors comme une sphère : la projection stéréographique revient alors à une inversion de la sphère (au sens géométrique). Citons, par exemple, le cas de la sismologie : les mécanismes au foyer étant analysés en utilisant une projection stéréographique.

B.2 Différents types de géo-référencement

Beaucoup d'applications de navigation et de cartographie, font appel à un géo-référencement précis, pouvant prendre deux formes : directe et indirecte. Ces types de géo-référencement dépendent essentiellement de trois paramètres :

- Le contexte : automatique, automatique avec données externes (données cadastrales), semi-automatique (interactive), utilisation des points de contrôle . . .
- Stratégie de développement : temps réel ou temps différé.
- Précision requise : pouvant varier de l'ordre > 1 m pour des applications de navigation automobile (Edgard, 2006), à l'ordre de 1 cm pour des applications de levé automatique de voirie ou celle relevant du domaine ferroviaire (Barbu, 2006).

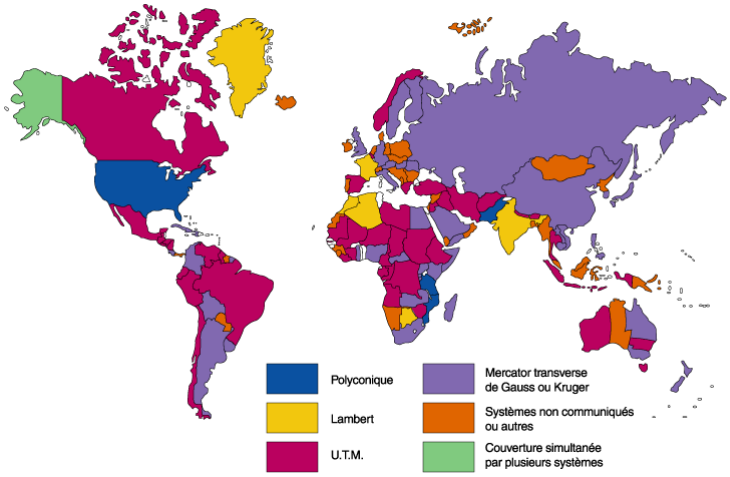


FIGURE B.5 – Répartition mondiale des différents systèmes de projection *(Source des illustrations : http ://www.ign.fr/)*.

B.2.1 Géo-référencement direct

Le géo-référencement direct se base sur des systèmes de positionnement utilisant des capteurs de localisation (INS, GPS, odomètres, gyromètres, boussoles numériques. . .). Le type et le nombre de capteurs formant ces systèmes varient selon l'application. Divers travaux ont été déjà menés sur la thématique du géo-référencement direct :

- Cartographie mobile temps réel : utilisant un véhicule équipé d'un système de positionnement à base d'INS/GPS et de plusieurs capteurs images pour une fin de cartographie numérique. Les systèmes terrestres sont détaillés dans le tableau 3.2. Il existe aussi des systèmes aéroportés (Schwarz and El-Sheimy, 2004)
- Navigation autonome en temps réel : les systèmes les plus performants ont été exposés pendant le concours *DARPA Grand Challenge*, nous pouvons citer les travaux de Whittaker et Nasto dans (Whittaker and Nastro, 2006).

Divers systèmes matériels de géo-référencement direct ont mûri. Deux des références mondiales sont : POS LV (Artes and Nastro, 2005) le produit d'Applanix [4] basé sur les capteurs (GPS-RTK [5] et INS), et le système *LANDINS* d'IXSEA aussi intégrant aussi le même noyau de capteurs.

Une étude de coût des systèmes de positionnement est présentée au chapitre 3.

4. http ://www.applanix.com
5. RTK : Real-Time Kinematic (cinématique temps réel).

B.2.2 Géo-référencement indirect

Le Géo-référencement indirect consiste à extraire différents attributs ou primitives d'une scène selon une géométrie d'acquisition [6] de donnée. En effet l'image est utilisée comme le sous-système principal de détermination de la localisation et de l'orientation relative et absolue dans un système référenciel global.

On constate deux types de primitives :

- Les primitives planes tels que les MNTs, les MNFs, les ortho-photos, les ortho-façades. . . ; celles-ci présentent une grande densité qui fournit de l'information répartie en tout point de la scène, ce qui permettrait une sursegmentation à partir de ces primitives.
- Les primitives linéaires tel que les POI [7], les attributs géométriques (des contours, des segments . . .), point de fuite. . . Celles-ci forment une information peu dense mais structurante et précise, et facilitent la délimitation d'orientations principales dans la scène.

L'extraction de ces deux types de primitives, permet le géo-référencement indirect de la scène en question, par des techniques combinant les différents atouts de chaque primitive.

Un exemple de géo-référencement direct et indirect de données aériennes est exposé dans la figure B.6.

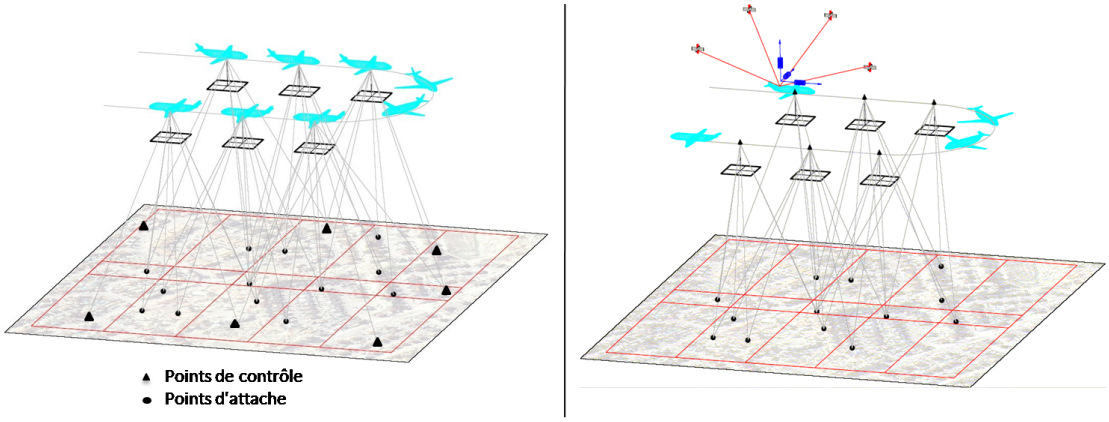


FIGURE B.6 – (à gauche) Géo-référencement indirect. (à droite) Géo-référencement direct *(Source des illustrations : http ://dprg.geomatics.ucalgary.ca).*

6. La géométrie d'acquisition : monoscopie, stéréoscopie, multiscopie, données laser.
7. POI : (Point Of Interest) Point d'intérêt

Annexe C

Acquisitions *Magny-Les-Hameaux*

Nous présentons dans cette annexe les acquisitions que nous avons effectué à la ville de *Magny-Les-Hameaux* en utilisant *Lara3D*.

C.1 Cadre des expérimentations

Dans le cadre d'un partenariat entre notre laboratoire et une société de géomètres experts, nous avons saisi l'occasion pour évaluer notre système d'acquisition en terme de performance de robustesse et de précision, à l'aide de l'assistance des gens du métier.

C.1.1 Le métier des géomètres experts

Le travail du géomètre recouvre une série d'activités complémentaires mais étendues, allant de la topographie sous toutes ses formes à la cartographie (consistant à représenter au mieux la topographie sous forme de cartes), et à tous les aspects techniques et juridiques de la définition de la propriété foncière.

C.1.2 Sites d'acquisition

Pour évaluer notre système nous fûmes amenés à faire des acquisitions de données, au sud de *Paris* dans la ville de *Magny-les-Hameaux*. Pour cela, deux itinéraires présentant des caractéristiques différentes ont été judicieusement choisis :

- Le premier itinéraire se situant dans une zone urbaine. (cf. Figure C.1).
- Le deuxième itinéraire se situant dans une zone rurale. (cf. Figure C.2).

C.1.3 Dispositif matériel utilisé

Nous avons effectué cinq campagnes d'acquisition entre décembre 2006 et avril 2007, toutes réalisées avec la plateforme *Lara3D*.

Plusieurs combinaisons de capteurs ont été testées, afin d'évaluer les performances des uns par rapport au autres. La figure C.3 résume la disposition des différents capteurs.

FIGURE C.1 – Ortho-photo géo-référencée de l'itinéraire de la zone urbaine dans la ville de *Magny-les-Hameaux* : 1er itinéraire. Les positions en Lambert I : début (581 368.93, 113 711.63, 163.51) et fin (581 708.78 113 743.32 163.72). Longueur itinéraire 310m.

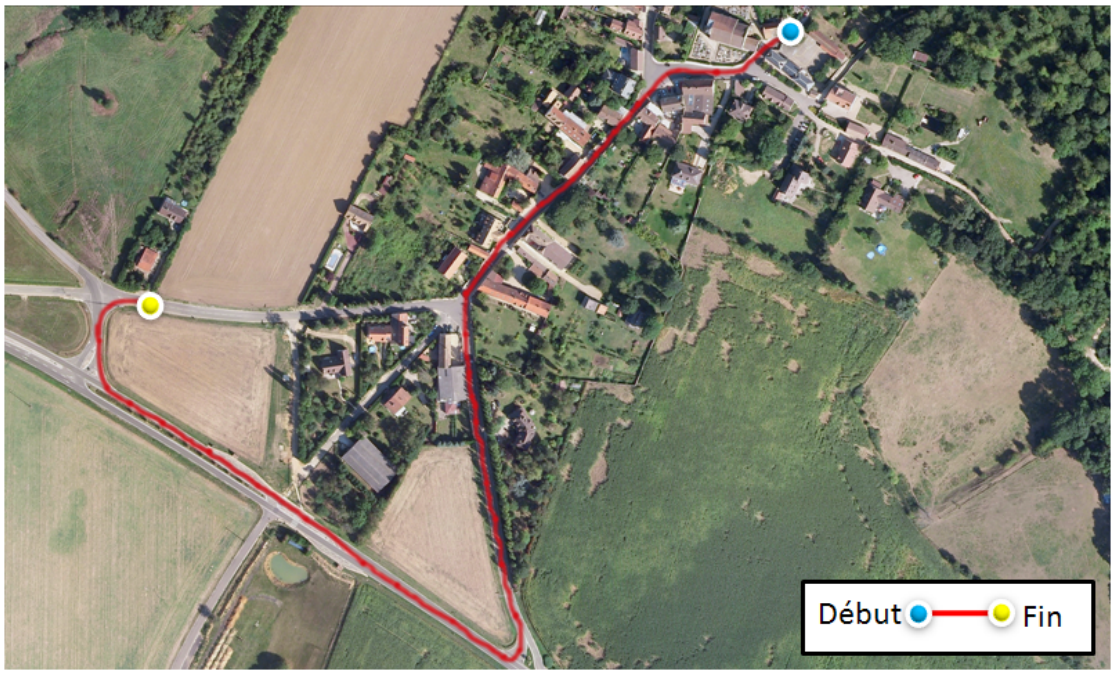


FIGURE C.2 – Ortho-photo géo-référencée de l'itinéraire de la zone rurale dans la ville de *Magny-les-Hameaux* : 2ème itinéraire. Les positions en Lambert I : début (5579 812.47, 115 941.23, 153.03) et fin (579 407.28, 115 815.35, 159.54). Longueur itinéraire 450m.

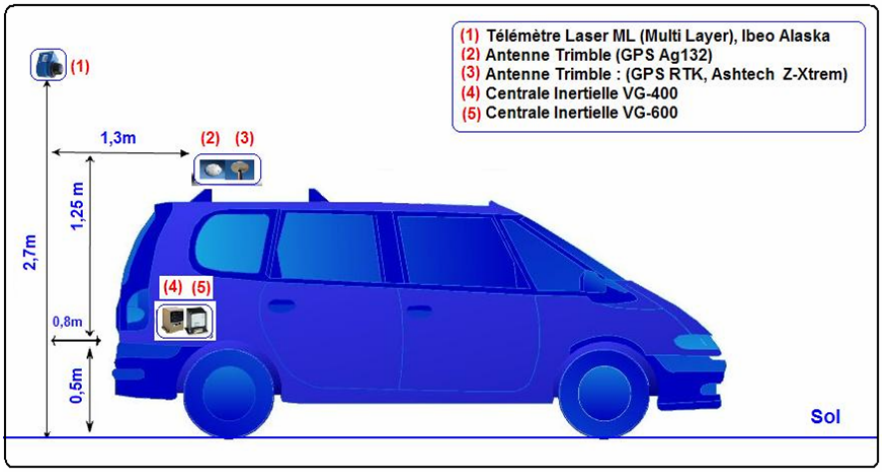


FIGURE C.3 – Disposition des différents capteurs utilisés pendant les campagnes d'acquisition.

C.2 Résultats

C.2.1 Résultat de la trajectoire

Les premiers résultats de trajectoires sont exposés dans la figure C.4 (gauche) pour le premier trajet, et la figure C.4 (droite) pour le deuxième itinéraire.

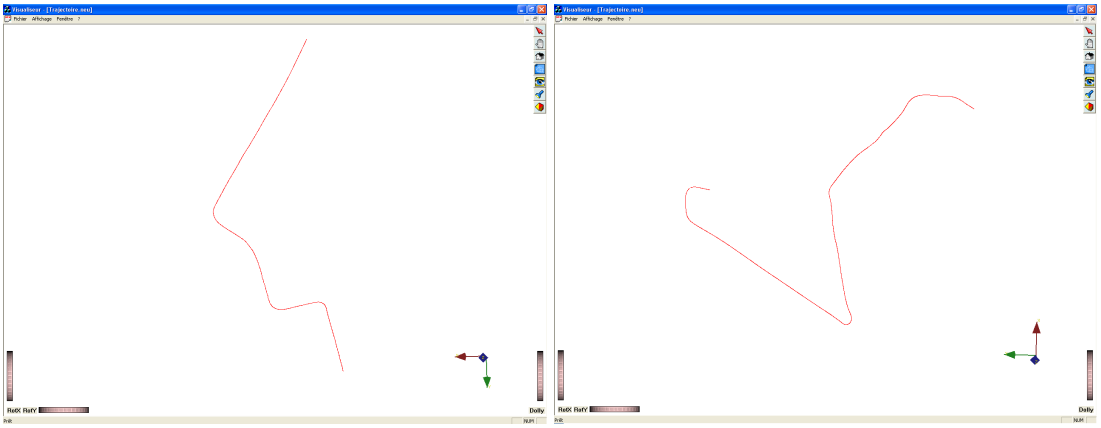


FIGURE C.4 – (à gauche) Trajectoire résultante du premier itinéraire. (à droite) Trajectoire résultante du deuxième itinéraire.

C.2.2 Évaluations réalisées par le cabinet de géomètres

Nous avons eu des échanges avec les experts du métier de la société de géomètres afin d'évaluer notre système d'acquisition.

La figure C.5 illustre une évaluation de la trajectoire obtenue lors de la numérisation du première itinéraire. Nous résumons les remarques reçues en ces points essentiels :

1. Le géo-référencement n'est pas correct, il y a un décalage de 5.50 m environ en coordonnées planimétriques (axes X et Y).
2. La données altimétrique (axe Z) n'est pas fiable et l'erreur est de plusieurs mètres.
3. La distance entre les points de la trajectoire n'étant pas uniforme, cela démontre un certain aléatoire lors des captures.
4. La précision du système, métrique, est loin des attentes des géomètres experts qui requièrent une précision centimétrique.

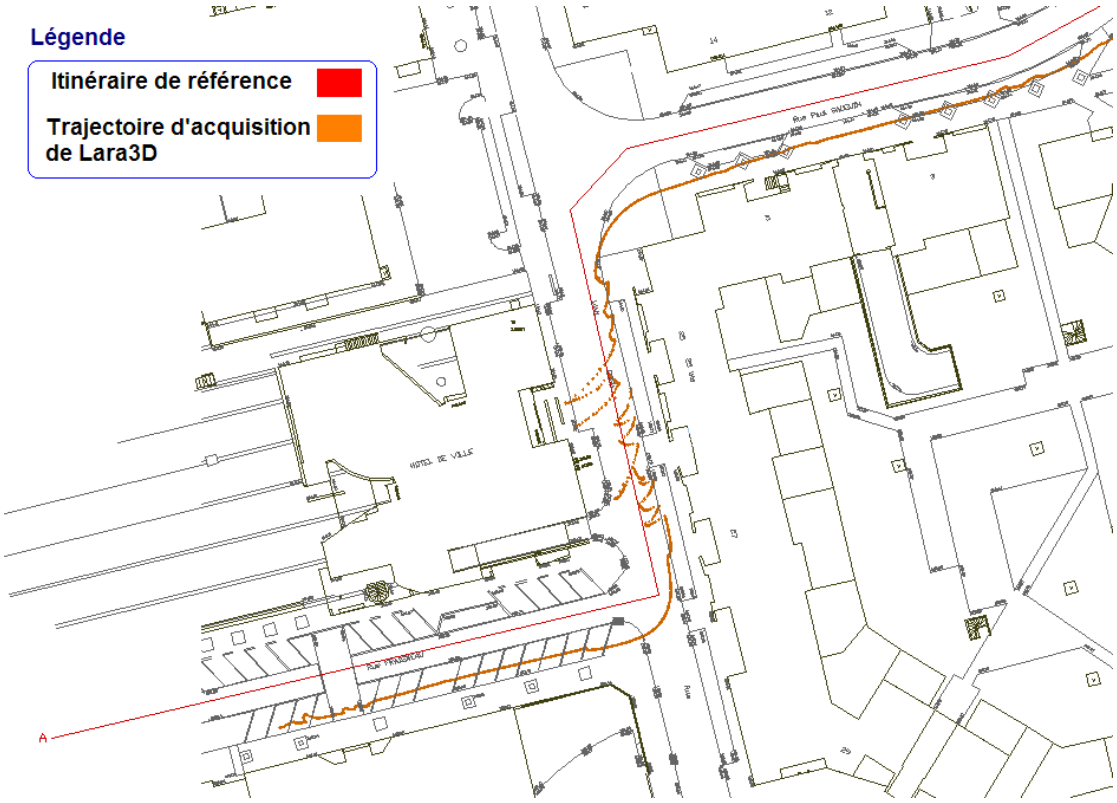


FIGURE C.5 – Résultat d'un recalage entre l'itinéraire d'origine et la trajectoire obtenue lors de la première campagne d'acquisition sur le premier parcours de la ville de *Magny-les-Hameaux*.

Annexe D

Acquisitions *Paris 5ème*

Nous présentons dans cette annexe les détails des acquisitions que nous avons effectuées dans la zone de test à *Paris 5ème*, en utilisant *Lara3D*.

D.1 Cadre des expérimentations

Le travail expérimental a été réalisé dans le cadre du projet TerraNumerica au lot réservé aux technologies d'acquisition (cf.Figure 1.2). La première zone de test fixée par les partenaires est celle de *Paris 5ème* autour du *Panthéon*.

D.2 Détails des acquisitions

D.2.1 Planification des itinéraires

Nous avons mené plusieurs campagnes d'acquisitions sur cette zone (de 2006 à 2009) utilisant la plateforme *Lara3D*. La planification des itinéraires acquis a été réalisée par tronçons pour les raisons déjà détaillées dans la section 4.3.2. La figure D.1 illustre la répartition de l'ensemble des tronçons acquis. Le tableau D.1 donne les détails des différents tronçons numérisés. La longueur global des itinéraires est de l'ordre de 2.6km pour un nombre globale de points 3D avoisinant les 9 millions, dont seulement 5millions seront considérés dans le cadre de notre étude.

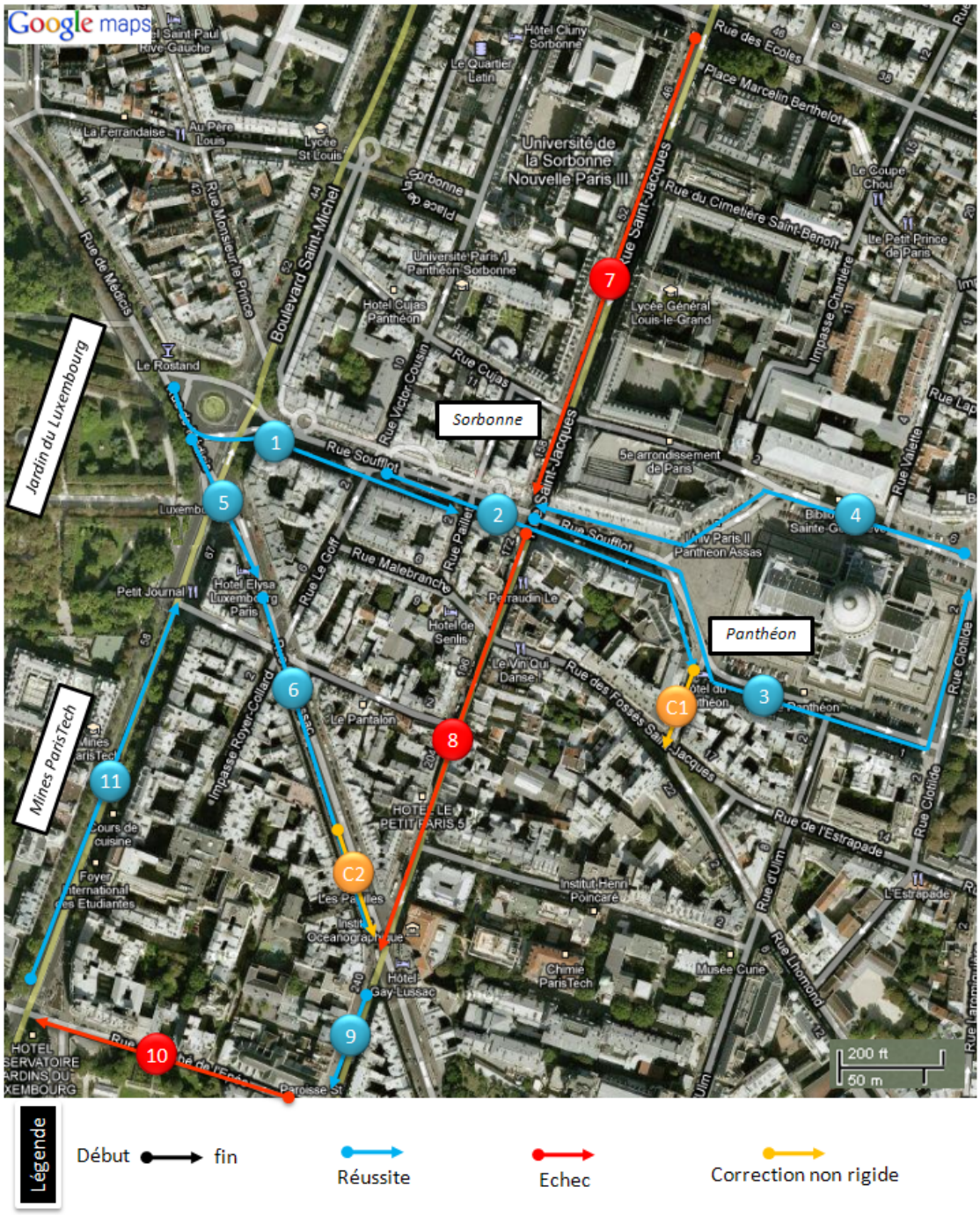


FIGURE D.1 – Tronçons d'acquisition de la zone de test à *Paris 5ème*.

N°	Nom tronçon	Point départ (WGS-84)	Point arrivée (WGS-84)	Longueur
1	Soufflot_P1	0.852546, 0.0408501, 96.70	0.852541, 0.0408838, 97.22	220m
2	Soufflot_P2	0.852541, 0.0408844, 94.00	0.852522, 0.0409205, 87.68	270m
3	SoufflotP2_Pantheon	0.852542, 0.0408898, 246.80	0.852527, 0.040964, 97.79	450m
4	Pantheon_SoufflotP2	0.852533, 0.0409681, 99.54	0.852536, 0.0409092, 99.56	290m
5	Gay_Lussac_P1	0.85255, 0.0408438, 94.70	0.852533, 0.0408556, 96.18	150m
6	Gay_Lussac_P2	0.852524, 0.040860, 61.18	0.8524926, 0.0408885, 167.02	220m
7	Saint_Jacques_P1	Non disponible	Non disponible	200m
8	Saint_Jacques_P2	0.852544, 0.0409021, 48.82	0.852481, 0.040868, 55.86	260m
9	Saint_Jacques_Eglise	0.8524851, 0.0408740, 113.44	0.852472, 0.040864, 54.50	90m
10	Abbe_de_lEpee	0.85248, 0.0408744, 22.82	0.852522, 0.0408412, 54.57	200m
11	BD_Saint_Michel	0.8525312, 0.0408438, 97.41	Non disponible	270m
C1	Clotaire	Non disponible	0.852522, 0.0409205, 87.68	56m
C2	GayLussac_Fin	Non disponible	0.8524926, 0.0408885, 167.02	51m

TABLE D.1: Caractérisation des tronçons présentés sur la figure D.1. La longueur totale des itinéraires acquis est de l'ordre de 2.6 km

D.2.2 Configurations matérielle et logicielle

Les acquisitions ont été réalisées avec différentes configurations matérielles. Le tableau D.2 résume les différents capteurs utilisés.

Les acquisitions ont été réalisées au cours de la journée pour obtenir des données de texture issues des caméras. La planification des périodes d'acquisition est effectuée en fonction de trois paramètres :

- Le choix de la meilleur constellation GPS, ceci étant réalisé grâce aux prévisions observées par le logiciel *Planning* de *Trimble* [1] d'autre logiciels peuvent être utilisés (cf. site [2]) ;
- Les prévisions atmosphériques favorables ;
- Les prévisions de trafics favorables.

Pour les tentatives d'acquisition avec le GPS RTK, la base de correction est placée à l'*INRIA Rocquencourt* ayant une garantie de signal correct d'un diamètre de 40 km. La distance entre la base de référence et la zone acquise varie de 17 à 19 km.

Le système est orchestré par le logiciel *RT-Maps*. Nous avons élaboré plusieurs réalisations de composants spécifiques pour le fonctionnement des capteurs ainsi que pour les comportements algorithmiques.

Pour la fonction de géo-référencement (*Lambert II* dans le cas de la zone *Paris 5ème*) nous utilisons la bibliothèque *PROJ.4* [3] pour les projections cartographiques.

1. *Trimble Planning Software* : http ://www.trimble.com/planningsoftware_ts.asp.
2. http ://www.obsat.com/logiciel.htm
3. http ://proj.osgeo.org

Télémètres Laser					
Fabriquant	**Référence**	**Portée**	**Champ**	**Cadence**	**Aspect**
Ibeo	LD SDA	256 m	270°	10hz	
Ibeo	LD multi-layer	128 m	270°	10 à 40 Hz	
Sick	LMS221	80 m	180°	10 à 40 Hz	

Centrales Inertielles					
Fabriquant	**Référence**	**Heading : Précision (°)**	**Attitude dynamique Roulis, Tangage : Précision (°)**	**Cadence**	**Aspect**
Crossbow	VG 600	< 2.0 °	<0.25°	84 Hz	
Crossbow	VG 400	< 1.0 °	< 0.1°	> 75 Hz	
Crossbow	VG 440	< 1.0°	<0.2°	25 Hz	

GPS					
Fabriquant	**Référence**	**RTK**	**DGPS**	**Cadence**	**Aspect**
Trimble	AG 132	--	Oui	10hz	
Trimble	AG 332	--	Oui	10hz	
Ashtech	Z-Xtreme	Oui	Oui	10-20hz	

Caméras					
Fabriquant	Référence	Résolution (HxV)	Débit (RGB)	Taux de transfert	Aspect
Avt Pike	F-145C	1388 x 1038	15 Hz	100-800 Mbit/s	
Marlin	F-046B	780 x 582	21 Hz	100-400 Mbit/s	

TABLE D.2: Liste des capteurs utilisés dans les acquisitions de la zone de *Paris 5ème*.

D.3 Résultats

D.3.1 Résultat global couleur sur la zone

La figure D.2 représente le résultat global des acquisitions couleur effectuées autour du *Panthéon* en couleur des acquisitions, après l'application du recalage.

D.3.2 Exemple d'échec d'acquisition

La figure D.3 illustre le résultat d'une acquisition en Mars 2009 sur la rue de *l'Abbé-de-l'Épée*. Le résultat est inexploitable du fait de la géométrie très étroite des bâtiments de la rue numérisée.

D.3.3 Exemple de résultat nécessitant une correction non rigide

La figure D.4 illustre le résultat d'une acquisition effectuées en Mars 2009 dans la rue *Clotaire* à *Paris 5ème*. La géométrie présente une anomalie qui peut être supprimée par une correction non rigide.

D.3.4 Problème de l'aspect temporel des acquisitions

Les conditions d'acquisition étant variables et l'environnement urbain étant dynamique, les résultats de deux acquisitions à deux moments différents d'un même tronçon peuvent afficher des différence et avoir des géométries non uniformes. Ceci présente une source d'anomalie dans les données traitées. La figure D.5 illustre un cas de différence de géométrie due à des travaux effectuées sur la rue *Soufflot*.

D.4 Remerciements

Nous tenons à remercier le *LIVIC*, l'équipe de *IMARA* [4] de l'*INRIA* et *Intempora* pour les capteurs prêtés ainsi que toutes les aides de configurations matérielles ou logicielles qu'ils nous ont apporté.

4. Informatique, Mathématiques et Automatique pour la Route Automatisée

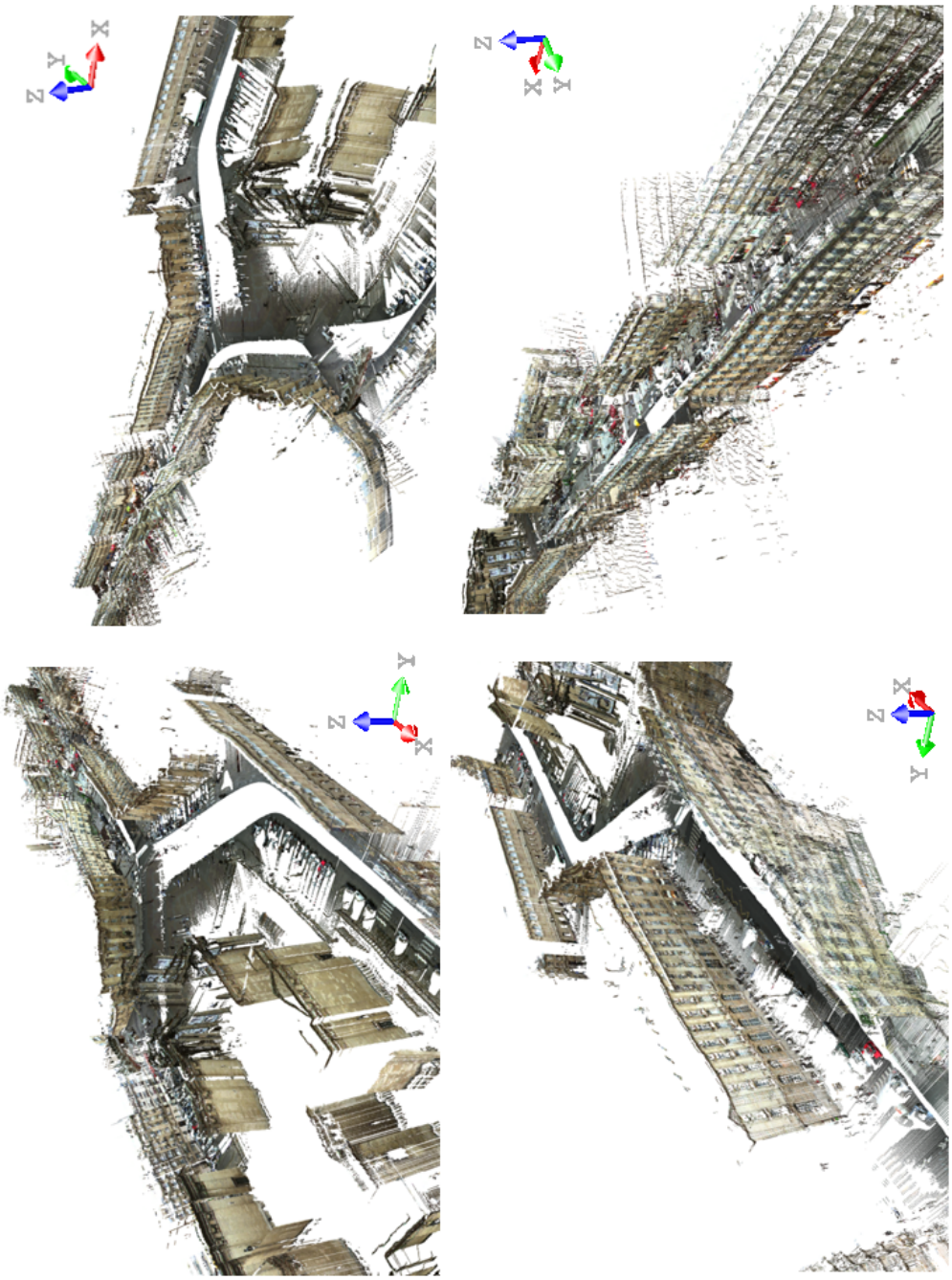


FIGURE D.2 – Différents angles de vue sur les résultats d'acquisition autour du *Panthéon* après application du recalage.

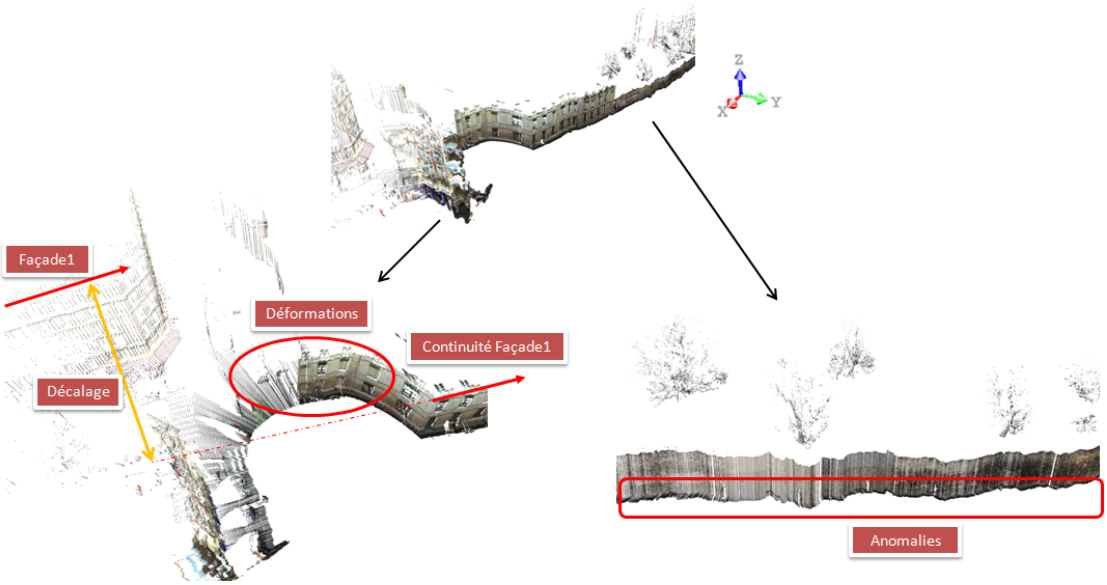


FIGURE D.3 – Anomalies difficilement corrigibles sur la rue de *l'Abbé-de-l'Épée*.

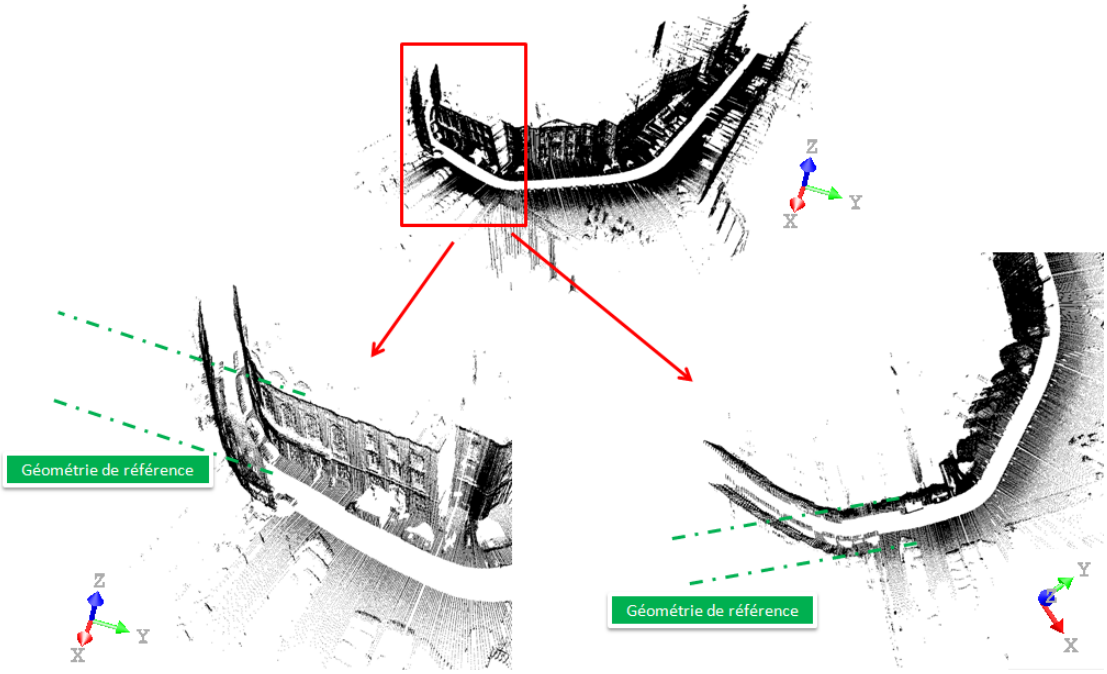


FIGURE D.4 – Rue *Clotaire*. Cas de déformation nécessitant une correction par recalage non rigide.

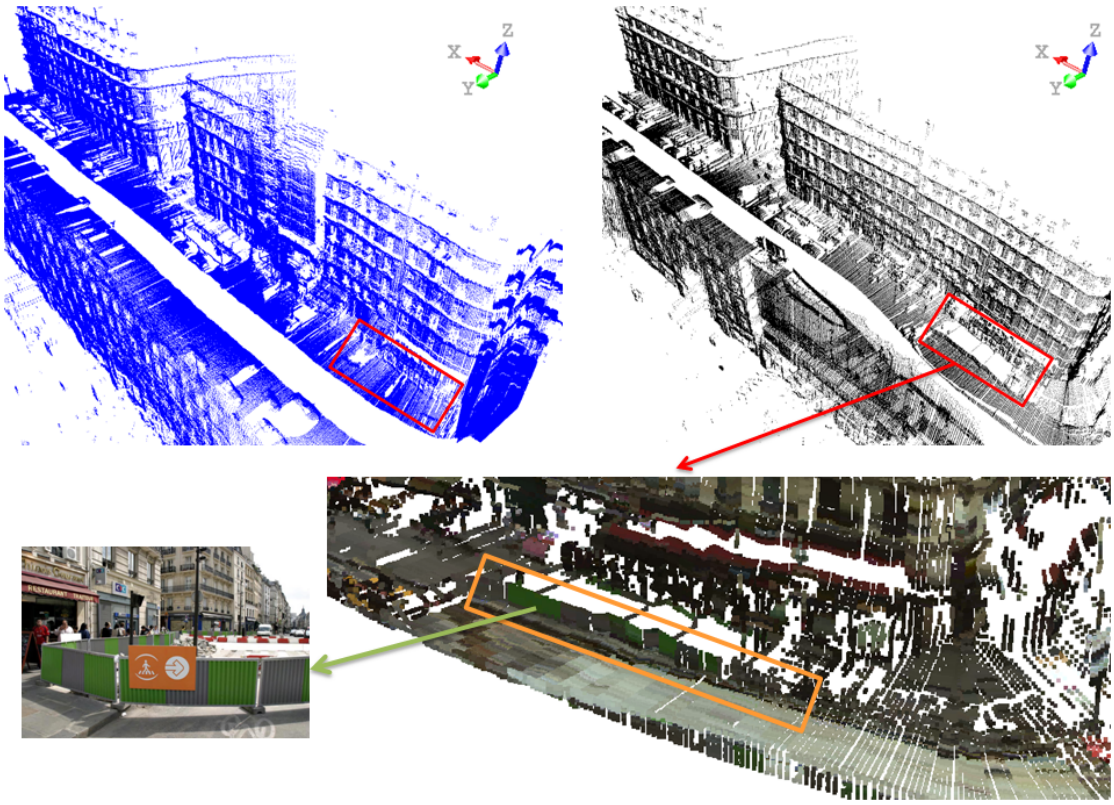


FIGURE D.5 – Rue *Soufflot* portion 1. (En haut à gauche) résultat d'acquisition (Octobre 2008). (en haut à droite) résultat d'acquisition (Mars 2009). (En bas) Gros plan sur la différence remarquée dans les géométries des deux tronçons résultants des deux acquisitions, celle-ci étant dû à des travaux de la voie publique effectués courant Mars 2009.

Annexe E

Acquisitions *INRIA Rocquencourt*

Nous présentons dans cette annexe les détails des acquisitions que nous avons effectué dans la zone de test à l'*INRIA Rocquencourt* en utilisant *Lara3D*.

E.1 Cadre des expérimentations

Les expérimentation ont été réalisées en Décembre 2008. L'objectif de ces acquisitions réalisées dans un cadre interne à l'équipe MMS, est de tester l'acquisition de nuit avec le MMS *Lara3D*.

E.2 Site d'acquisition

L'acquisition a été effectuée sur le site de l'*INRIA Rocquencourt*, où nous avons planifié trois itinéraires d'acquisition de façon à enrichir les scénarios de recalage tracés. Les illustrations de ces itinéraires ont été présentées sur la figure 7.2.

E.3 Configuration matérielle et logicielle

L'acquisition a été réalisée avec la configuration matérielle décrite dans le tableau E.1. La planification a été réalisée de nuit en prenant en compte les contraintes suivantes :

- Le choix de la meilleur constellation GPS, réalisé grâce aux prévisions observées par le logiciel *Planning* de *Trimble* ;
- Les prévisions atmosphériques favorables.

Télémètre Laser	Centrale Inertielle	GPS
Ibeo, LD SDA	Crossbow, VG600	Ashtech, Z-Xtreme

TABLE E.1: Liste des capteurs utilisés lors des acquisitions de la zone de l'*INRIA Rocquencourt*.

E.4 Résultat global de l'acquisition

La figure E.1 illustre le résultat global de l'acquisition après la réalisation des traitements de recalage.

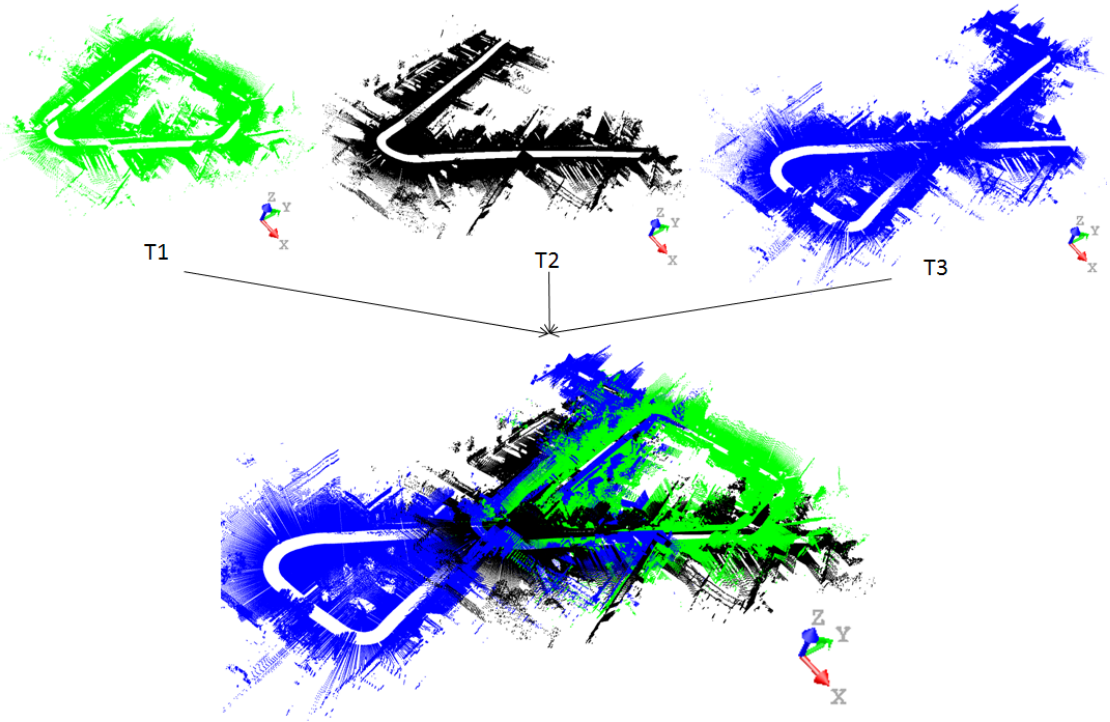


FIGURE E.1 – *INRIA Rocquencourt*. (en haut) les trois tronçons acquis. (en bas) Résultat global de l'acquisition après l'application du traitement du recalage.

Annexe F

Acquisitions scanner Trimble GX sur Lara3D

Nous présentons dans cette annexe les acquisitions effectuées sur le véhicule *Lara3D* avec embarquement d'un scanner fixe Trimble GX.

F.1 Cadre des expérimentations

Les acquisitions ont été effectuées en collaboration avec l'équipe R&D de *Mensi Trimle* et par la contribution de Hyun-Jae Yoo.

Nous avons fait l'acquisition du côté impair de la rue *Soufflot* à *Paris 5ème* (pour comparer avec les données acquises par le scanner VX dans le cadre de TerraNumerica) (cf. Figure F.1). Dans cette zone, il y a deux carrefours qui permettent de voir la complétude.

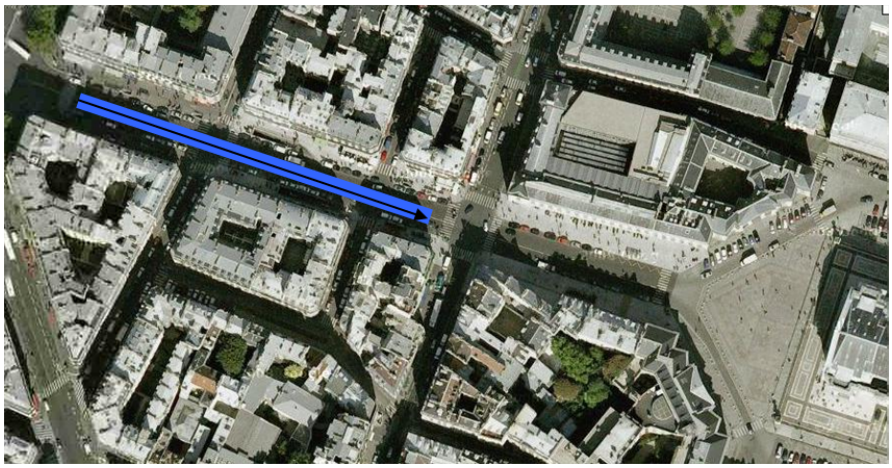


Figure F.1 – Zone d'acquisition sur la rue *Soufflot* à *Paris 5ème*.

F.2 Configuration matérielle et logicielle

F.2.1 Configuration matérielle

Les acquisitions présentées dans ce annexe ont été réalisées par le MMS (Mobile Mapping System) Lara3D (cf. Figure F.2). La configuration matérielle utilisée est la suivante : Capteurs de perception : Télémètre Laser GX, à une fréquence d'acquisition de 10 Hz avec 118 points levés par tour. Capteurs de localisation : GPS AG332 avec correction différentielle, Centrale inertielle VG600.

FIGURE F.2 – Montage du scanner laser 3D *Trimble GX* sur le véhicule *Lara3D*.

F.2.2 Configuration logicielle

Le système est orchestré via le logiciel RT-Maps. Nous avons développé un nouveau composant pour le géo référencement des points 3D issus du scanner GX (cf. Figure F.3).

F.2.3 Calibration du télémètre avec la POS

Nous avons fait l'acquisition de données sur la rue Soufflot avec différents angles de lacet (θ) du scanner GX. Nous supposons que la centrale inertielle et le scanner GX sont parfaitement sur le même plan horizontal (X,Y). La figure F.4 illustre la transformation sur le plan (X,Y) entre le repère GX et le repère R_{INS} de l'intégration INS/GPS .

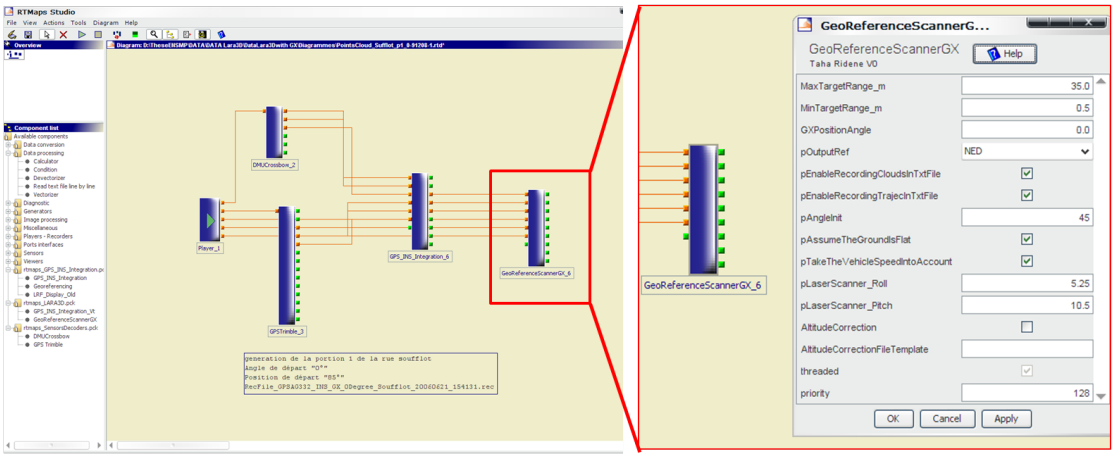


FIGURE F.3 – Nouveau composant de géo-référencement, spécifique au laser *Trimble GX*.

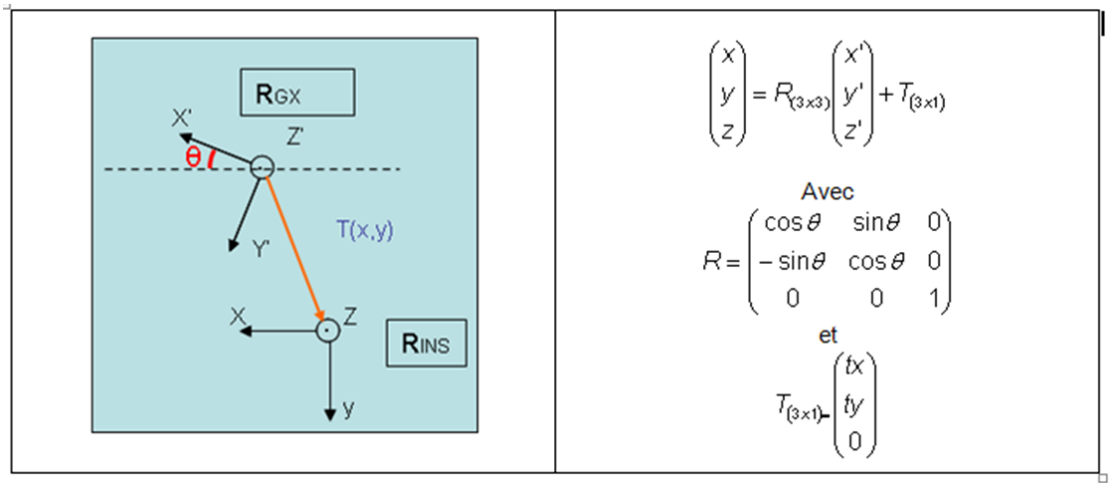


FIGURE F.4 – la transformation sur le plan (X,Y) entre le repère GX et le repère R_{INS} de l'intégration INS/GPS.

F.3 Résultats des acquisitions

F.3.1 Acquisition avec θ = 0°

C'est le cas d'acquisition correspondant à une numérisation des plans de coupe laser, perpendiculaires à la trajectoire du véhicule.

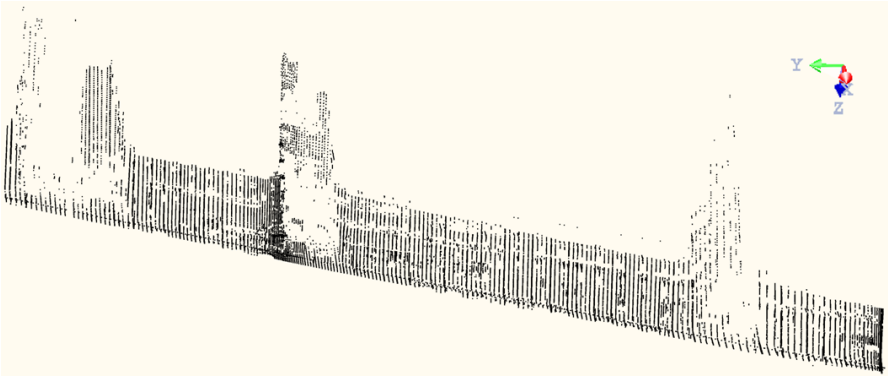


FIGURE F.5 – Façade droite de la rue *Soufflot* à *Paris 5ème* par *Lara3D* avec *scanner GX* et θ = 0°.

F.3.2 Acquisition avec θ = 30°

C'est le cas d'acquisition correspondant à une numérisation des plans de coupe laser perpendiculaires à la trajectoire du véhicule.

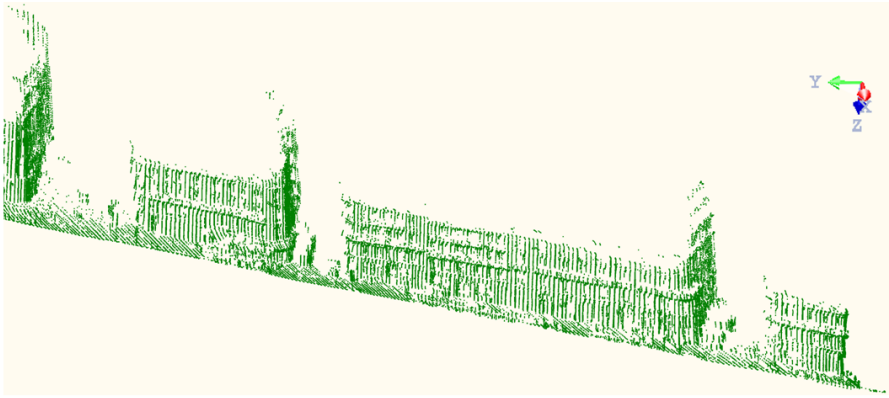


FIGURE F.6 – Façade droite de la rue *Soufflot* à *Paris 5ème* par *Lara3D* avec *scanner GX* et θ = 30°.

F.3.3 Acquisition avec θ = 45°

C'est le cas d'acquisition correspondant à une numérisation des plans de coupe laser perpendiculaires à la trajectoire du véhicule.

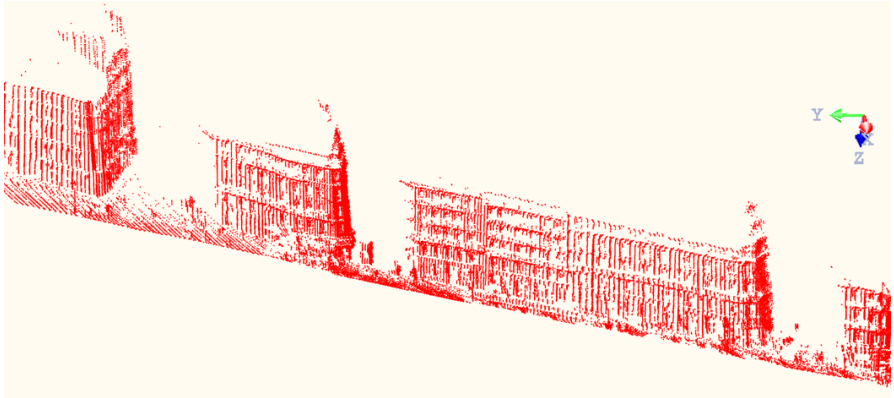


FIGURE F.7 – Façade droite de la rue *Soufflot* à *Paris 5ème* par *Lara3D* avec *scanner GX* et θ = 45°.

F.3.4 Acquisition avec θ = -30°

C'est le cas d'acquisition correspondant à une numérisation des plans de coupe laser perpendiculaires à la trajectoire du véhicule.

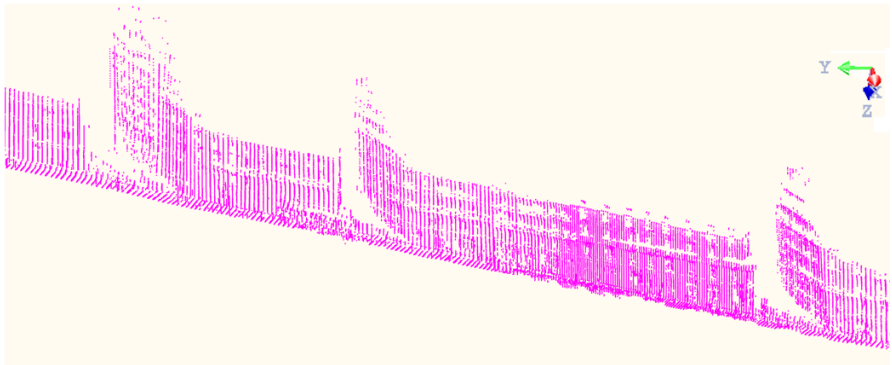


FIGURE F.8 – Façade droite de la rue *Soufflot* à *Paris 5ème* par *Lara3D* avec *scanner GX* et θ = -30°.

F.3.5 Acquisition avec θ = -45°

C'est le cas d'acquisition correspondant à une numérisation des plans de coupe laser perpendiculaires à la trajectoire du véhicule.

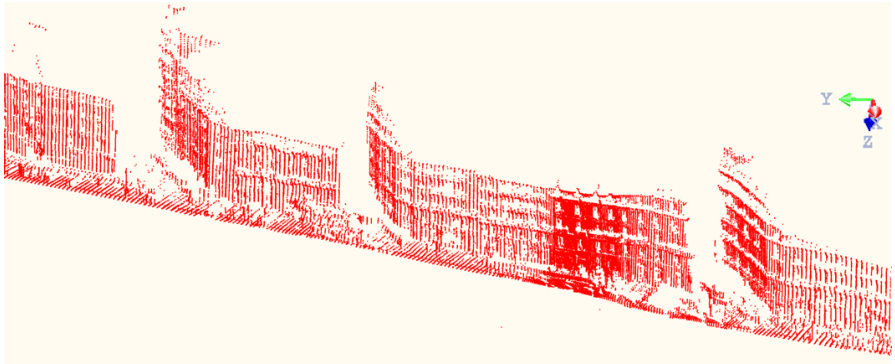


FIGURE F.9 – Façade droite de la rue *Soufflot* à *Paris 5ème* par *Lara3D* avec *scanner GX* et θ = -45°.

F.4 Bilan des acquisitions

F.4.1 Orientation de la géométrie des données

Les acquisitions (0°,30°, 45°) ont été générées avec une géométrie relativement correcte. Les acquisitions (-35° et 45°) ont des géométries en biais qui sont à corriger.

F.4.2 Couverture des nuages de points

Nous remarquons que la couverture des nuages de points dans les 5 configurations (0°, +/-30°, +/-45°) présente une complémentarité : les zones cachées ou masquées dans une configuration sont couvertes et complétées par les données d'une deuxième configuration. La figure F.10 illustre un cas de complémentarité entre les configurations 0° et 30°.

F.4.3 Géo-référencement des données

Nous remarquons des problèmes au niveau du géo référencement des données, qui est dû essentiellement à l'utilisation d'un GPS sans correction différentielle (cf. Figure F.10 et F.11).

F.4.4 Validation de la consolidation

Nous avons remarqué à partir de cette expérimentation que l'intégration de plusieurs résultats d'acquisition selon différents angles de lacet augmente la densité du

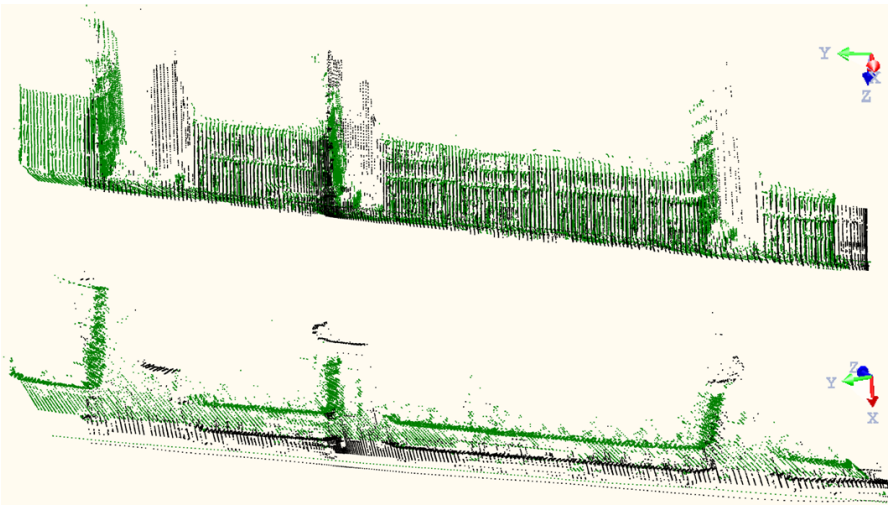


FIGURE F.10 – (En noir) les données obtenues avec $\theta = 0°$ et (en vert) $\theta = 30°$. Nous remarquons la complémentarité de ces deux données, cela est observable au niveau des façades perpendiculaires à la trajectoire du véhicule. Aussi nous observons un offset lié au géo-référencement des deux nuages de points.

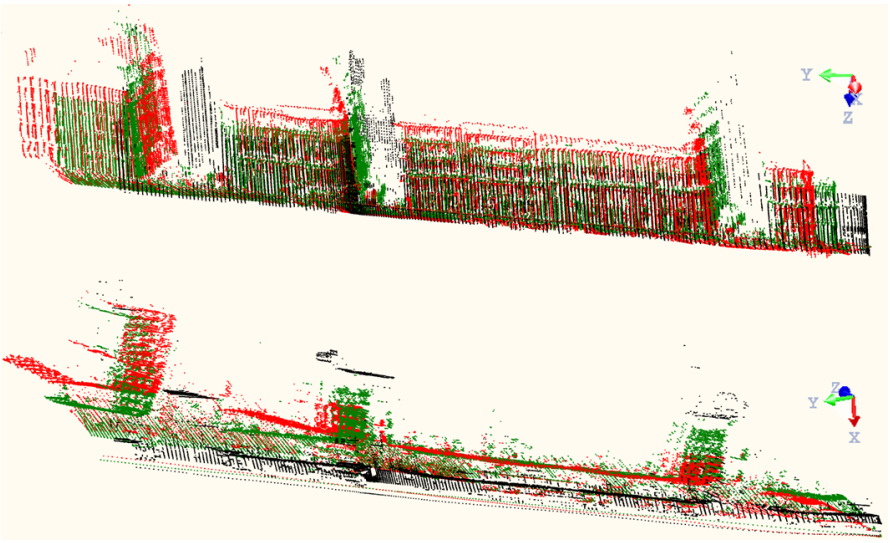


FIGURE F.11 – (En noir) les données obtenues avec $\theta = 0°$, (en vert) $\theta = 30°$ et en rouge $\theta = 45°$. Nous remarquons la complémentarité de ces deux données, cela est observable au niveau des façades perpendiculaires à la trajectoire du véhicule. Aussi nous observons des offsets liés au géo référencement des trois nuages de points.

nuage de points obtenu. Nous remarquons aussi que cela consolide le nuage de points par rapport aux problèmes d'occultations et de surfaces cachées.

F.5 Tests de vibration

Nous avons effectué des tests de vibration. Pour cela un accéléromètre a été placé à l'intérieur du télémètre laser *Trimble GX* à la place de toutes les parties de déflexion et d'EDM [1] (cf. FigureF.12). Cet accéléromètre permet de récupérer les valeurs de choc (vibration) lors du mouvement du véhicule.

FIGURE F.12 – Télémètre laser *Trimble GX* avec accéléromètre.

Nous avons monté le télémètre sur la plateforme *Lara3D* et conduit en effectuant des accélérations et des décélérations.

Les accélérations résultantes sur les trois axes au cours du mouvement du véhicule ont été analysés. L'accélération tri-axiale maximale obtenue est de 2.22G. Une telle vibration peut évidemment entraîner une baisse de qualité dans la précision des données et devrait être compensée par un post-traitement.

1. Electronic Distance Measuring.

Annexe G

Recalage de nuage de points 3D sur ortho-photo

G.1 Recalage entre ortho-photo géo référencée et trajectoire de *Lara3D*

En pratique une ortho-photo géo référencée est couplée avec un fichier de géo-référencement. La figure G.1 illustre le géo-référencement d'une ortho-photo par le biais d'un fichier « .tfw ».

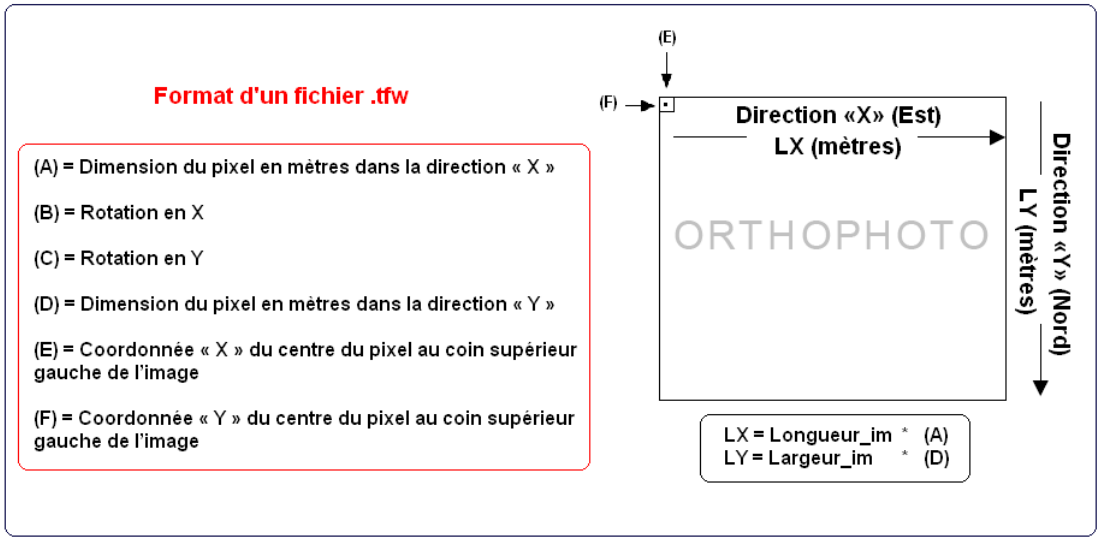


FIGURE G.1 – Ortho-photo géo-référencée par un fichier .tfw

Le recalage est réalisé par une transformation de coordonnées selon l'équation G.4.

$$\begin{pmatrix} X_{lamb} \\ Y_{lamb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (A) & (B) \\ (C) & (D) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_{pix} \\ Y_{pix} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} (E) \\ (F) \end{pmatrix} \tag{G.1}$$

avec (X_{lamb}, Y_{lamb}) les coordonnées en Lambert (Flottants) et (X_{pix}, Y_{pix}) les coordonnées image (Entiers). La matrice étant inversible cela donne :

$$\begin{pmatrix} X_{pix} \\ Y_{pix} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (A) & (B) \\ (C) & (D) \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} X_{lamb} - (E) \\ Y_{lamb} - (F) \end{pmatrix} \tag{G.2}$$

Dans notre cas particulier la matrice vaut :

$$\begin{pmatrix} (A) & 0 \\ 0 & (D) \end{pmatrix} \tag{G.3}$$

Ce qui donne :

$$\begin{pmatrix} X_{pix} \\ Y_{pix} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/(A) & 0 \\ 0 & 1/(D) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_{lamb} - (E) \\ Y_{lamb} - (F) \end{pmatrix} \tag{G.4}$$

G.2 Résultat de recalage de nuage de points 3D et ortho-photo

Nous avons développé une première version d'un visualiseur 3D (OpenGL), pour le recalage des nuages de points 3D avec des ortho-photos géo-référencées.

La figure G.2 présente une illustration de recalage entre le nuage de points 3D, obtenu lors des campagnes d'acquisition et l'ortho-photo géo-référencée sur la zone de *Magny-Les-Hameaux*.

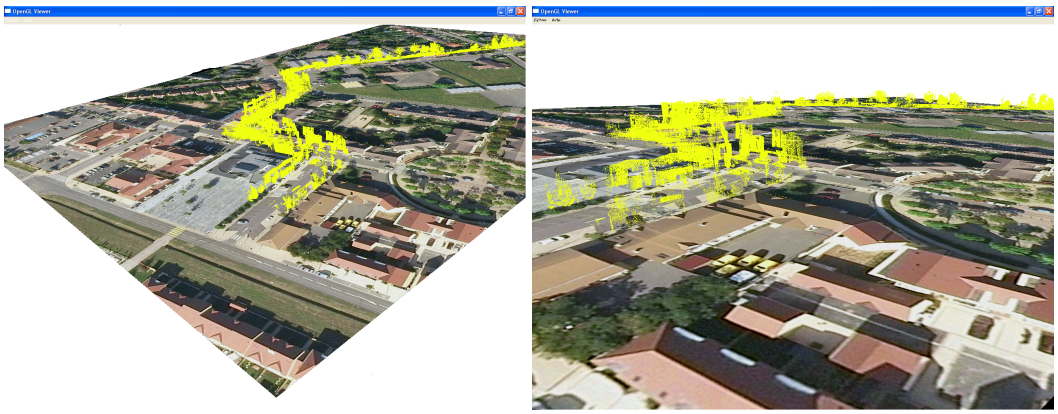


FIGURE G.2 – Résultat d'un recalage entre ortho-photo aérienne et nuage de points 3D, pour le premier parcours de la ville de *Magny-les-Hameaux*

Annexe H

Implémentations algorithmiques

Algorithme 1 Pseudo code de l'algorithme ICP-SA

```
1  Début
2      { Pré-traitement }
3      Décimation des nuages de points pCL1 et pCL2
4      { Phases préliminaires }
5      Construction KD-Tree pour pCL1
6      Calcul des normales pour pCL1 et pCL2
7      { Initialisation }
8      k ←0; Converge ←Faux; Arrêt←Faux; th_ad←s_init; ϵ←erreur_init;
   k_max←k_initmax; Erreur←0.0
9      { Phase itérative }
10     TantQue Arrêt = Faux Faire
11         PourChaque point p_j De pCL2 Faire
12             Recherche du p.p.v p_i avec d(p_i,p_j) < th_ad
13              /* utilisation du KD-tree */
14             Si formation de la paire (p_i,p_j) Alors
15                 w_i = Vrai
16             Sinon
17                 w_i = Faux
18         Rejet des paires dupliquées /* cf. Figure 6.8 */
19         Mise à jour des poids w_n
20         Estimation de T_k(R_k(3,3), t_k(3,1)) pour l'ensemble des paires de
   mises en correspondance
21         Application de T_k sur pCL2
22         Calcul de la moyenne μ_k et de l'écart type σ_k de D(pCL1,pCL2)
23         { Phase des tests d'arrêt et de convergence }
24         Si σ_k<ϵ OU k = k_max Alors
25             Arrêt ←Vrai
26             Si σ_k<ϵ Alors
27                 Converge ←Vrai
28                 T_op ←T_k ET Erreur←σ_k
29         Sinon
30             th_ad ←μ_k + σ_k ET k ←k+1
31 Fin
```

Sorties : T_{op} ; *Converge* ; Erreur.

Entrées : pCL_1 ; pCL_2 ; $nbpts_1$; $nbpts_2$; s_{init} ; $erreur_{init}$; $k_{initmax}$.
/*nuages de points *modèle* et *requête* ; nombre de points des deux nuages ; valeurs d'initialisation du seuil, de l'erreur et du nombre maximal d'itérations*/

Algorithme 2 Pseudo code de l'algorithme R-ICP

```
1  Début
2      { Pré-traitement }
3      Décimation des nuages de points pCL1 et pCL2
4      { Phases préliminaires }
5      Construction KD-Tree pour pCL1
6      Calcul des normales pour pCL1 et pCL2
7      { Initialisation }
8      k ←0; Converge ←Faux; Arrêt←Faux; RANSAC ←Faux; th_ad←s_init;
   ε←erreur_init; k_max←k_initmax; Erreur←0.0
9      { Phase itérative }
10     TantQue Arrêt = Faux Faire
11         PourChaque point p_j De pCL2 Faire
12             Recherche du p.p.v p_i avec d(p_i,p_j) < th_ad /* KD-tree */
13             Si Formation de la paire (p_i,p_j) Alors
14                 w_i = Vrai
15             Sinon
16                 w_i = Faux
17         Rejet des paires dupliquées /* cf. Figure 6.8 */
18         Mise à jour des poids w_n
19         Si RANSAC = Faux Alors
20             RANSAC = Vrai
21             { Appel de la procédure RANSAC (cf. Algorithme 3) }
22             RANSAC_ICP(Matrice_paires, m_ransac):T_ransac,σ_ransac
23             T_k ←T_ransac ET th_ad ←ν σ_ransac
24             Si th_ad > η .ε Alors
25                 RANSAC = Faux
26         Sinon
27             Estimation de T_k(R_k(3,3),t_k(3,1)) à partir Matrice_paires
28         Application de T_k sur pCL2
29         Calcul de la moyenne μ_k ET de l'écart type σ_k des d(pCL1,pCL2)
30         { Phase des tests d'arrêt et de convergence }
31         /* .. */(cf. Algorithme 1)
32 Fin
```

Sorties : T_{op} ; *Converge* ; Erreur.

Entrées : pCL_1 ; pCL_2 ; $nbpts_1$; $nbpts_2$; m_{ransac} ; ν ; η ; s_{init} ; $erreur_{init}$; $k_{initmax}$.
/*nuages de points *modèle* et *requête* ; nombre de points des deux nuages ; valeurs d'initialisation du paramètre m de RANSAC, des variables de pondérations, du seuil, de l'erreur et du nombre maximal d'itérations*/

Algorithme 3 Pseudo code de la procédure $RANSAC_{ICP}$

```
1  Début
2      { m_ransac est déterminé selon la formule 6.2 }
3      { Initialisation }
4      k ←0;
5      Choisir aléatoirement m_ransac sous ensemble de s_ransac paires de
   correspondance à partir de la Matrice_paires
6      { Phase itérative }
7      PourChaque sous ensemble De m_ransac sous ensemble Faire
8          Estimation de T_k(R_k(3,3), t_k(3,1))
9          Application de T_k sur l'ensemble des points requêtes
10         Calcul de l'erreur E_k
11         Si k = 0 Alors
12             E_ransac ←E_0
13             T_ransac ←T_0
14         SinonSi E_k < E_ransac Alors
15             E_ransac ←E_k
16             T_ransac ←T_k
17         k←k+1
18 Fin
```

Sorties : T_{ransac} ; E_{ransac}.

Entrées : $Matrice_{paires}$; m_{ransac}.
/*Matrice des paires de correspondance ; paramètre du nombre d'échantillon de la procédure RANSAC*/

Algorithme 4 Pseudo code de l'algorithme HPS-ICP

1 **Début**
2 { *Pré-traitement* }
3 Décimation du nuage de points pCL_1
4 Filtrage 2D des données MNS (filtrage alterné séquentiel)
5 { *Phases préliminaires* }
6 Calcul des normales pour pCL_1 et pCL_{MNS} (représentation en 3D du MNS)
7 Construction KD-Tree pour pCL_{MNS}
8 { *Initialisation* }
9 k $\leftarrow$0; $INIT_{HPS}\leftarrow$Faux; Converge $\leftarrow$Faux; Arrêt$\leftarrow$Faux; $th_{ad}\leftarrow s_{init}$; $\epsilon\leftarrow erreur_{init}$; $k_{max}\leftarrow k_{initmax}$
10 { *Initialisation du recalage par extraction et mise en correspondance de plans horizontaux* }
11 **Si** $INIT_{HPS}$ = Faux **Alors**
12 $EXTRACTION3D_{HP}(pCL_1, traj_{pCL1})$:[$HP3D_{pCL1}$]
13 $EXTRACTION2D_{HP}(MNS$,TYPEFILTRE):[$HP2D_{MNS}$]
14 $HP2D_{pCL1}$ projection 2D du plan horizontal 3D $HP3D_{pCL1}$
15 $HP3D_{MNS}$ correspondance 3D du plan horizontal 2D $HP2D_{MNS}$
16 Estimation de $R_{2D(x,y)}$ entre $HP2D_{pCL1}$ et $HP2D_{MNS}$
17 Estimation de $T_{2D(x,y)}$ entre $HP2D_{pCL1}$ et $HP2D_{MNS}$
18 Estimation de $T_{(z)}$ entre $HP3D_{pCL1}$ et $HP3D_{MNS}$
19 $T_{init} \leftarrow T_{(z)} \circ R_{2D(x,y)} \circ T_{2D(x,y)}$
20 Application de T_{init} sur pCL_1
21 $INIT_{HPS} \leftarrow$Vrai
22 **Sinon**
23 { *Phase itérative* }
24 /* .. */ (cf. Algorithme 1)
25 **Fin**

Sorties : T_{op} ; *Converge* ; Erreur

Entrées : pCL_1 ; MNS ; $traj_{pCL1}$; $nbpts_1$; TYPEFILTRE ; s_{init} ; $erreur_{init}$; $k_{initmax}$.
/*nuages de points *requête* ; la structure MNS ; trajectoire du véhicule relative au pCL_1 ; nombre de points du pCL_1 ; type du filtre à appliquer pour la segmentation ; valeurs d'initialisation du seuil, de l'erreur et du nombre maximal d'itérations*/

Algorithme 5 Pseudo code de l'algorithme de l'évaluation binaire $FBQ - E_b$

```
1  Début
2      { Phases préliminaires }
3      Construction KD-Tree pour la liste des positions des lampadaires
   extraites List_ref
4      { Initialisation }
5      σ ←σ_d + μ + σ_d; Eb_vrai←0; Eb_faux←0; FBQ − E_b ←0.0; th_fix ←ϑ
6      PourChaque position L_i De List_extract Faire
7          Recherche du p.p.v LRef_i avec d(LRef_i,L_i)< th_fix /* KD-Tree*/
8          Si Formation de la paire (LRef_i,L_i) Alors
9              Si d(L_i,LRef_i) < (σ + θ) Alors
10                 Eb_vrai ←Eb_vrai +1
11             Sinon
12                 Eb_Faux ←Eb_Faux +1
13         Sinon
14             n_extract ←n_extract-1
15     FBQ − E_b ←1/n_extract.Eb_vrai
16 Fin
```

Sorties : $FBQ - E_b$; Eb_{vrai} ; Eb_{faux}

Entrées : $List_{extract}$; $LRef$;$n_{extract}$; θ ; σ_d ; μ ; ϑ.
/*Liste des points représentants les lampadaires extraites et celle de référence ; nombre de lampadaires extraites ; incertitude ; valeurs d'initialisation du rayon moyen du lampadaire, l'incertitude du laser, le facteur de vibration et la distance maximale séparant deux lampadaires*/

Algorithme 6 Pseudo code de l'algorithme de l'évaluation floue $FBQ - E_f$

```
1  Début
2      { Phases préliminaires }
3      Construction KD-Tree pour la liste des positions des lampadaires
   extraites List_ref
4      { Initialisation }
5      σ ←σ_d + μ + σ_d; FBQ − E_f ←0.0; th_fix ←ϑ
6      PourChaque position L_i De List_extract Faire
7          Recherche du p.p.v LRef_i avec d(LRef_i, L_i)< th_fix /* KD-Tree*/
8          Si Formation de la paire (LRef_i, L_i) Alors
9              Si d(L_i, LRef_i) < (σ + θ) Alors
10                 Eb_i ←1
11                 Ef_i ←tab-φ_i . (σ + θ) − d(Lref_i, L_i)/((σ + θ))
12             Sinon
13                 Eb_i ←0
14                 Ef_i ←0
15         FBQ − E_f ←FBQ − E_f+ Ef_i
16 Fin
```

Sorties : $FBQ - E_f$;

Entrées : $List_{extract}$; $LRef$; θ ; σ_d ; μ ; tab-φ.
/*Liste des points représentants les lampadaires extraites et celle de référence ; valeurs d'initialisation du rayon moyen du lampadaire, l'incertitude du laser, le facteur de vibration et la distance maximale séparant deux lampadaires ; le tableau de la distribution de la sélection floue (comme exemple cf. Tableau 8.4) */

CO-RECALAGE DE DONNÉES HÉTÉROGÈNES 3D GÉO-RÉFÉRENCÉES : CONTRIBUTIONS À LA CORRECTION DE RELEVÉS LASER MOBILES

RESUME : Un développement considérable des bases de données cartographiques 3D à différentes échelles s'est produit ces dernières années. Il a été stimulé par de nombreux besoins et soutenu par de véritables progrès technologiques, et par une diversité d'approches en numérisation 3D. Nous considérons dans cette thèse un contexte de production de cartographie numérique basée sur la fusion de données hétérogènes 3D.

Nous intégrons trois types de données : relevés avec laser fixe, relevés avec laser mobile issus d'un Système de Cartographie Mobile (MMS) et un Modèle Numérique de Surface (MNS). Les caractéristiques différentes de ces données muti-sources se traduisent par des incohérences et des déformations. Nous nous focalisons essentiellement sur les erreurs affectant les données du MMS.

Nous décrivons une démarche innovante de correction de relevés laser terrestres en nous basant sur des données externes au système d'acquisition (MNS, BD TOPO®…). Notre démarche est basée sur un recalage hétérogène de données 3D. Nous proposons trois variantes de recalage rigide de la famille des ICP.

Nous proposons également une nouvelle méthode d'évaluation qualitative du recalage, ayant deux variantes. Celle-ci est basée sur l'extraction et la comparaison de primitives géométriques. Elle a été utilisée pour la comparaison des précisions des algorithmes de recalage développés.

Les résultats expérimentaux issus de nos implémentations montrent des temps raisonnables pour une exploitation sur de grandes bases de données.

MOTS-CLES: Cartographie Numérique 3D, Systèmes de Cartographie Mobiles, Nuages de Points 3D, MNS, Recalage Hétérogène, ICP, RANSAC, Évaluation Qualitative, Logique Floue.

CO-REGISTRATION OF 3D HETEREGENEOUS GEO-REFERENCED DATA: CONTRIBUTIONS TO THE CORRECTION OF MOBILE MAPPING SYSTEMS SURVEYS

ABSTRACT: The development of 3D mapping databases is a matter of increasing interest. Databases have recently been developed at different scales (national, European, international) and to meet different needs. Such development has been made possible by the implementation of efficient 3D mapping technologies. The context of this study is related to the production of 3D digital databases.

In this thesis, we perform a fusion of three kinds of 3D data: 3D point clouds from fixe and mobile acquisition and a Digital Surface Model (DSM). We propose a new method of correction of 3D mobile mapping system data, based on registration with external data (DSM, BD TOPO® …). In this term, we propose new heterogeneous registration methods applied to solve problems in 3D urban environment representations issued from a Mobile Mapping System. We improve the stability of convergence, the computation time and handle heterogeneous data sets in various scenarios.

We also propose a new method for qualitative evaluation of 3D registration related to the developed algorithms. Two variants of FQ-Evaluation were tested, based on the extraction and the comparison of geometric features.

Experimental results issued from our implementations show a computation time sufficient to the using of large databases.

KEYWORDS: 3D data bases, Mobile Mapping System, 3D point clouds, DSM, Heterogeneous Registration, ICP, RANSAC, Qualitative Evaluation, Fuzzy.

MINES ParisTech

ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY