HAL
open science

# Analyse et conception de scanners laser mobiles dédiés à la cartographie 3D d'environnements urbains

Hyun-Jae Yoo

## To cite this version:

Hyun-Jae Yoo. Analyse et conception de scanners laser mobiles dédiés à la cartographie 3D d'environnements urbains. Automatique. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2011. Français. NNT : 2011ENMP0003 . pastel-00579965v2

**HAL Id: pastel-00579965**

**https://pastel.hal.science/pastel-00579965v2**

Submitted on 18 Sep 2014

**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.

ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

MINES ParisTech

Ecole doctorale n°432 : Sciences des Métiers de l' Ingénieur

# 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 par*

**Hyun-Jae YOO**

le 13 janvier 2011

# Analyse et conception de scanners laser mobiles dédiés à la cartographie 3D d'environnements urbains

CONFIDENTIEL JUSQU'AU 13 JANVIER 2014

Directeur de thèse : François **GOULETTE**

Co-encadrants : Joël **SENPAUROCA**
Grégory **LEPERE (MENSI-Trimble)**

**Jury**

| | | |
|---|---|---|
| **M. Laurent POLIDORI** | Professeur des Universités, ESGT | Président du jury |
| **M. Pierre GRUSSENMEYER** | Professeur des Universités, INSA de Strasbourg | Rapporteur |
| **Mme. Véronique CHERFAOUI** | Maître de Conférences HDR, UTC | Rapporteur |
| **M. Jean-José ORTEU** | Professeur HDR, Ecole des Mines d'Albi | Examinateur |
| **M. Nicolas PAPARODITIS** | Directeur de Recherches HDR, IGN | Examinateur |
| **M. Stéphane RIALLAND** | Ingénieur de recherche, MENSI-Trimble | Examinateur |
| **M. François GOULETTE** | Enseignant-chercheur HDR, MINES ParisTech | Directeur de thèse |
| **M. Joël SENPAUROCA** | Enseignant-chercheur, MINES ParisTech | Co-encadrant |

T H E S E

**MINES ParisTech**
**CAOR – Centre de Robotique, Mathématiques et Systèmes**
60, Boulevard Saint Michel 75272 Paris cedex 06, FRANCE

# Remerciements

Je vais prendre quelques lignes pour remercier les différentes personnes qui m'ont permis de réaliser cette thèse.

Je souhaite remercier d'abord François Goulette, mon directeur de thèse, Joël Senpauroca, mon co-encadrant de l'Ecole, et Grégory Lepère, mon co-encadrant de l'Entreprise, qui m'ont encadré durant ces trois dernières années. Ils m'ont dirigé dans la bonne direction. Je les remercie pour leur disponibilité et les conversations régulières que nous avons eues sur ce travail, leurs conseils scientifiques et techniques qui ont guidé très efficacement ce travail.

Je remercie également les membres de l'équipe de MMS du laboratoire et les membres de l'équipe R&D Scanner de l'entreprise. C'était très agréable de travailler avec eux. Je souhaite remercier plus particulièrement Stéphane Rialland, chef du projet de prototypage qui m'a beaucoup aidé.

Je remercie les membres du jury : les rapporteurs Pierre Grussenmeyer et Véronique Cherfaoui, pour leurs remarques et conseils qui m'ont permis de rendre ce document plus complet, et les examinateurs externes Laurent Polidori, Jean-José Orteu, Nicolas Paparoditis, pour la participation au jury de thèse.

J'exprime aussi ma gratitude à tous mes collègues du laboratoire et de l'entreprise qui ont apporté leurs conseils et soutiens durant ces dernières années.

Finalement, je souhaite remercier ma famille, mes amis qui m'ont encouragé et soutenu depuis toujours. Je remercie plus particulièrement ma femme pour son soutien et son existence.

# Table des matières

**REMERCIEMENTS** ..... **1**

**TABLE DES MATIERES** ..... **3**

**LISTE DES FIGURES** ..... **7**

**LISTE DES TABLEAUX** ..... **11**

**CHAPITRE 1. INTRODUCTION** ..... **13**

1.1 CONTEXTE ..... 14
1.2 CONTRIBUTIONS ..... 15
1.3 PLAN DU DOCUMENT ..... 15

**CHAPITRE 2. CARTOGRAPHIE 3D D'ENVIRONNEMENTS URBAINS** ..... **17**

2.1 INTRODUCTION ..... 18
2.2 USAGES DES DONNEES CARTOGRAPHIQUES ..... 18
2.3 PRINCIPES D'ACQUISITION DE DONNEES CARTOGRAPHIQUES ..... 21
*2.3.1 Photogrammétrie aérienne ..... 22*
*2.3.2 Lasergrammétrie ..... 24*
2.4 SYSTEMES MOBILES TERRESTRES DE CARTOGRAPHIE 3D ..... 33
*2.4.1 Systèmes en photogrammétrie / imagerie ..... 34*
*2.4.2 Systèmes en lasergrammétrie ..... 35*
2.5 SCANNERS LASER POUR LES SYSTEMES MOBILES DE CARTOGRAPHIE ..... 44
2.6 CONCLUSION ..... 48

**CHAPITRE 3. COMPARAISON ET ANALYSE DES RELEVES LASER** ..... **51**

3.1 INTRODUCTION ..... 52
3.2 COMPARAISON EXPERIMENTALE DES SYSTEMES STATIQUE ET MOBILE ..... 52
*3.2.1 Zone de test ..... 52*
*3.2.2 Acquisition ..... 53*
*3.2.3 Comparaison des temps opératoires ..... 54*
3.3 ANALYSE QUALITATIVE DES RELEVES LASER ..... 55

*3.3.1 Critères de qualité* ..... *55*
*3.3.2 Comparaison des données réelles en termes de qualité* ..... *62*
*3.3.3 Notes globales pour l'analyse* ..... *65*
3.4 CONCLUSION ..... 66
**CHAPITRE 4. IMPACT EXPERIMENTAL DE LA GEOMETRIE D'ACQUISITION ..... 67**
4.1 INTRODUCTION ..... 68
4.2 VARIATION DE L'ANGLE DE LACET ..... 68
*4.2.1 Réalisation du prototype* ..... *68*
*4.2.2 Acquisition de données* ..... *72*
4.3 VARIATION DE L'ANGLE DE TANGAGE ..... 76
*4.3.1 Réalisation du prototype* ..... *76*
*4.3.2 Acquisition de données* ..... *77*
4.4 CONCLUSION ..... 79
**CHAPITRE 5. CONCEPTS DE SCANNERS LASER MOBILES ..... 81**
5.1 INTRODUCTION ..... 82
5.2 OUTIL DE CONCEPTION ASSISTEE PAR ORDINATEUR ..... 82
*5.2.1 Processus de conception* ..... *82*
*5.2.2 Simulateur de Système Mobile de Cartographie* ..... *84*
5.3 ANALYSE COMPARATIVE DES CONCEPTS DE SCANNER LASER MOBILE ..... 89
*5.3.1 Objectif et conception* ..... *89*
*5.3.2 Création de scénarios* ..... *90*
*5.3.3 Proposition de concepts de type « Mono-plan »* ..... *91*
*5.3.4 Proposition de concepts de type « Multi-plans »* ..... *105*
5.4 CONCLUSION ..... 123
**CHAPITRE 6. PROTOTYPAGE DE SCANNER LASER DEDIE ..... 125**
6.1 INTRODUCTION ..... 126
6.2 PROTOTYPAGE DE SCANNER MULTI-PLANS : FORME EN K ..... 126
*6.2.1 Etude de faisabilité* ..... *126*
*6.2.2 Réalisation* ..... *131*
6.3 TESTS ET RESULTATS ..... 132
*6.3.1 Acquisition sur chariot* ..... *132*

*6.3.2 Acquisition sur véhicule ..... 134*
*6.3.3 Comparaison des scanners de type mono-plan et de forme en K ..... 135*
6.4 CONCLUSION ..... 140
**CHAPITRE 7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES ..... 141**
7.1 CONCLUSIONS ..... 142
7.2 PERSPECTIVES ..... 143
**LISTE DES PUBLICATIONS ..... 145**
**BIBLIOGRAPHIE ..... 147**
**ANNEXE 1. ADAPTATION DU TRIMBLE GX ..... 151**
**ANNEXE 2. ADAPTATION DU SIMULATEUR ..... 155**
**ANNEXE 3. DEFLEXION OPTIQUE ET ESPACE SCANNE ..... 159**
**ANNEXE 4. SPECIFICATION DU PROTOTYPE ..... 167**
**ANNEXE 5. DEVELOPPEMENT DU PROTOTYPE ..... 169**

# Liste des figures

FIGURE 1-1 : TECHNOLOGIES DEVELOPPEES DU PROJET (SOURCE [WEB TERRANUMERICA]) ..... 14
FIGURE 2-1 : NUMERISATION 3D DE LA PLACE VENDOME AVEC UN SCANNER STATIQUE... 18
FIGURE 2-2 : UTILISATION DE DONNEES POUR LA NAVIGATION (SOURCE [WEB TERRANUMERICA]) ..... 19
FIGURE 2-3 : UTILISATION DE DONNEES POUR LE TOURISME (SOURCE [WEB VERSAILLES]) ..... 19
FIGURE 2-4 : UTILISATION DE DONNEES DU PATRIMOINE (SOURCE [WEB TERRANUMERICA]) ..... 20
FIGURE 2-5 : UTILISATION DE DONNEES POUR LA SURVEILLANCE (SOURCE [WEB 3DLM]) 20
FIGURE 2-6 : UTILISATION DE DONNEES POUR L'URBANISME (SOURCE [WEB TERRANUMERICA]) ..... 21
FIGURE 2-7 : PRINCIPE DE TRIANGULATION POUR LA PHOTOGRAMMETRIE ..... 22
FIGURE 2-8 : SYSTEME AERIEN DE PHOTOGRAMMETRIE (SOURCE [WEB APPLANIX]) ..... 23
FIGURE 2-9 : PHOTOGRAPHIE ACQUISE PAR UN SYSTEME AERIEN DE PHOTOGRAMMETRIE. 23
FIGURE 2-10 : ACQUISITION DE DONNEES 3D ..... 24
FIGURE 2-11 : ELEMENTS PRINCIPAUX D'UN SCANNER LASER 3D..... 24
FIGURE 2-12 : PRINCIPE DU TEMPS DE VOL ..... 25
FIGURE 2-13 : CALCUL DU TEMPS DE PARCOURS DE L'IMPULSION LASER ..... 26
FIGURE 2-14 : NOTION DE MULTI-ECHO (SOURCE [STONE ET AL, 2004]) ..... 27
FIGURE 2-15 : CALCUL DE DECALAGE DE PHASE (SOURCE [STONE ET AL, 2004])..... 27
FIGURE 2-16 : PRINCIPE DE TRIANGULATION..... 29
FIGURE 2-17 : SYSTEME AERIEN DE LASERGRAMMETRIE (SOURCE [WEB OPTECH])..... 30
FIGURE 2-18 : DONNEES ACQUISES PAR LASERGRAMMETRIE AERIENNE (SOURCE [WEB OPTECH])..... 31
FIGURE 2-19 : SYSTEMES DE LASERGRAMMETRIE TERRESTRE (SOURCES [WEB TRIMBLE]) 31
FIGURE 2-20 : ACQUISITION DE DONNEES AVEC UN SYSTEME STATIQUE..... 32
FIGURE 2-21 : DONNEES ACQUISES PAR LASERGRAMMETRIE STATIQUE TERRESTRE ..... 32
FIGURE 2-22 : COMPOSITION D'UN SYSTEME MOBILE DE CARTOGRAPHIE ..... 33
FIGURE 2-23 : SYSTEME MOBILE TERRESTRE AVEC IMAGERIE SEULE..... 34
FIGURE 2-24 : DONNEES ACQUISES PAR SYSTEME MOBILE TERRESTRE ..... 35
FIGURE 2-25 : SYSTEMES STATIQUES EN PHOTOGRAMMETRIE ..... 35
FIGURE 2-26 : STREETMAPPER, SYSTEME DE 3DLM (SOURCE [WEB 3DLM]) ..... 36
FIGURE 2-27 : DONNEES ACQUISES PAR STREETMAPPER..... 36
FIGURE 2-28 : STEREOPOLIS II, SYSTEME DE L'IGN (SOURCE [WEB IGN]) ..... 37
FIGURE 2-29 : DONNEES ACQUISES PAR STEREOPOLIS ..... 37
FIGURE 2-30 : PRINCIPE DU MODE « A-LA-VOLEE » ..... 38
FIGURE 2-31 : LARA-3D, SYSTEME DU CAOR, VERSION 2008..... 38
FIGURE 2-32 : TRAITEMENT DES DONNEES LARA-3D (SOURCE [GOULETTE ET AL, 2006]) ..... 39
FIGURE 2-33 : DONNEES ACQUISES AVEC LARA-3D..... 39

FIGURE 2-34 : PRINCIPE DU MODE « PLURI-STATIQUE » ..... 40
FIGURE 2-35 : SYSTEME DU NAIST (SOURCE [ASAI ET AL, 2007]) ..... 41
FIGURE 2-36 : DONNEES DU SYSTEME DU NAIST EN POSITION FIXE (SOURCE [ASAI ET AL, 2007]) ..... 41
FIGURE 2-37 : SYSTEME DE L'UNIVERSITE DE SOUTHERN CALIFORNIA ..... 42
FIGURE 2-38 : VLMS, SYSTEME DE L'UNIVERSITE DE TOKYO ..... 43
FIGURE 2-39 : DAVIDE, SYSTEME DE GIOVE (SOURCE [AMOUREUS, 2007]) ..... 44
FIGURE 2-40 : IBEO LD ..... 44
FIGURE 2-41 : SICK LMS 221 ..... 45
FIGURE 2-42 : VELODYNE HDL-64E ..... 45
FIGURE 2-43 : LYNX, SCANNER D'OPTECH ..... 46
FIGURE 2-44 : VQ-250, SCANNER DE RIEGL ..... 46
FIGURE 2-45 : VMX-250, SYSTEME DE RIEGL ..... 47
FIGURE 2-46 : PRINCIPE DE DEFLEXION DU LASER DES SCANNERS DE LYNX ET VQ-250 .. 48
FIGURE 3-1 : ZONE DE TEST POUR LA COMPARAISON DES SYSTEMES STATIQUE ET MOBILE 52
FIGURE 3-2 : ACQUISITION DE DONNEES AVEC TRIMBLE VX ..... 53
FIGURE 3-3 : ACQUISITION DE DONNEES AVEC LARA-3D ..... 53
FIGURE 3-4 : NOTIONS DE PRECISIONS ABSOLUE ET RELATIVE ..... 55
FIGURE 3-5 : NUAGE DE POINTS AVEC DES ZONES DE DIFFERENTES RESOLUTIONS (SOURCE [ABUHADROUS, 2005]) ..... 57
FIGURE 3-6 : LA DENSITE LOCALE DU POINT « P » ..... 58
FIGURE 3-7 : EXEMPLE DE « BOITE A MOUSTACHE » ..... 59
FIGURE 3-8 : EXEMPLES DE BOITES A MOUSTACHE DE RESOLUTION PAR RAPPORT A L'INTERVALLE DE RESOLUTION SOUHAITEE ..... 59
FIGURE 3-9 : NUAGE DE POINTS AVEC DES ZONES NON-ACQUISES (SOURCE [ABUHADROUS, 2005, GOULETTE, 2006]) ..... 60
FIGURE 3-10 : EXEMPLE DE LA SURFACE COUVERTE ..... 61
FIGURE 3-11 : RESOLUTION DES RELEVES LASER DU TRIMBLE VX ET DE LARA-3D ..... 63
FIGURE 3-12 : REPRESENTATION DES POINTS DE LA SURFACE COUVERTE ..... 64
FIGURE 4-1 : REPERE LOCAL DE LA PLATEFORME ..... 68
FIGURE 4-2 : MONTAGE DE SCANNER TRIMBLE GX SUR UN TREPIED ..... 69
FIGURE 4-3 : PIECES SUPPLEMENTAIRES POUR LA SECURITE DU TRIMBLE GX SUR LARA-3D ..... 69
FIGURE 4-4 : TRIMBLE GX AVEC ACCELEROMETRE ..... 70
FIGURE 4-5 : TRIMBLE GX AVEC ACCELEROMETRE SUR LARA-3D. ..... 70
FIGURE 4-6 : ZONE DE TEST DE VIBRATION ..... 71
FIGURE 4-7 : RESULTAT DU TEST DE VIBRATION DU TRIMBLE GX SUR LARA-3D ..... 71
FIGURE 4-8 : TRIMBLE GX SUR LARA-3D ..... 72
FIGURE 4-9 : ACQUISITION EN 5 PROFILS ..... 73
FIGURE 4-10 : ZONE D'ACQUISITION POUR TRIMBLE GX SUR LARA-3D ..... 73
FIGURE 4-11 : ACQUISITION DE ZONE TEST PAR TRIMBLE GX SUR LARA-3D AVEC DIFFERENTS ANGLES DE LACET : NUAGES DE POINTS A GAUCHE, ZONES COUVERTES A DROITE ..... 74
FIGURE 4-12 : RESOLUTION DE DIFFERENTS RELEVES SELON L'ANGLE DE LACET ..... 75
FIGURE 4-13 : SCANNER MONO-PLAN SUR CHARIOT ..... 77
FIGURE 4-14 : ZONE D'ACQUISITION POUR LE SCANNER MONO-PLAN SUR CHARIOT ..... 77

FIGURE 4-15 : NUAGES DE POINTS ACQUIS PAR LE SCANNER MONO-PLAN SUR CHARIOT.... 78
FIGURE 5-1 : PROCESSUS DE CONCEPTION DE SYSTEMES MOBILES DE CARTOGRAPHIE..... 83
FIGURE 5-2 : SIVIC, SIMULATEUR VEHICULES INFRASTRUCTURES CAPTEURS..... 85
FIGURE 5-3 : GENERATION DU NUAGE DE POINTS EN COURS DE SIMULATION..... 87
FIGURE 5-4 : SCENE VIRTUELLE D'ENVIRONNEMENT URBAIN ..... 88
FIGURE 5-5 : GENERATION DU NUAGE DE POINTS DE SCENE VIRTUELLE ..... 88
FIGURE 5-6 : SCENES VIRTUELLES..... 90
FIGURE 5-7 : SCANNER DE « MONO-PLAN »..... 91
FIGURE 5-8 : MONTAGE DU CONCEPT 1 (MONO-PLAN VERTICAL) SUR LA PLATEFORME ..... 92
FIGURE 5-9 : MONTAGE DU CONCEPT 2 SUR LA PLATEFORME ..... 93
FIGURE 5-10 : INCLINAISON DE +/- 20° DE SCANNER SUR LA PLATEFORME..... 93
FIGURE 5-11 : MONTAGE DU CONCEPT 3 SUR LA PLATEFORME ..... 94
FIGURE 5-12 : MONTAGE DU CONCEPT 4 SUR LA PLATEFORME ..... 96
FIGURE 5-13 : EXEMPLE DE LA REPRESENTATION DE VARIATION DE RESOLUTION ..... 97
FIGURE 5-14 : RESOLUTION DES RELEVES LASER ISSUS DES CONCEPTS DE TYPE « MONO-PLAN » ..... 98
FIGURE 5-15 : SURFACE COUVERTE SUR UN CARREFOUR ..... 100
FIGURE 5-16 : CONCEPT 3 (3BIS) DANS LE CAS DU CARREFOUR ..... 101
FIGURE 5-17 : SURFACE COUVERTE SUR UN BATIMENT EN U ..... 102
FIGURE 5-18 : SURFACE COUVERTE SUR UN BATIMENT LOINTAIN..... 103
FIGURE 5-19 : SURFACE COUVERTE SUR UN PONT..... 104
FIGURE 5-20 : SCANNER DE TYPE « MULTI-PLANS : FORME EN V » ..... 105
FIGURE 5-21 : MONTAGE DU CONCEPT 5 SUR LA PLATEFORME ..... 106
FIGURE 5-22 : MONTAGE DU CONCEPT 6 SUR LA PLATEFORME ..... 107
FIGURE 5-23 : MONTAGE DU CONCEPT 7 SUR LA PLATEFORME ..... 108
FIGURE 5-24 : TROIS PROFILS DE 120° AVEC 45° D'ECART ENTRE EUX ..... 109
FIGURE 5-25 : SCANNER DE TYPE « MULTI-PLANS : FORME EN FLECHE ← », SOLUTION 1109
FIGURE 5-26 : SCANNER DE « MULTI-PLANS : FORME EN FLECHE ← », SOLUTION 2 ..... 110
FIGURE 5-27 : MONTAGE DU CONCEPT 8 SUR LA PLATEFORME ..... 111
FIGURE 5-28 : MONTAGE DU CONCEPT 9 SUR LA PLATEFORME ..... 112
FIGURE 5-29 : MONTAGE DU CONCEPT 10 SUR LA PLATEFORME ..... 113
FIGURE 5-30 : SCANNER DE TYPE « MULTI-PLANS : FORME EN K » ..... 114
FIGURE 5-31 : MONTAGE DU CONCEPT 11 SUR LA PLATEFORME ..... 115
FIGURE 5-32 : RESOLUTION DES RELEVES LASER ISSUS DES CONCEPTS DE TYPE « MULTI-PLANS »..... 116
FIGURE 5-33 : SURFACE COUVERTE SUR UN CARREFOUR ..... 118
FIGURE 5-34 : SURFACE COUVERTE SUR UN BATIMENT EN U ..... 119
FIGURE 5-35 : SURFACE COUVERTE SUR UN BATIMENT LOINTAIN..... 120
FIGURE 5-36 : SURFACE COUVERTE SUR UN PONT..... 121
FIGURE 6-1 : PRESENTATION DE QUATRE DEMI-PLANS DU CONCEPT « FORME EN K »..... 126
FIGURE 6-2 : CALCUL DU TEMPS DISPONIBLE POUR LE CHANGEMENT DE VOIES ..... 127
FIGURE 6-3 : PLAN PRODUIT PAR LA VOIE A ..... 128
FIGURE 6-4 : PLAN PRODUIT PAR A VOIE B (OU C)..... 128
FIGURE 6-5 : COMPOSANT DE DEFLEXION A ETUDIER..... 129
FIGURE 6-6 : TAILLE NECESSAIRE DU MIROIR..... 130
FIGURE 6-7 : PROTOTYPE REALISE ..... 131

FIGURE 6-8 : PROTOTYPE SUR UN CHARIOT ..... 132
FIGURE 6-9 : ZONE D'ACQUISITION POUR LE PROTOTYPE SUR CHARIOT ..... 133
FIGURE 6-10 : NUAGE DE POINTS OBTENU AVEC LE PROTOTYPE SUR CHARIOT ..... 133
FIGURE 6-11 : MONTAGE DE PROTOTYPE SUR LARA-3D ..... 134
FIGURE 6-12 : ZONE POUR LA DEUXIEME ACQUISITION SUR VEHICULE ..... 134
FIGURE 6-13 : EXEMPLE DE NUAGE DE POINTS D'UN BATIMENT DE LA RUE DE RIVOLI ..... 135
FIGURE 6-14 : SCANNER MONO-PLAN SUR VEHICULE ..... 136
FIGURE 6-15 : ZONE D'ACQUISITION POUR L'ANALYSE DES CONCEPTS 1 ET 11 ..... 136
FIGURE 6-16 : VISUALISATION DES POINTS OBTENUS ..... 137
FIGURE 6-17 : NUAGE DE POINTS OBTENU AVEC LE CONCEPT 1 (MONO-PLAN VERTICAL) 138
FIGURE 6-18 : RESOLUTION DE DONNEES DES CONCEPTS 1 ET 11 ..... 139
FIGURE 6-19 : SURFACE COUVERTE DES BATIMENTS AVEC LES CONCEPTS 1 ET 11 ..... 140
FIGURE 7-1 : DE L'ACQUISITION A L'ENREGISTREMENT DE DONNEES ..... 151
FIGURE 7-2 : COMPOSANT DE SCANNER TRIMBLE GX ..... 152
FIGURE 7-3 : GENERATION DE NUAGE DE POINTS ..... 153
FIGURE 7-4 : CALCUL DE NORMALE D'UN POINT ..... 156
FIGURE 7-5 : GENERATION DU NUAGE DE POINTS DANS LE SIMULATEUR ..... 157
FIGURE 7-6 : DIAGRAMME DE RTMAPS ..... 158
FIGURE 7-7 : REPRESENTATION DES COORDONNEES SPHERIQUE ..... 159
FIGURE 7-8 : REPRESENTATION DES ANGLES D'INCLINAISON $\alpha$ ET $\omega$ ..... 160
FIGURE 7-9 : REPRESENTATION DE VECTEUR DU LASER REFLETE $\vec{u}_r^{\theta}$ ..... 161
FIGURE 7-10 : PLAN AVEC $\alpha = 0$, $\omega = \pi/4$ (REFERENCE) ..... 162
FIGURE 7-11 : PLAN AVEC $\alpha = 0$, $\omega = \pi/6$ ..... 163
FIGURE 7-12 : PLAN AVEC $\alpha = \pi/6$, $\omega = \pi/4$ ..... 164
FIGURE 7-13 : PLAN AVEC $\alpha = \pi/12$, $\omega = \pi/6$ ..... 165
FIGURE 7-14 : GRAPHIQUE DE L'ANGLE INCIDENT $\phi$ EN FONCTION DES ANGLES $\alpha$, $\omega$ ET $\theta$ 166
FIGURE 7-15 : SCHEMA FONCTIONNEL D'UN SCANNER ..... 167
FIGURE 7-16 : PRESENTATION DE PARTIE ACQUISITION ..... 168
FIGURE 7-17 : SCHEMA STRUCTUREL DE L'EDM ..... 170
FIGURE 7-18 : PRINCIPE DE PARTIE EMISSION D'EDM ..... 171
FIGURE 7-19 : PRINCIPE DE PARTIE RECEPTION D'EDM ..... 171
FIGURE 7-20 : MONTAGE D'EDM ..... 172
FIGURE 7-21 : MOTEUR CONTINU AVEC MIROIR SIMPLE ..... 173
FIGURE 7-22 : MOTEUR CONTINU AVEC MIROIR POLYGONE (SOURCE [WEB RIEGL]) ..... 173
FIGURE 7-23 : PRINCIPE DE MONTAGE « GALVANOMETRE » ..... 174
FIGURE 7-24 : TRAME DE DONNEES (10 OCTETS) ..... 175
FIGURE 7-25 : COMPTEURS DE PPS ET DE FPGA ..... 176
FIGURE 7-26 : COMPTEUR DE NOMBRE DE PROFILS ..... 176
FIGURE 7-27 : VALEUR DE LUMINANCE FONCTION DE DISTANCE ..... 178
FIGURE 7-28 : FENETRE DE VISUALISATION ..... 179
FIGURE 7-29 : VISUALISATION D'ACQUISITION, VERSION 1 ..... 180
FIGURE 7-30 : AMELIORATION SUR L'AXE VERTICAL DE VISUALISATION ..... 180
FIGURE 7-31 : VISUALISATION D'ACQUISITION, VERSION 2 ..... 181
FIGURE 7-32 : PRINCIPE D'ESTIMATION DE VITESSE DE VEHICULE ..... 183

# Liste des Tableaux

TABLE 2-1 : COMPARAISON DES PRINCIPES DE TELEMETRIE LASER ..... 30
TABLE 2-2 : COMPARAISON DES SCANNERS LYNX ET VQ-250 ..... 47
TABLE 3-1 : TEMPS OPERATOIRES POUR LE SYSTEME STATIQUE ET LE SYSTEME MOBILE ... 54
TABLE 3-2 : VALEURS DE PRECISION DES RELEVES LASER ISSUS DU TRIMBLE VX ET DE LARA-3D ..... 62
TABLE 3-3 : VALEUR DE RESOLUTION DES RELEVES LASER ISSUS DU TRIMBLE VX ET DE LARA-3D ..... 63
TABLE 3-4 : SURFACE COUVERTE DES RELEVES LASER DU TRIMBLE VX ET DE LARA-3D 64
TABLE 3-5 : NOTATION LOGARITHMIQUE DE LA PRECISION ..... 65
TABLE 3-6 : NOTES GLOBALES DE L'ANALYSE COMPARATIVE ..... 65
TABLE 4-1 : VALEURS DE RESOLUTION DE DIFFERENTS RELEVES SELON L'ANGLE DE LACET ..... 75
TABLE 4-2 : SURFACE COUVERTE DES DIFFERENTS RELEVES SELON L'ANGLE DE LACET.... 76
TABLE 4-3 : CARACTERISTIQUES DE TECHNOLOGIES UTILISEES POUR LE PROTOTYPE..... 76
TABLE 5-1 : CONFIGURATION SPATIALE DU « CONCEPT 1 » ..... 91
TABLE 5-2 : CONFIGURATION SPATIALE DU « CONCEPT 2 » ..... 92
TABLE 5-3 : CONFIGURATION SPATIALE DU « CONCEPT 3 » ..... 94
TABLE 5-4 : CONFIGURATION SPATIALE DU « CONCEPT 4 » ..... 95
TABLE 5-5 : VALEURS DE RESOLUTION DES CONCEPTS DE TYPE « MONO-PLAN »..... 98
TABLE 5-6 : SURFACE COUVERTE DES RELEVES ISSUS DES CONCEPTS DE TYPE « MONO-PLAN » ..... 99
TABLE 5-7 : CONFIGURATION SPATIALE DU « CONCEPT 5 » ..... 105
TABLE 5-8 : CONFIGURATION SPATIALE DU « CONCEPT 6 » ..... 106
TABLE 5-9 : CONFIGURATION SPATIALE DU « CONCEPT 7 » ..... 107
TABLE 5-10 : CONFIGURATION SPATIALE DU « CONCEPT 8 » ..... 110
TABLE 5-11 : CONFIGURATION SPATIALE DU « CONCEPT 9 » ..... 111
TABLE 5-12 : CONFIGURATION SPATIALE DU « CONCEPT 10 » ..... 112
TABLE 5-13 : CONFIGURATION SPATIALE DU « CONCEPT 11 » ..... 114
TABLE 5-14 : VALEURS DE RESOLUTION DES CONCEPTS DE TYPE « MULTI-PLANS »..... 116
TABLE 5-15 : SURFACE COUVERTE DES RELEVES ISSUS DES CONCEPTS DE TYPE « MULTI-PLANS »..... 117
TABLE 5-16 : RECAPITULATIF DE L'ANALYSE DES CONCEPTS ..... 122
TABLE 6-1 : CARACTERISTIQUES DES TECHNOLOGIES UTILISEES POUR LE PROTOTYPE .... 131
TABLE 6-2 : VALEURS DE RESOLUTION DES PROTOTYPES DES CONCEPTS 1 ET 11 ..... 139
TABLE 6-3 : SURFACE COUVERTE DES PROTOTYPES DES CONCEPTS 1 ET 11..... 140
TABLE 7-1 : VARIATION DE COULEUR FONCTION DE DISTANCE..... 182

# Chapitre 1.

# Introduction

1.1 CONTEXTE ..... 14
1.2 CONTRIBUTIONS ..... 15
1.3 PLAN DU DOCUMENT..... 15

## 1.1 Contexte

Cette thèse a été effectuée en collaboration entre le Centre de Robotique de MINES ParisTech et MENSI Trimble sous convention CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche). Elle s'est inscrite dans le cadre du projet TerraNumerica.

Le Centre de Robotique (CAOR) de MINES ParisTech, a été créé en 1989. Il fait partie du département « Mathématiques et Systèmes », un des cinq départements de l'Ecole [web CAOR]. Le Centre travaille autour de plusieurs thèmes de recherche en collaboration avec plusieurs entreprises et des laboratoires publics.

Cette thèse se situe dans le thème de recherche « Systèmes mobiles de cartographie » avec une équipe dédiée, l'équipe *Mobile Mapping Systems* (MMS). Cette équipe étudie et utilise les systèmes mobiles de cartographie pour acquérir des données numériques et modéliser des environnements en 3D.

MENSI, société créée en 1986, et filiale du groupe Trimble depuis 2003, conçoit, développe et commercialise un système complet de numérisation, par scanning laser 3D et un logiciel de modélisation d'objets et de scènes de grandes dimensions [web Trimble]. Il existe deux équipes de R&D dans cette société : l'équipe R&D Scanner et l'équipe R&D Software.

Cette thèse sous convention CIFRE a été effectuée au sein de l'équipe R&D Scanner afin de concevoir un nouveau système de scanner laser innovant dédié aux systèmes mobiles de cartographie.

Le projet TerraNumerica était labellisé par le pôle de compétitivité à vocation mondiale « Cap Digital » [web TerraNumerica]. Le consortium des partenaires était composé de plusieurs laboratoires publics, académiques et de plusieurs entreprises. Il s'agissait de travailler sur la représentation et la numérisation des territoires et de leurs ressources, et la valorisation multimédia de ces informations.

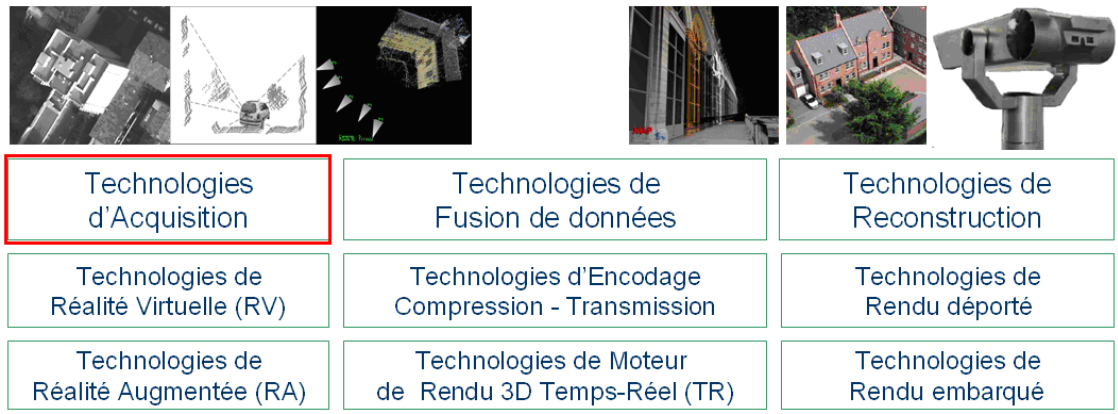


Figure 1-1 : Technologies développées du projet (Source [web TerraNumerica])

Le projet était structuré autour de plusieurs technologies (Figure 1-1). Cette thèse entrait dans le cadre des technologies d'acquisition de données urbaines 3D.

## *1.2 Contributions*

L'objectif initial de la thèse était de concevoir un système innovant de numérisation 3D sur plateforme mobile qui prenne en compte des critères de qualité d'acquisition de nuages de points en fonction de la scène numérisée, ainsi que les objectifs applicatifs de cette acquisition.

Le travail réalisé a permis d'apporter plusieurs contributions sur ce thème, qui sont exposées dans ce document :

- une méthode d'analyse des relevés laser
- une démarche de conception par simulation d'un système mobile de cartographie
- un concept de scanner laser dédié aux systèmes mobiles de cartographie
- la réalisation d'un prototype permettant de valider les hypothèses formulées durant la conception

Ce travail a donné lieu à cinq publications (page 145). Un brevet est en cours d'étude.

## *1.3 Plan du document*

Ce document est structuré en sept chapitres incluant le présent chapitre d'introduction. Le domaine de la cartographie 3D d'environnements urbains avec la notion de systèmes mobiles de cartographie est abordé dans le Chapitre 2. La comparaison de systèmes statiques et mobiles en termes de temps et de qualité est présentée dans le Chapitre 3. Dans ce chapitre, une méthode d'analyse de la qualité des données laser est aussi proposée. L'impact de la géométrie d'acquisition sur la qualité de données est étudié dans le Chapitre 4. La démarche de conception de scanner laser mobile dédié aux systèmes mobiles de cartographie est décrite dans le Chapitre 5, ainsi que les différents concepts qui en sont issus. Le Chapitre 6 montre le prototype réalisé et les résultats des tests effectués. Les conclusions et perspectives de ces travaux sont enfin abordées dans le Chapitre 7.

# Chapitre 2.

# Cartographie 3D d'environnements urbains


2.1 INTRODUCTION ..... 18

2.2 USAGES DES DONNEES CARTOGRAPHIQUES ..... 18

2.3 PRINCIPES D'ACQUISITION DE DONNEES CARTOGRAPHIQUES ..... 21

*2.3.1 Photogrammétrie aérienne ..... 22*

*2.3.2 Lasergrammétrie ..... 24*

2.4 SYSTEMES MOBILES TERRESTRES DE CARTOGRAPHIE 3D ..... 33

*2.4.1 Systèmes en photogrammétrie / imagerie ..... 34*

*2.4.2 Systèmes en lasergrammétrie ..... 35*

2.5 SCANNERS LASER POUR LES SYSTEMES MOBILES DE CARTOGRAPHIE ..... 44

2.6 CONCLUSION ..... 48

## 2.1 Introduction

Le domaine de la cartographie est en pleine évolution depuis plusieurs dizaines d'années suite aux développements des outils informatiques. Le mot « Cartographie » formé des mots grecs « *Cartis* = carte» et « *graphein* = écrire » signifie « réalisation de cartes ». La réalisation de cartes sert à créer des bases de données pour les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG).

Le type de données cartographiques nécessaires peut varier selon l'usage des cartes réalisées. La Figure 2-1 est un exemple de données cartographiques de la place Vendôme à Paris. Ces données permettent de créer une carte 3D, pour une application telle que la modélisation de cette place.

Figure 2-1 : Numérisation 3D de la place Vendôme avec un scanner statique

Dans ce chapitre, nous présentons différents usages de données cartographiques, puis les technologies d'acquisition les plus utilisées avec des exemples de systèmes d'acquisition. Ensuite, nous présentons plus spécifiquement des systèmes mobiles terrestres de cartographie utilisant la lasergrammétrie.

## 2.2 Usages des données cartographiques

Les caractéristiques des données cartographiques varient selon les usages. Dans cette section, nous présentons quelques domaines d'application des données cartographiques.

## A) Navigation et déplacements

Figure 2-2 : Utilisation de données pour la navigation (Source [web TerraNumerica])

Une des principales utilisations de données cartographiques dans le grand public est la navigation, permettant de s'orienter et de parvenir à destination. La Figure 2-2 montre des exemples de cette utilisation de données cartographiques.

Les informations routières enregistrées permettent de visualiser la localisation actuelle du véhicule (ou de la personne) à l'aide des informations issues du GNSS (*Global Navigation Satellite System*), et de montrer le chemin pour arriver à destination. Les données utilisées sont souvent en 2D mais avec les dernières avancées technologiques, les données 3D sont aussi de plus en plus utilisées.

## B) Tourisme et patrimoine

Figure 2-3 : Utilisation de données pour le tourisme (Source [web Versailles])

Ces technologies sont utilisées aussi dans le domaine du tourisme par la création virtuelle de villes ou d'endroits spécifiques. La Figure 2-3 montre le château de Versailles en virtuel 3D auquel on peut accéder par ordinateur. Cela permet de découvrir facilement les villes ou les patrimoines que l'on souhaite visiter sans se déplacer physiquement.

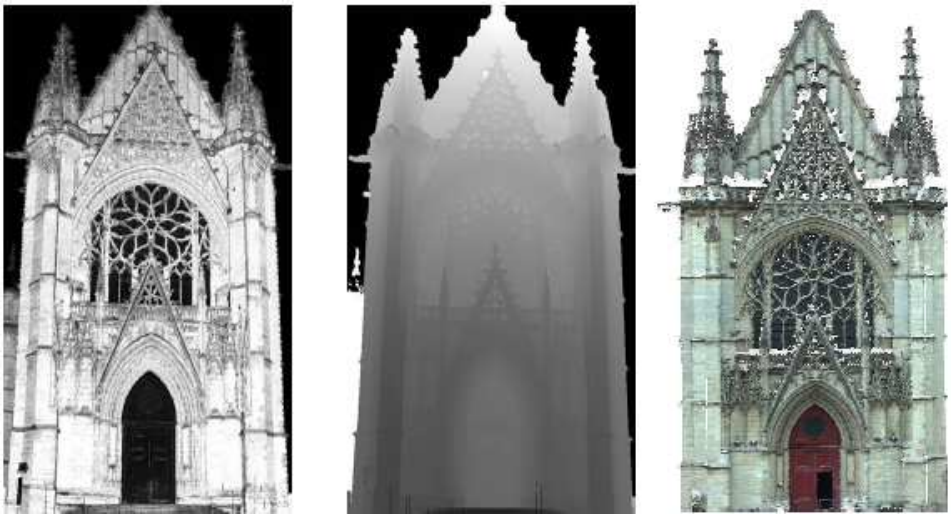

Figure 2-4 : Utilisation de données du patrimoine (Source [web TerraNumerica])

L'étude et la conservation des patrimoines constituent un autre usage des données cartographiques. La Figure 2-4 montre un exemple d'une façade de cathédrale numérisée en 3D [web TerraNumerica].

## C) Surveillance des infrastructures

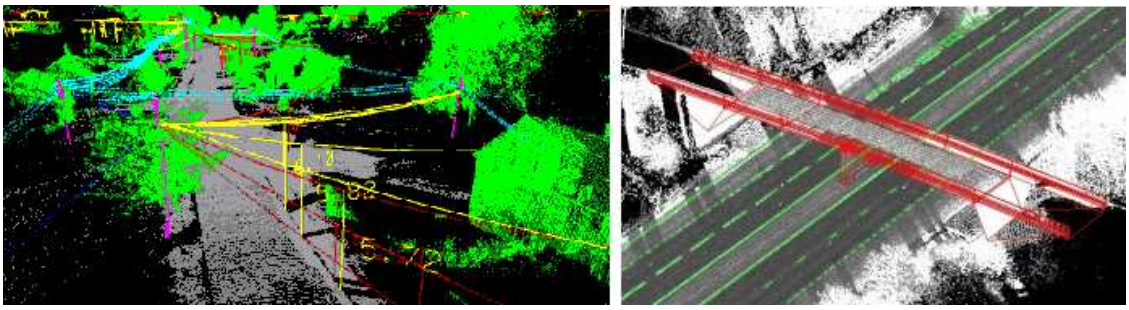

Figure 2-5 : Utilisation de données pour la surveillance (Source [web 3DLM])

En matière de sécurité civile, les données cartographiques peuvent aussi être appliquées à la surveillance des infrastructures. La Figure 2-5 montre quelques exemples de cet usage.

L'image de gauche représente l'utilisation de données de fils électriques, permettant de relever leur hauteur minimale afin de prévenir un risque de collision.

L'image de droite représente l'utilisation de données d'un pont pour la restitution d'une scène d'accident, sans être soumis aux contraintes extérieures de circulation.

### D) Urbanisme

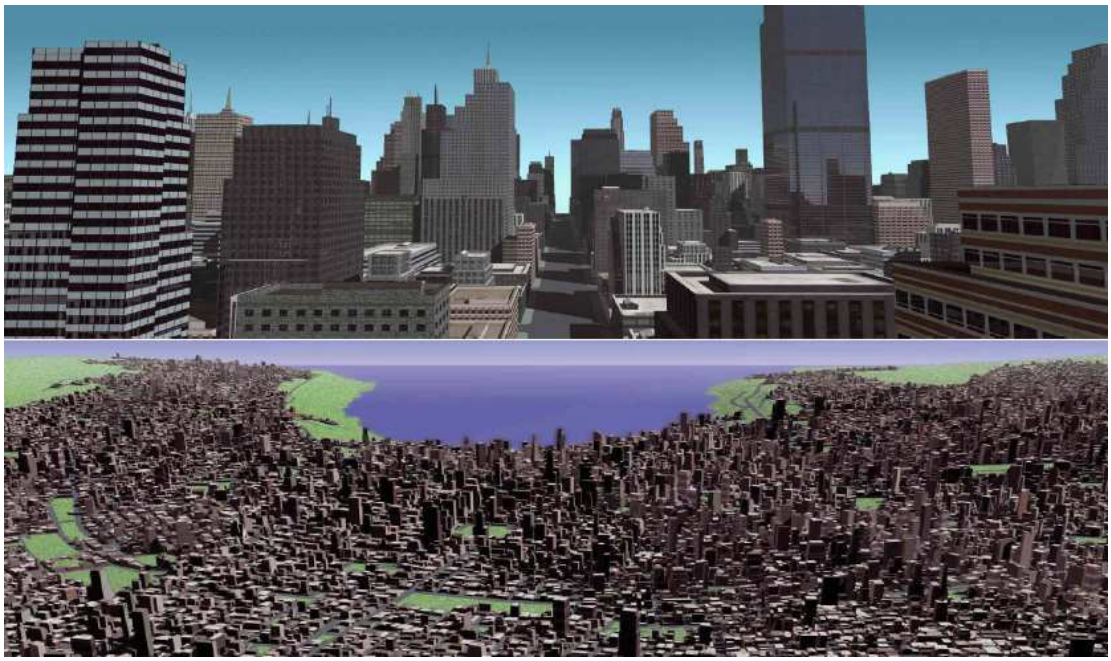

Figure 2-6 : Utilisation de données pour l'urbanisme (Source [web TerraNumerica])

Les données cartographiques sont utilisées également pour l'urbanisme dans des applications telles que la documentation, les plans d'urbanisme, la simulation, etc. La Figure 2-6 montre quelques exemples d'utilisation de données pour la modélisation d'une ville.

Outre les applications présentées ci-dessus, ces technologies sont utilisées dans d'autres domaines tels que le génie militaire, les applications multimédia, les jeux vidéo, etc.

## *2.3 Principes d'acquisition de données cartographiques*

Avec l'utilisation de plus en plus vaste et fréquente de données cartographiques, les technologies d'acquisition se sont également développées depuis plusieurs dizaines d'années. Nous présentons par la suite deux des technologies les plus courantes : la photogrammétrie aérienne et la lasergrammétrie.

### 2.3.1 Photogrammétrie aérienne

- **Principe**

La photogrammétrie est une technologie d'acquisition à l'aide d'images. Le principe de cette technologie est basé sur la méthode de triangulation passive, c'est-à-dire sans émission de signal ou d'énergie.

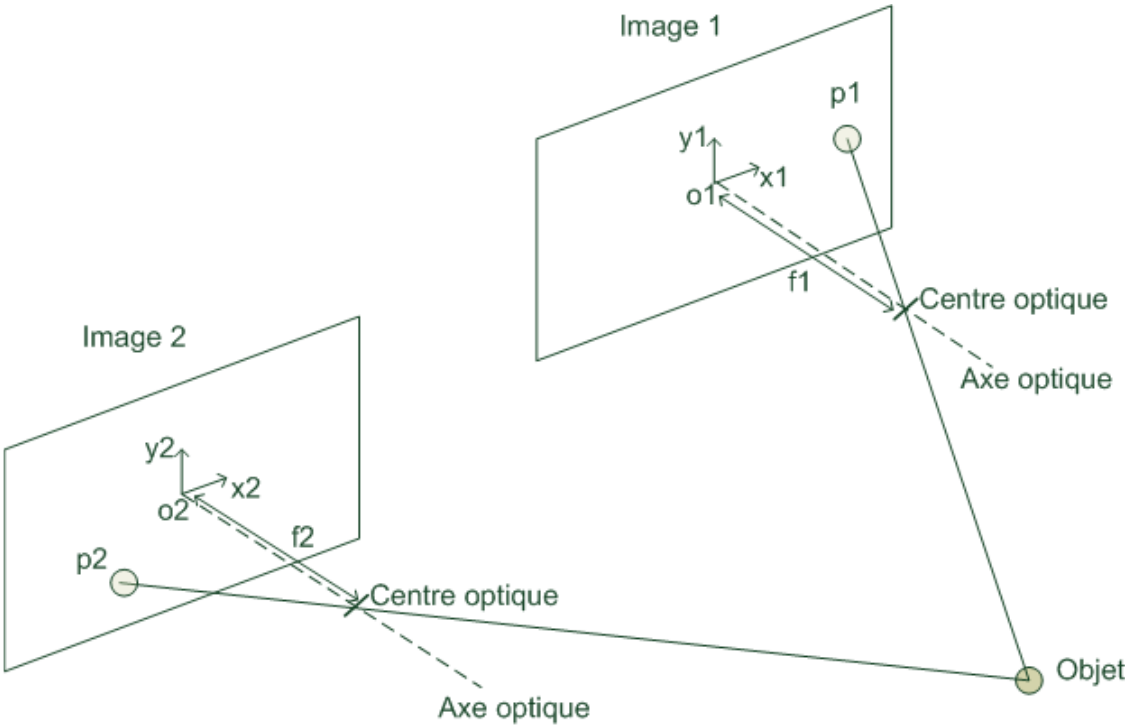


Figure 2-7 : Principe de triangulation pour la photogrammétrie

La Figure 2-7 représente le principe de la triangulation. Deux capteurs d'image sont utilisés, dont les positions sont différentes et connues. Si un objet est détecté par ces deux capteurs, alors sa position peut être déterminée avec les valeurs connues : les distances focales (f1 et f2), les positions des images de l'objet (p1 et p2) et les positions et orientations des plans images.

Afin de créer des données en 3D, il est nécessaire d'avoir des parties d'images communes et d'y repérer les points homologues.

Il existe deux méthodes d'acquisition d'images différentes : spatiale et temporelle. La méthode spatiale nécessite au moins deux capteurs. Elle permet d'obtenir les images simultanément. En revanche, la méthode temporelle permet d'obtenir les images successivement en déplaçant un capteur unique [Laflamme et al, 2006].

- **Systèmes d'acquisition de photogrammétrie aérienne**

La Figure 2-8 présente un exemple de système aérien qui utilise la méthode de photogrammétrie.

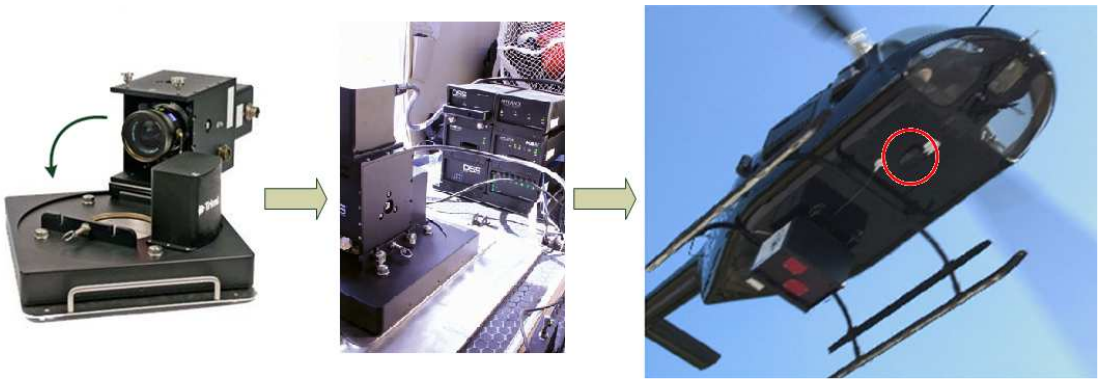

Figure 2-8 : Système aérien de photogrammétrie (source [web Applanix])

Ce système de Trimble - Applanix, nommé *Digital Sensor System (*DSS), contient une caméra orientée vers le bas. Ce système permet d'acquérir des informations de scène globale sous forme d'image. La méthode de photogrammétrie est de type temporel (séquence vidéo).

Figure 2-9 : Photographie acquise par un système aérien de photogrammétrie

La Figure 2-9 montre une photographie acquise par un autre système aérien pour le Mont Saint-Michel en Normandie [web IGN].

### 2.3.2 Lasergrammétrie

- **Principe général**

La lasergrammétrie est une technologie d'acquisition de distance utilisant un rayon laser. Il est possible de mesurer ainsi les coordonnées 3D d'un point sur la surface d'un objet, en combinant les informations de distance R et d'orientation du laser $\phi$ et $\theta$ (Figure 2-10, gauche). En faisant parcourir (scanning) de nombreux angles différents au laser, on obtient de nombreux points de mesure collectés dans ce qu'on appelle un « nuage de points » (Figure 2-10, centre et droite). Le système est appelé « scanner laser ou LiDAR (*Light Detection and Ranging*).

Figure 2-10 : Acquisition de données 3D

Un scanner laser est un instrument constitué d'une télémétrie laser pour acquérir des informations de distance, d'un ou plusieurs composants de déflexion pour défléchir le faisceau laser et acquérir l'information de direction (mesure de l'orientation) ainsi que d'une partie traitement pour traiter et enregistrer les informations transmises (Figure 2-11).

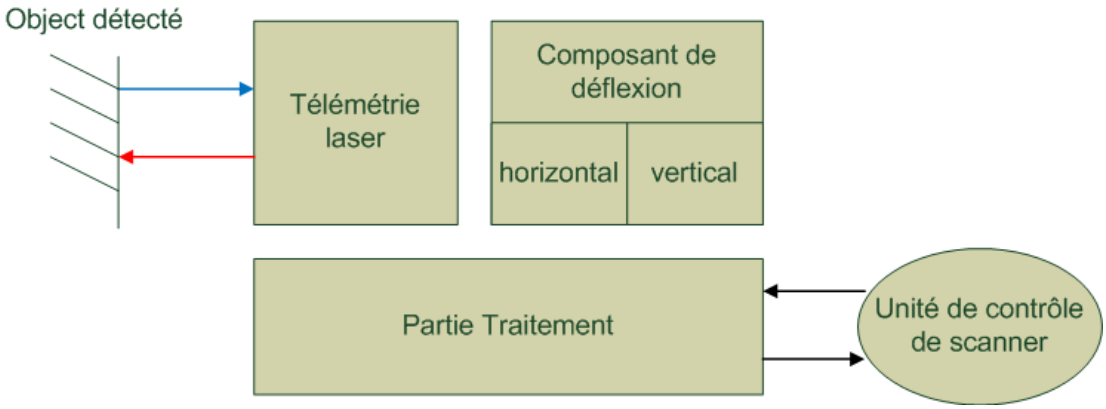


Figure 2-11 : Eléments principaux d'un scanner laser 3D

La télémétrie laser (ou EDM : *Electronic Distance Measurement*) est un composant technologique (optique, électronique) qui sert à mesurer, à l'aide d'un laser, la distance entre l'instrument et l'objet à détecter.

Le composant de déflexion permet d'orienter la direction du laser à la sortie du système pour obtenir le balayage souhaité. Selon le nombre de composants de déflexion, le système peut être en 2D ou en 3D : un système 2D nécessite un seul composant de déflexion tandis qu'un système 3D en nécessite au moins deux, l'un pour la déflexion horizontale, l'autre pour la déflexion verticale.

La partie Traitement récupère les données brutes de distance et d'angle(s) des mesures associées à chaque point et les restitue dans le format nécessaire (par exemple (x, y, z) avec luminance) pour générer le nuage de points. D'autres informations peuvent être ajoutées, car un scanner laser peut contenir plusieurs capteurs embarqués qui permettent d'ajouter des données sur l'état de l'environnement, comme la température, l'inclinaison par rapport à l'axe horizontal, etc. Certaines de ces informations peuvent aussi être utilisées dans la partie Traitement pour corriger les données.

### ➢ Principes physiques de télémétrie laser

Il existe plusieurs méthodes de mesure de distance, dont principalement : le temps de vol (Time of Flight), la phase différentielle (Phase Shift), la triangulation [Goulette et Laurgeau, 2001].

*Temps de vol*

Le principe de la méthode du temps de vol consiste à mesurer la distance à partir du temps d'un aller-retour $\Delta t$ d'une impulsion laser entre l'instrument et l'objet à mesurer (Figure 2-12).

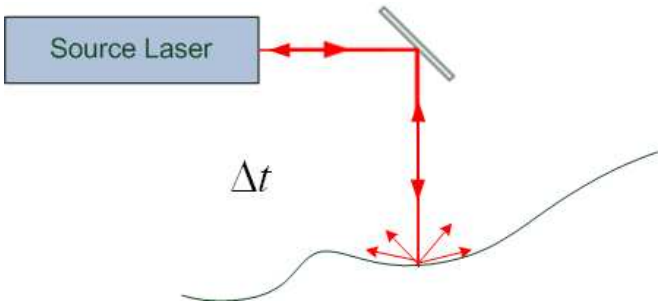


Figure 2-12 : Principe du temps de vol

Une impulsion lumineuse de grande puissance crête (quelques centaines de Watts) et de très courte durée (sub-nanoseconde) est envoyée d'une source laser. Lorsque cette impulsion rencontre un objet, celui-ci rétro-diffuse une partie de l'énergie lumineuse de cette impulsion.

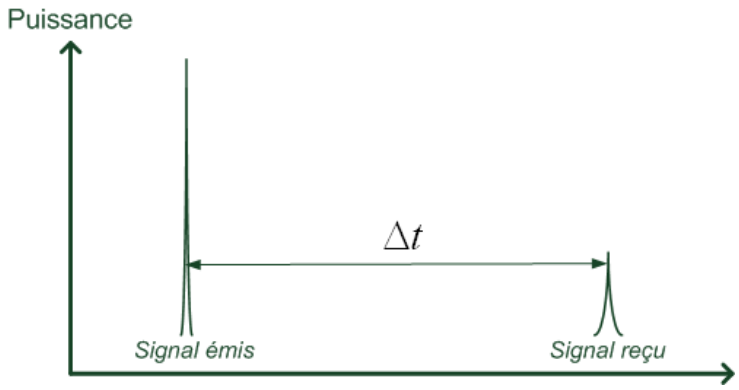

Figure 2-13 : Calcul du temps de parcours de l'impulsion laser

On calcule ensuite le temps de parcours de l'impulsion laser entre l'instant de l'émission et l'instant de la réception du signal (Figure 2-13).

La puissance du signal reçu est plus faible que celle du signal émis en raison de plusieurs facteurs tels que l'albédo[i] de l'objet à mesurer, l'angle incident[ii] et aussi la divergence du laser.

A partir de la différence de temps entre les deux signaux, on calcule la distance à l'objet à l'aide de l'Equation 2-1 :

$$d = c \cdot \frac{\Delta t}{2} \qquad \text{Equation 2-1}$$

Avec $d$ : distance parcourue (m)
$c$ : vitesse de la lumière (~= $3.10^8$ m/s)
$\Delta t$ : temps de parcours (s)

Cette méthode de mesure de la distance peut fonctionner à grande portée (quelques centaines de mètres). Elle est adaptée pour des grandes structures comme des bâtiments, des reliefs géographiques, etc.

Le temps de vol peut mesurer plusieurs signaux de retour (technologie de multi-écho). Grâce à cette technologie, les signaux de retour peuvent être traités pour enrichir les données, comme le montre la Figure 2-14.

---

[i] L'albédo est un indice du pouvoir de réflexion d'une surface exposée à la lumière. Il peut être exprimé en pourcentage. Par exemple, on dit que l'albédo est de 100% pour un objet qui réfléchit la totalité de la lumière et de 0% pour un objet qui absorbe la totalité de la lumière.

[ii] L'angle incident est l'angle entre la normale de la surface et la direction de la source lumineuse.

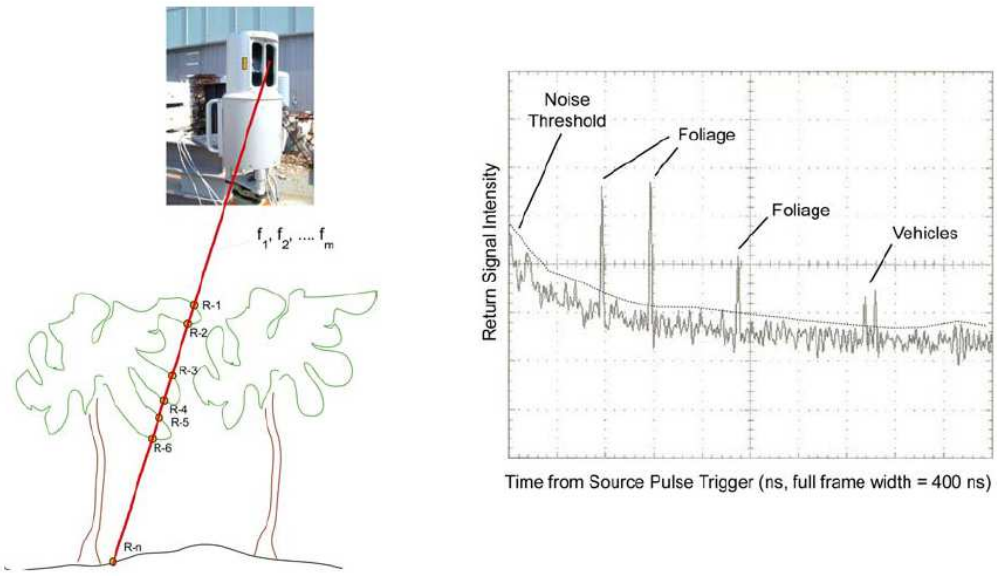


Figure 2-14 : Notion de multi-écho (Source [Stone et al, 2004])

*Différence de phase / Phase différentielle*

Cette méthode est basée sur une mesure de déphasage. Comme le montre la Figure 2-15, la source laser envoie de façon continue un signal sinusoïdal de fréquence fixe donnée ; le récepteur du scanner reçoit le signal rétro-diffusé sinusoïdal de même fréquence mais déphasé.

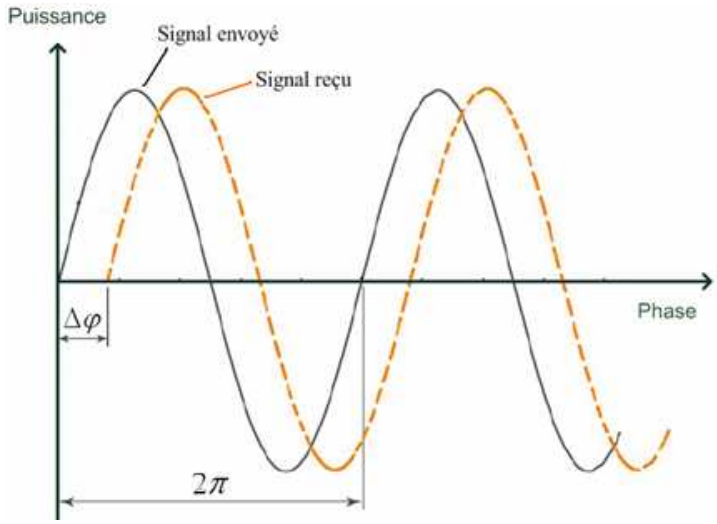


Figure 2-15 : Calcul de décalage de phase (Source [Stone et al, 2004])

A partir de la valeur de décalage de phase ($\Delta\varphi$), nous pouvons déduire la distance parcourue du signal à l'aide de l'Equation 2-2 :

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot f \cdot \Delta t = 2\pi \cdot f \cdot \left(\frac{2d}{c}\right)$$

$$\text{Soit } d = \frac{\Delta\varphi \cdot c}{4\pi \cdot f} \qquad \text{Equation 2-2}$$

Avec $\Delta\varphi$ : phase différentielle (décalage de phase) (radian)
$f$ : fréquence du signal en sinusoïdale (Hz)
$\Delta t$ : temps décalage temporel entre le signal envoyé et le signal reçu (s)
$d$ : distance parcourue (m)
$c$ : vitesse de la lumière (~= $3.10^8$ m/s)

Une méthode de calcul du décalage de phase consiste à faire la multiplication des signaux envoyés et reçus comme indiqué dans l'Equation 2-3[i] :

$$\Delta\phi = \arccos\left(\frac{2}{T} \cdot \int_0^T S_{emis} \cdot S_{recu} \cdot dt\right) \qquad \text{Equation 2-3}$$

Avec $\Delta\varphi$ : phase différentielle (décalage de phase) (radian)
$S_{emis}$ : signal envoyé ( $\cos(\omega t)$ )
$S_{recu}$ : signal reçu ( $\cos(\omega t + \Delta\phi)$ )
$T = \frac{1}{f}$ : période (s)
$\omega$ : pulsation (rad/s)

Cette méthode d'acquisition est très rapide, généralement plus rapide que les autres (quelques centaines de kHz), et la précision des mesures est généralement meilleure que celle de la méthode du temps de vol.

Toutefois, il existe une distance d'ambiguïté liée à ce que $\Delta\varphi$ est mesurée modulo $2\pi$. Par exemple, pour une fréquence $f$ de 20 MHz, la distance d'ambiguïté est de 7,50 m[ii].

Plusieurs méthodes permettent de résoudre cette restriction, par exemple, la combinaison de signaux de différentes fréquences : des fréquences faibles pour augmenter la portée, des fréquences élevées pour augmenter la précision.

---

[i] $\int_0^T S_{emis} \cdot S_{recu} \cdot dt = \frac{1}{2} \cdot \int_0^T \left(\cos(2\omega t + \Delta\phi) + \cos(\Delta\phi)\right) \cdot dt = \frac{T}{2} \cdot \cos(\Delta\phi)$

[ii] Distance d'ambiguïté : $d = \frac{\Delta\varphi \cdot c}{4\pi \cdot f} = \frac{2\pi \cdot 3 \cdot 10^8}{4\pi \cdot 20 \cdot 10^6} = 7{,}5 \text{ m}$

*Triangulation*

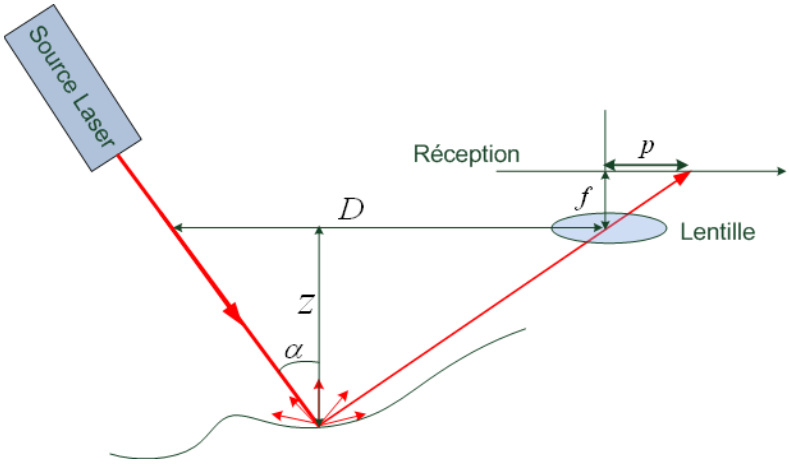


Figure 2-16 : Principe de Triangulation

Pour mesurer une distance par triangulation active, la partie émission (source laser) et la partie réception du signal sont séparées par une certaine distance connue (Figure 2-16).

Selon la position de l'objet, le signal est reçu en différents endroits du capteur (généralement un capteur CCD, *Charge-Coupled Device*), ce qui permet de déduire la distance z de l'objet par rapport au système grâce à l'Equation 2-4 :

$$z = \frac{D}{\tan\alpha + p/f} \qquad \text{Equation 2-4}$$

Avec $z$ : distance de l'objet (m)
$D$ : distance entre la partie émission et la partie réception (m)
$f$ : distance focale (m)
$p$ : position du signal reçu dans la partie réception (m)
$\alpha$ : angle de projection du laser (radian)

Cette méthode permet de mesurer la distance avec une précision généralement élevée du fait de la résolution de la partie réception (quelques micromètres).

En revanche, cette méthode est limitée par ses portées maximale et minimale selon la position et la taille de la partie réception. Elle est aussi limitée par un double effet d'ombre : pour être mesuré, un point de la scène doit être vu à la fois de la source et du capteur CCD.

Si la source lumineuse est un rayon laser, on mesure un point d'un objet (triangulation laser point), si la source lumineuse est un plan laser, on mesure un profil (profilomètre).

*Comparaison des principes physiques de télémétrie laser*

Chaque méthode de télémétrie laser a ses points forts et ses points faibles. La méthode de triangulation peut avoir la meilleure précision mais la portée est limitée, car la précision se dégrade très vite avec la distance. La méthode du temps de vol peut avoir la meilleure portée mais la précision est relativement moins bonne. La méthode de la phase différentielle peut avoir une vitesse d'acquisition très rapide mais sa portée est relativement limitée.

La Table 2-1 représente la comparaison des méthodes de télémétries laser sur trois critères : portée, précision et vitesse d'acquisition.

Table 2-1 : Comparaison des principes de télémétrie laser

| | Portée | Précision | Vitesse d'acquisition |
|---|---|---|---|
| Triangulation | + | +++ | + |
| Temps de vol | +++ | + | ++ |
| Phase différentielle | ++ | ++ | +++ |

- **Systèmes d'acquisition de lasergrammétrie**

Dans de nombreux cas, les technologies de lasergrammétrie sont utilisées conjointement avec des technologies de photogrammétrie afin d'enrichir les informations.

*Systèmes aériens*

Un exemple de système aérien qui utilise la méthode de lasergrammétrie est présenté sur la Figure 2-17.

Figure 2-17 : Système aérien de lasergrammétrie (Source [web Optech])

Ce système d'Optech contient un LiDAR orienté vers le bas qui permet d'acquérir des informations de la scène globale sous forme de nuage de points. La Figure 2-18 montre les données acquises par différents systèmes d'Optech avec différentes hauteurs de vol.

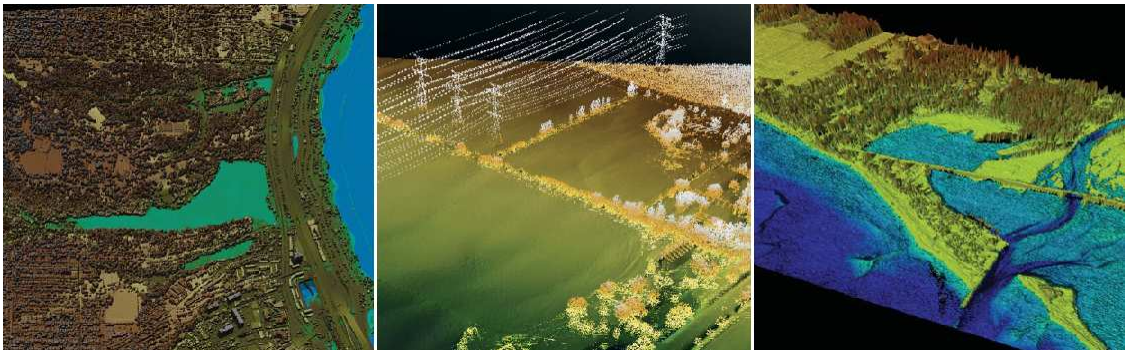

Figure 2-18 : Données acquises par lasergrammétrie aérienne (Source [web Optech])

Ces systèmes sont utilisés pour des études ou des documentations de scènes de grande dimension comme une ville complète.

*Systèmes statiques terrestres*

Figure 2-19 : Systèmes de lasergrammétrie terrestre (Sources [web Trimble])

Des exemples de systèmes terrestres qui utilisent la lasergrammétrie sont présentés sur la Figure 2-19. Les trois systèmes sont des scanners Trimble. L'image de gauche montre le scanner Trimble S25 (plus disponible à la vente) qui fonctionne avec la méthode de « triangulation ». L'image du milieu montre le scanner Trimble GX qui fonctionne avec la méthode de « temps de vol ». L'image de droite montre le scanner Trimble FX qui fonctionne avec la méthode de « phase différentielle ». Tous ces systèmes permettent d'acquérir des informations de scène en détail sous forme de nuage de points.

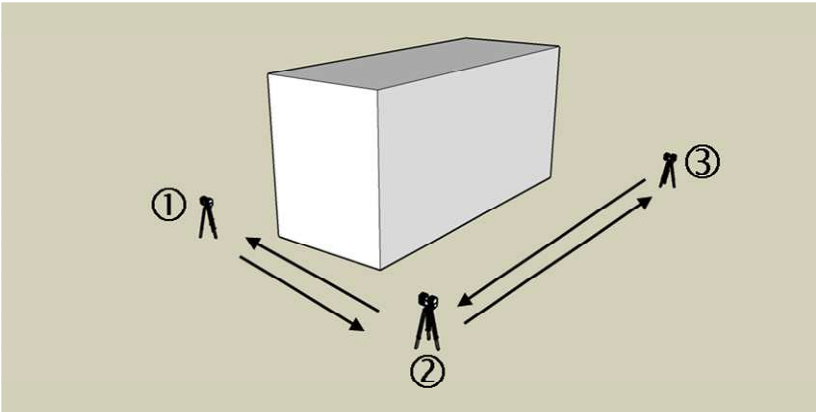

Figure 2-20 : Acquisition de données avec un système statique

Ils sont appelés « statiques », car leur principe opératoire est de les disposer en un lieu fixe, appelé « station », le temps de mesurer par double balayage une scène d'intérêt. Plusieurs stations successives peuvent être utilisées, puis les nuages de points combinés après recalage (Figure 2-20).

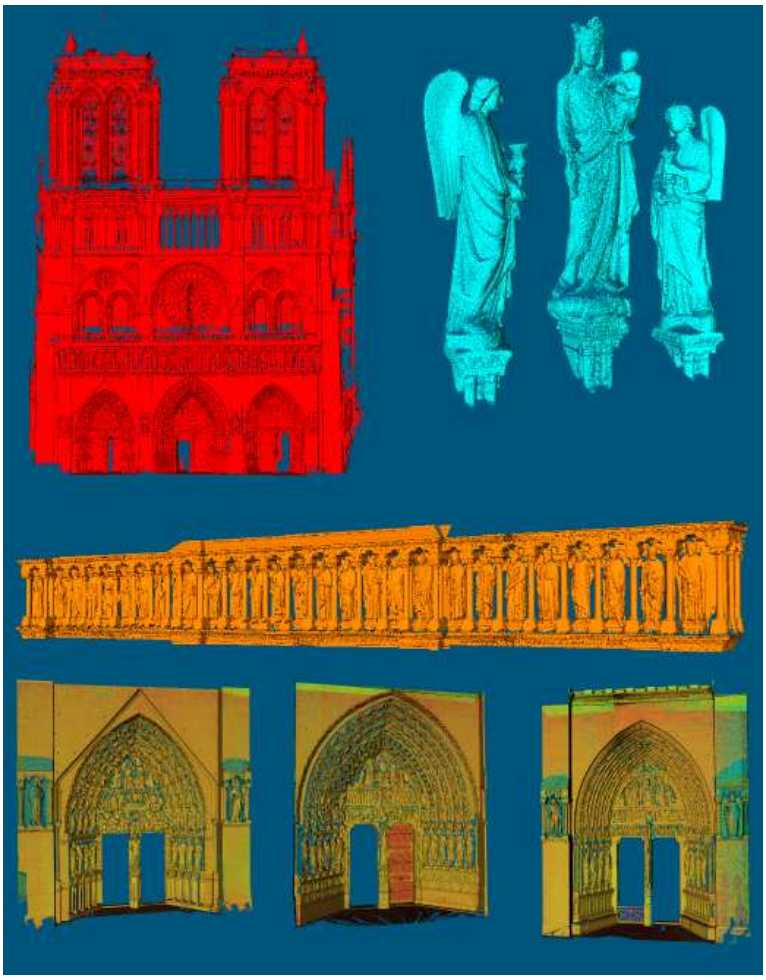
Figure 2-21 : Données acquises par lasergrammétrie statique terrestre

La Figure 2-21 montre les données acquises par les scanners Trimble GX et Trimble FX sur la cathédrale de Notre-Dame de Paris dans le cadre du projet TerraNumerica.

Ces systèmes sont utilisés pour la modélisation d'un ou plusieurs bâtiments, la surveillance des infrastructures, etc.

## *2.4 Systèmes mobiles terrestres de cartographie 3D*

Les nouvelles demandes de grandes bases de données 3D nécessitent de combiner les exigences d'une grande couverture de zone d'intérêt, avec celles de la capture d'un niveau de détail élevé, le tout avec des contraintes fortes de temps et de budget limités.

Les systèmes aériens fournissent des données de grande taille des objets ou de scènes rapidement, mais les données ne contiennent pas les détails des objets.

Les systèmes statiques fournissent des données de bonne qualité, mais il est long et difficile de produire des données sur un objet de grande dimension comme une rue ou même une ville entière.

Les systèmes mobiles terrestres de cartographie sont ainsi apparus comme un compromis entre les autres méthodes. Ils consistent en une collecte d'informations sur plateforme mobile terrestre.

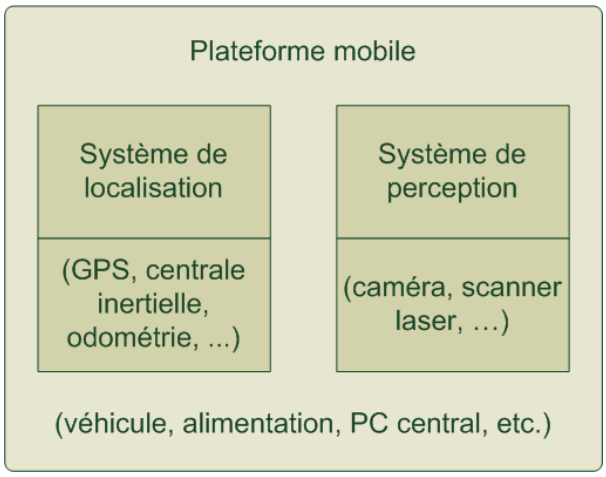


Figure 2-22 : Composition d'un système mobile de cartographie

Un système de ce type se décompose en trois parties : un système de perception, un système de localisation et une plateforme mobile (Figure 2-22). Le système de perception acquiert, à tout moment, des informations de la scène qui l'entoure. Il peut être composé de plusieurs capteurs, par exemple, une ou plusieurs caméras, un ou plusieurs scanners laser, etc. Le système de localisation calcule la position et l'orientation du système à tout

moment. Il peut contenir plusieurs capteurs, par exemple, une ou plusieurs antennes et un récepteur GPS, une centrale inertielle, un odomètre, une boussole numérique, etc. La plateforme mobile est composée non seulement du véhicule mais aussi des supports des systèmes intégrés, comme l'alimentation et la connectique électrique, l'unité de contrôle, etc.

Nous présentons ci-dessous quelques systèmes existants, en les distinguant selon qu'ils utilisent principalement la photogrammétrie ou la lasergrammétrie.

### 2.4.1 Systèmes en photogrammétrie / imagerie

Certains systèmes utilisent des données images seules. Ils sont utilisés pour la création de bases de données routières [web TeleAtlas] ou la navigation directe dans les images [web GoogleMaps].

Figure 2-23 : Système mobile terrestre avec imagerie seule

Le véhicule présenté sur la Figure 2-23 est un système de Google qui contient un ensemble de neuf caméras afin d'acquérir des informations de la scène sous forme d'image. Ces données acquises sont utilisées pour la base de données de « *Street View* de *Google Maps* » [web GoogleMaps].

Figure 2-24 : Données acquises par système mobile terrestre

La Figure 2-24 montre les données acquises par le système de Google pour la rue Soufflot à Paris.

Certains systèmes utilisent plusieurs capteurs image simultanément pour exploiter l'information en photogrammétrie comme c'était le cas du Stéréopolis I de l'Institut Géographique National (IGN) [Bentrah, 2006].

Figure 2-25 : Systèmes statiques en photogrammétrie

L'information d'imagerie, seule ou photogrammétrique, peut aussi être recueillie par des systèmes portables par un piéton. Quelques exemples sont présentés sur la Figure 2-25. L'image de gauche montre une caméra numérique de Samsung classique qui permet d'acquérir des informations sous forme d'image 2D ou 3D (méthode temporelle). L'image du centre montre une caméra de 3DWORLD qui contient trois objectifs permettant d'acquérir des informations sous forme d'image 3D (méthode spatiale). L'image de droite montre un caméscope de Panasonic qui contient deux objectifs permettant l'acquisition des informations sous forme de vidéo 3D (méthode spatiale).

### 2.4.2 Systèmes en lasergrammétrie

Des systèmes en lasergrammétrie sont équipés d'un ou plusieurs scanners laser. Un exemple de système est présenté sur la Figure 2-26. Ce système est un StreetMapper qui contient quatre scanners laser de Riegl LMS-Q120i [web 3DLM]. Il permet d'acquérir des informations sur la scène sous forme de nuage de points. Chaque scanner laser

acquiert des informations d'une partie de la scène, qui sont ensuite consolidées pour créer un nuage de points pour la scène globale.

Figure 2-26 : StreetMapper, système de 3DLM (source [web 3DLM])

La Figure 2-27 montre les données acquises par StreetMapper pour une ville de campagne (la trajectoire du système est représentée en ligne jaune) [web 3DLM].

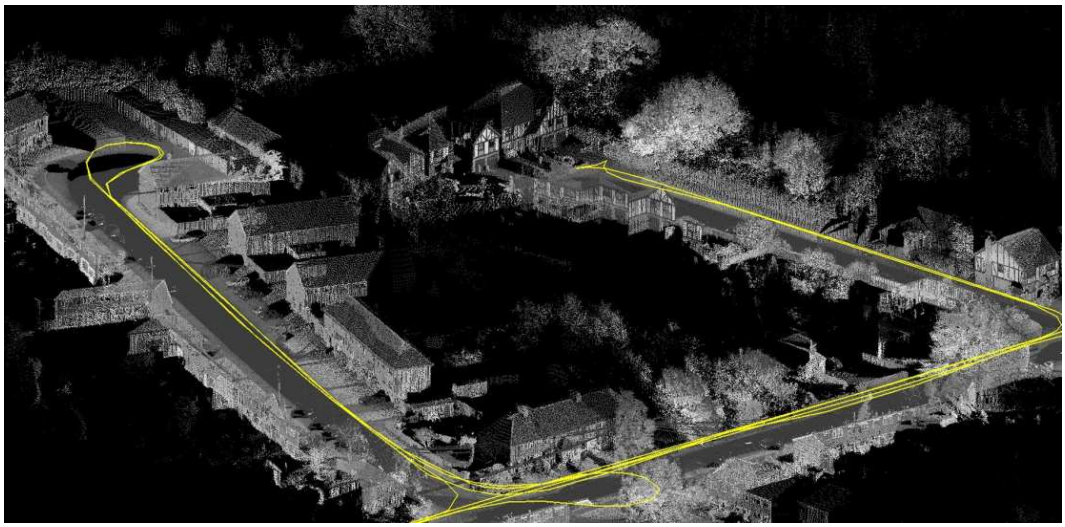

Figure 2-27 : Données acquises par StreetMapper

L'IGN possède un système mobile de cartographie utilisant la lasergrammétrie et la photogrammétrie, appelé Stéréopolis II.

Figure 2-28 : Stéréopolis II, Système de l'IGN (Source [web IGN])

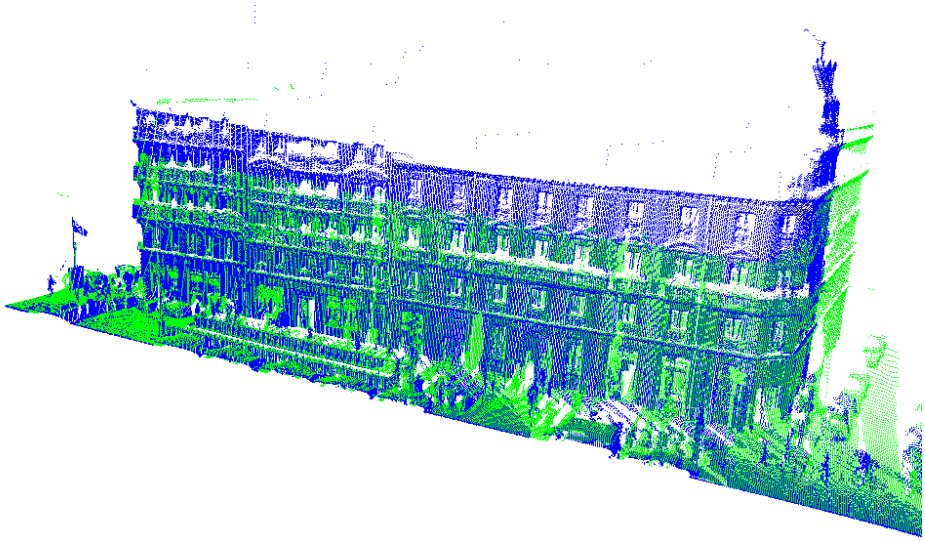

Figure 2-29 : Données acquises par Stéréopolis

La Figure 2-29 montre les données acquises par Stéréopolis pour la rue Soufflot à Paris dans le cadre du projet TerraNumerica. Pour cette acquisition, les deux scanners de Riegl sont orientés sur un même côté de la rue avec des configurations spatiales différentes (en vert, angle de lacet à 0°, et en bleu, angle de lacet à 45°).

### ➢ Principes de lasergrammétrie mobile

Il existe deux modes de fonctionnement pour la lasergrammétrie mobile, selon la façon de combiner les informations de perception et de localisation [Vosselman et Maas, 2010] : « à-la-volée » (on-the-fly) et « pluri-statique » (stop-and-go).

*A-la-volée (On-the-fly)*

Le premier mode, nommé « à-la-volée » (*On-the-fly)*, capture l'environnement en mouvement, c'est-à-dire que les capteurs embarqués fonctionnent pendant le déplacement de la plateforme.

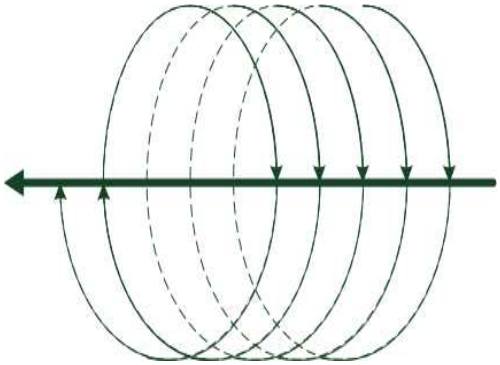

Figure 2-30 : Principe du mode « à-la-volée »

La Figure 2-30 représente le principe du mode « à-la-volée ». La grande flèche représente la direction du mouvement du véhicule et les petites flèches représentent le sens d'acquisition d'un capteur comme un scanner laser 2D. Comme la plateforme se déplace, l'acquisition du capteur est de forme hélicoïdale.

Prenons le système mobile de cartographie LARA-3D comme un exemple de ce mode. LARA-3D (LA Route Automatisée en tridimensionnel) est un prototype conçu et développé par le Centre de Robotique CAOR (Figure 2-31). Il permet de réaliser des études prospectives et nous aide dans le développement de nouveaux concepts relatifs aux systèmes de cartographie [Abuhadrous, 2005, Goulette et al, 2006, Brun et al, 2007].

Figure 2-31 : LARA-3D, système du CAOR, version 2008

Le système LARA-3D est composé d'un GPS, d'une centrale inertielle pour le système de localisation et d'un scanner laser 2D pour le système de perception (selon les usages, nous pouvons ajouter une ou plusieurs caméras). Nous utilisons le logiciel RTMaps qui permet de synchroniser et de traiter des données issues de différents capteurs [web RTMaps].

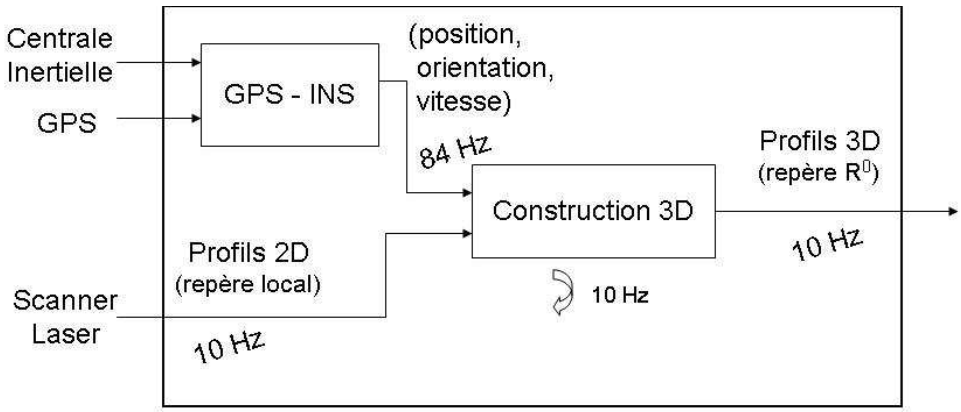


Figure 2-32 : Traitement des données LARA-3D (Source [Goulette et al, 2006])

Sur la Figure 2-32, est présentée la façon de générer un nuage de points issu des données. Les données issues de plusieurs capteurs sont d'abord datées par RTMaps. Ensuite, nous déduisons la position, l'orientation et la vitesse du véhicule à partir des données du couple GPS – centrale inertielle à 84 Hz (vitesse d'acquisition de la centrale inertielle). Les données laser contenant les informations de distances obtenues à partir de chaque profil 2D sont reçues à 10 Hz. Avec ces informations, nous construisons des profils 3D à 10 Hz (vitesse d'acquisition du scanner laser, la vitesse la plus faible qui entre dans l'algorithme de « construction 3D »). L'ensemble des profils 3D construits constitue le nuage de points en 3D.

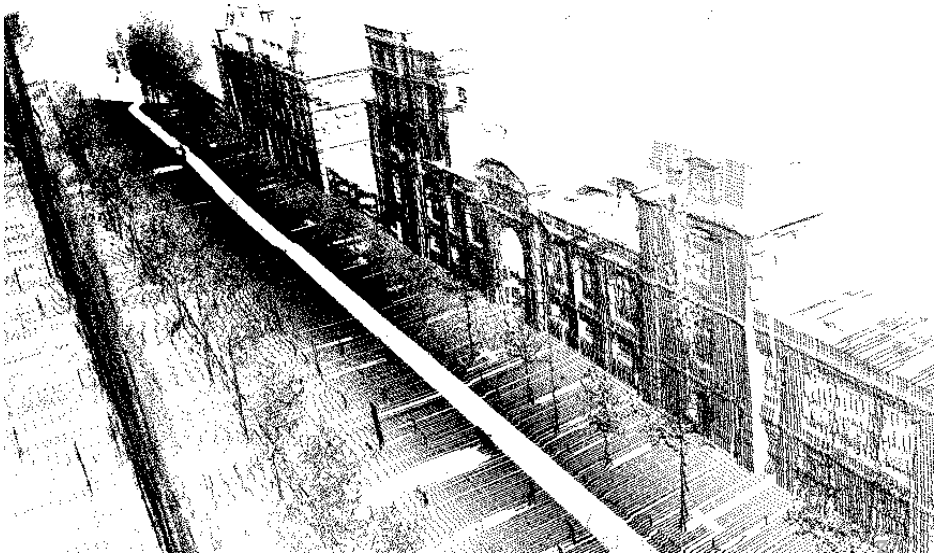

Figure 2-33 : Données acquises avec LARA-3D

La Figure 2-33 montre un nuage de points généré à partir de données de LARA-3D (boulevard Saint Michel, Paris). Le scanner laser utilisé a un champ de vision de 270° (90° d'angle mort) et il est positionné de manière à ce que l'angle mort soit vers le sol. Il en découle une zone sans information au centre de la rue, comme nous pouvons le constater sur la figure.

L'intérêt de ce mode réside dans sa rapidité d'acquisition (le temps d'acquisition est égal au temps de déplacement de véhicule). En revanche, les données doivent être correctement synchronisées afin de produire des informations cohérentes.

### *Pluri-statique (Stop & Go)*

Le deuxième mode capture l'environnement en mode statique. Cela signifie que la position et l'orientation de la plateforme restent statiques lors de l'acquisition. Comme les acquisitions sont faites en plusieurs fois, nous proposons de nommer ce mode « Pluri-statique » (*Stop & Go*).

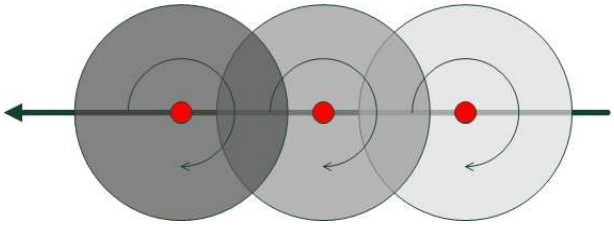

Figure 2-34 : Principe du mode « Pluri-statique »

La Figure 2-34 représente le principe du mode « Pluri-statique ». Les points rouges représentent les positions d'acquisition fixe et la grande flèche représente la direction du mouvement du véhicule entre deux acquisitions. Pendant l'acquisition, le véhicule reste fixe et le scanner tourne sur deux axes de rotation. Après avoir terminé l'acquisition, le véhicule se déplace à une autre position. Le principe de ce mode est d'économiser le temps de préparation (montage et déplacement du système) par rapport aux systèmes statiques.

Ce mode est utilisé pour certains systèmes terrestres comme CityGRID [Haring, 2007] ou le système de l'institut NAIST [Asai et al, 2007]. La Figure 2-35 présente le système mobile de cartographie du NAIST. Ce système est équipé d'un GPS, d'un gyroscope pour la localisation, d'un scanner 3D et d'une caméra omnidirectionnelle pour la perception. La Figure 2-36 montre les images acquises sur une position fixe avec le système de NAIST (l'image du haut est le résultat de l'acquisition laser, l'image du bas est le résultat issu de la caméra).

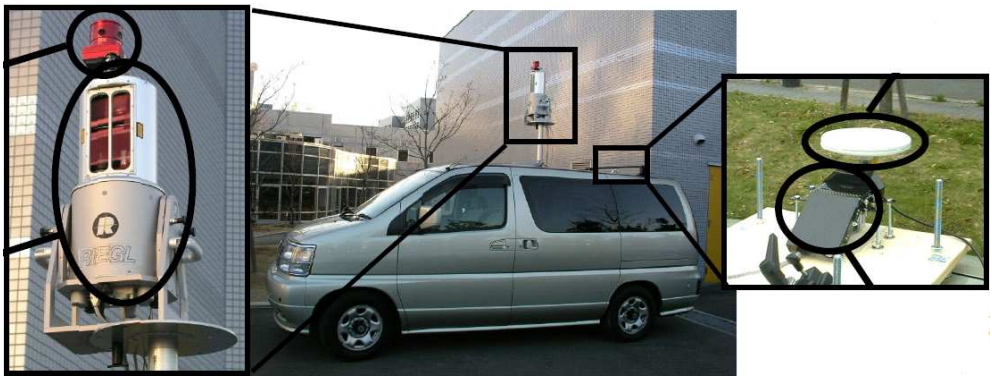

Figure 2-35 : Système du NAIST (Source [Asai et al, 2007])

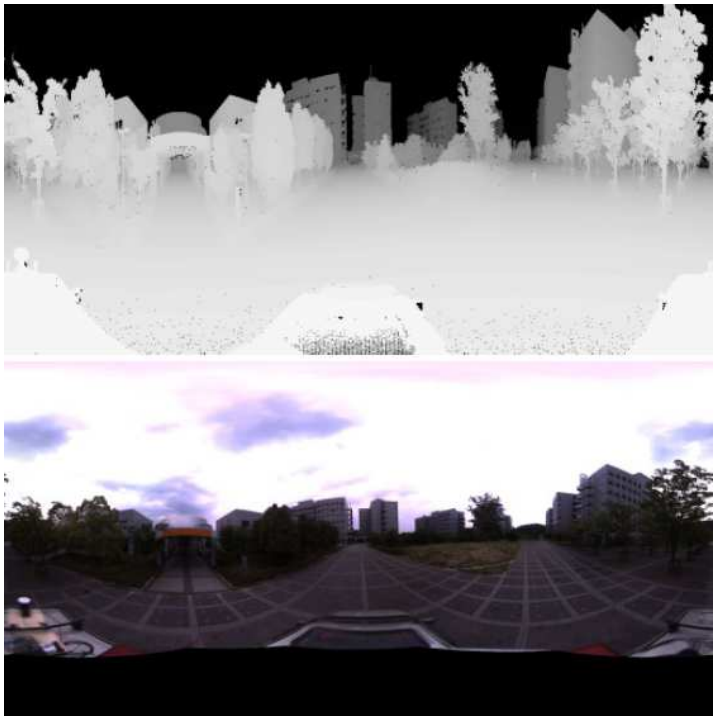

Figure 2-36 : Données du système du NAIST en position fixe (Source [Asai et al, 2007])

L'intérêt de ce système réside dans l'absence de problème de synchronisation entre les données de perception et de localisation. Les données peuvent être plus précises que celles des systèmes en mode « à-la-volée ». En revanche, comme nous devons rester en position fixe pour l'acquisition, le temps d'acquisition devient plus important.

Nous nous intéresserons dans la suite de ce document, principalement aux systèmes mobiles de cartographie avec lasergrammétrie « à-la-volée ».

- **Recherche sur les systèmes mobiles de cartographie**

*Amélioration de la précision des relevés laser*

L'étude sur la précision des relevés laser un thème actuel important de recherche dans le domaine de la cartographie mobile.

La précision des points 3D est directement liée à la localisation du système. L'objectif du système de localisation est de calculer le plus précisément possible la trajectoire de la plateforme au cours de l'acquisition.

Plusieurs capteurs sont utilisés pour la localisation telle que le GPS, la centrale inertielle et odomètre. Mais les capteurs ont des erreurs systématiques et des contraintes. La localisation est donc calculée en faisant la fusion de données issues des différents capteurs [Grinstead et al, 2006].

En plus des informations issues de l'intégration du GPS et de la centrale inertielle, l'utilisation des informations de perception contribue à l'amélioration des informations de localisation tels que le recalage des données images [Grinstead et al, 2005, Kingston et al, 2007] ou l'utilisation des cibles [El-Hakim et al, 1997].

Les données laser elles-mêmes peuvent être utilisées pour améliorer les informations de localisation [Früh et Zakhor, 2004, Howard et al, 2004].

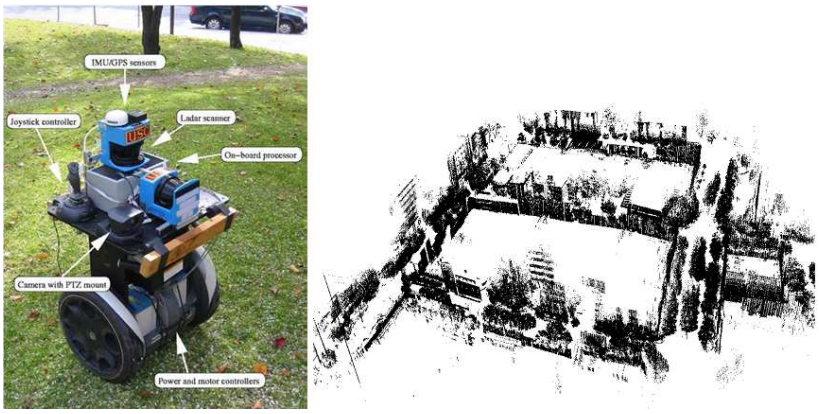


Figure 2-37 : Système de l'Université de Southern California

La Figure 2-37 présente un système équipé de deux scanners laser 2D, d'une caméra, d'un GPS, d'une centrale inertielle et d'un odomètre. L'algorithme d'estimation de position se décompose en quatre étapes : la localisation de « Fine-Scale », la localisation de « Coarse-Scale », la localisation de « Coarse-to-Fine » et la génération cartographique. A l'étape de la localisation de « Fine-Scale », le relevé laser issu du scanner positionné en horizontal est utilisé à l'aide de l'algorithme de « Scan Matching » [Howard et al, 2004].

Les études sur la calibration et le géo-référencement sont également nécessaire pour améliorer les informations de localisation [Manandhar et Shibasaki 2000a ; 2000b ; 2001b].

Enfin, la précision et la qualification des données ont déjà fait l'objet de différents travaux [Barber et al, 2007, Bolzon et al, 2007, Alba et al, 2007, Schaer et al, 2007].

*Modélisation des objets dans un nuage de points*

Un autre thème de recherche d'actualité est la modélisation des objets dans un nuage de points.

L'extraction des éléments caractéristiques tels que les bâtiments (façades), la voirie, la végétation à partir des relevés laser est présentée dans [Manandhar et Shibasaki, 2001c ; 2001d ; 2002].

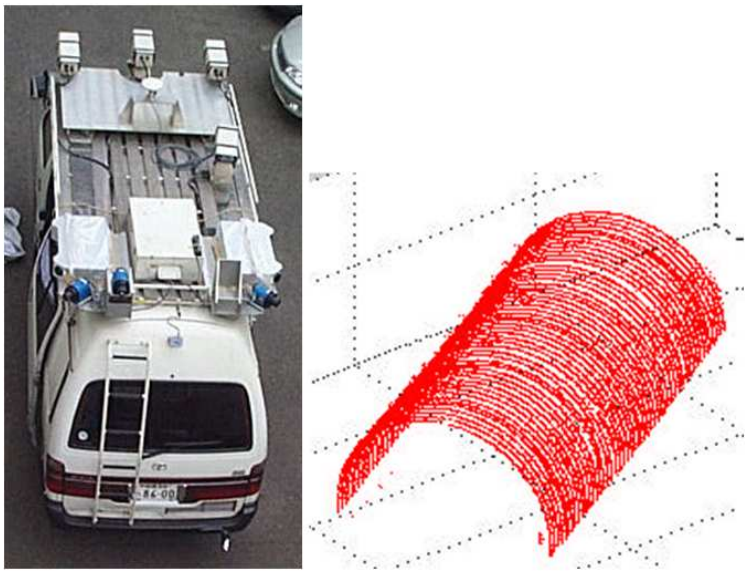

Figure 2-38 : VLMS, système de l'Université de Tokyo

La Figure 2-38 montre le système de l'université de Tokyo, VLMS ((Vehicle-borne Laser Mapping System) avec un exemple d'extraction d'un tunnel à partir du relevé laser. [Manandhar et Shibasaki, 2001d].

Après avoir extrait des éléments, une modélisation peut être réalisée pour différentes applications [Yu et al, 2007, Amoureus, 2007]. La Figure 2-39 représente le système DAVIDE avec un laser de type profilomètre (image en haut à droite) pour mesurer le côté de la voirie en profil, ainsi qu'un système *Traverse Profile Logger* (image en bas à droite) pour mesurer la route. Ce système permet de faire la surveillance, la gestion, l'analyse, le test et la maintenance de la voirie [Amoureus, 2007].

Figure 2-39 : DAVIDE, système de GIOVE (Source [Amoureus, 2007])

## *2.5 Scanners laser pour les systèmes mobiles de cartographie*

Dans cette section, nous présentons des scanners laser utilisés pour la cartographie sur les systèmes mobiles de cartographie terrestres.

- **Scanners laser non dédiés**

Il y a plusieurs scanners laser qui sont utilisés pour les systèmes mobiles de cartographie comme les produits d'IBEO, de SICK, etc. Ce sont des scanners initialement dédiés à d'autres applications. Parmi les nombreux scanners, nous présentons quelques exemples.

| | |
|---|---|
| Fréquence d'impulsion | 10800 Hz |
| Fréquence de balayage | 10 Hz |
| Champ de vision | 270° |
| Portée | 80 m |
| Résolution angulaire | 0,25° |

Figure 2-40 : IBEO LD

IBEO LD est un scanner laser dédié à l'application d'aide à la conduite [web IBEO]. Ce scanner est compact à utiliser sur un système mobile et il possède un grand champ de vision (Figure 2-40). De plus, il a une résolution angulaire constante qui permet de synchroniser facilement les données avec les informations de localisation du véhicule. Il est donc l'un des scanners les plus utilisés pour les systèmes mobiles terrestres de cartographie [Goulette et al, 2006].

| | |
|---|---|
| Fréquence d'impulsion | 54000 Hz |
| Fréquence de balayage | 75 Hz |
| Champ de vision | 180° |
| Portée | 80 m |
| Résolution angulaire | 0,25° / 0,5° / 1° |

Figure 2-41 : SICK LMS 221

Le scanner LMS 221 de SICK est conçu pour des applications telles que la surveillance de passage [web SICK]. Ce scanner est plus rapide en termes de fréquences d'impulsion et de balayage par rapport au scanner IBEO LD (Figure 2-41), il est donc aussi souvent utilisé pour la cartographie [Früh et Zakhor, 2004].

| | |
|---|---|
| Fréquence d'impulsion | 1,8 MHz |
| Fréquence de balayage | 5 ~ 15 Hz |
| Champ de vision | 360° x 26.8° |
| Portée | 50 m |
| Résolution angulaire | 0,09° x 0,4° |

(avec 64 sources laser)

Figure 2-42 : Velodyne HDL-64E

Le scanner HDL-64 E de Velodyne, dédié initialement aux applications de surveillance et automobile, permet de récupérer une information extrêmement riche à l'aide de ses 64 lasers intégrés [web Velodyne].

On trouve d'autres exemples de scanners non dédiés qui ont été utilisés pour la cartographie mobile, tels que Trimble GX [Alshawa et al, 2007 ; 2009] et FARO Photon [web SITECO].

### ➢ Scanners laser dédiés

Depuis peu de temps, les scanners laser dédiés aux systèmes mobiles terrestres de cartographie ont commencé à apparaître. Nous présentons ci-dessous les scanners LYNX et VQ-250.

*Optech LYNX*

En 2007, la société Optech a annoncé son premier scanner laser dédié aux systèmes mobiles de cartographie, LYNX [web Optech, Ussyshkin, 2009].

Figure 2-43 : LYNX, scanner d'Optech

La Figure 2-43 représente LYNX (image de gauche) et un exemple de montage sur un véhicule lors de la conférence InterGEO 2008 [web InterGeo]. Optech propose d'utiliser deux LYNX afin d'obtenir une couverture maximale de la scène. Comme nous pouvons le voir sur la figure, l'exemple d'un système complet contient deux LYNX associés à deux caméras, une antenne GPS (avec son récepteur dans le véhicule) et une centrale inertielle (boîte blanche).

*Riegl VQ-250*

En 2008, la société Riegl a annoncé son premier scanner laser mobile, deuxième scanner sur le marché, VQ-250.

Figure 2-44 : VQ-250, scanner de Riegl

La Figure 2-44 représente le scanner VQ-250 (image de gauche) et un exemple de montage sur un véhicule lors de la conférence InterGEO 2008. Il est aussi utilisé à deux exemplaires afin de couvrir un maximum de la scène.

Figure 2-45 : VMX-250, système de Riegl

Riegl a annoncé en 2009 un système compact et complet, le VMX-250, qui contient deux VQ-250, une centrale inertielle et optionnellement des caméras ou des caméscopes. La Figure 2-45 représente le VMX-250 (image de gauche) et son montage sur un véhicule. Ce système permet de simplifier son montage sur une plateforme [web Riegl].

*Comparaison de LYNX et VQ-250*

La Table 2-2 compare les performances des deux scanners laser, LYNX et VQ-250. Les performances citées dans ce tableau datent de 2008.

Table 2-2 : Comparaison des scanners LYNX et VQ-250

| | **LYNX (Optech)** | **VQ-250 (Riegl)** |
|---|---|---|
| **Principe** | Temps de vol | Temps de vol |
| **Cadence de mesure** | 100k Hz | 200k Hz |
| **Fréquence de balayage** | 150 Hz | Maximum 100 Hz |
| **Portée max** | 100m (pour 20% d'albédo) | 100m (pour 10% d'albédo) |
| **Portée min** | ? | 1m |
| **Précision (1 sigma)** | 8mm | 10mm |
| **Nombre d'échos par pulse** | Maximum 4<br>(1er, 2ème, 3ème et dernier échos) | Illimité |
| **Champs d'ouverture** | 360° | 360° |

Au regard de la cadence de mesure et la fréquence de balayage, nous constatons que VQ-250 permet d'obtenir une résolution angulaire plus fine des données.

En revanche, LYNX permet d'avoir une vitesse du véhicule plus rapide, tout en gardant à résolution horizontale constante.

VQ-250 permet d'acquérir un plus grand nombre d'informations à longue distance car sa portée maximale est donnée pour un albédo plus faible que celui du LYNX.

Les deux systèmes intègrent la technologie de multi-écho. VQ-250 valide tous les signaux de retour tandis que LYNX valide au maximum quatre signaux (les trois premiers et le dernier).

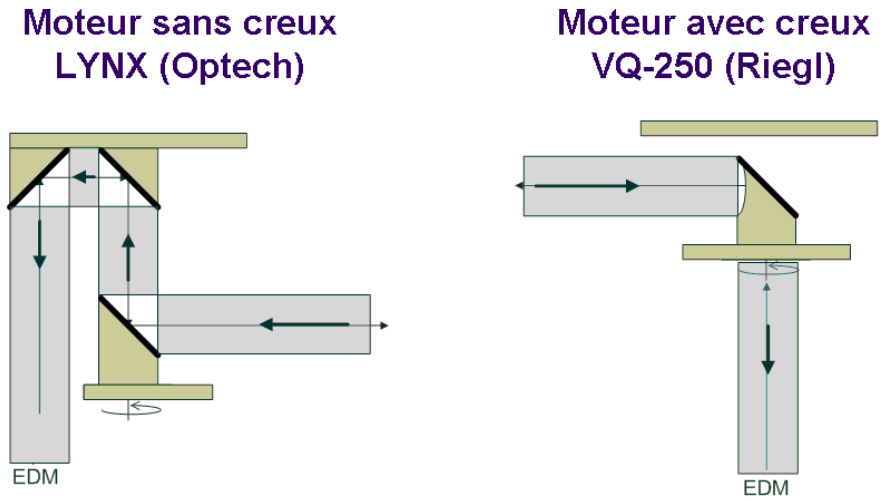


Figure 2-46 : Principe de déflexion du laser des scanners de LYNX et VQ-250

La Figure 2-46 représente les différents principes de déflexion des deux scanners permettant d'avoir un champ de vision de 360°. Le principe du VQ-250 est expliqué dans une brochure technique [web Riegl]. Le principe du LYNX a été imaginé à partir des photos commerciales. Le premier utilise un moteur sans creux. Le second utilise un moteur avec creux.

Il existe encore d'autres produits comme le Dynascan de MDL [web MDL]. Celui-ci présente toutefois des caractéristiques moins intéressantes.

## *2.6 Conclusion*

Nous avons présenté dans ce chapitre les usages de la cartographie 3D d'environnements urbains et les différentes méthodes existantes d'acquisition de données.

Comme les données cartographiques sont utilisées dans plusieurs domaines, les méthodes d'acquisition de données se développent pour mieux répondre aux besoins. Les systèmes

mobiles terrestres ont pour objectif d'acquérir des données rapidement avec un bon niveau de détail.

Dans le chapitre suivant, nous comparons des systèmes statique et mobile afin de confirmer l'avantage de ces derniers. Nous proposons également une méthode d'analyse comparative de la qualité des relevés laser afin de garantir la bonne qualité des données issues des systèmes mobiles.

# Chapitre 3.

# Comparaison et analyse des relevés laser


3.1 INTRODUCTION ..... 52

3.2 COMPARAISON EXPERIMENTALE DES SYSTEMES STATIQUE ET MOBILE ..... 52

*3.2.1 Zone de test ..... 52*

*3.2.2 Acquisition ..... 53*

*3.2.3 Comparaison des temps opératoires ..... 54*

3.3 ANALYSE QUALITATIVE DES RELEVES LASER ..... 55

*3.3.1 Critères de qualité ..... 55*

*3.3.2 Comparaison des données réelles en terme de qualité ..... 62*

*3.3.3 Notes globales pour l'analyse ..... 65*

3.4 CONCLUSION ..... 66

## 3.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de comparer les méthodes statiques et mobiles d'acquisition de données laser. Dans un premier temps, nous comparons les systèmes mobiles et statiques en termes de rapidité d'acquisition pour prouver l'intérêt des systèmes mobiles.

Dans un second temps, nous comparons les relevés laser de ces deux systèmes en termes de qualité. Pour ceci, nous proposons une méthode d'analyse comparative de la qualité des relevés.

## 3.2 Comparaison expérimentale des systèmes statique et mobile

Nous procédons à une comparaison en termes de rapidité d'acquisition entre un système statique et un système mobile dans un cas réel.

### 3.2.1 Zone de test

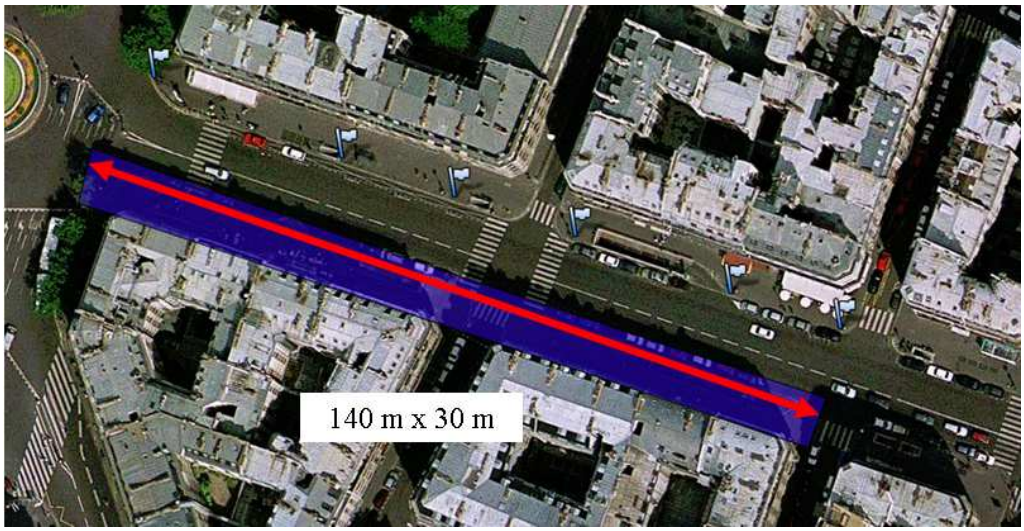


Figure 3-1 : Zone de test pour la comparaison des systèmes statique et mobile

Pour cette comparaison, la rue Soufflot, à Paris, a été choisie (Figure 3-1). Les dimensions de cette zone sont d'environ 140 m de longueur et 30 m de hauteur. Cette zone a été choisie dans le cadre du projet TerraNumerica, d'une part car elle est représentative de la ville de Paris, et d'autre part car elle ne contient pas de végétation, ce qui en facilite la modélisation.

### 3.2.2 Acquisition

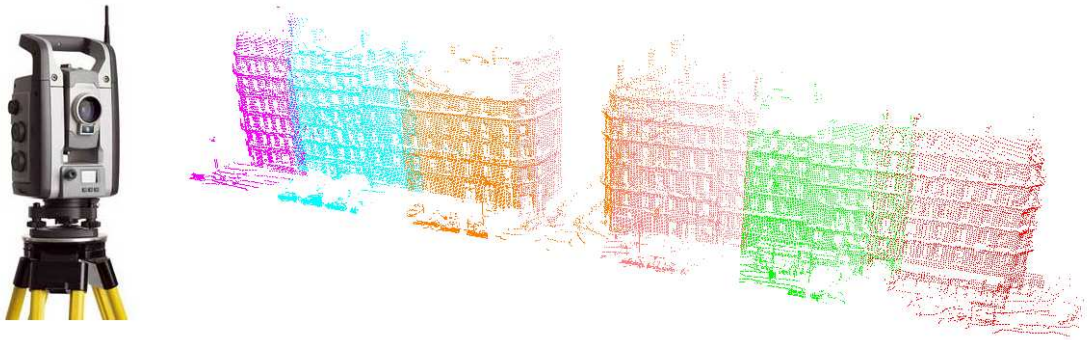

Figure 3-2 : Acquisition de données avec Trimble VX

La Figure 3-2 montre un Trimble VX, une station totale utilisée comme un scanner laser statique, ainsi que les données acquises avec cet appareil. Le côté des numéros impairs de la rue a été numérisé en six stations (présentées en différentes couleurs sur la Figure 3-2 et par des drapeaux sur la Figure 3-1).

La résolution angulaire choisie est de 0,01 radian (≈ 0,57°), autrement dit, un point tous les 50 cm à 50 m.

La consolidation (recalage local) des données est effectuée avant et après l'acquisition de chaque station en numérisant des cibles positionnées au préalable.

Dans cette expérience, les positions des stations d'acquisition n'ont pas été mesurées par un capteur de géo-localisation tel que le GPS. Le géo-référencement est donc fait en post-traitement en considérant des données de Stéréopolis sur la même zone comme référence (données issues du projet TerraNumerica).

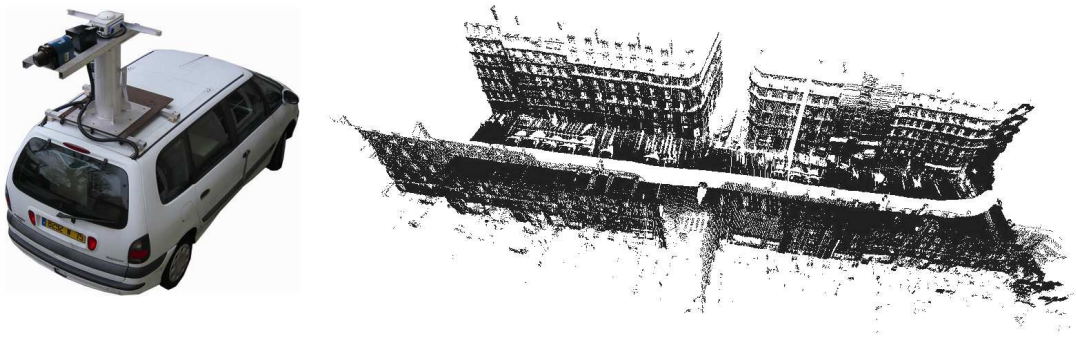

Figure 3-3 : Acquisition de données avec LARA-3D

La Figure 3-3 montre LARA-3D (présenté au Chapitre 2) et les données acquises. Cette acquisition a été faite en un seul passage du véhicule (de droite à gauche sur l'image de

droite de la Figure 3-3). Par ailleurs, les informations des deux côtés de la rue ont été acquises simultanément.

Le scanner laser utilisé a une fréquence de balayage de 10 Hz et le véhicule s'est déplacé à une vitesse comprise entre 6 et 9 km/h. La résolution horizontale est donc comprise entre 17 et 25 cm. La résolution angulaire du scanner laser est de 0,25°.

Grâce au système de localisation de LARA-3D, les relevés laser sont directement lors de l'étape de génération du nuage de points.

### 3.2.3 Comparaison des temps opératoires

La Table 3-1 présente les temps opératoires pour la préparation, l'acquisition et la génération des données avec les systèmes utilisés pour ce test.

Table 3-1 : Temps opératoires pour le système statique et le système mobile

| Temps opératoires | Trimble VX | LARA-3D |
|---|---|---|
| Préparation | 20 minutes x 6 stations | 30 minutes |
| Acquisition | 40 minutes x 6 stations (inclut recalage local) | 1 minute |
| Génération | - | 10 minutes |
| Temps total | 360 minutes (6 heures) | 41 minutes (0,68 heure) |

Avec le Trimble VX, une heure est nécessaire pour chaque station : 20 minutes pour la préparation (l'installation et la désinstallation) et 40 minutes pour l'acquisition incluant le temps de recalage local. Le géo-référencement des données n'a pas été comptabilisé. Le temps nécessaire pour la génération du nuage de points avec un logiciel est négligeable. Ainsi, nous avons pris au total environ 6 heures, de la préparation de l'acquisition à la génération des nuages de points.

Avec LARA-3D, l'acquisition a duré environ une minute. Trente minutes de préparation étaient nécessaires. La génération du nuage de points a nécessité moins de 10 minutes. Ainsi, cette manipulation a duré environ 41 minutes au total.

Cette comparaison montre clairement, sans surprise, qu'un système mobile est capable de réduire le temps d'acquisition. Si nous imaginions de faire l'acquisition d'une plus grande zone, la différence de temps total serait plus conséquente, car il faudrait effectuer plusieurs stations supplémentaires avec le système statique, ce qui implique une heure supplémentaire à chaque fois, alors que quelques minutes supplémentaires suffiraient à l'acquisition des données avec le système mobile.

Néanmoins, la rapidité d'acquisition présenterait peu d'intérêt si la qualité des données acquises n'était pas garantie. En effet, l'absence de qualité nécessiterait un temps supplémentaire pour améliorer la qualité des données soit en procédant à une nouvelle acquisition, soit par un post-traitement des données. Ainsi, la qualité des données est un

facteur important à prendre en considération, dont nous présentons une analyse ci-dessous.

## 3.3 Analyse qualitative des relevés laser

Dans cette section, nous analysons les relevés laser en termes de qualité. Nous proposons pour cela une méthode d'analyse avec les critères que nous considérons importants. Puis, nous présentons l'application de cette analyse sur nos données expérimentales.

### 3.3.1 Critères de qualité

Nous considérons comme critères d'analyse de la qualité des relevés laser, la précision, la résolution et la complétude.

- **Précision**

Le premier critère que nous définissons est la précision. Ce critère est essentiel pour valider un travail de numérisation 3D.

La précision peut être exprimée de plusieurs façons : elle est exprimée en erreur de RMS (*Root Mean Square*) mais aussi en exactitude (biais) et en fidélité (écart-type) [Gajdamowicz et al, 2007, ASTM, 2010].

$$\gamma^2 = \delta^2 + \sigma^2 \qquad \text{Equation 3-1}$$

Avec $\gamma$ : erreur de RMS (m)
$\delta$ : exactitude (m)
$\sigma$ : fidélité (m)

Nous proposons de définir la précision d'un relevé laser en distinguant son exactitude de sa fidélité, les deux étant ensuite reliées à la précision RMS (Equation 3-1) [web RMS].

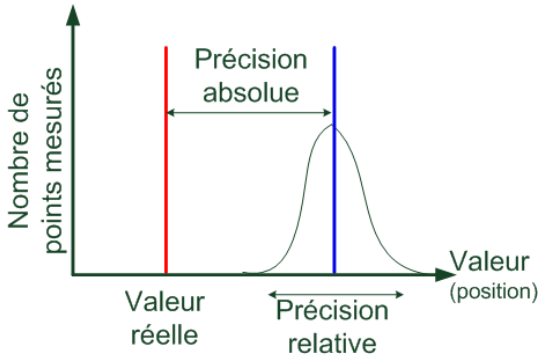


Figure 3-4 : Notions de précisions absolue et relative

La Figure 3-4 représente les notions de précisions absolue et relative par la distribution de valeurs mesurées d'une même position. Une erreur systématique déplace la distribution de la valeur réelle (exactitude) et une erreur aléatoire agrandit la distribution (fidélité).

### *Exactitude*

L'exactitude (en anglais, *accuracy*) est l'étroitesse de l'accord entre le résultat d'un mesurage et une valeur vraie du mesurande [ASTM, 2010, JCGM, 2008]. Nous utilisons la notion de biais pour exprimer la valeur d'exactitude sur le plan quantitatif. Le biais est la différence entre la valeur réelle et la moyenne des données acquises (en mètre).

Pour calculer la valeur de l'exactitude, nous utilisons plusieurs cibles dans la scène à numériser avec différentes positions connues. Les étapes du calcul sont les suivantes :

1. extraire les cibles numérisées
2. calculer le biais entre la position de la cible calculée et sa position réelle
3. calculer la moyenne des biais de toutes les cibles (valeur de l'exactitude)

Pour calculer le biais d'une cible, nous avons besoin de la position réelle de chaque cible. Nous pouvons obtenir la position réelle à l'aide d'un instrument de mesure comme une station totale. Il faut noter que les données doivent être géo-référencées.

### *Fidélité*

La fidélité (en anglais, *precision*) est l'étroitesse de l'accord entre les indications ou les valeurs mesurées obtenues par des mesurages répétés du même objet [ASTM, 2010, JCGM, 2008]. Nous exprimons la valeur de fidélité en écart-type (en mètre).

Comme pour l'exactitude, pour calculer la valeur de précision, nous utilisons plusieurs cibles dans la scène à numériser avec différentes positions. Les étapes du calcul sont les suivantes :

1. extraire les cibles numérisées
2. calculer l'écart-type de chaque cible
3. calculer la moyenne des écarts-type de toutes les cibles (valeur de la fidélité)

On calcule l'écart-type d'une cible en ajustant (*fitting*) le nuage de points de la cible à la forme de celle-ci.

- **Résolution**

Le critère de la résolution est défini pour analyser la répartition spatiale des données acquises et pour vérifier la bonne acquisition des détails dans la scène numérisée.

La résolution des données peut être bonne, trop faible (sous-densifiée) ou trop grande (sur-densifiée). Une résolution sous-densifiée signifie que des détails auront pu être incorrectement numérisés. Une résolution sur-densifiée peut engendrer des problèmes de stockage de données. Une bonne résolution demande que les données soient réparties de manière homogène dans l'espace.

Le plus souvent, l'utilisateur définit une résolution angulaire selon l'application qu'il entend faire et en accord avec le niveau de détail souhaité et à la distance souhaitée. Naturellement, tous les objets de la scène se situant à des distances variées, la résolution locale des données varie en fonction de cette distance.

La Figure 3-5 est un nuage de points acquis par LARA-3D. Comme le scanner laser embarqué a une résolution angulaire déterminée, l'écart en distance entre deux points successifs dépend de la distance scanner-objet.

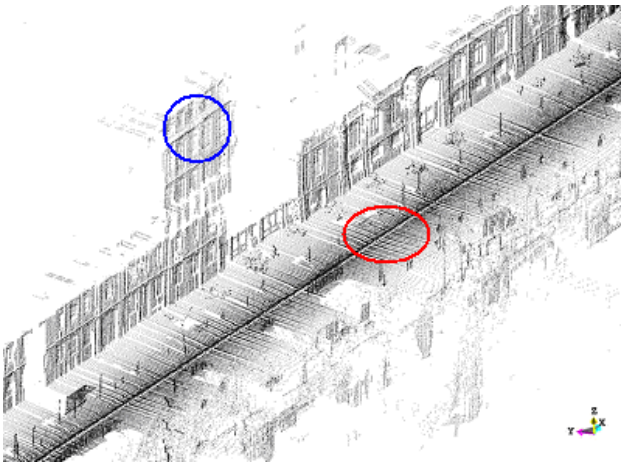

Figure 3-5 : Nuage de points avec des zones de différentes résolutions (Source [Abuhadrous, 2005])

Comme on le voit sur la figure, la zone proche du véhicule est acquise avec une résolution sur-densifiée (cercle rouge) et la zone éloignée du véhicule est acquise avec une résolution sous-densifiée (cercle bleu).

Afin de mieux expliquer ce critère de résolution, nous définissons le terme suivant : la densité locale. La densité locale est définie comme une propriété associée à un point donné « p », et elle est associée au nombre de points au voisinage du point « p » pour une zone donnée (Figure 3-6).

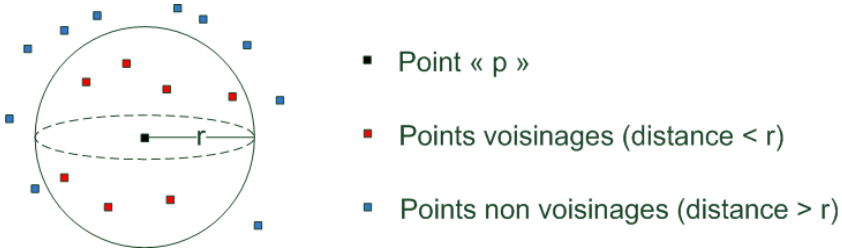


Figure 3-6 : La densité locale du point « p »

Les points au voisinage sont ceux dont la distance avec le point « p » est inférieure au seuil de distance *r*. La zone est un volume sphérique dont le rayon est égal au seuil de distance *r*.

La densité locale à un point est calculée avec l'Equation 3-2 :

$$D_i = \frac{n_i}{\pi r^2} \qquad \text{Equation 3-2}$$

Avec $D_i$ : densité locale au point *i* (pts/m²)

$n_i$ : nombre de points dans le voisinage du point *i*

$r$ : seuil de distance pour déterminer les points du voisinage (m)

Après avoir calculé les densités locales en chaque point d'un relevé, nous déduisons la densité moyenne du relevé laser par l'Equation 3-3 :

$$\overline{D} = \frac{1}{n_T} \cdot \sum_{i=1}^{n_T} D_i \qquad \text{Equation 3-3}$$

Avec $\overline{D}$ : densité moyenne (pts/m²)

$n_T$ : nombre total de points dans le relevé

$D_i$ : densité locale au point *i* (pts/m²)

Nous proposons une représentation de la distribution des points selon leur densité locale par l'outil utilisé en statistiques, appelé « boîte à moustache » (*Box and Whiskers plot* [Tukey, 1977]) comme sur la Figure 3-7.

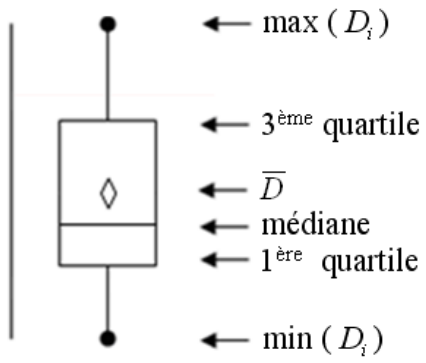


Figure 3-7 : Exemple de « boîte à moustache »

La boîte représente 50 % des données (entre le 1ère et 3ème quartile). Ainsi, nous pouvons dire que plus la taille de la boîte est petite, plus le relevé laser est homogène.

Nous exprimons la résolution souhaitée par intervalle des résolutions minimales et maximales.

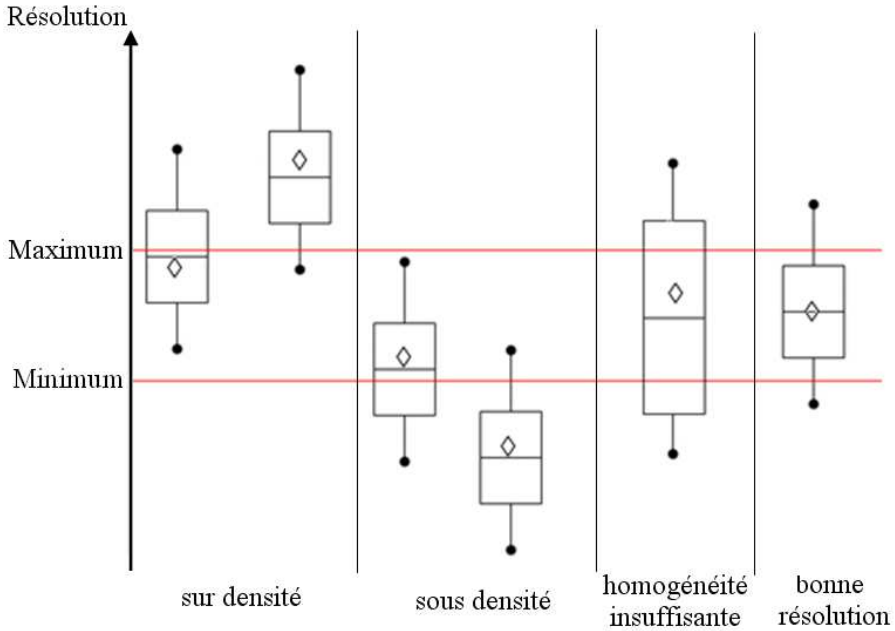


Figure 3-8 : Exemples de boîtes à moustache de résolution par rapport à l'intervalle de résolution souhaitée

Comme on le voit sur la Figure 3-8, plusieurs cas différents peuvent se produire. La première boîte correspond à une résolution partiellement sur-densifiée. La deuxième boîte est entièrement sur-densifiée. La troisième boîte correspond à une résolution partiellement sous-densifiée. La quatrième boîte est entièrement sous-densifiée. La cinquième boîte est bien placée mais la taille de la boîte est trop grande, c'est-à-dire que les données manquent d'homogénéité. La sixième boîte, bien centrée, correspond à une bonne résolution.

Nous proposons de calculer la valeur de résolution avec le Taux de Bonne Résolution (TBR) défini selon l'Equation 3-4 :

$$TBR = \frac{n}{n_T} \qquad \text{Equation 3-4}$$

Avec $TBR$ : Taux de Bonne Résolution (%)

$n$ : nombre de points $i$ tel que $D_i >$ valeur minimale de résolution souhaitée

$n_T$ : nombre total de points du relevé laser

Comme les zones sur-densifiées contiennent des informations utiles, nous retenons également les points de ces zones pour le calcul du TBR.

- **Complétude**

Nous définissons un critère de complétude pour quantifier la couverture d'acquisition des zones d'intérêt.

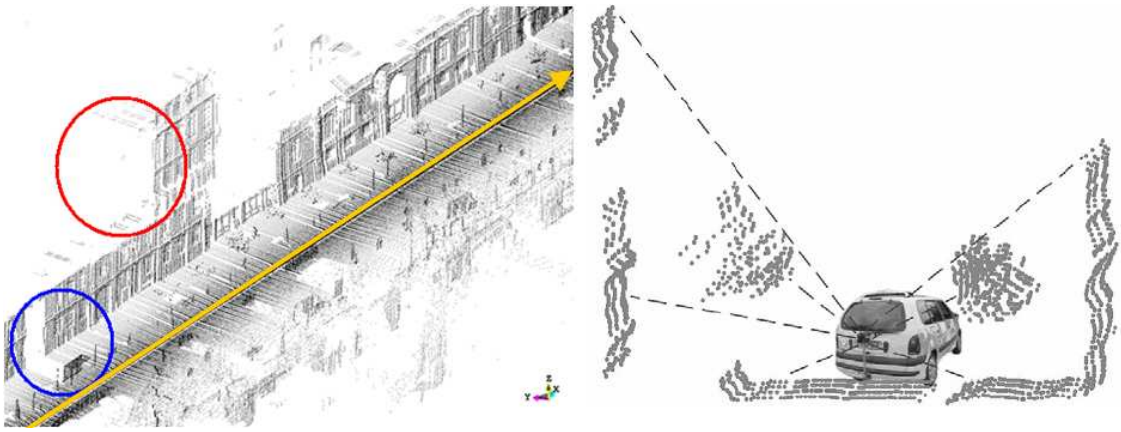

Figure 3-9 : Nuage de points avec des zones non-acquises (Source [Abuhadrous, 2005, Goulette, 2006])

La Figure 3-9 représente un nuage de points acquis avec LARA-3D avec les zones non-acquises, représentées par des cercles colorés (image de gauche). La trajectoire de LARA-3D est représentée en flèche jaune. Un scanner laser est monté sur la plateforme qui mesure selon des profils perpendiculaires à la trajectoire à hauteur de 1 mètre (image de droite, angle mort vers le ciel).

La notion que nous avons choisie pour représenter et mesurer ce critère est la surface couverte. Cette notion est liée au problème d'occultation et de visibilité.

L'occultation peut avoir plusieurs origines, comme par exemple, des objets fixes ou mobiles situés devant les zones d'intérêt. La zone représentée par un cercle bleu sur la Figure 3-9 montre une partie de la façade qui est occultée par un abribus.

Il peut y avoir des zones non acquises même s'il n'y a pas d'occultation. Ce sont des zones non visibles par le système au cours de l'acquisition, comme par exemple la zone représentée par un cercle rouge sur la Figure 3-9.

Pour calculer la surface couverte, nous choisissons les zones d'intérêt telles qu'un bâtiment, un pont, etc. Ensuite, on calcule la surface couverte à l'aide de l'Equation 3-5 :

$$S = \frac{n}{\overline{D}} \qquad \text{Equation 3-5}$$

Avec $S$ : surface couverte (m²)
$n$ : nombre de points de la zone d'intérêt (pts)
$\overline{D}$ : densité moyenne de la zone d'intérêt (pts/m²)

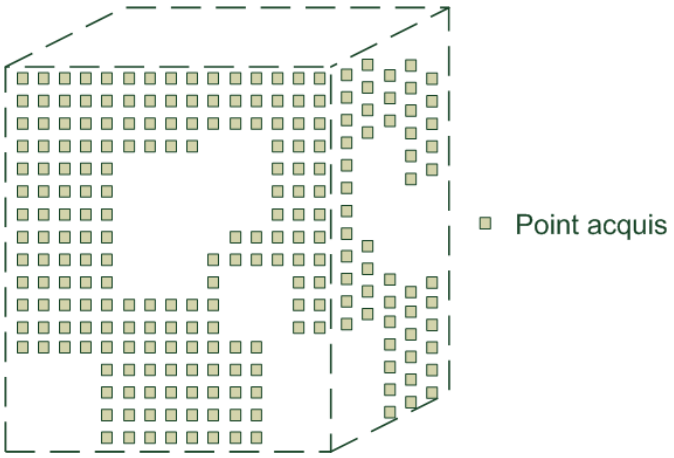


Figure 3-10 : Exemple de la surface couverte

La Figure 3-10 montre un exemple de la surface couverte d'un bâtiment. Il y a des zones non couvertes et elles sont représentées par le blanc sur la figure. Il y a au total 240 points qui couvrent le bâtiment. En supposant que la densité moyenne de ce bâtiment est de 10 points/m², il en résulte que la surface couverte est de 24 m² (240 / 10).

D'un point de vue pratique, les surfaces couvertes sont calculées sur plusieurs zones d'intérêt choisies dans un même nuage de points, et extraites manuellement, mais identiques entre deux relevés obtenus avec des configurations d'acquisition différentes. C'est ce qui permet d'effectuer ensuite des comparaisons.

### 3.3.2 Comparaison des données réelles en termes de qualité

Dans cette partie, nous utilisons les notions et critères que nous venons de définir, pour analyser les acquisitions réalisées par systèmes statique et mobile sur la rue Soufflet présentées ci-dessus. Nous limitons la comparaison à la partie commune aux deux acquisitions (numéros impairs de la rue, à droite en regardant le Panthéon).

- **Précision**

*Exactitude*

Comme nous n'avions pas placé de cible, nous choisissons des objets fixes comme éléments de comparaison (lampadaires et panneaux). Un relevé de Stéréopolis disponible sur la même zone est utilisé comme référence.

Avec le relevé du Trimble VX, nous avons mesuré des différences de distance de 52 mm, 58 mm et 55 mm, ce qui donne une valeur d'exactitude de 55 mm.

Avec le relevé de LARA-3D, nous avons mesuré des différences de 242 mm, 200 mm et 248 mm, ce qui donne une valeur d'exactitude de 230 mm.

*Fidélité*

N'ayant pas de cible, nous choisissons trois zones aléatoires sur les façades comme des cibles pour les calculs. Nous obtenons la valeur de fidélité à l'aide du logiciel RealWorks Survey qui donne une valeur d'écart-type par la fonction « *fitting* ».

Avec les données du Trimble VX, nous avons eu des écart-types de 0,1 mm, 0,5 mm et 0,3 mm, ce qui donne une valeur de fidélité de 0,3 mm.

Avec les données de LARA-3D, nous avons eu des écart-type de 25,3 mm, 39,0 mm et 35,9 mm, ce qui donne une valeur de fidélité de 33,41 mm.

Table 3-2 : Valeurs de précision des relevés laser issus du Trimble VX et de LARA-3D

| | Trimble VX | LARA-3D |
|---|---|---|
| Exactitude (mm) | 55 | 230 |
| Fidélité (mm) | 0,3 | 33,4 |
| RMS (mm) | 55 | 231,6 |

Comme on le voit dans la Table 3-2, les précisions absolues sont moins bonnes que les précisions relatives pour les deux relevés laser. Elles conditionnent la précision RMS totale des relevés, reportés dans le tableau après calcul par la formule de l'Equation 3-1.

On observe que le relevé laser obtenu par le système mobile LARA-3D souffre sur cet exemple, d'une précision bien moins bonne que celle du système statique.

➢ **Résolution**

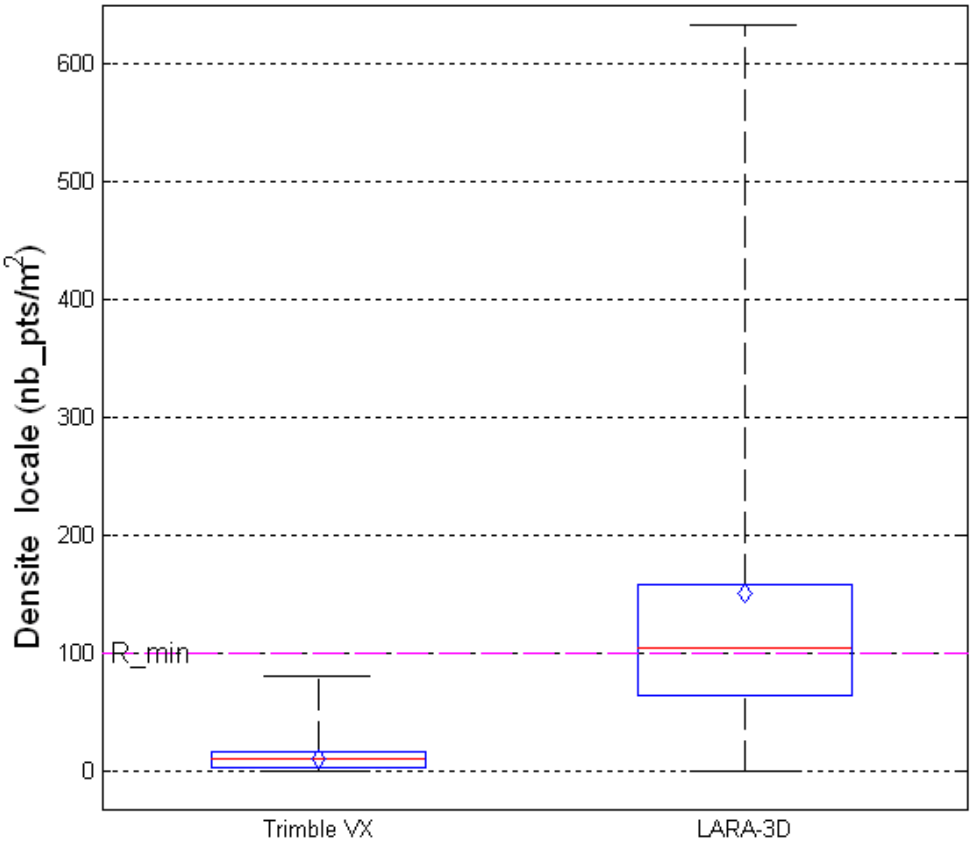


Figure 3-11 : Résolution des relevés laser du Trimble VX et de LARA-3D

La Figure 3-11 représente la distribution de la résolution des données. Pour calculer le TBR, nous choisissons de fixer la résolution minimale à 100 points/m², soit un point tous les 10 cm au carré.

Table 3-3 : Valeur de résolution des relevés laser issus du Trimble VX et de LARA-3D

| | Trimble VX | LARA-3D |
|---|---|---|
| Densité (pts/m²) | 11,2 | 151 |
| TBR (%) | 0 | 54 |

Le Trimble VX produit un nuage de points à densité moyenne très faible avec 11,2 points/m$^2$ tandis que LARA-3D produit un nuage de points à densité moyenne relativement meilleure avec 151 points/m$^2$.

En termes du Taux de Bonne Résolution, le relevé de LARA-3D donne un meilleur résultat que celui du Trimble VX. Le TBR à 0 % du relevé du Trimble VX est la conséquence de l'acquisition avec une résolution angulaire faible (0,01 rad) compte tenu de la distance entre les stations et les façades (environ 25 m).

En revanche, le relevé du Trimble VX est plus homogène que celui de LARA-3D (taille des boîtes et amplitude de variation).

- **Complétude**

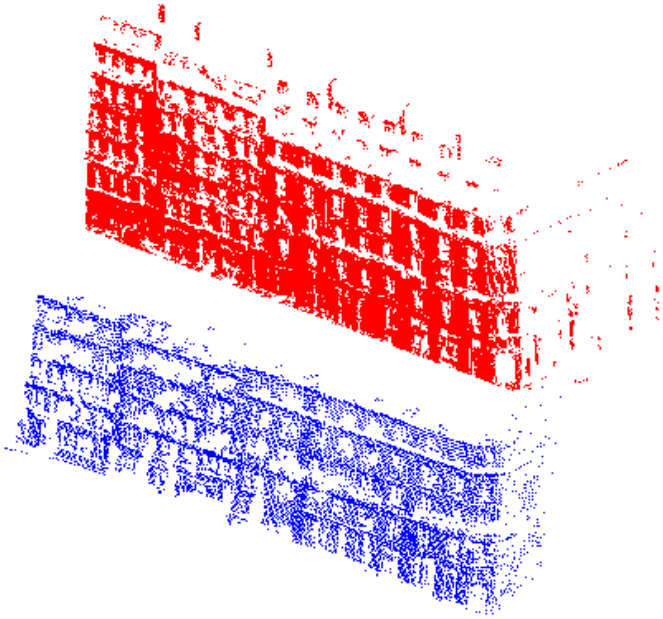

Figure 3-12 : Représentation des points de la surface couverte

La Figure 3-12 représente deux nuages de points d'un bâtiment pour calculer la surface couverte. La surface couverte pour les données du Trimble VX (représentées en bleu) est de 521,23 m² tandis que la surface couverte pour les données de LARA-3D (représentées en rouge) est de 685,84 m².

Table 3-4 : Surface couverte des relevés laser du Trimble VX et de LARA-3D

| | Trimble VX | LARA-3D |
|---|---|---|
| Surface couverte (m²) | 521 | 685 |

La Table 3-4 représente la surface couverte des relevés du Trimble VX et de LARA-3D. La différence de surface couverte s'explique par plusieurs raisons : les positions d'acquisition, les occultations différentes dues aux véhicules en stationnement (moments d'acquisition différents).

### 3.3.3 Notes globales pour l'analyse

Pour terminer cette démarche, nous proposons de calculer une note unique synthétisant les différentes caractéristiques d'un relevé laser.

- **Normalisation**

Comme les intervalles des notes sont différents pour chaque critère, il est nécessaire de normaliser ces intervalles. Nous proposons de calculer les notes normalisées entre 0 et 1 avec l'Equation 3-6:

$$N_i = \frac{C_i - C_{\min,i}}{C_{\max,i} - C_{\min,i}} \qquad \text{Equation 3-6}$$

Avec $N_i$ : note normalisée pour le critère *i*

$C_i$ : valeur du critère *i*

$C_{\min,i}$ : valeur minimale du critère *i*

$C_{\max,i}$ : valeur maximale (ou idéale) du critère *i*

Pour la précision (absolue et relative), nous proposons d'utiliser une échelle logarithmique. Ceci permet de représenter plus facilement des ordres de grandeur de précision, comme cela est indiqué sur la Table 3-5.

Table 3-5 : Notation logarithmique de la précision

| Précision | Note |
|---|---|
| 1 mm | 3 |
| 1 cm | 2 |
| 1 dm | 1 |
| 1 m | 0 |

- **Calcul des notes globales**

Table 3-6 : Notes globales de l'analyse comparative

| | Coefficient | Relevé laser 1 | Relevé laser 2 | … |
|---|---|---|---|---|
| Critère 1 | $Coeff_1$ | $N_{1,1}$ | $N_{2,1}$ | … |
| Critère 2 | $Coeff_2$ | $N_{1,2}$ | $N_{2,2}$ | … |
| … | … | … | … | … |
| Note globale | - | $N_globale_1$ | $N_globale_2$ | … |

Après avoir normalisé les notes et défini les coefficients, nous remplissons une table globale (voir exemple sur la Table 3-6). Ensuite, nous calculons la note globale pour chaque relevé laser.

Cette démarche permet d'aboutir à une note globale, unique, pour chaque relevé laser. Ceci a été illustré dans trois publications (revue « Bulletin of Geodetic Sciences », conférences MMT 2009 et ISPRS Commission V 2010, voir p.145). Elle demande toutefois de préciser les coefficients utilisés pour chaque critère, qui peuvent dépendre des applications ; ceci a un impact fort sur la note globale obtenue. Concrètement dans la suite de ce document, et pour cette raison, la note globale n'est pas calculée, les comparaisons étant effectuées critère par critère.

## *3.4 Conclusion*

Nous avons comparé dans ce chapitre les systèmes statiques et mobiles en termes de rapidité et de la qualité des données acquises.

Nous avons confirmé que comparés aux systèmes statiques, les systèmes mobiles permettaient de réduire de façon considérable le temps d'acquisition.

Néanmoins, la rapidité d'acquisition n'a de sens que si les systèmes mobiles garantissent une bonne qualité des données. C'est pour cette raison que nous avons décidé de comparer les différentes données acquises en termes de qualité.

Pour cela, nous avons proposé une méthode d'analyse comparative de qualité des relevés laser issus des différents systèmes d'acquisition en définissant quelques critères.

A l'aide de cette étude, nous avons pu quantifier la qualité des différents relevés laser obtenus lors de notre expérimentation.

# Chapitre 4.

# Impact expérimental de la géométrie d'acquisition


4.1 INTRODUCTION ..... 68

4.2 VARIATION DE L'ANGLE DE LACET ..... 68

*4.2.1 Réalisation du prototype ..... 68*

*4.2.2 Acquisition de données ..... 72*

4.3 VARIATION DE L'ANGLE DE TANGAGE ..... 76

*4.3.1 Réalisation du prototype ..... 76*

*4.3.2 Acquisition de données ..... 77*

4.4 CONCLUSION ..... 79

## 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions, par l'expérimentation, l'impact de la géométrie du système d'acquisition sur la qualité des relevés laser. Cette étude est faite en procédant à la variation de l'orientation du scanner laser sur la plateforme.

Afin de mieux expliquer la configuration spatiale sur la plateforme, nous définissons un repère local comme indiqué sur la Figure 4-1.

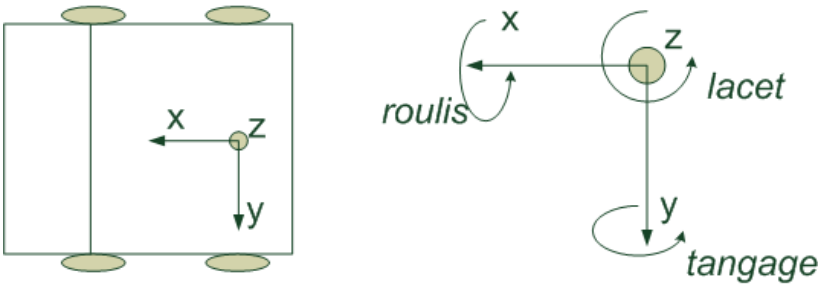


Figure 4-1 : Repère local de la plateforme

Le point (0, 0, 0) de ce repère est défini par le centre de l'axe des deux pneus arrières. La direction du mouvement du véhicule est sur l'axe X (Figure 4-1, gauche).

Concernant l'orientation, nous appelons de façon classique « roulis » la rotation autour de l'axe X ; « tangage » la rotation autour de l'axe Y ; et « lacet » la rotation autour de l'axe Z (Figure 4-1, droite).

## 4.2 Variation de l'angle de lacet

La première étude d'impact de la géométrie consiste à faire varier l'angle de lacet. Pour cette étude, on utilise le scanner 3D terrestre Trimble GX sur la plateforme LARA-3D qui est équipée d'un système de localisation.

L'objectif principal est de comprendre l'impact de la variation de l'angle de lacet sur la qualité des relevés laser. Un objectif secondaire est de comprendre les contraintes de mise en œuvre telles que la fixation du système et les vibrations subies par le système.

### 4.2.1 Réalisation du prototype

- **Etude de sécurité**

Le scanner Trimble GX est normalement conçu pour être monté sur un trépied avec une embase de type instrument de géomètre comme illustré sur la Figure 4-2.

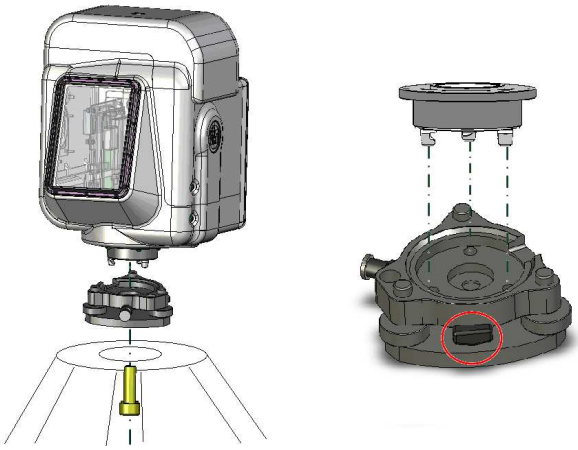

Figure 4-2 : Montage de scanner Trimble GX sur un trépied

Le scanner est tenu dans l'embase à l'aide d'un mécanisme de blocage (cercle rouge, image de droite). Cet ensemble se fixe sur un trépied à l'aide d'une vis (image de gauche).

Le scanner Trimble GX étant lourd (environ 13 kg), il peut y avoir un risque de sécurité en le montant sur la plateforme mobile LARA-3D.

Pour minimiser ce risque, nous ajoutons quelques pièces supplémentaires telles qu'indiquées sur la Figure 4-3.

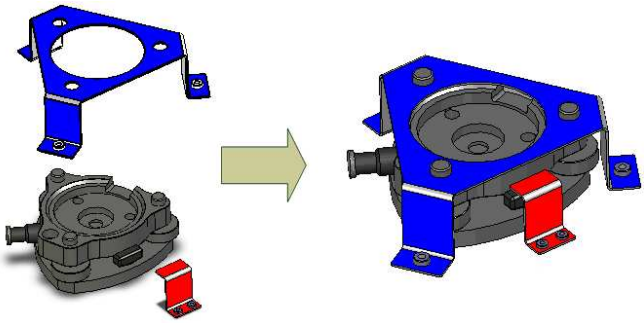

Figure 4-3 : Pièces supplémentaires pour la sécurité du Trimble GX sur Lara-3D

La liaison entre l'embase et la plateforme est garantie par l'ajout d'une pièce représentée en bleu. Cette pièce permet également à l'embase de rester fixe sans tourner autour de l'axe de la vis de maintien.

La liaison entre le scanner et l'embase est quant à elle garantie par l'ajout d'une pièce représentée en rouge, qui empêche le mécanisme de blocage de se lever.

Après un test effectué sur la plateforme LARA-3D, nous avons conclu que nous n'avions pas besoin d'autres pièces supplémentaires pour la sécurité du scanner sur la plateforme.

### ➢ Etude de vibration

Une fois la sécurité garantie, nous avons étudié le niveau de vibration qu'un scanner peut subir au cours d'une acquisition mobile classique. Si le niveau de vibration est important, il peut y avoir un impact sur la qualité des données et sur la durée de vie du scanner.

Le niveau de vibration se mesure par l'intermédiaire d'un accéléromètre qui mesure les accélérations dans toutes les directions. Cet instrument de mesure (SAVER 3L60) est installé dans un scanner Trimble GX en remplacement de composants internes afin que la mesure soit effectuée au plus près de ce que reçoit le scanner et de façon à ce que le poids soit le même qu'un scanner standard (voir la Figure 4-4). Les informations d'accélération sont enregistrées durant les mouvements du véhicule.

Figure 4-4 : Trimble GX avec accéléromètre

Après avoir monté le scanner sur la plateforme LARA-3D comme sur la Figure 4-5, nous conduisons le système en effectuant des accélérations et des décélérations.

Figure 4-5 : Trimble GX avec accéléromètre sur LARA-3D.

Un parcours de ce prototype est effectué autour du jardin du Luxembourg à Paris avec des routes goudronnées et des routes pavées (Figure 4-6).

Figure 4-6 : Zone de test de vibration

Nous avons collecté les informations des vibrations au cours du mouvement de LARA-3D. La Figure 4-7 représente le graphique d'analyse de vibration obtenue.

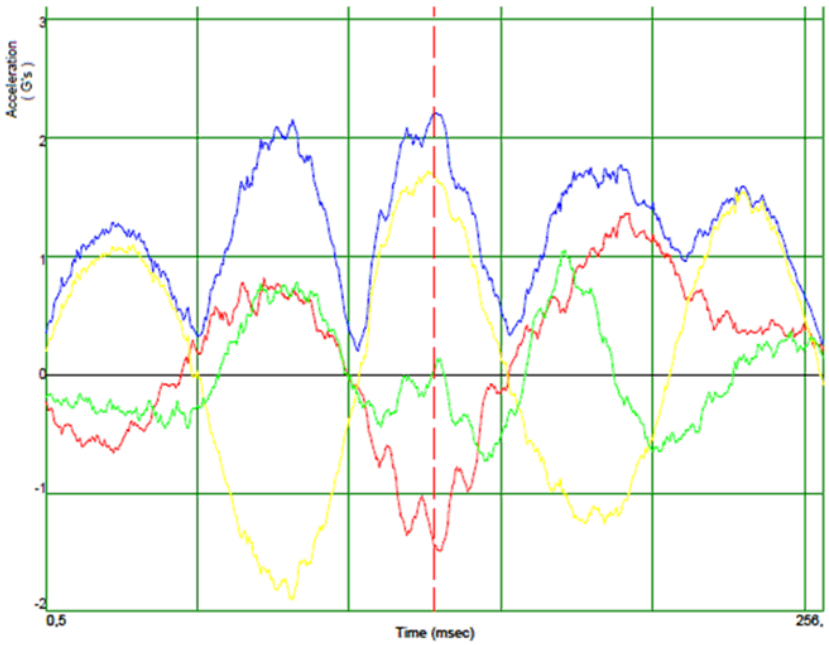


Figure 4-7 : Résultat du test de vibration du Trimble GX sur LARA-3D

Les vibrations sont exprimées en accélération (en unité de G = 9,8 m/s²) sur trois axes. Le scanner Trimble GX est capable de supporter jusqu'à 7G. Selon le résultat d'analyse, l'accélération triaxiale maximale obtenue était 2,22G, ce qui est inoffensif pour la durée de vie ou pour la qualité de la calibration métrologique.

Ce résultat nous permet de valider que les vibrations sont négligeables pour le scanner. Il est toutefois à noter que ces vibrations peuvent avoir un impact sur la précision des relevés laser. Une étude complémentaire à ce sujet serait à mener, incluant par exemple du recalage en post-traitement [Ridene, 2010].

- **Développement de la partie informatique**

Le scanner Trimble GX ne comporte pas de compteur d'horodatage des points 3D acquis (*timestamping* ou compteur de synchronisation). En revanche, afin que les données laser soient cohérentes avec les données de localisation de LARA-3D, il faut qu'elles soient synchronisées entre elles.

Une adaptation spécifique du Trimble GX a ainsi dû être menée pour assurer deux fonctions essentielles : ajouter la notion d'horodatage dans le scanner Trimble GX (synchronisation) ; contrôler le scanner à partir du logiciel RTMaps qui enregistre et collecte les données issues de tous les capteurs de la plateforme LARA-3D. Le travail réalisé pour cela est détaillé en Annexe 1.

### 4.2.2 Acquisition de données

Après avoir terminé la réalisation du prototype, nous avons effectué une acquisition de données sur une rue. Ce travail a été effectué avec Taha Ridene, docteur de MINES ParisTech.

- **Montage**

Le montage du scanner Trimble GX sur la plateforme LARA-3D est tel qu'indiqué précédemment. Quant au positionnement, le scanner est placé au bout de la plateforme (Figure 4-8). Le scanner est toujours en mesure de tourner autour de l'axe de lacet en toute sécurité (comme indiqué sur l'image de droite).

Figure 4-8 : Trimble GX sur LARA-3D

L'acquisition se fait en cinq passages avec différentes orientations de scanner (cinq relevés laser). La Figure 4-9 montre les cinq différents profils. Ils sont tous orientés vers le côté droit du véhicule. Le premier profil est perpendiculaire à la direction du véhicule. Par convention, nous le définissons comme l'angle 0°. Les autres profils ont un angle de lacet de ± 30° et ± 45° par rapport au premier profil.

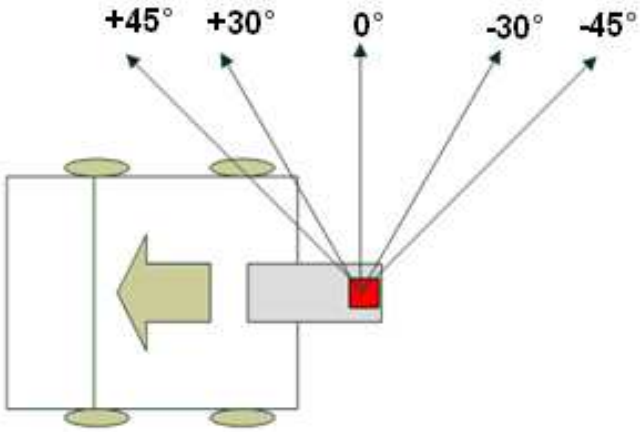


Figure 4-9 : Acquisition en 5 profils

- **Zone d'acquisition**

Nous avons fait l'acquisition du côté impair de la rue Soufflot à Paris. La Figure 4-10 montre la zone d'acquisition pour le prototype, représentée par le rectangle jaune et la direction de LARA-3D par la flèche rouge. Comme on le voit, il y a trois carrefours dans cette zone, ce qui permet de visualiser les différences entre les cinq profils notamment en termes de complétude.

Figure 4-10 : Zone d'acquisition pour Trimble GX sur LARA-3D

➢ **Résultat**

Nous analysons les relevés laser sur les critères de résolution et de complétude présentés au Chapitre 3. La précision n'est pas traitée car elle n'est pas liée à la géométrie d'acquisition.

Suite au post-traitement permettant de combiner les informations de localisation du véhicule et les données laser, nous avons obtenu les résultats présentés sur la Figure 4-11.

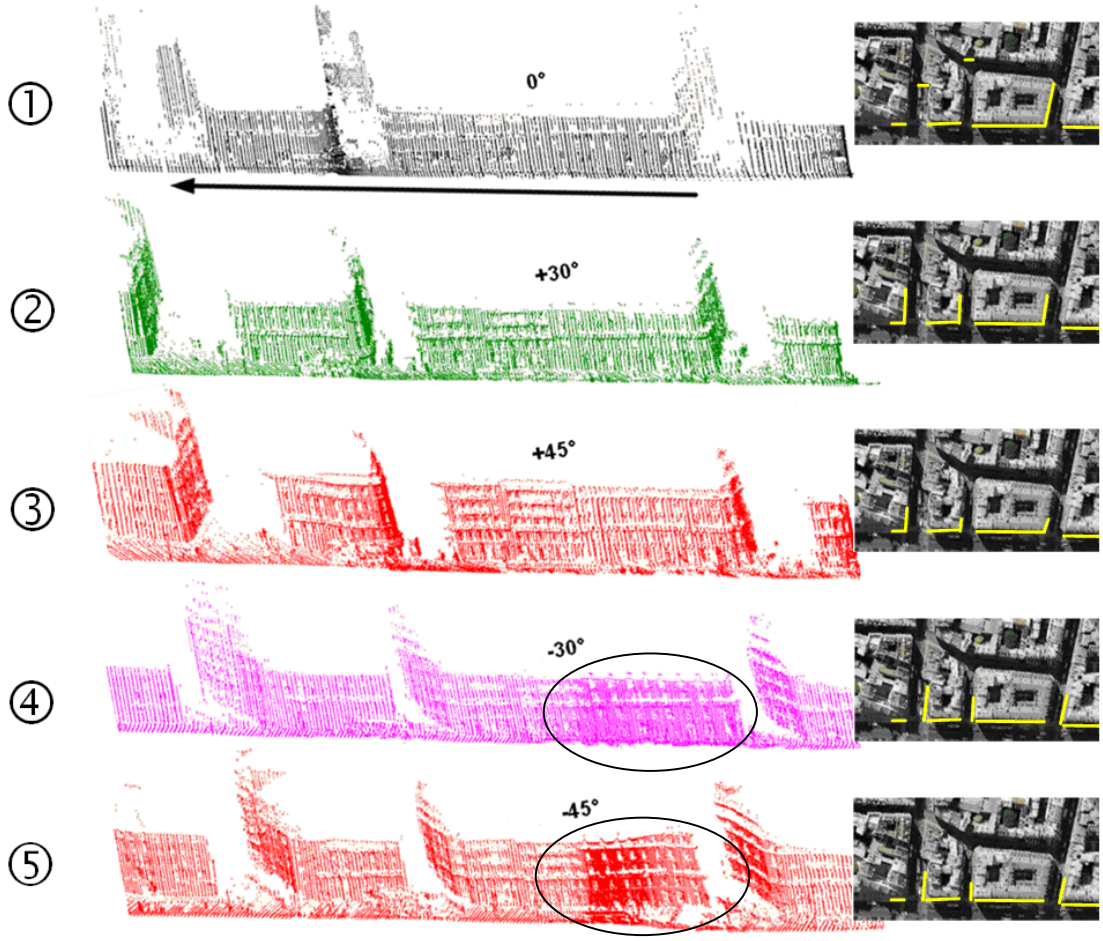


Figure 4-11 : Acquisition de zone test par Trimble GX sur LARA-3D avec différents angles de lacet : nuages de points à gauche, zones couvertes à droite

La Figure 4-11 représente les cinq relevés laser acquis par le Trimble GX monté sur LARA-3D. Les lignes jaunes dans les images de droite représentent les zones couvertes.

*Résolution*

La Figure 4-12 représente la distribution de la résolution des cinq relevés laser de prototype Trimble GX sur LARA-3D.

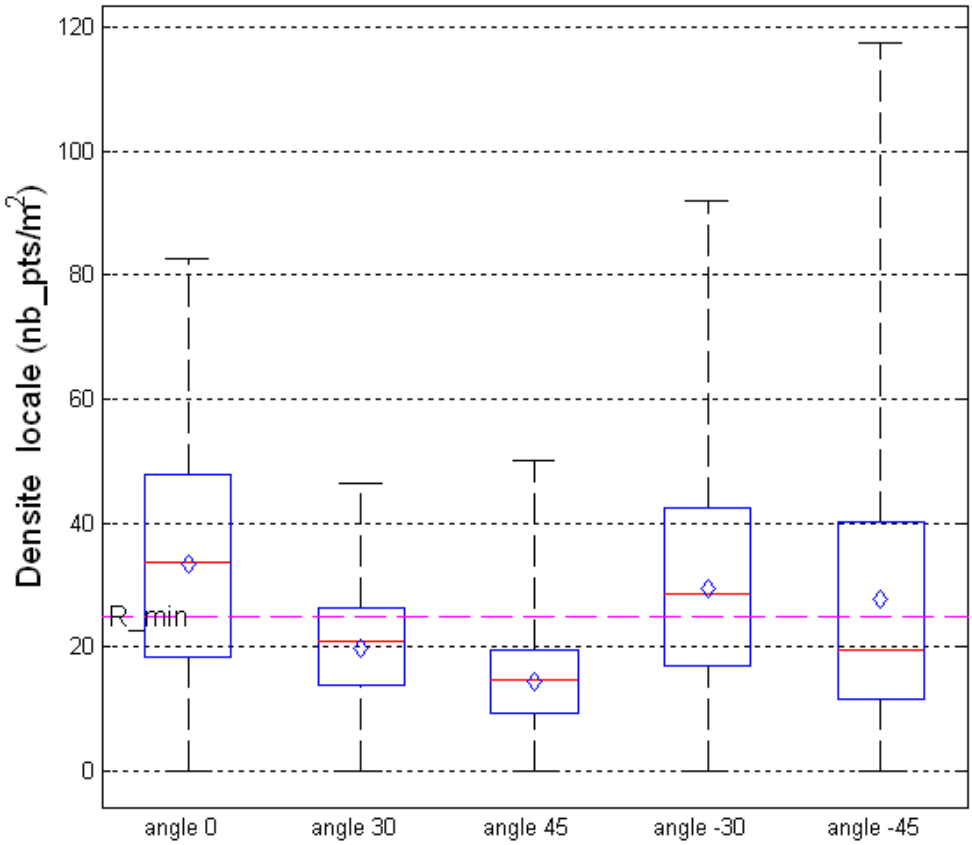

Figure 4-12 : Résolution de différents relevés selon l'angle de lacet

Nous choisissons de fixer la résolution minimale à 25 points/m², la moyenne des densités de tous les relevés ce qui permet de mieux visualiser la différence entre les relevés laser en calculant les Taux de Bonne Résolution (TBR).

Table 4-1 : Valeurs de résolution de différents relevés selon l'angle de lacet

| | 0° | +30° | +45° | -30° | -45° |
|---|---|---|---|---|---|
| Densité (pts/m²) | 33,3 | 19,9 | 14,5 | 29,5 | 27,6 |
| TBR (%) | 72 | 49 | 24 | 66 | 48 |

La Table 4-1 représente les valeurs de résolution des différents relevés laser ainsi que les TBR. On observe une grande différence entre +30° et – 30° (également entre +45° et -45°), alors que ces valeurs devraient être semblables. Cette différence est due à la vitesse du véhicule qui n'était pas constante pendant l'acquisition. En effet, il y a eu un ralentissement du véhicule lors de l'acquisition de la zone avec les angles -30° et -45° (représentée par des cercles sur la Figure 4-11), augmentant ainsi la densité de cette zone. Par conséquent, les valeurs de résolution des relevés avec les angles -30° et -45° deviennent plus importantes.

Ainsi, nous préférons limiter la comparaison aux trois premiers relevés (0°, +30° et +45°) qui sont acquis à une vitesse relativement régulière.

Le TBR devient de plus en plus réduit avec l'augmentation de l'angle de lacet ce qui est logique, car la distance entre le système et l'objet devient plus grande avec l'augmentation de cet angle.

*Complétude*

La Table 4-2 représente la surface couverte des relevés obtenus avec différents angles de lacet. Un angle de lacet de 30° semble augmenter la surface couverte. En revanche, l'angle de lacet de 45° couvre moins de zones que l'angle de lacet de 0°. Comme on le voit sur les images de droite de la Figure 4-11, une valeur trop forte d'angle de lacet peut limiter la surface couverte des façades.

Table 4-2 : Surface couverte des différents relevés selon l'angle de lacet

| | Avec 0° | Avec +30° | Avec +45° | Avec -30° | Avec -45° |
|---|---|---|---|---|---|
| Surface couverte ($m^2$) | 2180 | 2675 | 2148 | 2887 | 2499 |

Pour conclure cette analyse, nous confirmons que la variation de l'angle de lacet influence la qualité des relevés laser en termes de résolution et de complétude. La résolution a tendance à diminuer lorsque l'incidence s'écarte de la normale. L'impact sur la complétude est plus complexe car l'angle de lacet peut augmenter ou diminuer la surface couverte.

## *4.3 Variation de l'angle de tangage*

La seconde étude d'impact de la géométrie consiste à comprendre l'influence de l'inclinaison du scanner 3D autour de l'axe de tangage.

### 4.3.1 Réalisation du prototype

Nous utilisons un prototype de scanner mono-plan réalisé par l'équipe R&D Scanner chez Trimble. Les caractéristiques du prototype sont indiquées dans la Table 4-3.

Table 4-3 : Caractéristiques de technologies utilisées pour le prototype

| | |
|---|---|
| Fréquence d'impulsion | 1MHz |
| Fréquence de balayage | 60 Hz |
| Champ de vision | 270° |
| Portée maximale | 100m |

### 4.3.2 Acquisition de données

- **Montage**

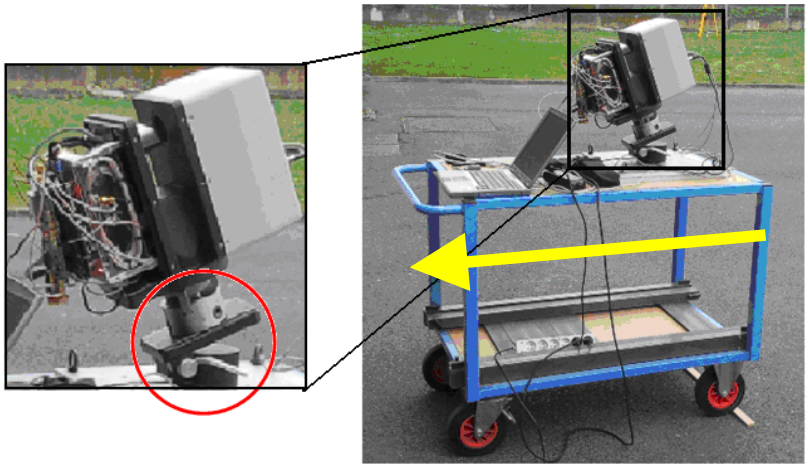

Figure 4-13 : Scanner mono-plan sur chariot

Nous réalisons le montage du prototype sur un chariot, une plateforme simple sans système de localisation (Figure 4-13). Le prototype est monté en supprimant le mouvement de rotation horizontale (en enlevant la motorisation). Nous y ajoutons un accessoire permettant de l'incliner facilement (cercle rouge). La direction du mouvement est indiquée par la flèche jaune. Nous procédons à trois acquisitions avec les angles de tangage de 0°, de 20° et de 40°.

- **Zone d'acquisition**

Figure 4-14 : Zone d'acquisition pour le scanner mono-plan sur chariot

La zone d'acquisition pour ce prototype est le bâtiment de MENSI-Trimble (Figure 4-14). Nous cherchons à scanner le plan de la façade en face du bâtiment perpendiculaire à la direction du mouvement (ligne rouge). La direction du mouvement est représentée en flèche jaune.

- **Résultat**

La Figure 4-15 montre les résultats d'acquisition de trois différentes inclinaisons.

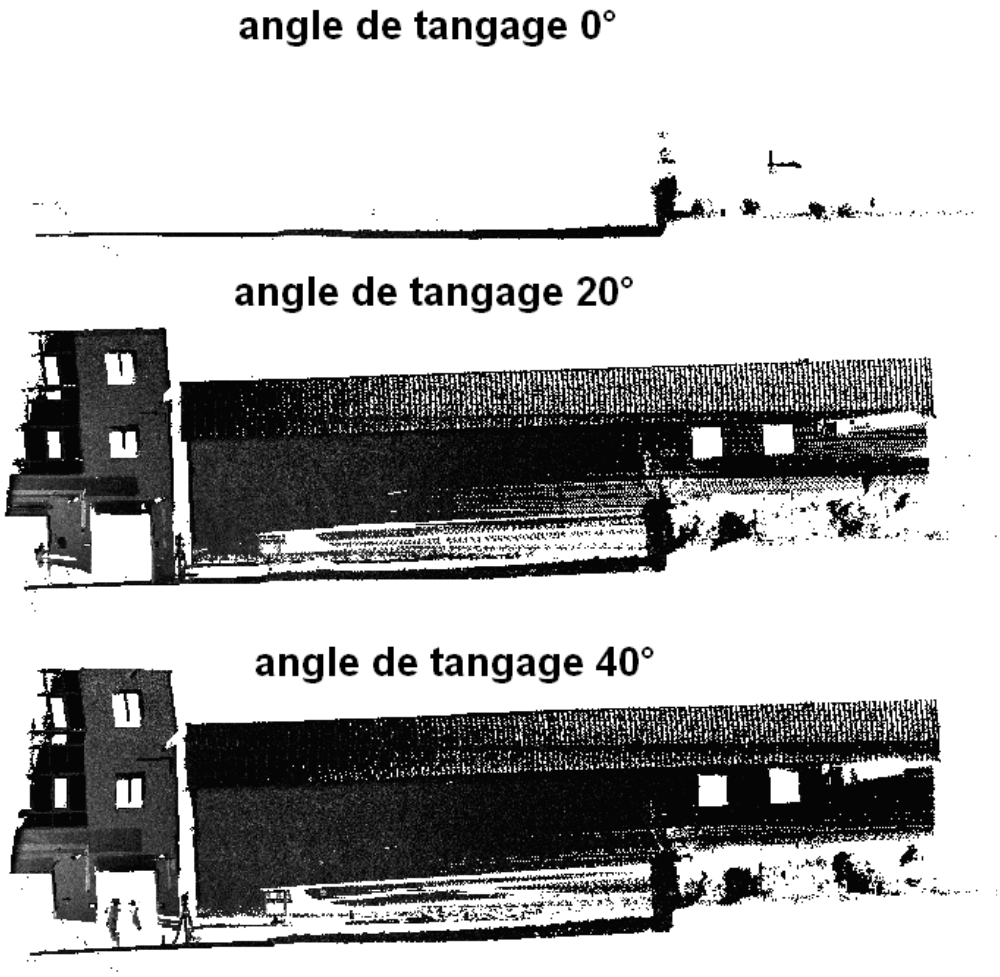


Figure 4-15 : Nuages de points acquis par le scanner mono-plan sur chariot

Aucun point n'a été mesuré sur la façade du bâtiment pour une inclinaison de 0 : Le plan de balayage est totalement parallèle au plan de la façade. Avec les inclinaisons de 20° et de 40°, nous voyons apparaître les informations de façade, même si les angles incidents sont importants à l'extrémité de la façade.

Nous pouvons donc confirmer que l'inclinaison permet d'avoir plus de visibilité sur les façades perpendiculaires à la direction de mouvement du système.

## *4.4 Conclusion*

Nous avons vu dans ce chapitre l'impact de la géométrie du système d'acquisition sur la qualité des relevés laser. En effet, les variations des angles de lacet et de tangage influencent clairement les critères de résolution et de complétude.

En revanche, l'acquisition expérimentale de données en situation réelle est longue et difficile, car la réalisation de ces systèmes est complexe à mettre en œuvre. Pour cette raison, le recours à la simulation pourrait être bénéfique.

Dans le chapitre suivant, nous présentons un outil de simulation développé à cette fin et plusieurs concepts proposés et comparés.

# Chapitre 5.

# Concepts de scanners laser mobiles


5.1 INTRODUCTION ..... 82

5.2 OUTIL DE CONCEPTION ASSISTEE PAR ORDINATEUR ..... 82

*5.2.1 Processus de conception ..... 82*

*5.2.2 Simulateur de Système Mobile de Cartographie ..... 84*

5.3 ANALYSE COMPARATIVE DES CONCEPTS DE SCANNER LASER MOBILE ..... 89

*5.3.1 Objectif et conception ..... 89*

*5.3.2 Création de scénarios ..... 90*

*5.3.3 Proposition de concepts de type « Mono-plan » ..... 91*

*5.3.4 Proposition de concepts de type « Multi-plans » ..... 105*

5.4 CONCLUSION ..... 122

## 5.1 Introduction

Certains scanners laser dédiés à la cartographie mobile ont commencé à apparaître sur le marché, tels que LYNX et VQ-250 (Chapitre 2). Ces scanners permettent d'acquérir des données avec une bonne précision. Mais ils répondent imparfaitement aux besoins de résolution et de complétude. Ainsi, il est souvent recommandé d'utiliser deux scanners de ce type.

On imagine donc qu'il y aurait encore des améliorations possibles sur les scanners laser dédiés à la cartographie mobile, afin que ceux-ci répondent aux critères désirés de qualité de données, de coût et de taille du système.

Dans le cadre de cette thèse, nous cherchons donc à concevoir un système de scanning laser mobile qui puisse améliorer ces critères, et en particulier la précision, la résolution et la complétude.

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord un outil de conception assistée par ordinateur qui permet de faciliter la conception des systèmes de scanning laser mobile. Ensuite, nous proposons plusieurs concepts possibles et nous les comparons en utilisant la méthode d'analyse présentée au Chapitre 3.

## 5.2 Outil de conception assistée par ordinateur

Afin de concevoir un ou plusieurs systèmes, nous suivons un processus de conception. Dans cette section, nous expliquons le processus de conception d'un système mobile de cartographie. Puis, nous montrons les intérêts d'un outil de conception assistée par ordinateur. Nous présentons par la suite le simulateur que nous avons choisi comme outil à cette fin.

### 5.2.1 Processus de conception

D'un point de vue général, pour valider un concept de système mobile de cartographie, nous distinguons cinq étapes (Figure 5-1) :

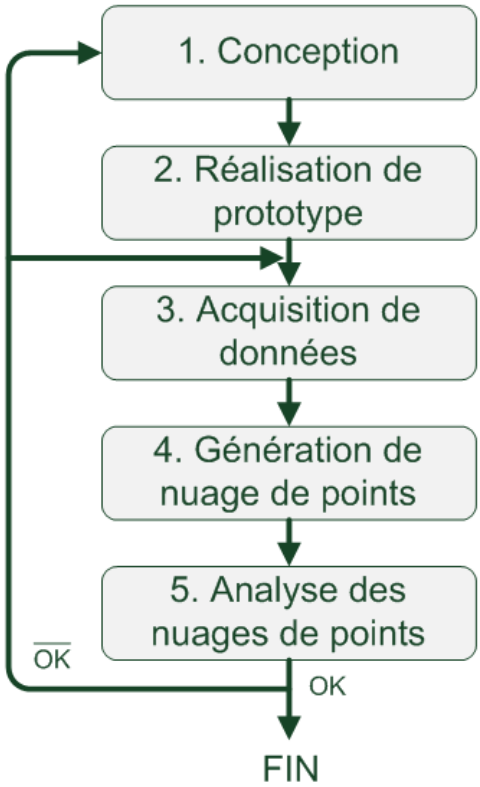


Figure 5-1 : Processus de conception de systèmes mobiles de cartographie

- **Etape 1 : Conception**

Dans cette étape, nous concevons un système en définissant les caractéristiques des capteurs à embarquer et leur configuration spatiale sur la plateforme mobile selon les besoins de nos applications.

- **Etape 2 : Réalisation de prototype**

Après avoir conçu un système, nous le réalisons. Selon le concept choisi, soit nous achetons, soit nous développons des capteurs puis les intégrons dans une plateforme mobile. Cette étape a besoin de suffisamment de temps et de moyens. L'intégration des capteurs doit être validée du point de vue de la sécurité (montage rigide) et du fonctionnement (synchronisation des différents capteurs, calibrations, etc.).

- **Etape 3 : Acquisition de données**

Une fois la réalisation du système terminée, nous faisons l'acquisition de données avec le système. Nous choisissons d'abord une (ou plusieurs) zone(s) de test selon nos besoins et notre application. Ensuite nous effectuons l'acquisition.

- **Etape 4 : Génération de nuage de points**

Nous traitons les données acquises dans l'étape précédente en faisant la fusion de données issues de différents capteurs afin de générer les nuages de points.

- **Etape 5 : Analyse des nuages de points**

Nous analysons les nuages de points en termes de qualité. Sur la base de cette analyse, nous évaluons le concept proposé. Si le résultat n'est pas satisfaisant, alors on revient soit à l'étape d'acquisition (étape 3), soit à l'étape de conception (étape 1) pour concevoir un autre système qui puisse mieux répondre à notre application. Nous pouvons avoir, dans cette étape, des idées sur les points forts et les points faibles de chaque concept.

Ce processus classique de conception nécessite beaucoup de temps et de dépenses dans les étapes de réalisation et d'acquisition (étapes 2 et 3) pour des raisons qui ne sont pas liées au concept proprement dit (achat des matériels, installation, climat, recherche des zones expérimentales, etc.). Pendant la réalisation des prototypes du Chapitre 4, nous avons ainsi dû consacrer plusieurs jours pour monter le scanner sur la plateforme.

Lorsqu'on prévoit de faire plusieurs acquisitions, il faut également faire attention aux conditions climatiques qui peuvent jouer sur la qualité de données, et aussi ne pas gêner la circulation lorsque la zone de test est en milieu urbain. De plus, si nous n'arrivons pas à trouver un concept qui convienne, alors nous devons repasser de nouveau toutes ces étapes.

A noter également, le système de localisation a un impact sur le résultat obtenu, alors que ses performances peuvent varier d'une acquisition à l'autre sans relation directe avec le prototype de scanner laser testé.

Ainsi, si l'on pouvait remplacer les étapes 2 et 3 par une simulation, on pourrait économiser beaucoup de temps et de dépenses lors du processus de conception. On pourrait également séparer l'impact de la géométrie du concept des autres facteurs tels que la localisation. C'est ce que nous proposons ci-dessous.

### 5.2.2 Simulateur de Système Mobile de Cartographie

- **Caractéristiques attendues d'un simulateur**

Le simulateur doit pouvoir générer des nuages de points à partir d'un système mobile de cartographie virtuel. Pour pouvoir simuler les étapes 2 et 3 du processus précédent, il doit contenir des modules de capteurs, véhicule et une scène virtuelle réaliste en 3D.

*Module de capteurs*

Nous avons besoin de différents capteurs virtuels pour pouvoir créer un système mobile de cartographie virtuelle. Tout d'abord, un module de scanner laser est impérativement nécessaire. Ce module doit pouvoir acquérir les informations de distance d'un objet à

partir du module dans la scène virtuelle. Le module de scanner laser doit prendre comme paramètres les caractéristiques importantes d'un scanner laser (portée, fréquence de balayage et d'impulsion, champs de vision, etc.). Il est aussi nécessaire d'avoir des modules de capteurs de localisation comme un GPS, une centrale inertielle. Ces données doivent être datées afin de les synchroniser pour la fusion.

*Module de véhicule*

Un véhicule virtuel de simulateur doit être dynamique avec une vitesse connue et modifiable. Le véhicule doit pouvoir embarquer des capteurs et leurs configurations spatiales sur le véhicule doivent être facilement modifiables.

*Scène*

Une scène de simulateur doit contenir des objets réalistes, il doit y avoir alors des bâtiments, des ponts, des routes, des véhicules (statiques ou dynamiques), des arbres, etc. Les positions de ces objets doivent être modifiables. Idéalement les objets doivent également pouvoir être représentés avec des caractéristiques de surface différentes (type de matériel, couleurs, etc.).

### ➢ SiVIC, Simulateur de Véhicules, Infrastructures et Capteurs

Pour réaliser une simulation de prototypage (véhicule, environnement, capteurs), la plate-forme de simulation SiVIC (Simulateur Véhicule, Infrastructure et Capteur) a été retenue.

Cette plateforme a été développée au sein du laboratoire LIVIC (INRETS-LCPC). Elle est maintenant commercialisée par la start-up CIVITEC [web Civitec]. Il peut y avoir d'autres simulateurs pour acquérir des données comme MATLAB Simulink, mais SiVIC est le mieux adapté à la simulation d'acquisitions de capteurs embarqués (scanner laser et caméra) sur un véhicule terrestre et à la simulation d'un environnement. De plus, il est possible de transférer les données provenant des capteurs simulés vers RTMaps. Ceci permet alors de développer les applications de traitement de données avec RTMaps et ensuite de pouvoir les utiliser directement sur un véhicule LARA-3D.

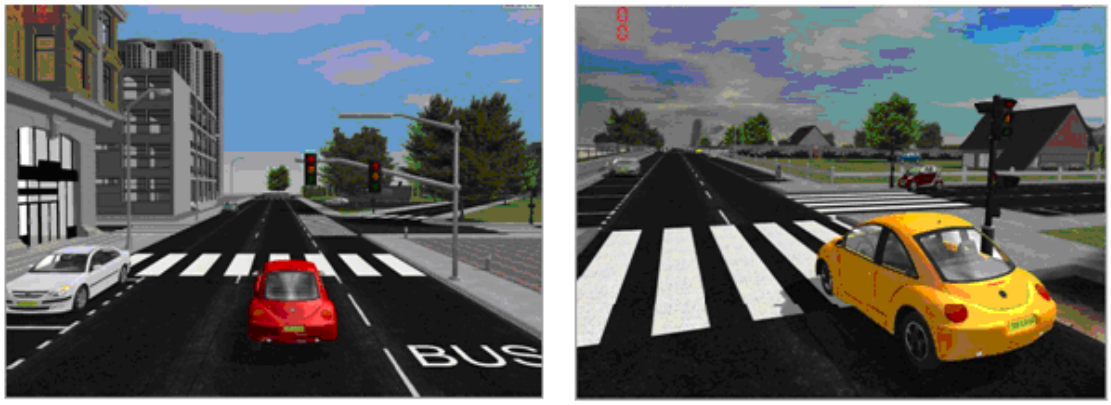


Figure 5-2 : SiVIC, Simulateur Véhicules Infrastructures Capteurs

SiVIC est une plate-forme de prototypage de capteurs virtuels dont le but est de reproduire, de la manière la plus fidèle possible, la réalité d'une situation dans le paysage urbain, le comportement d'un véhicule et le fonctionnement des capteurs qui peuvent y être embarqués (Figure 5-2) [Gruyer et al, 2005 ; 2006, Boussard et al, 2006]. Cette plate-forme propose donc de générer des données homogènes à celles qui peuvent être enregistrées par un système d'acquisition de données sur un véhicule d'essai réel, à savoir un flux continu de données numériques datées et synchronisées sur la même base de temps, issues des caméras, scanner laser, GPS, centrale inertielle, etc. Il est alors possible d'utiliser ce logiciel pour produire à volonté les données correspondant à des scénarios de conduite choisis, évitant ainsi les difficultés liées à la mobilisation de véhicules réels et au stockage des données.

Les objectifs recherchés et les points importants caractérisant les fonctionnalités de la plate-forme SiVIC sont nombreux et divers. Cette plate-forme permet la simulation de scénarios routiers et peut aussi être utilisée comme simulateur d'un modèle physique très réaliste du véhicule pour tester les algorithmes de contrôle/commande. Citons quelques points forts de cette plate-forme :

- Simulation des caméras fournissant un rendu graphique réaliste,
- Simulation des capteurs télémétriques utilisant un modèle géométrique des véhicules et de leur environnement,
- Possibilité de mettre facilement en place des scénarios et d'interagir sur tous les paramètres de la scène en temps réel,
- Gestion des conditions climatiques : brouillard, luminosité, pluie, etc.
- Intégration d'un modèle de commande facilement modifiable,
- Intégration d'un générateur de trajectoire permettant de faire suivre à la voiture une trajectoire imposée.
- Modélisation des caractéristiques de la route (texture, adhérences, …)

Afin de compléter l'ensemble des capteurs embarqués sur les véhicules de SiVIC et ainsi d'obtenir une homogénéité avec des prototypes réels, un ensemble de capteurs proprioceptifs sont disponibles. Ceux-ci comprennent des odomètres et des centrales inertielles (accéléromètres et gyromètres sur les 3 axes). De façon à pouvoir gérer facilement tous les capteurs proprioceptifs et extéroceptifs de SiVIC, un module de gestion de leurs modes de fonctionnement et de leurs bases de temps respectives existe.

De plus, la plate-forme SiVIC est couplée avec le logiciel RTMaps afin de pouvoir générer des séquences de données virtuelles (caméras, télémétrie laser, odométrie, INS, etc.) homogènes avec les données réelles traitées sur un véhicule prototype réel. En effet, avec cette architecture, les algorithmes de perception et de contrôle/commande utilisés sur les véhicules d'essais et avec SiVIC sont strictement les mêmes. Ceci est très intéressant dans les phases d'évaluation de fonctions d'aide à la conduite dans des conditions particulières et sur de très longues durées. De plus, afin de compléter cette fonctionnalité d'outil virtuel de référence pour l'évaluation des aides à la conduite, un mécanisme de gestion de scénarios dynamiques est disponible. Celui-ci permet de mettre

en place une procédure d'évaluation complexe et complète en enchaînant de nombreux scénarios en boucle, déclenchés automatiquement par un module de gestion dynamique d'événements (position d'un objet, distance entre deux objets, intervalle de temps).

Ce logiciel nous permet de simuler les concepts de scanner dans un environnement réaliste : l'état du véhicule et les objets à scanner comme les bâtiments, ponts, signalisations, etc. On peut monter notre scanner sur le véhicule en précisant la position par rapport au centre du véhicule. On peut aussi paramétrer les caractéristiques du scanner, comme la fréquence de balayage, le nombre de points par degré, la portée, l'angle d'ouverture, etc. Pour les objets à scanner, on peut choisir leur position dans la scène, leur type, etc.

### ➢ Adaptation du simulateur

Avec SiVIC, nous récupérons la distance entre le scanner et les points d'objet numérisé d'une part et l'état du véhicule d'autre part. Ce simulateur a été adapté pour prendre en compte certains paramètres physiques de l'acquisition (impact de l'angle incident, albédo de la surface), afin d'augmenter le réalisme. Ceci est expliqué en Annexe 2. La communication entre SiVIC et RTMaps permettant de générer des nuages de points est également expliquée en Annexe 2.

### ➢ Exemple d'utilisation de simulateur

La Figure 5-3 montre la génération du nuage de points en cours de simulation. Les deux fenêtres en bas sont issues de SiVIC (gauche : fenêtre de commande, droite : fenêtre de visualisation). Les deux fenêtres en haut et derrière proviennent de RTMaps (gauche : visualisation de nuage de points en temps-réel, droite : fenêtre de commande, et en arrière-plan : diagramme de RTMaps).

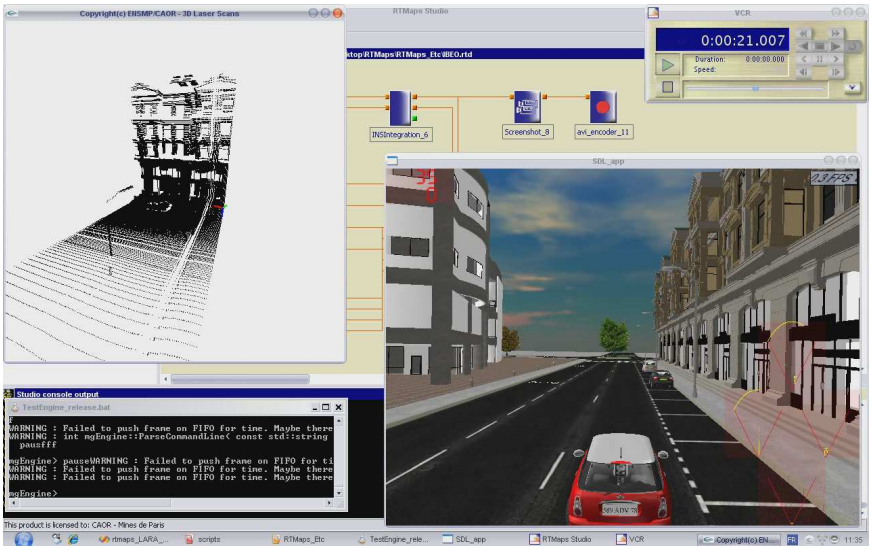


Figure 5-3 : Génération du nuage de points en cours de simulation

La Figure 5-4 montre un exemple d'une scène virtuelle de l'environnement urbain.

Figure 5-4 : Scène virtuelle d'environnement urbain

La Figure 5-5 est le résultat de la génération de nuages de points colorisés avec les couleurs de la scène.

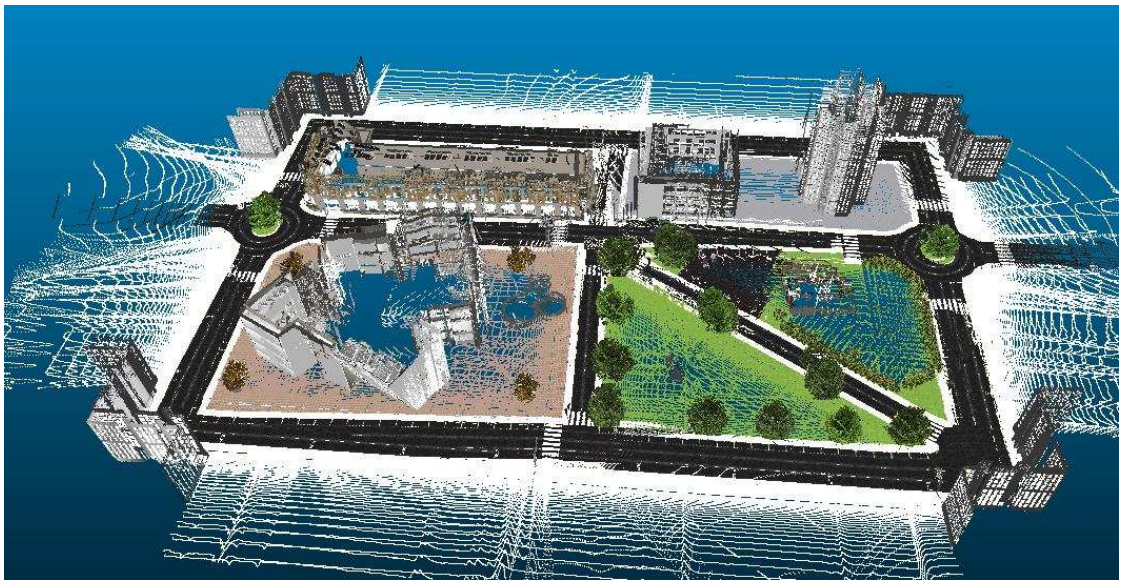

Figure 5-5 : Génération du nuage de points de scène virtuelle

## *5.3 Analyse comparative des concepts de scanner laser mobile*

Nous proposons dans cette section des concepts de scanning laser dédiés à la cartographie mobile. Les objectifs de ces concepts sont d'abord présentés. Puis, nous exposons les concepts imaginés et nous les comparons.

### 5.3.1 Objectif et conception

L'objectif est de concevoir un ou plusieurs systèmes de scanner laser mobile qui améliorent la qualité des données en termes de précision, de résolution et de complétude.

L'amélioration doit se faire cependant en tenant compte des contraintes afin que le concept soit réalisable. D'abord, le système doit être compact afin de faciliter l'installation sur une plateforme. Aussi, le coût du système doit être raisonnable. Enfin, il peut y avoir d'autres contraintes comme la complexité de la réalisation, etc.

Pour atteindre cet objectif, nous pouvons imaginer plusieurs concepts de systèmes de scanner laser mobile. Les concepts sont imaginés avec trois paramètres : le type de scanner laser lui-même, le nombre de scanners laser utilisés et la ou les configurations spatiales sur une plateforme mobile.

Le type de scanner englobe toutes les caractéristiques du scanner y compris le mode de scan (mono-plan ou multi-plans). Le concept de système est complété par le choix du nombre de scanners à utiliser ainsi que par le choix des configurations spatiales.

Pour classer le type de scanners, il y a plusieurs paramètres tels que les fréquences d'impulsion et de balayage, la portée, etc. Dans cette thèse, nous pouvons utiliser des technologies de Trimble comme une télémétrie laser de haut de gamme et un composant de déflexion rapide. Ces paramètres restent identiques pour tous les concepts, nous classons alors le type de scanner en variant seulement le mode de scan.

Le processus de conception suit les étapes décrites en section 5.2.1, de la proposition du concept (étape 1) à la génération puis l'analyse des nuages de points (étapes 4 et 5).

### 5.3.2 Création de scénarios

A l'aide du simulateur, nous créons une ou plusieurs scènes virtuelles qui contiennent des éléments urbains comme des bâtiments, carrefour, piétons, véhicules garés, ponts, arbres, etc. La Figure 5-6 montre quelques images de scènes virtuelles réalisées avec le simulateur SiVIC. Ce sont des scénarios imaginables dans un environnement urbain.

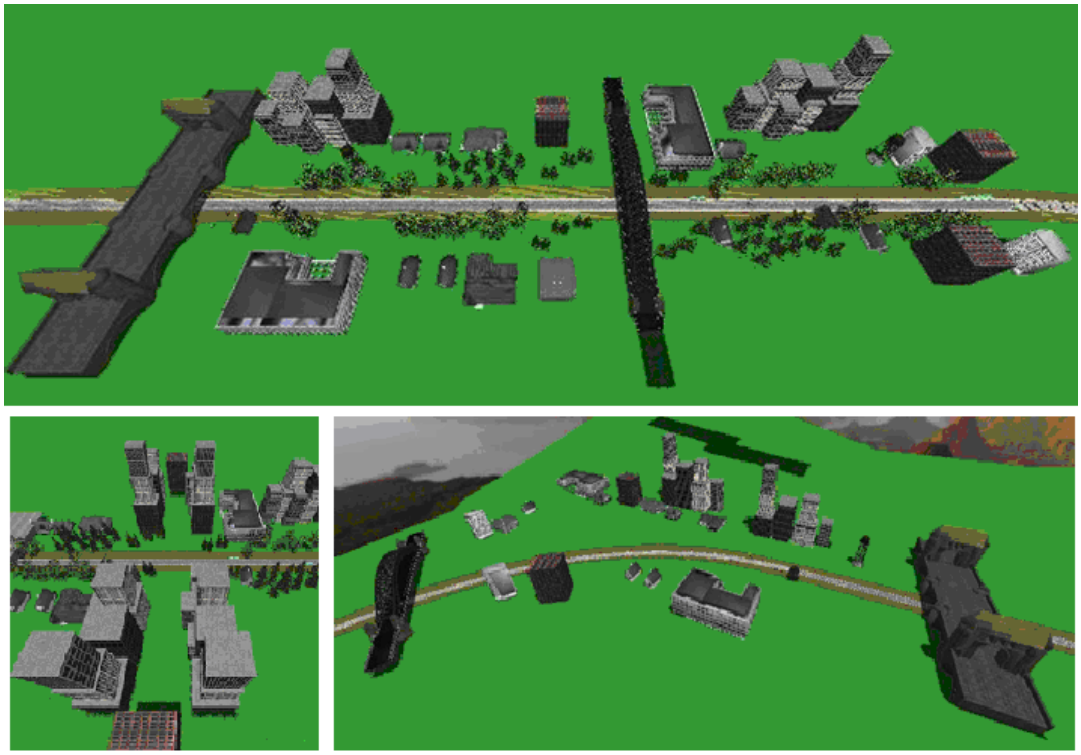

Figure 5-6 : Scènes virtuelles

Afin de comparer les nuages de points issus de différents concepts, nous fixons les paramètres opérationnels comme suit :

- Vitesse de véhicule à 50 km/h (13,89 m/s)
- Fréquence de balayage du scanner à 60 Hz
- Fréquence d'impulsion laser à 43200 Hz

La vitesse du véhicule est fixée à 50 km/h qui est la vitesse maximale en ville. La fréquence de balayage est fixée à 60 Hz, technologie disponible chez Trimble. La fréquence d'impulsion est définie par le nombre de points par degré pour le simulateur. L'utilisation de trop grandes fréquences d'impulsion amène des quantités de points qui peuvent être ensuite difficiles à gérer d'un point de vue informatique. Nous nous limitons à une fréquence permettant d'avoir une résolution angulaire de 0,5°, soit 43200 Hz (= 2 points/degré x 360° x 60 Hz).

### 5.3.3 Proposition de concepts de type « Mono-plan »

- **Type « Mono-plan »**

Le scanner de type « mono-plan » est le type classique en 2D qui se trouve dans la plupart des systèmes actuellement présents sur le marché.

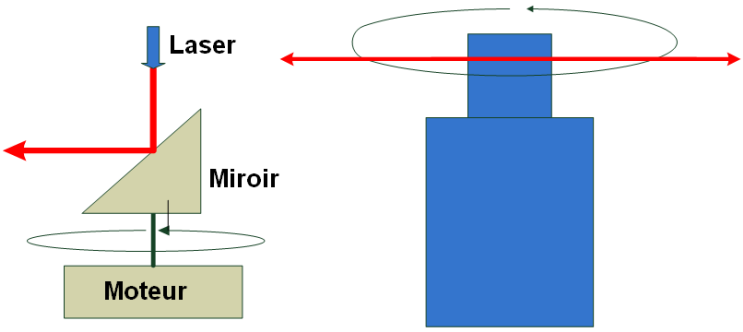


Figure 5-7 : Scanner de « Mono-plan »

La Figure 5-7 montre un exemple de scanner de type « Mono-plan ». Il y a une télémétrie laser avec un miroir simple à 45° monté sur un moteur continu. Le champ de vision de ce scanner est de 360°.

*Concept 1 (mono-plan vertical)*

Le premier concept (mono-plan vertical) utilise un scanner laser sur le toit de la plateforme mobile (Figure 5-8).

Table 5-1 : Configuration spatiale du « concept 1 »

| | |
|---|---|
| Position (m) | -1 ; 0 ; 2,5 |
| Orientation (°) | 0 ; 0 ; 0 |

La Table 5-1 présente la configuration spatiale du scanner sur la plateforme par rapport au repère local. Ce concept est utilisé dans le système LARA-3D (version 2008).

Le scanner est positionné à -1 m sur l'axe X, ce qui permet de ne pas avoir d'occlusion vers le bas et de pouvoir ainsi scanner le sol. Le scanner est monté sur le toit du véhicule à la hauteur de 2,5 m, ce qui est un compromis permettant d'éviter les zones sur-densifiées sur la route et aussi de ne pas gêner le mouvement du véhicule, par exemple dans un tunnel.

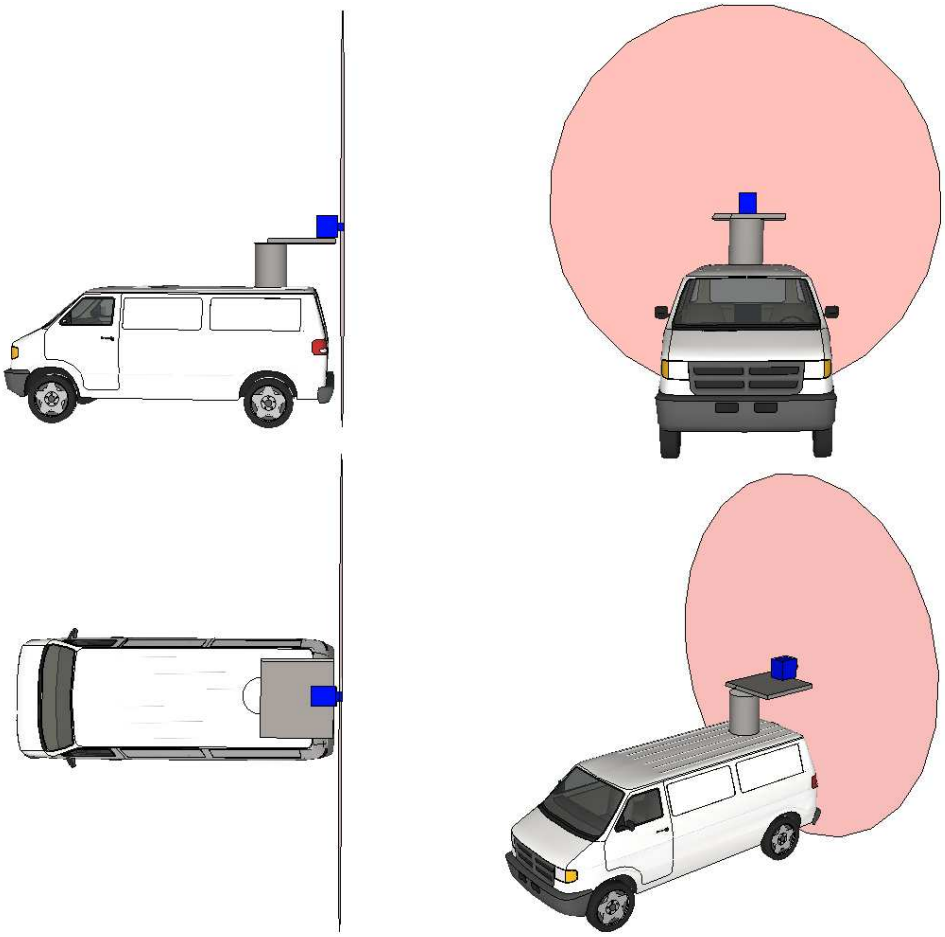

Figure 5-8 : Montage du concept 1 (mono-plan vertical) sur la plateforme

*Concept 2 (mono-plan incliné)*

Le concept 2 (mono-plan incliné) utilise également un scanner mono-plan mais inclinés ce qui permet de couvrir plus de zones.

Table 5-2 : Configuration spatiale du « concept 2 »

| | |
|---|---|
| Position (m) | -1 ; 0 ; 2,5 |
| Orientation (°) | 0 ; 20 ; 0 |

La Figure 5-9 représente le montage du concept 2 sur la plateforme et la Table 5-2 donne ses caractéristiques. L'angle d'inclinaison peut être plus grand, par exemple 40°. Nous définissons également un concept 2bis avec une inclinaison de 40°.

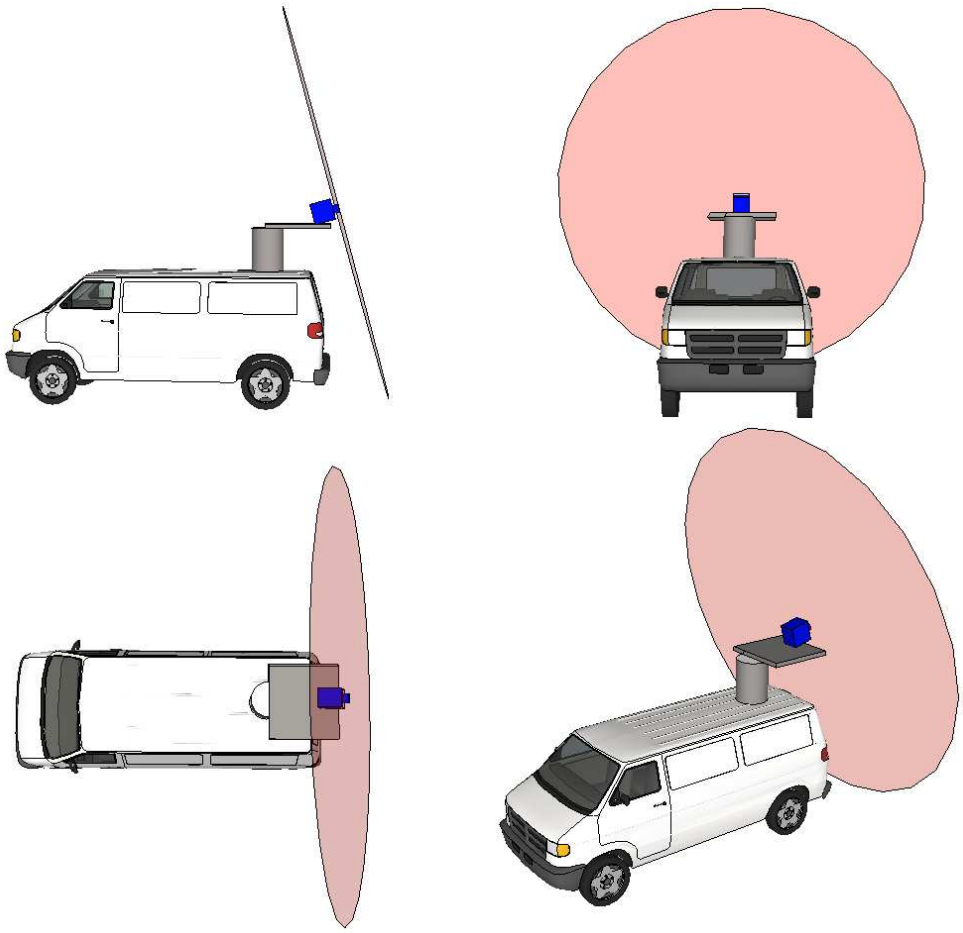

Figure 5-9 : Montage du concept 2 sur la plateforme

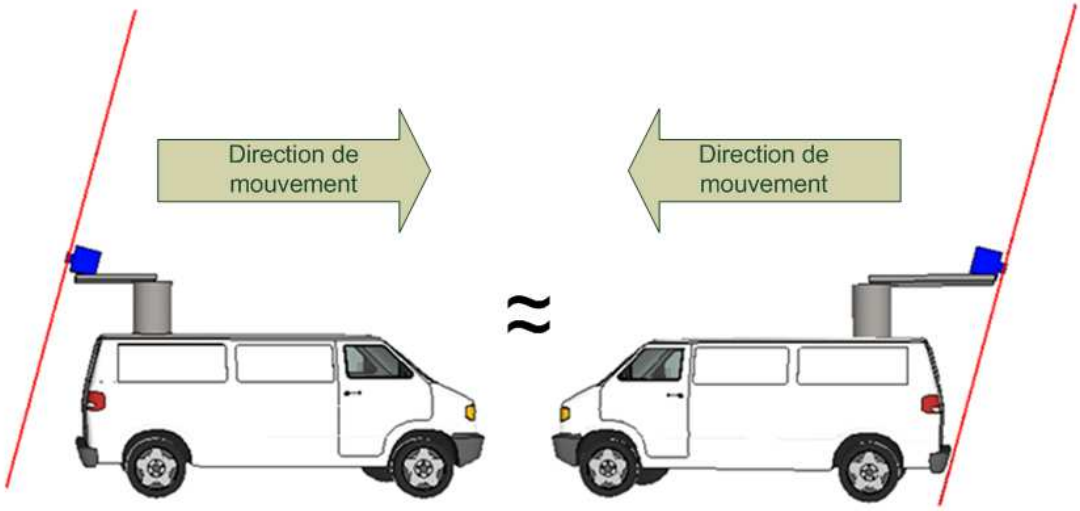


Figure 5-10 : Inclinaison de +/- 20° de scanner sur la plateforme

Nous pouvons aussi inverser le sens de l'inclinaison du scanner, les inclinaisons devenant ainsi -20° ou -40°. Mais cette inversion donne le même résultat que +20° ou +40° lorsque le véhicule effectue son parcours dans l'autre sens (Figure 5-10).

*Concept 3 (Papillon à deux scanners inclinés)*

Nous proposons un concept 3 (papillon à deux scanners inclinés), configuration avec deux scanners de type mono-plan.

Table 5-3 : Configuration spatiale du « concept 3 »

| | Scanner 1 | Scanner 2 |
|---|---|---|
| Position (m) | -1 ; -1 ; 2,5 | -1 ; 1 ; 2,5 |
| Orientation (°) | 0 ; 20 ; 45 | 0 ; 20 ; -45 |

La Table 5-3 présente les configurations spatiales des scanners du concept 3. Nous positionnons les scanners sur les deux coins arrières de la plateforme avec des inclinaisons sur les angles de tangage et de lacet. Ce concept est utilisé et proposé dans les systèmes commerciaux comme StreetMapper, VMX-250, LYNX Mobile Mapper [web 3DLM, web Riegl, web Optech].

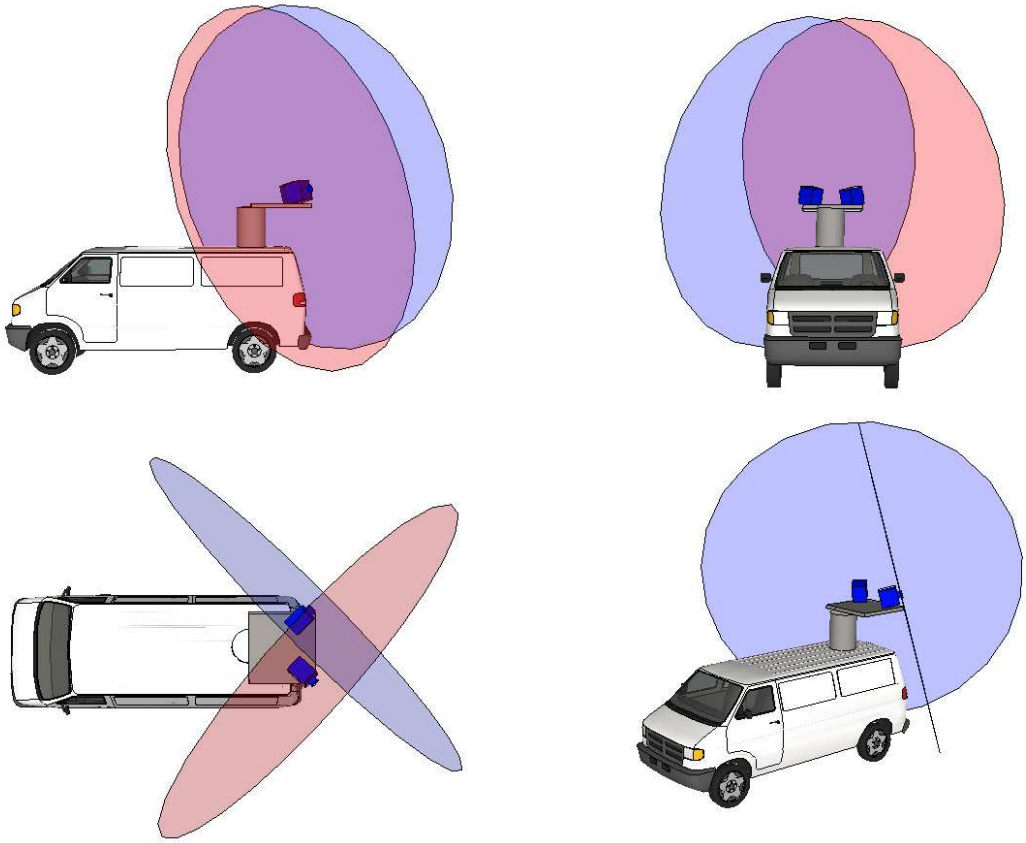

Figure 5-11 : Montage du concept 3 sur la plateforme

La Figure 5-11 représente le montage du concept 3 sur la plateforme. Les inclinaisons de l'angle de lacet permettent de couvrir plus de scènes sur les côtés du véhicule. Les inclinaisons d'angle de tangage permettent de scanner les objets qui sont au dessus du véhicule, comme les ponts, les panneaux, etc. Cette configuration est étudiée dans [Arsenault et Giroud, 2007]. Nous définissons aussi un concept 3bis comportant une inclinaison de 40° de tangage.

### *Concept 4 (Papillon à trois scanners inclinés)*

Le concept 4 (papillon à trois scanners inclinés) est une version améliorée du concept 3 en ajoutant un scanner de plus. En effet, avec le concept 3, il y a des zones non couvertes selon le résultat de simulation présenté dans la section « Analyse des concepts » ci-dessous (page 97).

Table 5-4 : Configuration spatiale du « concept 4 »

| | Scanner 1 | Scanner 2 | Scanner 3 |
|---|---|---|---|
| Position (m) | -1 ; -1 ; 2,5 | -1 ; 1 ; 2,5 | -1 ; 0 ; 2,5 |
| Orientation (°) | 0 ; 20 ; 45 | 0 ; 20 ; -45 | 0 ; 0 ; 0 |

La Table 5-4 présente la configuration spatiale des scanners du concept 4. Les deux premiers scanners sont configurés comme le concept 3. Le troisième scanner est monté en plan vertical.

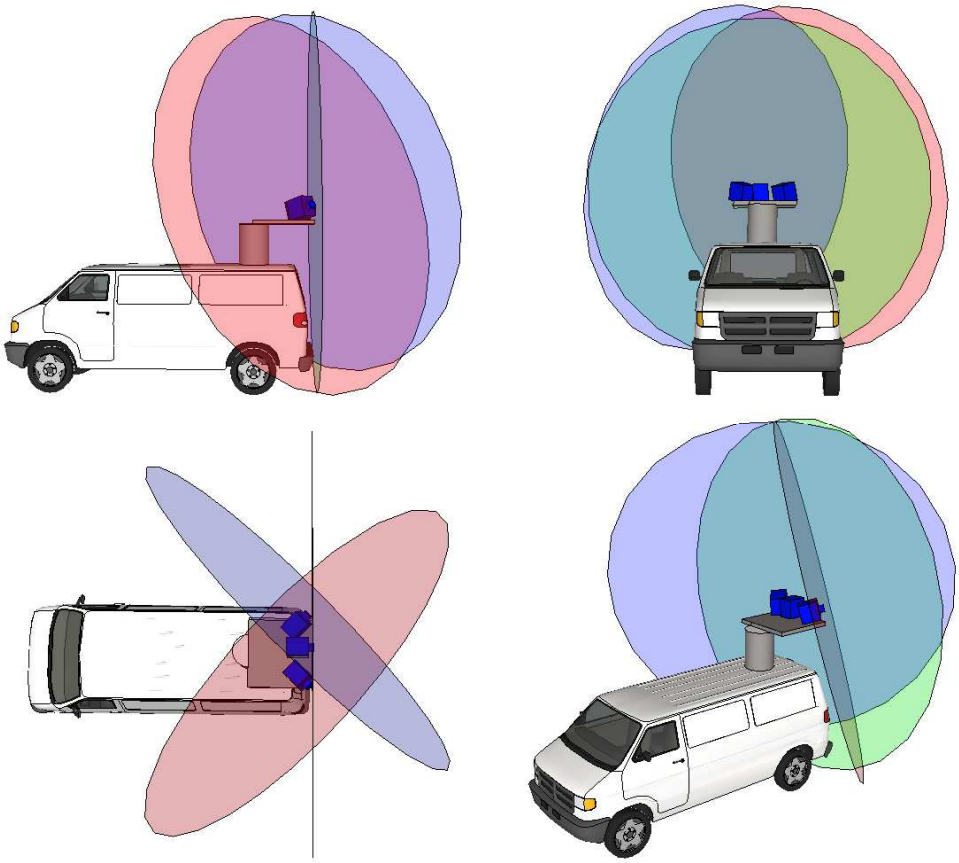

Figure 5-12 : Montage du concept 4 sur la plateforme

La Figure 5-12 représente le montage du concept 4 sur plateforme. L'objectif du troisième scanner (en couleur verte) est de compléter les zones non couvertes du concept 3.

Nous avons présenté quatre concepts basés sur le scanner de type « mono-plan ». Il pourrait y avoir encore d'autres concepts en augmentant le nombre de scanners et en modifiant les configurations spatiales. Cependant, comme il y a des contraintes de taille et de coût des systèmes, nous nous limitons ici à un maximum de trois scanners.

- **Analyse des concepts**

Nous analysons ci-dessous les données de simulation pour les critères de résolution et de complétude, concernant les concepts à scanner mono-plan présentés.

*Précision*

Comme la simulation produit des données sans erreurs, les valeurs de précisions à la fois relative et absolue ne présentent pas d'intérêt et n'ont pas d'impact sur l'analyse. Nous ne considérons donc pas ce critère.

*Résolution*

La Figure 5-13 montre un exemple d'une partie du nuage de points issu du concept 2 (mono-plan incliné), qui illustre bien la variation de résolution.

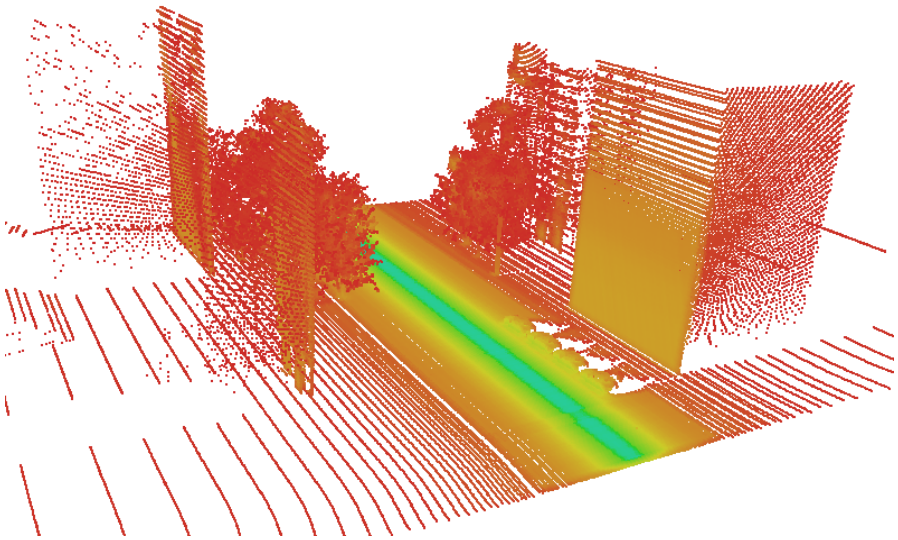

Figure 5-13 : Exemple de la représentation de variation de résolution

On constate qu'il y a trop de points dans la partie du sol proche de la trajectoire (zone sur-densifiée représentée en couleur bleue) et qu'il n'y a pas beaucoup de points dans la partie haute des bâtiments (zone sous-densifiée représentée en couleur rouge).

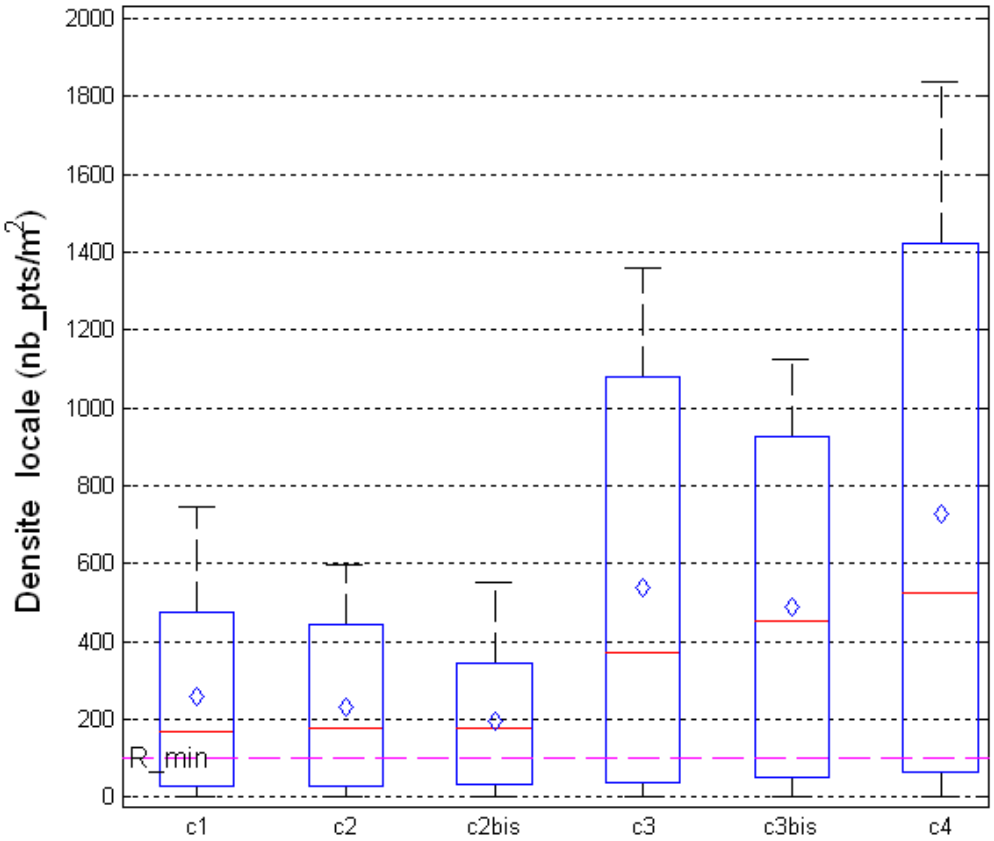

Figure 5-14 : Résolution des relevés laser issus des concepts de type « Mono-plan »

La Figure 5-14 montre la résolution des relevés laser issus des concepts de type « Mono-plan » proposés. Pour calculer le Taux de Bonne Résolution (TBR), nous choisissons de fixer la résolution minimale à 100 points/m$^2$ comme pour l'analyse des relevés du Trimble VX et de LARA-3D (Chapitre 3).

Table 5-5 : Valeurs de résolution des concepts de type « Mono-plan »

| | C1 | C2 | C2bis | C3 | C3bis | C4 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Densité (pts/m²) | 258 | 233 | 194 | 539 | 488 | 728 |
| TBR (%) | 56,3 | 57,1 | 58,2 | 61,9 | 64,3 | 67,3 |

Au regard de la Table 5-5 qui présente les valeurs de résolution, nous concluons sans surprise que l'utilisation de plusieurs scanners permet d'augmenter la qualité de résolution, ce qui signifie qu'elle diminue les zones sous-densifiées.

Les grandes différences entre les nuages de points acquis par les différents concepts sont sur la complétude de la scène présentée ci-dessous.

*Complétude*

Table 5-6 : Surface couverte des relevés issus des concepts de type « Mono-plan »

| | C1 | C2 | C2bis | C3 | C3bis | C4 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Surface couverte (m²) | 27919 | 37859 | 36849 | 32402 | 35988 | 44207 |

La Table 5-6 présente la surface couverte des différents relevés des concepts de type « Mono-plan ». De façon surprenante, on ne peut pas dire que l'utilisation de plusieurs scanners laser améliore la complétude par rapport à l'utilisation d'un seul scanner laser car la surface couverte du concept 3 (deux scanner utilisés) est plus petite que celle du concept 2 (un scanner utilisé).

Nous expliquons ce phénomène à l'aide des figures ci-dessous, basées sur quatre parties fréquentes dans une ville urbaine : un carrefour, un bâtiment de forme en U, un bâtiment lointain et un pont au dessus du passage du véhicule (Figure 5-15, Figure 5-17, Figure 5-18 et Figure 5-19).

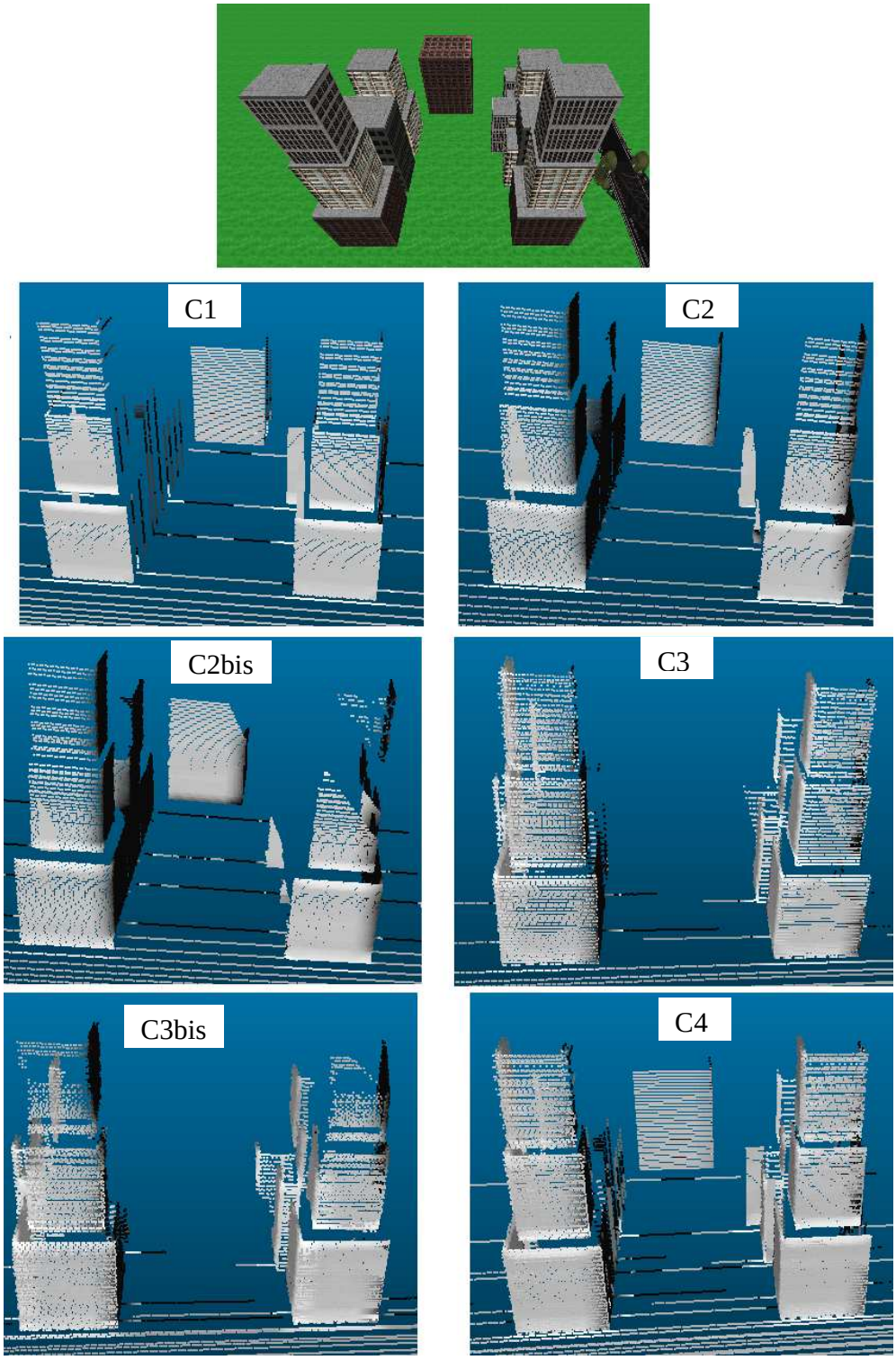

Figure 5-15 : Surface couverte sur un carrefour

La Figure 5-15 montre la différence de surface couverte sur un carrefour. Le concept 1 ne couvre que les façades dont les normales sont orientées vers l'avant. La modification de

la configuration spatiale du scanner (concept 2 et 2bis) permet d'acquérir les autres façades.

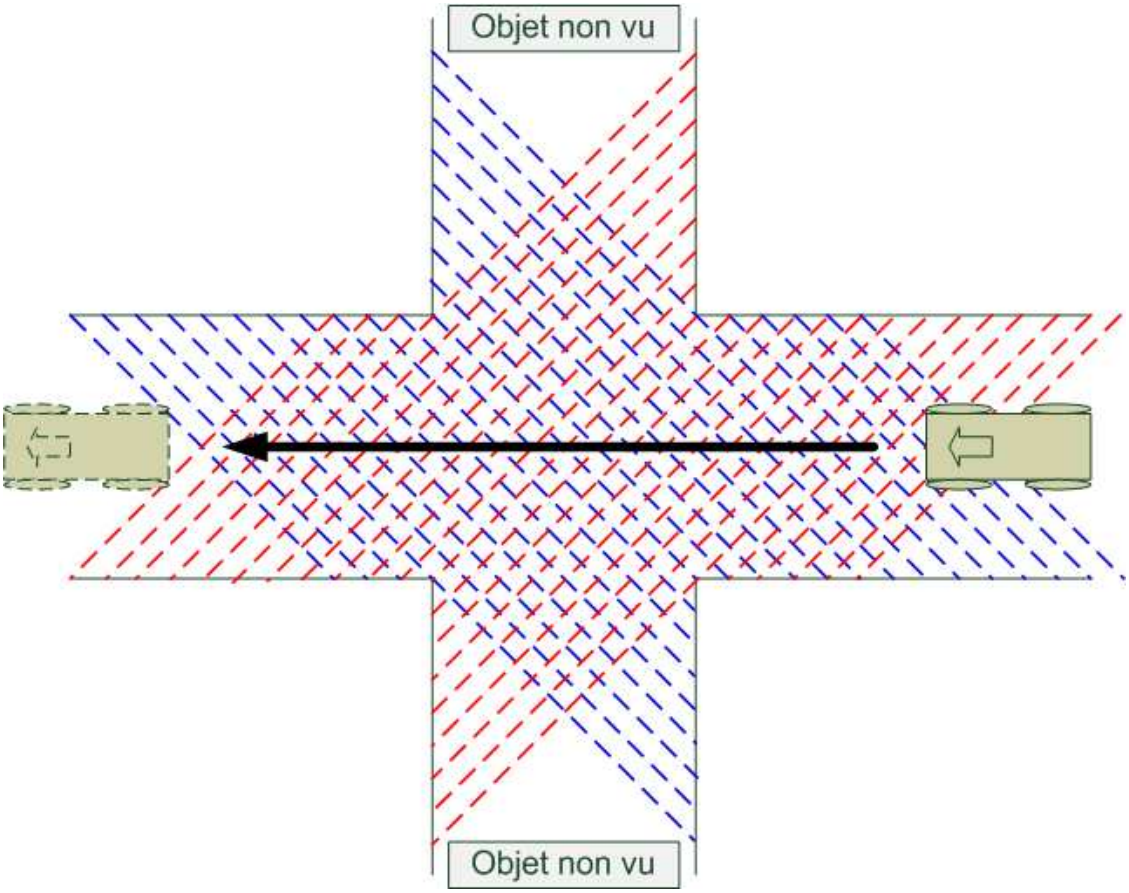


Figure 5-16 : Concept 3 (3bis) dans le cas du carrefour

Comme on le voit sur la Figure 5-16, avec les concepts 3 et 3bis, on ne peut pas acquérir certaines informations des extrémités de la route croisée. C'est pourquoi la surface couverte avec ces concepts est au final plus petite que celle avec le concept 2.

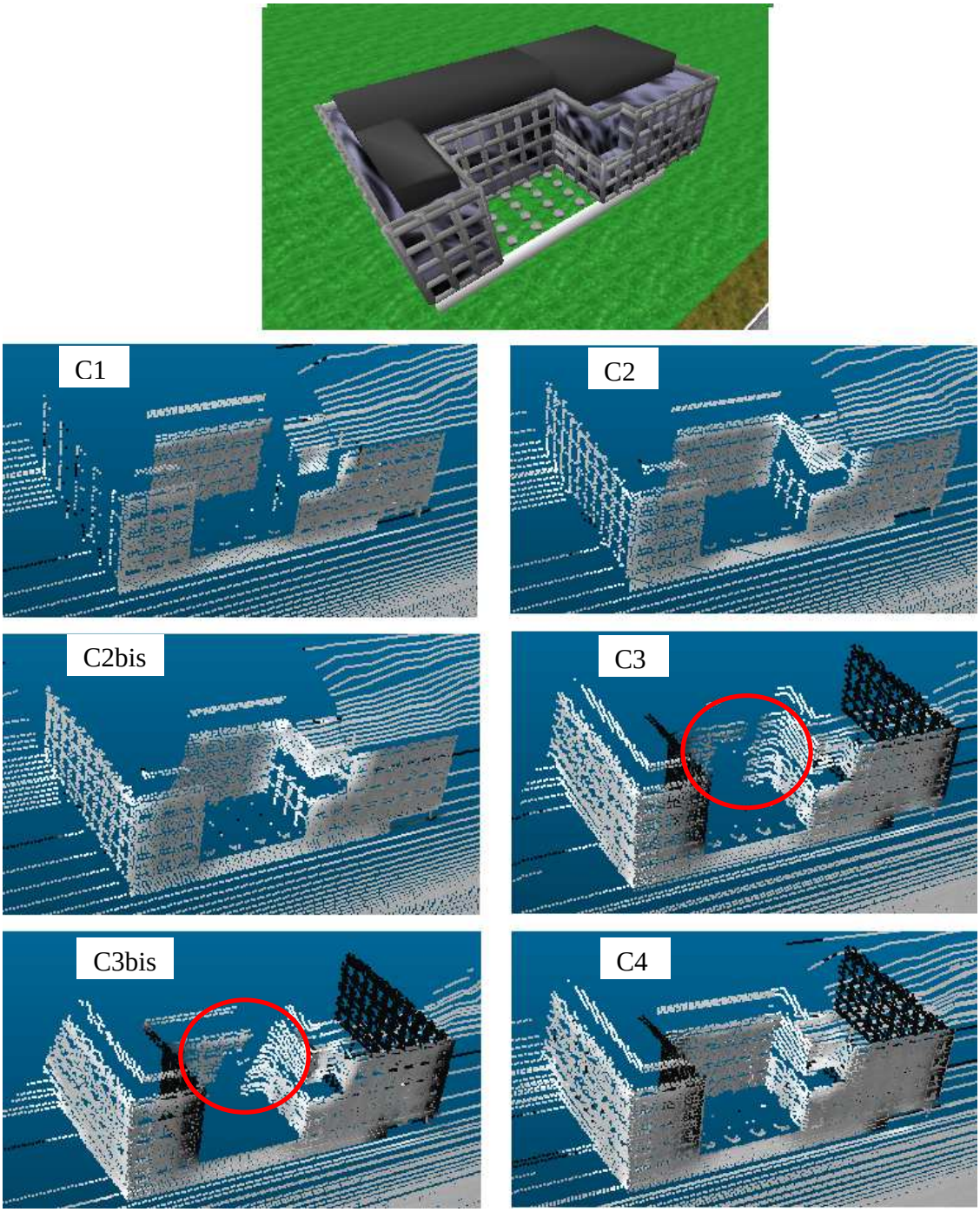

Figure 5-17 : Surface couverte sur un bâtiment en U

La Figure 5-17 montre la différence de surface couverte sur un bâtiment en U. Cette étude nous permet de comprendre l'intérêt des concepts 2 et 2bis qui permettent de couvrir un côté de plus par rapport au concept 1. L'autre côté du bâtiment peut être acquis si le système passe une deuxième fois en sens inverse. Les nuages de points issus des concepts 3 et 3bis couvrent les trois côtés, mais il y a des zones non couvertes qui sont couvertes par les autres concepts (cercle rouge).

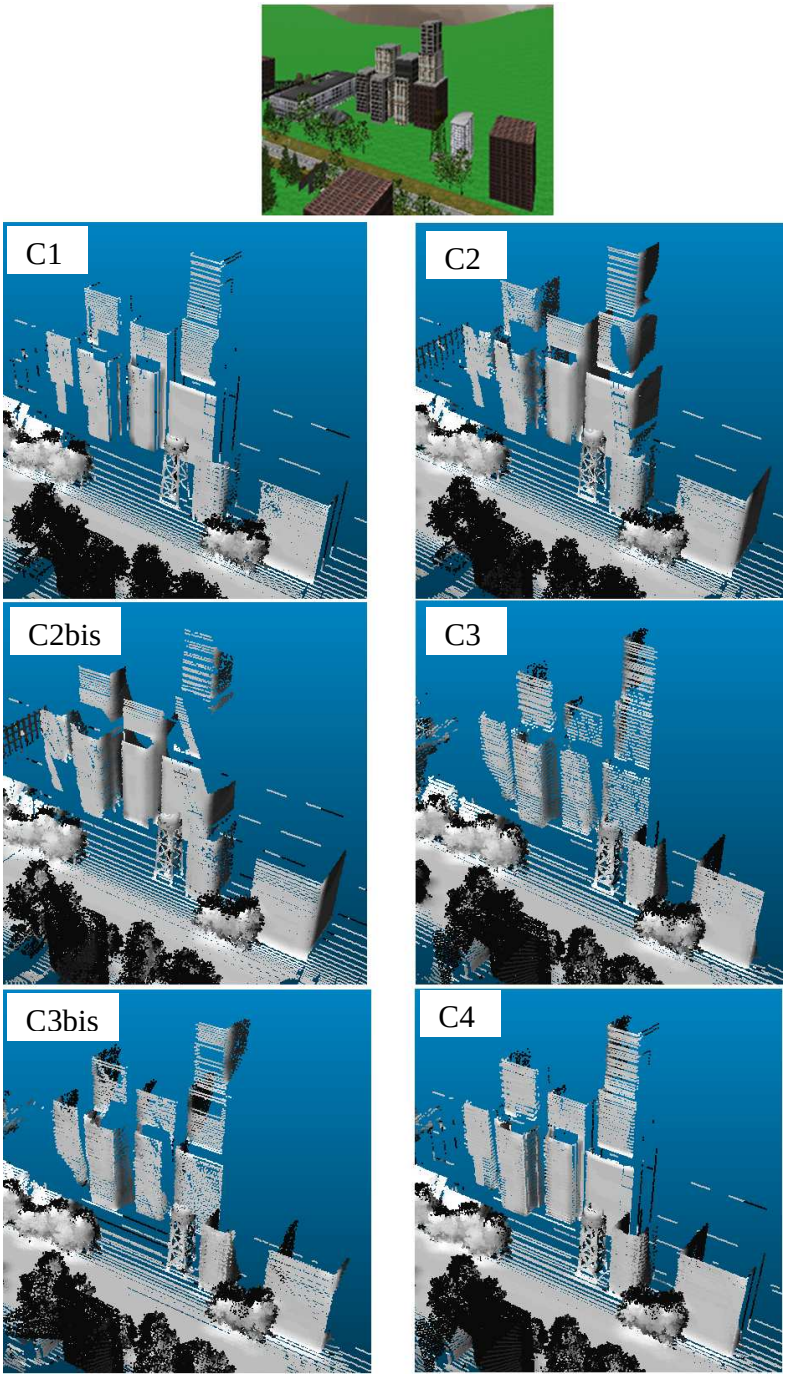

Figure 5-18 : Surface couverte sur un bâtiment lointain

La Figure 5-18 montre la différence de surface couverte sur un bâtiment lointain. Une grande partie de la surface des bâtiments lointains est occultée par les bâtiments proches comme le montre la Figure 5-18. Les concepts qui utilisent plusieurs scanners ne résolvent pas ce problème.

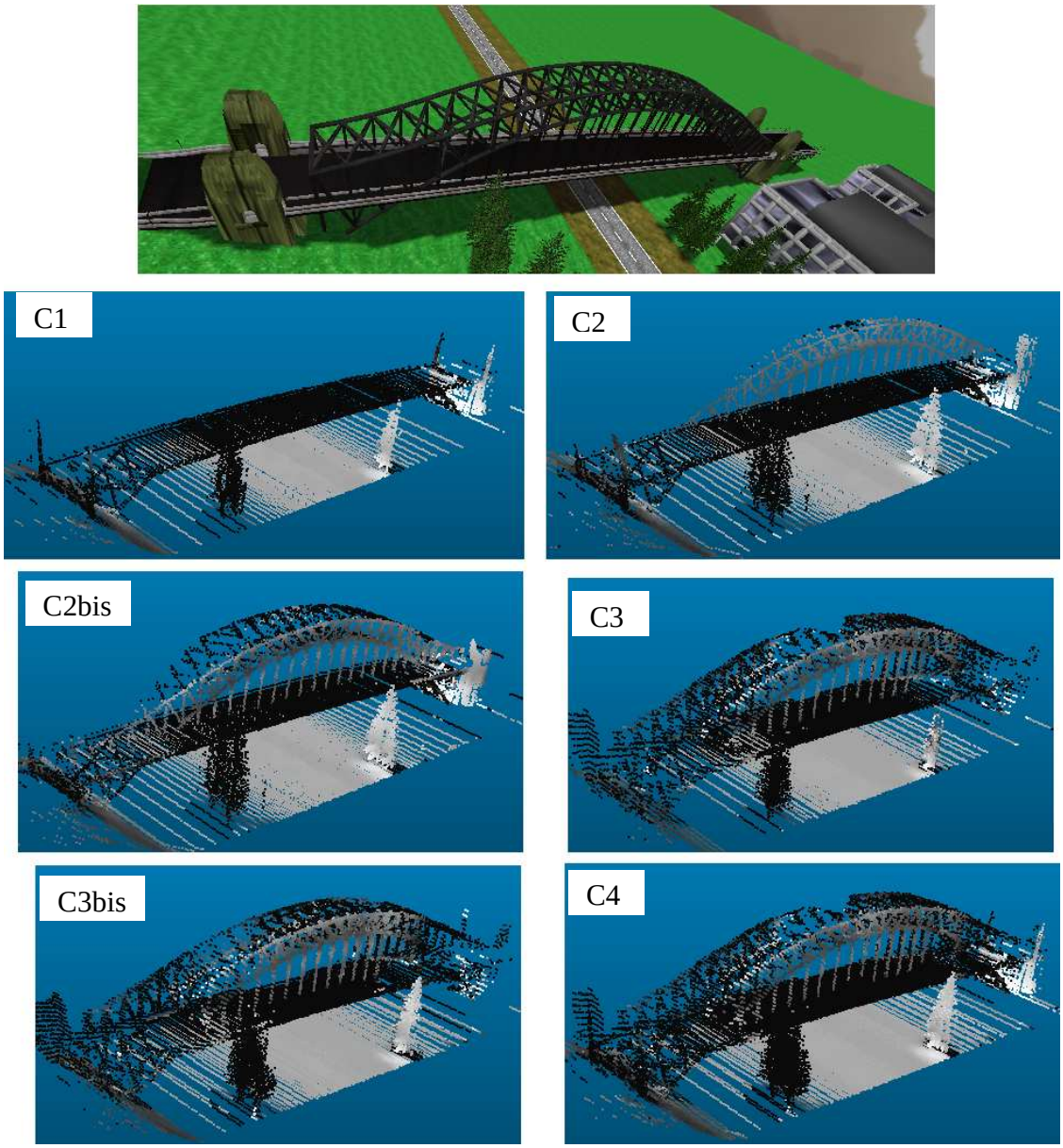

Figure 5-19 : Surface couverte sur un pont

La Figure 5-19 montre la différence de surface couverte sur un pont. Le nuage de points issu du concept 1 ne contient pas suffisamment d'informations pour identifier le type de pont. L'inclinaison du scanner (concepts 2 et 2bis) permet d'acquérir plus d'informations sur un côté du pont.

*Conclusion de l'analyse*

Nous avons montré que la configuration spatiale et le nombre de scanners laser influencent la qualité des relevés laser. L'utilisation de plusieurs scanners de type « Mono-plan » permet d'avoir des données redondantes qui améliorent la résolution en diminuant les zones sous-densifiées et aussi la complétude.

### 5.3.4 Proposition de concepts de type « Multi-plans »

Nous imaginons dans cette section des scanners à plans multiples sur un même côté afin d'avoir des données redondantes et de bien couvrir des zones. Il y a plusieurs technologies possibles pour avoir un système multi-plans dans un scanner. Soit, on peut ajouter des composants supplémentaires de déflexion, soit on peut varier l'angle du miroir de déflexion ou l'axe de rotation du moteur (Annexe 3).

- **Type « Multi-plans : Forme en V»**

Le premier scanner de type « Multi-plans » est un scanner balayant 2 fois 180°, nommé « Forme en V ». L'idée du scanner du concept 2 est de « plier » le plan de balayage en deux.

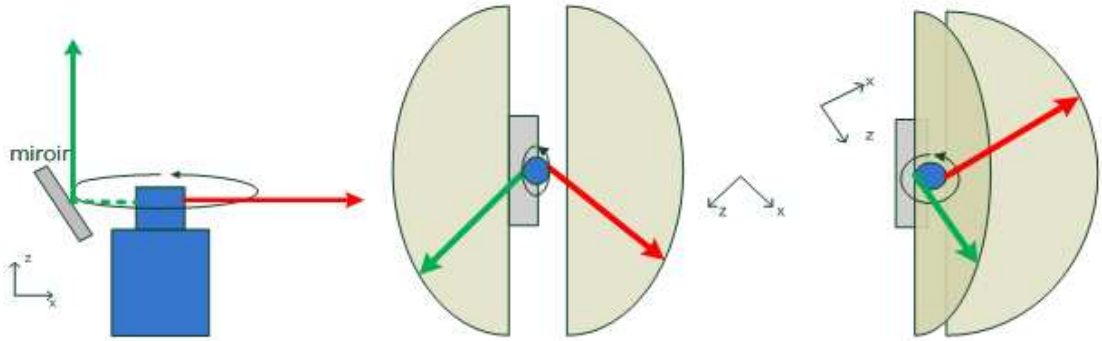


Figure 5-20 : Scanner de type « Multi-plans : Forme en V »

Comme le montre la Figure 5-20, on ajoute un miroir supplémentaire sur le scanner. Ce miroir supplémentaire permet de réorienter une moitié du balayage. Pendant un tour de moteur continu, on réalise deux balayages d'environ 180° chacun. L'angle entre les deux directions de balayage est de 90°, il pourrait aussi être modifié.

L'utilisation d'un miroir supplémentaire créerait des discontinuités qui génèreraient des angles morts entre les profils.

*Concept 5 (un scanner de forme en V)*

Le concept 5 contient un scanner de forme en V orienté vers le côté droit de la direction du véhicule.

Table 5-7 : Configuration spatiale du « concept 5 »

| | |
|---|---|
| Position (m) | -1 ; -1 ; 2,5 |
| Orientation (°) | 0 ; 0 ; 135 |

La Table 5-7 présente la configuration spatiale du scanner du concept 5. L'orientation du scanner est basée sur l'axe de rotation du miroir intégré.

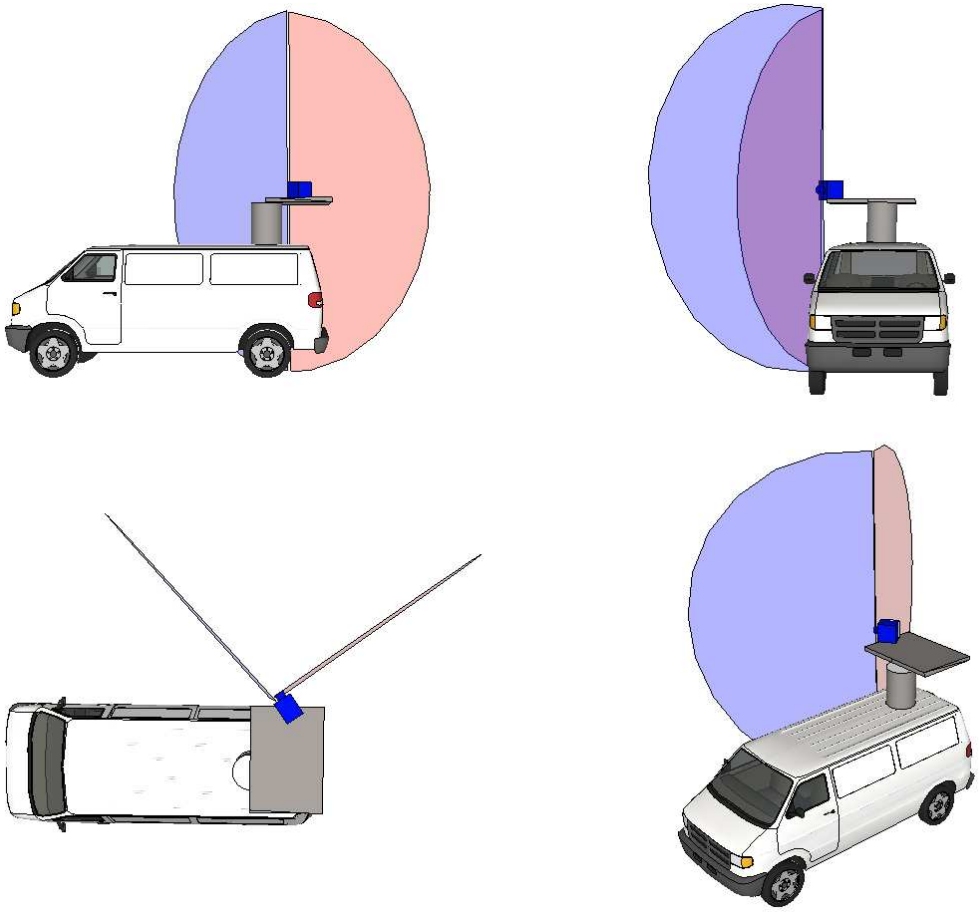

Figure 5-21 : Montage du concept 5 sur la plateforme

La Figure 5-21 représente le montage du concept 5 sur la plateforme. Deux plans de balayage sont orientés sur le côté droit. Ce concept permet d'acquérir plus d'information que le concept « mono-plan vertical » (concept 1) pour le côté droit.

*Concept 6 (deux scanners de forme en V)*

Le concept 6 contient deux scanners de forme en V montés sur chacun des côtés de la plateforme.

Table 5-8 : Configuration spatiale du « concept 6 »

| | Scanner 1 | Scanner 2 |
|---|---|---|
| Position (m) | -1 ; -1 ; 2,5 | -1 ; 1 ; 2,5 |
| Orientation (°) | 0 ; 0 ; 135 | 0 ; 0 ; 45 |

La Table 5-8 présente les configurations spatiales des scanners du concept 6. Le scanner 1 est configuré comme le scanner du concept 5. Le scanner 2 est configuré pour être orienté vers le côté gauche de la direction du mouvement du véhicule.

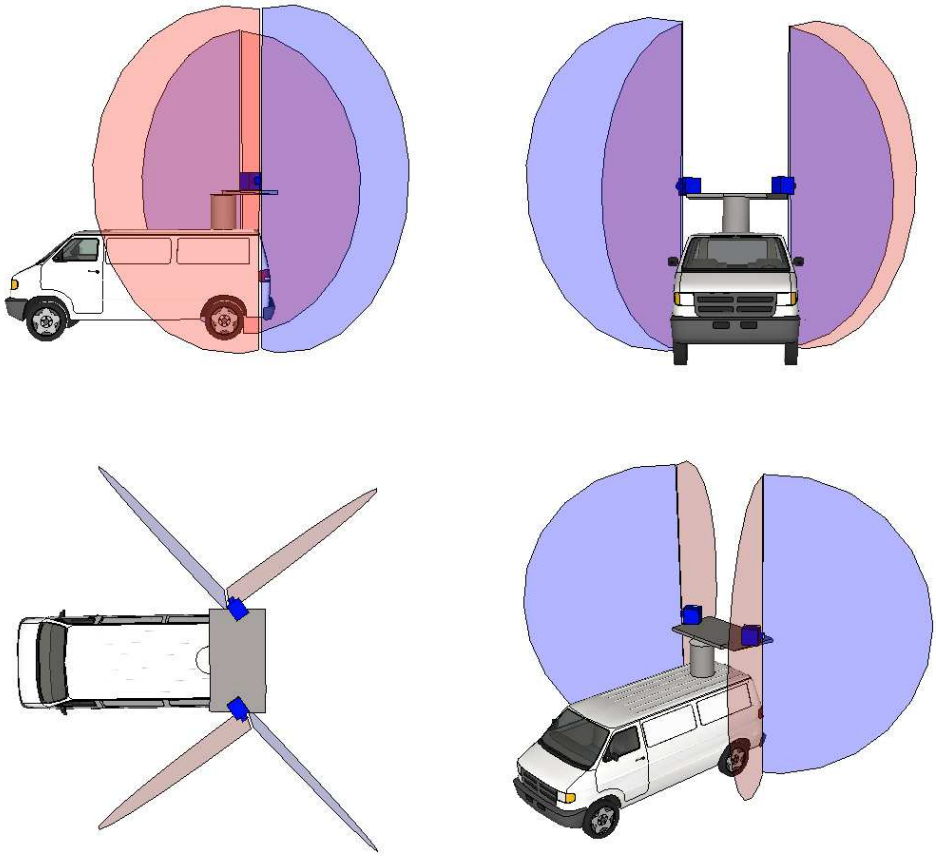

Figure 5-22 : Montage du concept 6 sur la plateforme

La Figure 5-22 représente le montage du concept 6 sur la plateforme. Ce concept permet d'acquérir, avec un seul passage, les informations des deux côtés du véhicule que le concept 5 ne permet pas de faire.

### *Concept 7 (trois scanners de forme en V)*

Le concept 7 contient trois scanners de forme en V sur la plateforme. Deux scanners sont orientés vers chacun des côtés du véhicule et un scanner est orienté vers l'arrière.

Table 5-9 : Configuration spatiale du « concept 7 »

| | Scanner 1 | Scanner 2 | Scanner 3 |
|---|---|---|---|
| Position (m) | -1 ; -1 ; 2,5 | -1 ; 1 ; 2,5 | -1 ; 0 ; 2,5 |
| Orientation (°) | 0 ; 0 ; 135 | 0 ; 0 ; 45 | 90 ; 0 ; 0 |

La Table 5-9 présente les configurations spatiales des scanners du concept 7. Les scanners 1 et 2 sont configurés comme le concept 6 et le scanner 3 est configuré pour être orienté à la fois vers le sol et vers le ciel.

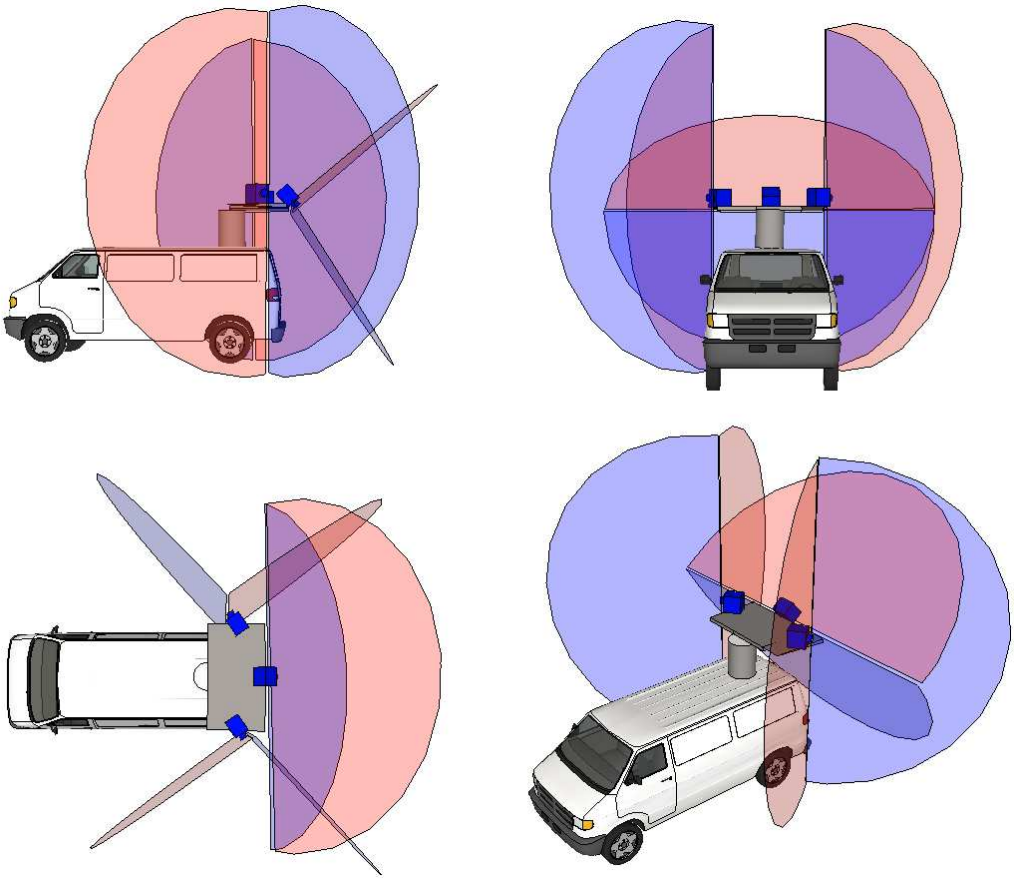

Figure 5-23 : Montage du concept 7 sur la plateforme

La Figure 5-23 représente le montage du concept 7 sur la plateforme. Le troisième scanner orienté vers l'arrière du véhicule ne produit pas de données redondantes, mais il permet de compléter la scène sur les côtés du sol et du ciel.

- **Type « Multi-plans : Forme en flèche ← »**

Le deuxième scanner de type « Multi-plans » est un scanner balayant 3 fois 120°, nommé « forme en flèche ← » : les profils de 120° sont positionnés avec 45° d'écart entre eux (Figure 5-24). L'intérêt d'avoir trois directions différentes est de pouvoir réduire les zones occultées.

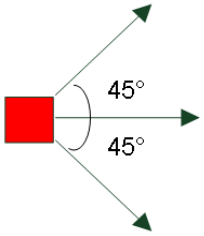


Figure 5-24 : Trois profils de 120° avec 45° d'écart entre eux

Il y a deux solutions technologiques qu'on peut imaginer pour ce type de scanner : la première à l'aide d'un miroir ayant une géométrie très particulière et la seconde à l'aide d'un diviseur du faisceau laser. Ce type de scanner concentre aussi l'acquisition sur un côté de la scène.

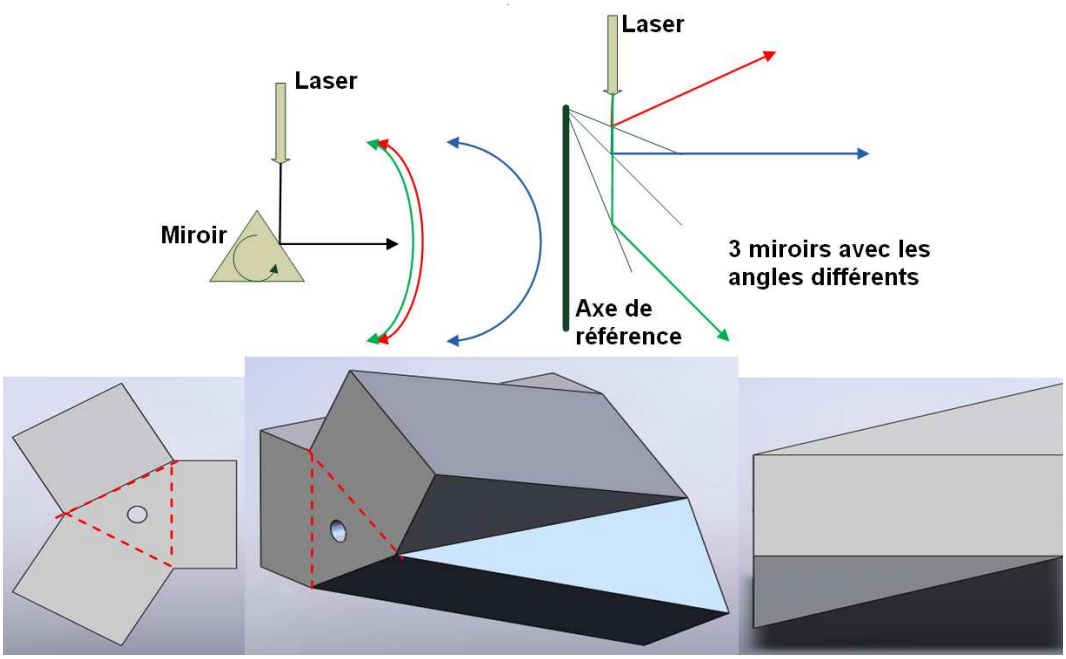


Figure 5-25 : Scanner de type « Multi-plans : Forme en flèche ← », solution 1

Comme le montre la Figure 5-25, la première solution technologique est obtenue à l'aide d'un miroir spécial basé sur un prisme triangulaire. Ce prisme triangulaire monté sur un moteur continu permet de balayer trois fois 120° pour un tour de moteur. En utilisant le miroir spécial, au lieu de balayer trois fois la même ligne, on balaie trois directions, devant, milieu et derrière.

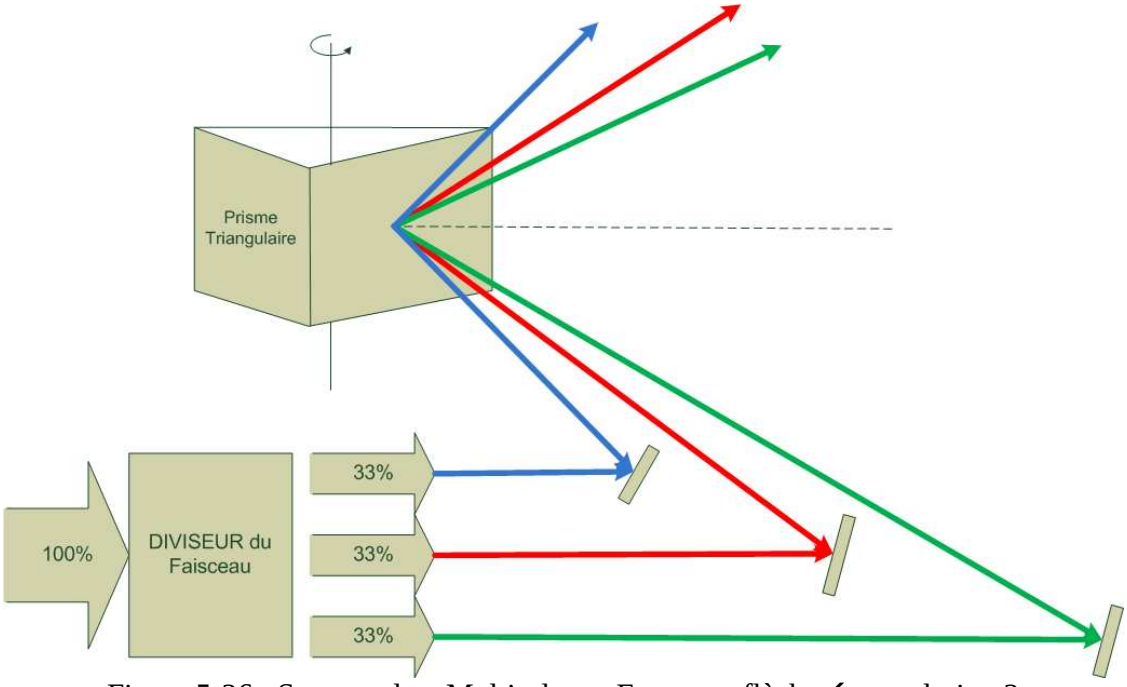

Figure 5-26 : Scanner de « Multi-plans : Forme en flèche ← », solution 2

La Figure 5-26 décrit la seconde solution technologique de forme en flèche ← obtenue à l'aide d'un diviseur de faisceau laser. La différence avec la première version réside dans la façon de produire trois lignes de balayage. Le principe de cette solution consiste à diviser un faisceau laser en trois, et à les envoyer, en même temps, avec les différents angles. Cette solution est aussi basée sur un prisme triangulaire (prisme classique). Ceci permet d'avoir neuf lignes de balayages pour un tour de moteur.

Pour le développement des deux versions, on utilise un composant de déflexion triangulaire (polygonal). Par conséquent, des angles morts sont produits à chaque passage d'une surface à l'autre du prisme triangulaire. Pour cette raison, le champ de vision devient au final légèrement plus petit que 120°.

Selon la relation entre la déflexion optique et l'espace scanné (Annexe 3), les deux solutions technologiques ne couvrent pas l'espace de la même façon. La première solution diverge aux grandes distances. Nous choisissons donc de conserver la seconde solution technologique.

### *Concept 8 (un scanner de forme en flèche ←)*

Le concept 8 utilise un scanner de forme en flèche ← orienté vers le côté droit du véhicule.

Table 5-10 : Configuration spatiale du « concept 8 »

| | |
|---|---|
| Position (m) | -1 ; -1 ; 2,5 |
| Orientation (°) | 0 ; 0 ; 90 |

La Table 5-10 présente la configuration spatiale du scanner du concept 8. L'orientation du scanner est définie par rapport à la direction du plan du milieu.

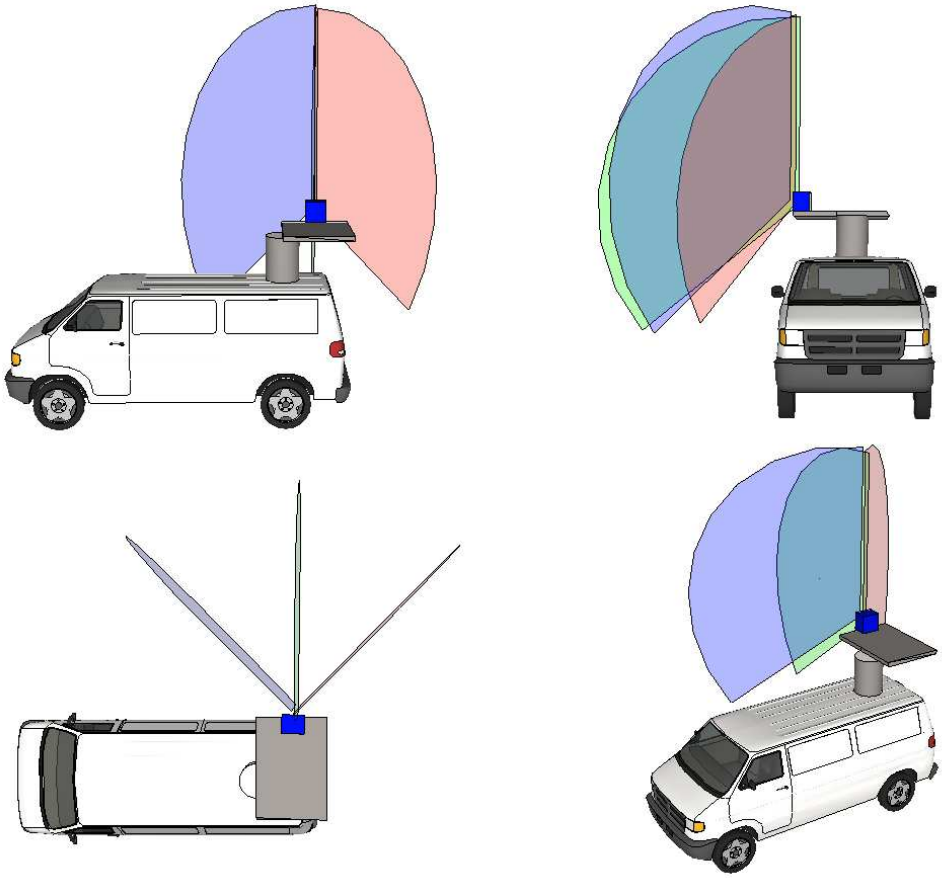

Figure 5-27 : Montage du concept 8 sur la plateforme

La Figure 5-27 représente le montage du concept 8 sur la plateforme. Cette configuration permet d'acquérir des données plus complètes que le concept 5 ayant un scanner de forme en V.

*Concept 9 (deux scanners de forme en flèche ←)*

Le concept 9 utilise deux scanners de forme en flèche ← montés sur chacun des côtés de la plateforme.

Table 5-11 : Configuration spatiale du « concept 9 »

| | Scanner 1 | Scanner 2 |
|---|---|---|
| Position (m) | -1 ; -1 ; 2,5 | -1 ; 1 ; 2,5 |
| Orientation (°) | 0 ; 0 ; 90 | 0 ; 0 ; -90 |

La Table 5-11 présente les configurations spatiales des scanners du concept 9. Chaque scanner est orienté sur un côté du véhicule.

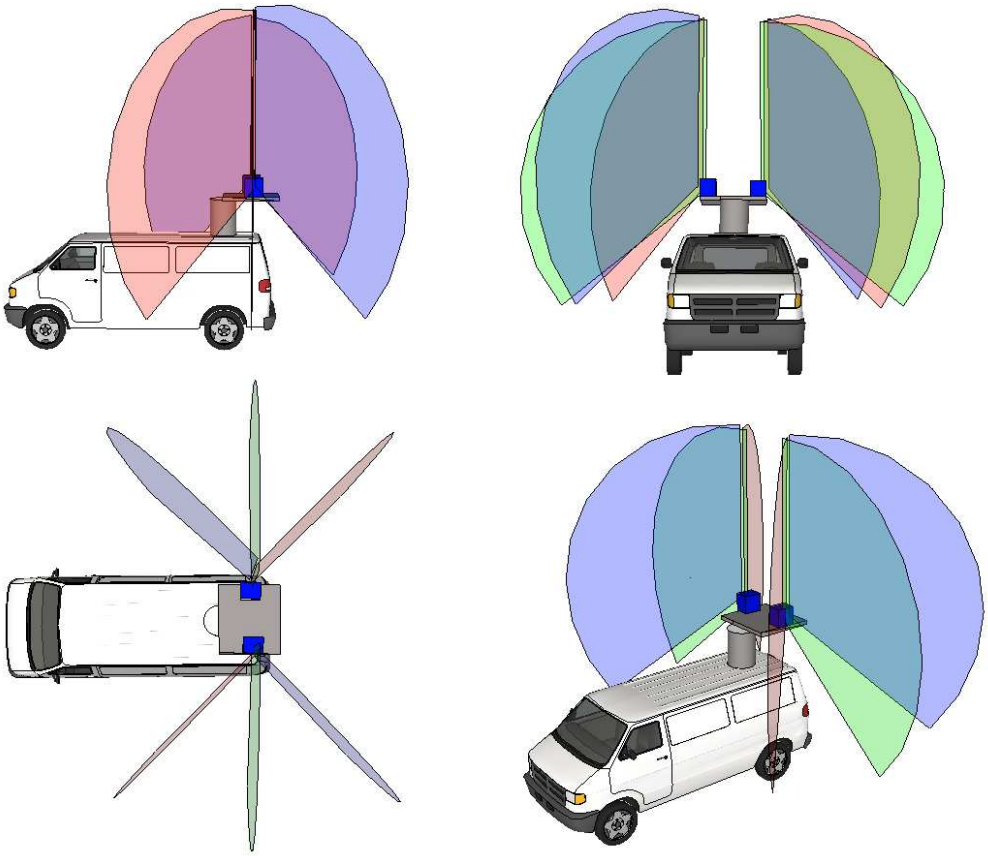

Figure 5-28 : Montage du concept 9 sur la plateforme

La Figure 5-28 représente le montage du concept 9 sur la plateforme. Ce concept permet d'acquérir, en un seul passage, les informations des deux côtés du véhicule.

*Concept 10 (trois scanners de forme en flèche ←)*

Le concept 10 contient trois scanners de forme en flèche ← sur la plateforme.

Table 5-12 : Configuration spatiale du « concept 10 »

| | Scanner 1 | Scanner 2 | Scanner 3 |
|---|---|---|---|
| Position (m) | -1 ; -1 ; 2,5 | -1 ; 1 ; 2,5 | -1 ; 0 ; 2,5 |
| Orientation (°) | 0 ; 0 ; 90 | 0 ; 0 ; -90 | 90 ; 45 ; 0 |

La Table 5-12 présente les configurations spatiales des scanners du concept 10. Deux scanners sont orientés sur chacun des deux côtés du véhicule et un scanner est orienté vers l'arrière permettant de couvrir les zones du ciel et du sol.

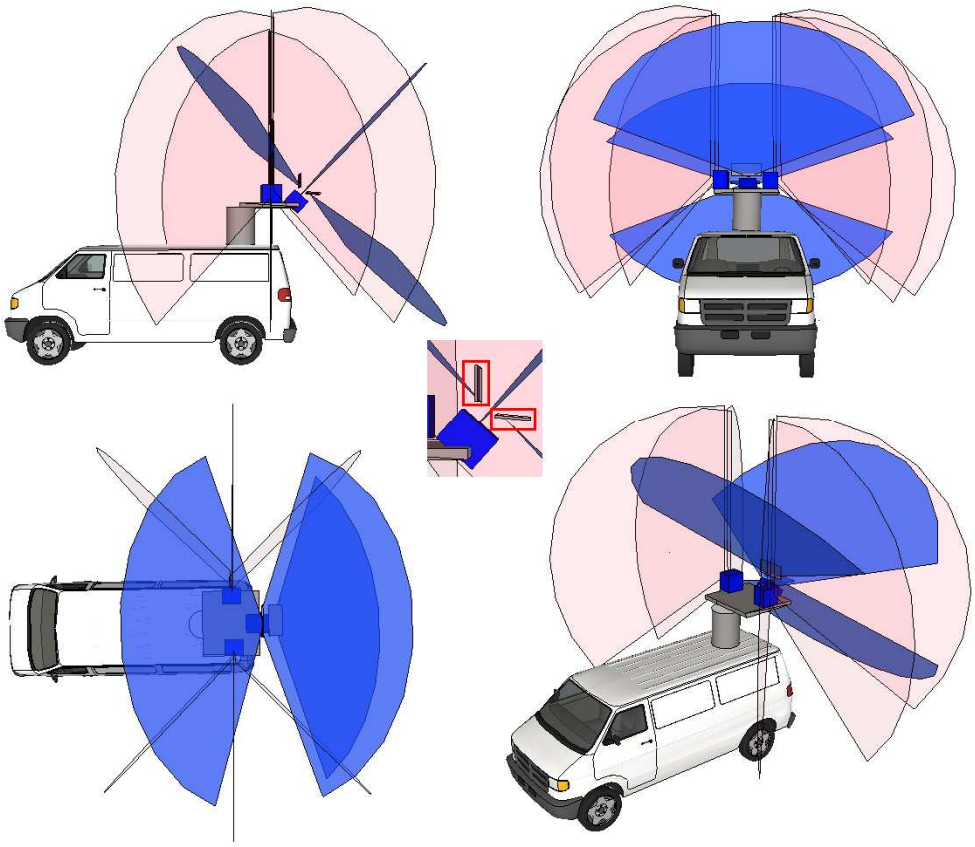

Figure 5-29 : Montage du concept 10 sur la plateforme

La Figure 5-29 représente le montage du concept 10 sur la plateforme. Nous avons représenté en rouge clair les plans des scanners 1 et 2 et en bleu foncé les plans du troisième. Le troisième scanner couvre les zones non couvertes par le concept 9 qui sont le sol et le ciel. Nous avons ajouté deux miroirs sur ce scanner afin que celui-ci puisse scanner le sol vers l'arrière et le ciel vers l'avant (voir l'image au centre).

L'utilisation du miroir polygonal pour le scanner de type « Multi-plans » donne un résultat positif car on peut avoir plus d'angles d'observation différents sur une même zone d'intérêt. En revanche, l'utilisation de ce miroir diminue le champ de vision, ce qui nécessite d'utiliser plusieurs scanners.

- **Type « Multi-plans : Forme en K »**

Le troisième scanner de type « Multi-plans » est un scanner nommé « Forme en K ». Comme le montre la Figure 5-30, ce scanner présente trois plans de balayage : 1 plan de 360° (ligne bleu) et 2 plans de 180° sur les côtés (+/- 30° par rapport au plan de rotation, lignes rouge et verte).

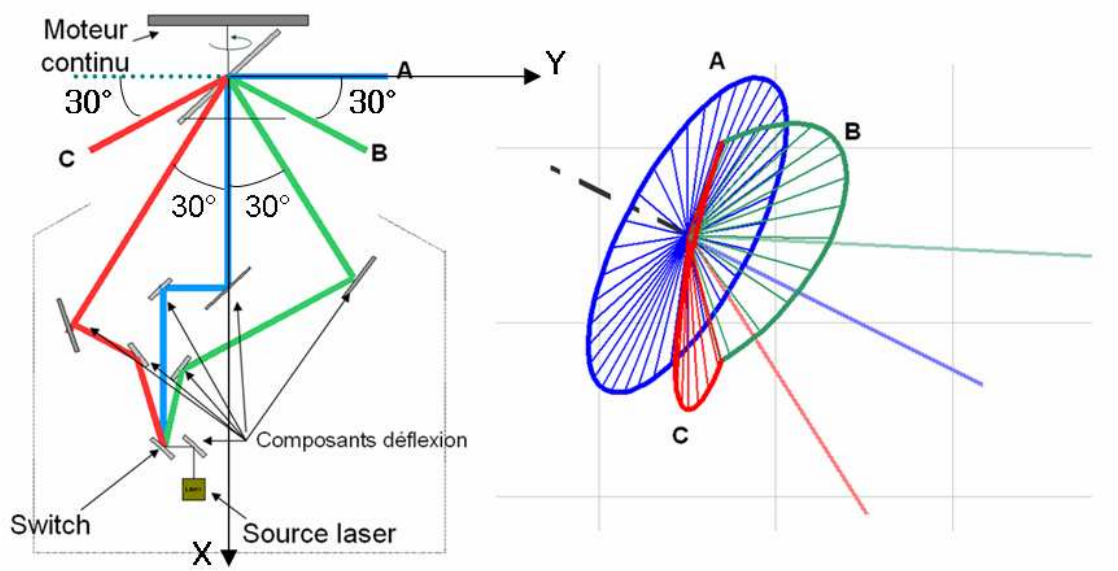


Figure 5-30 : Scanner de type « Multi-plans : Forme en K »

L'image de droite de la Figure 5-30 décrit les trois plans de balayage en 3D. L'axe X du scanner est à la fois l'axe de rotation et la direction du laser voie A (voie principale). Les directions des voies B et C sont inclinées de ± 30° par rapport à l'axe X dans le plan XY. Les trois voies se croisent sur le miroir de déflexion qui est monté sur un moteur continu à 45°.

*Concept 11 (un scanner de forme en K)*

Le concept 11 utilise un scanner de forme en K sur la plateforme.

Table 5-13 : Configuration spatiale du « concept 11 »

| | |
|---|---|
| Position (m) | -1 ; 0 ; 2,5 |
| Orientation (°) | 0 ; 20 ; 0 |

La Table 5-13 présente la configuration spatiale du scanner du concept 11.

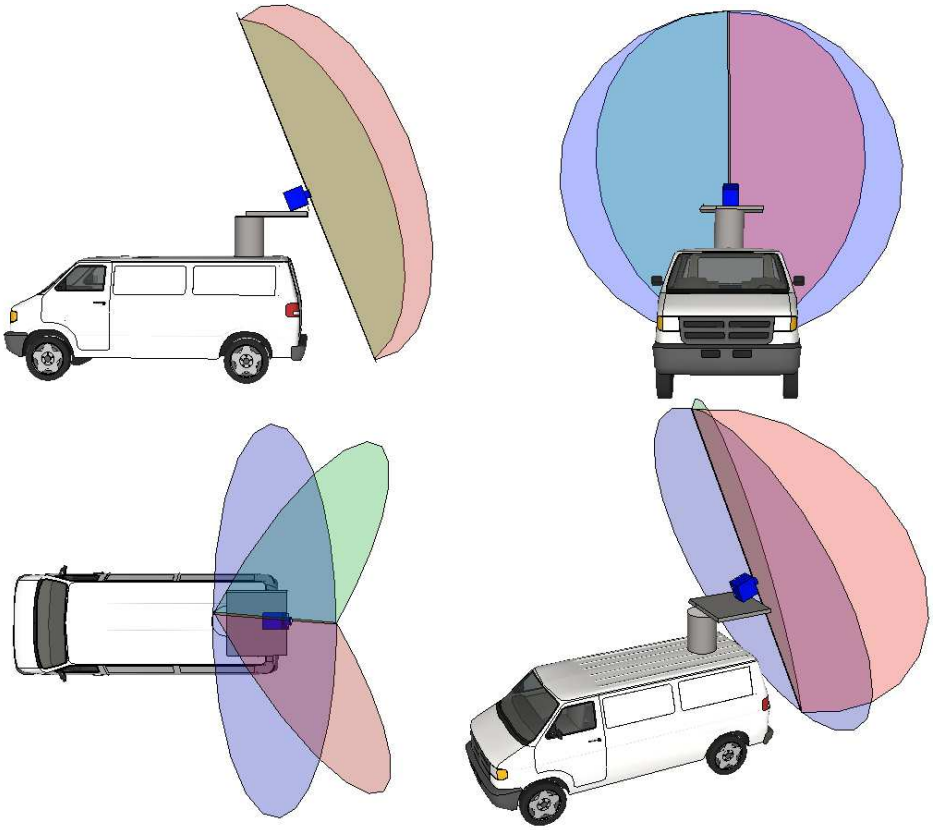

Figure 5-31 : Montage du concept 11 sur la plateforme

La Figure 5-31 représente le montage du concept 11 sur la plateforme. Comme on le voit, avec un scanner de forme en K, il y a deux profils pour chaque côté (droite et gauche). On peut également acquérir des données vers le ciel et vers le sol grâce à sa configuration spatiale.

- **Analyse des concepts**

Nous présentons l'analyse des concepts 6, 7 (forme en V), 9, 10 (forme en flèche ←) et 11 (forme en K). Les concepts 5 et 8 ne sont pas traités car, ils sont semblables aux concepts 6 et 9, d'un seul côté.

*Résolution*

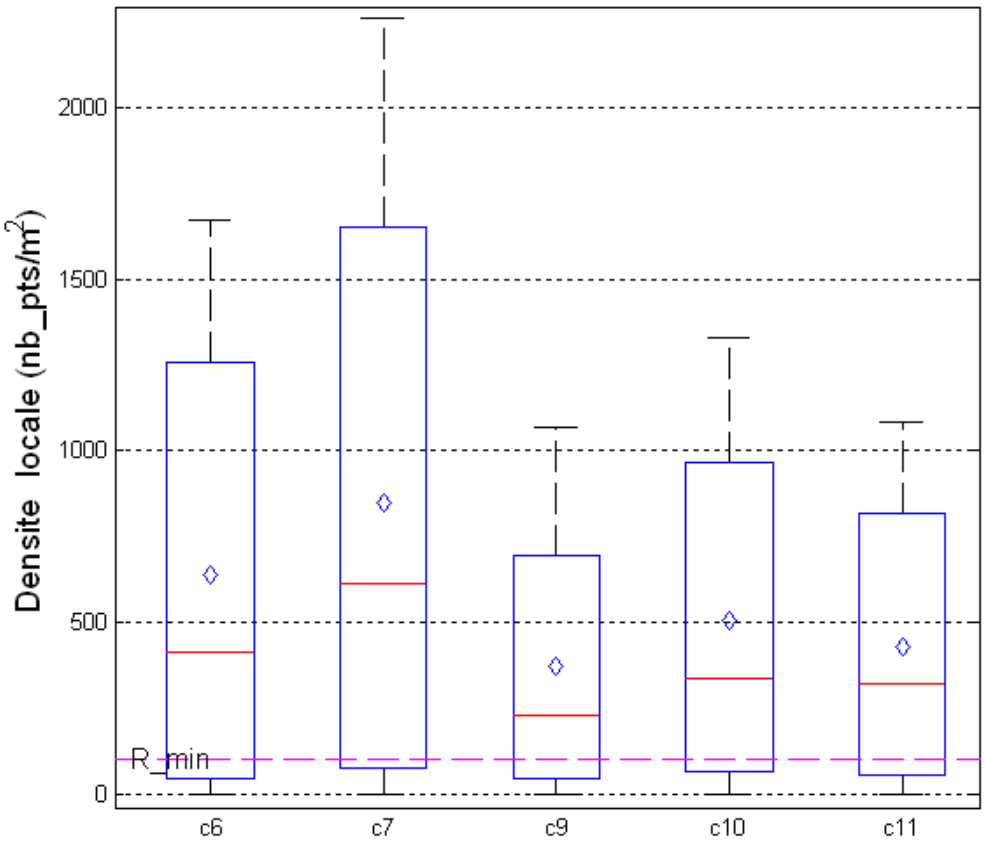


Figure 5-32 : Résolution des relevés laser issus des concepts de type « Multi-plans »

La Figure 5-32 montre la résolution des concepts de type « Multi-plans » proposés. Comme pour la comparaison des concepts de type « Mono-plan », la résolution minimale est fixée à 100 points/m$^2$.

Table 5-14 : Valeurs de résolution des concepts de type « Multi-plans »

| | C6 (2V) | C7 (3V) | C9 (2←) | C10 (3←) | C11 (1K) |
|---|---|---|---|---|---|
| Densité (pts/m²) | 636 | 850 | 371 | 506 | 428 |
| TBR (%) | 62,5 | 69,9 | 60,4 | 67,1 | 63,6 |

Au regard de la Table 5-14 qui présente les valeurs de résolution, il y a une similarité entre le TBR obtenu par le concept 11 (un scanner de forme en K) et le TBR des concepts 6 et 9, et ce malgré le fait que le concept 11 n'utilise qu'un seul scanner contrairement aux concepts 6 et 9 qui en utilisent deux. L'utilisation de trois scanners (concepts 7 et 10) permet d'augmenter sans surprise la qualité de résolution.

Le scanner de forme en V a un champ de vision plus grand que le scanner de forme en flèche ←. La forme en V peut donc atteindre la partie du sol qui est très proche de la trajectoire avec des points très denses tandis que la forme en flèche ← ne permet pas d'atteindre cette zone. Par conséquent, les concepts 6 et 7 ont, respectivement, une plus grande densité moyenne que les concepts 9 et 10.

*Complétude*

La Table 5-15 présente les valeurs de complétude des différents relevés des concepts de type « Multi-plans ».

Table 5-15 : Surface couverte des relevés issus des concepts de type « Multi-plans »

| | C6 (2V) | C7 (3V) | C9 (2←) | C10 (3←) | C11 (1K) |
|---|---|---|---|---|---|
| Surface couverte (m²) | 34818 | 49212 | 43104 | 50048 | 49516 |

En ce qui concerne la surface couverte, il y a une grande différence. En effet, le concept 11 permet de couvrir beaucoup plus de zones que les concepts 6 et 9. Il couvre même autant de surface que les concepts 7 et 10 qui utilisent trois scanners laser.

Au regard de ce résultat, nous pouvons dire que le concept 11 qui utilise un seul scanner de forme en K a la meilleure efficacité par rapport aux autres concepts en termes de complétude.

Nous présentons les surfaces couvertes à l'aide de quatre parties fréquentes dans une ville urbaine : un carrefour, un bâtiment de forme en U, un bâtiment lointain et un pont au dessus du passage du véhicule (Figure 5-33, Figure 5-34, Figure 5-35 et Figure 5-36).

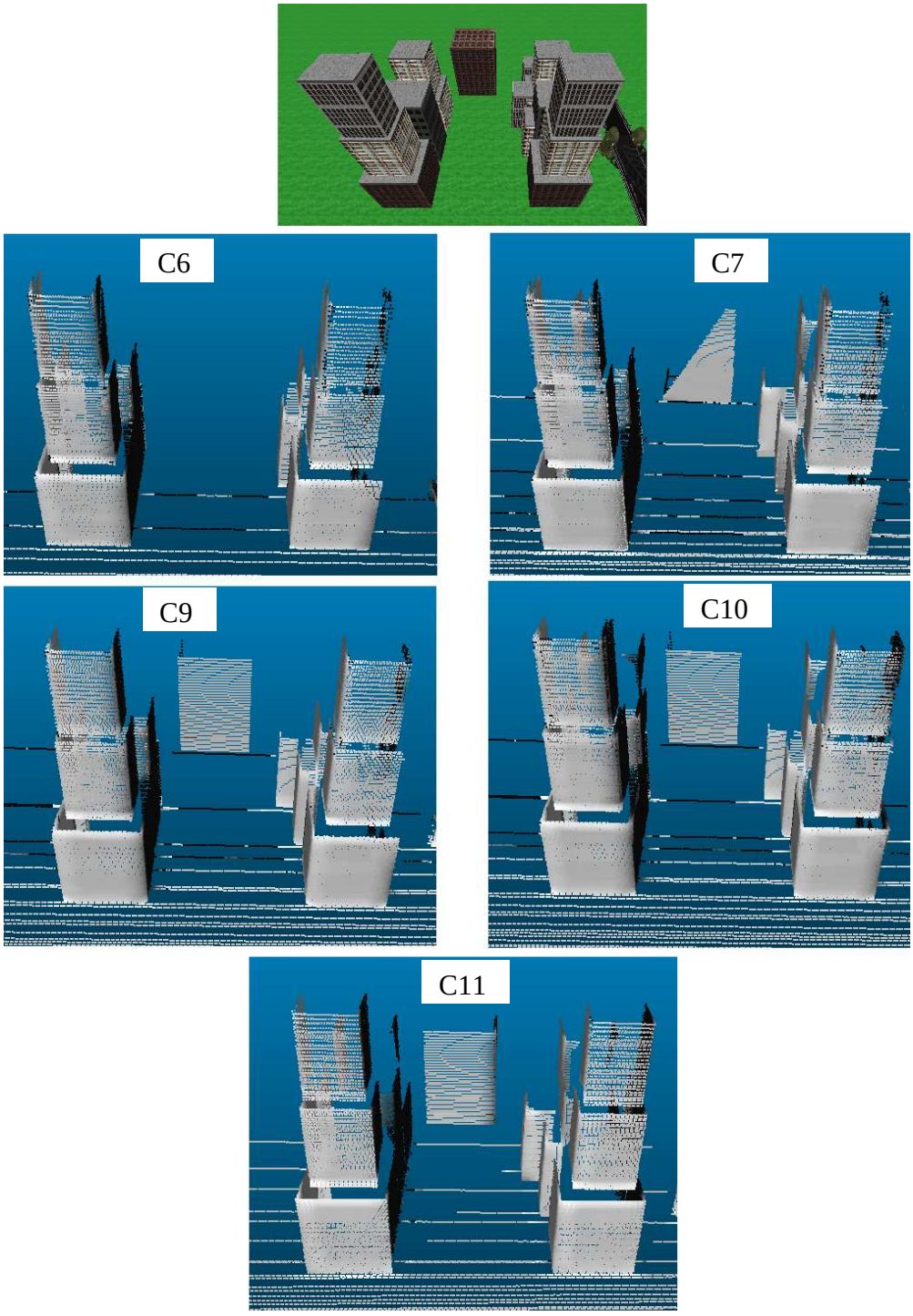

Figure 5-33 : Surface couverte sur un carrefour

La Figure 5-33 montre la différence de surface couverte sur un carrefour. Les concepts 6 et 7 qui utilisent les scanners de forme en V ne couvrent pas suffisamment de zones dans cette partie alors que les autres concepts les couvrent mieux.

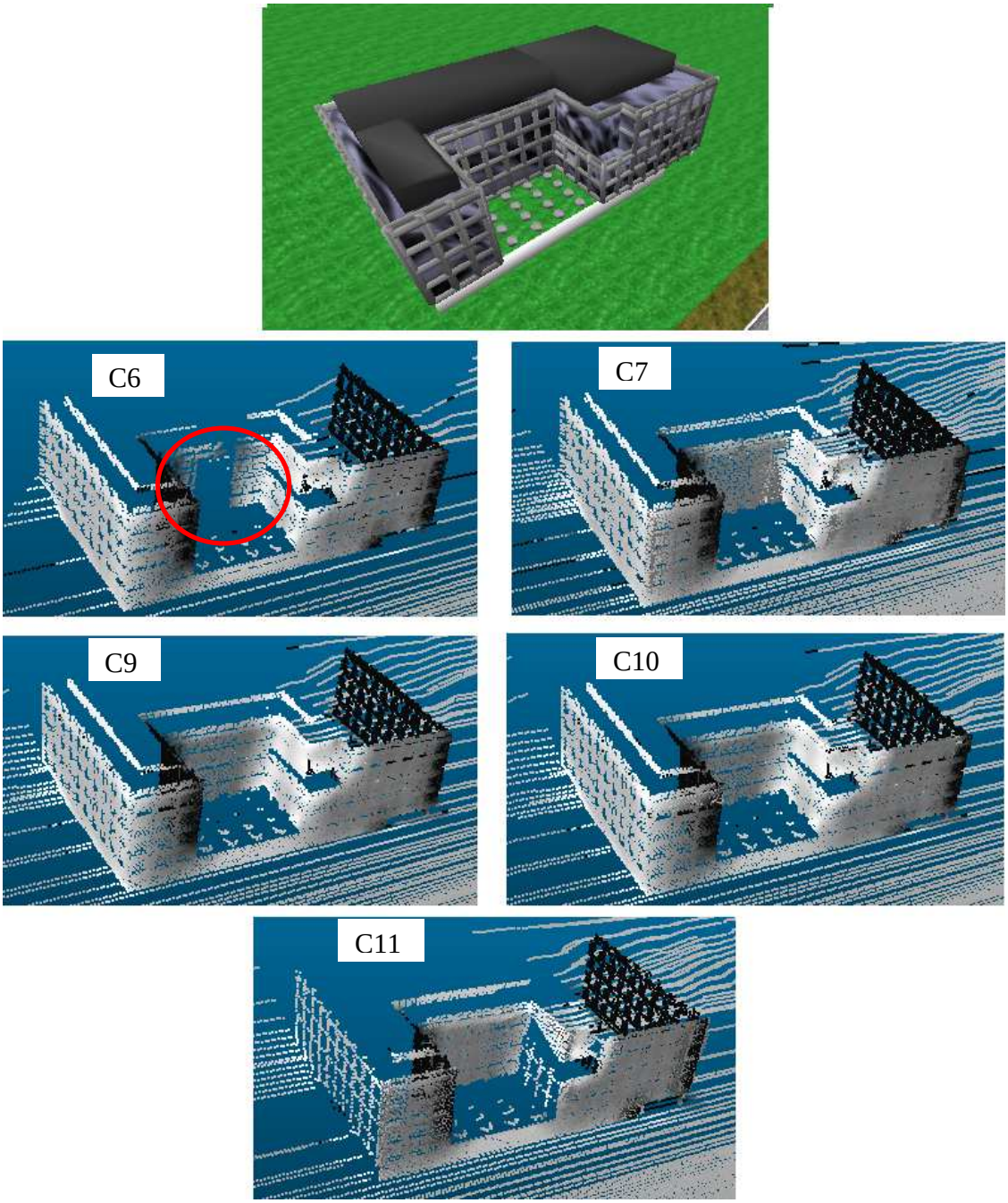

Figure 5-34 : Surface couverte sur un bâtiment en U

La Figure 5-34 montre la différence de surface couverte sur un bâtiment en U. A part le concept 6 (cercle rouge), les autres concepts permettent d'acquérir suffisamment d'informations.

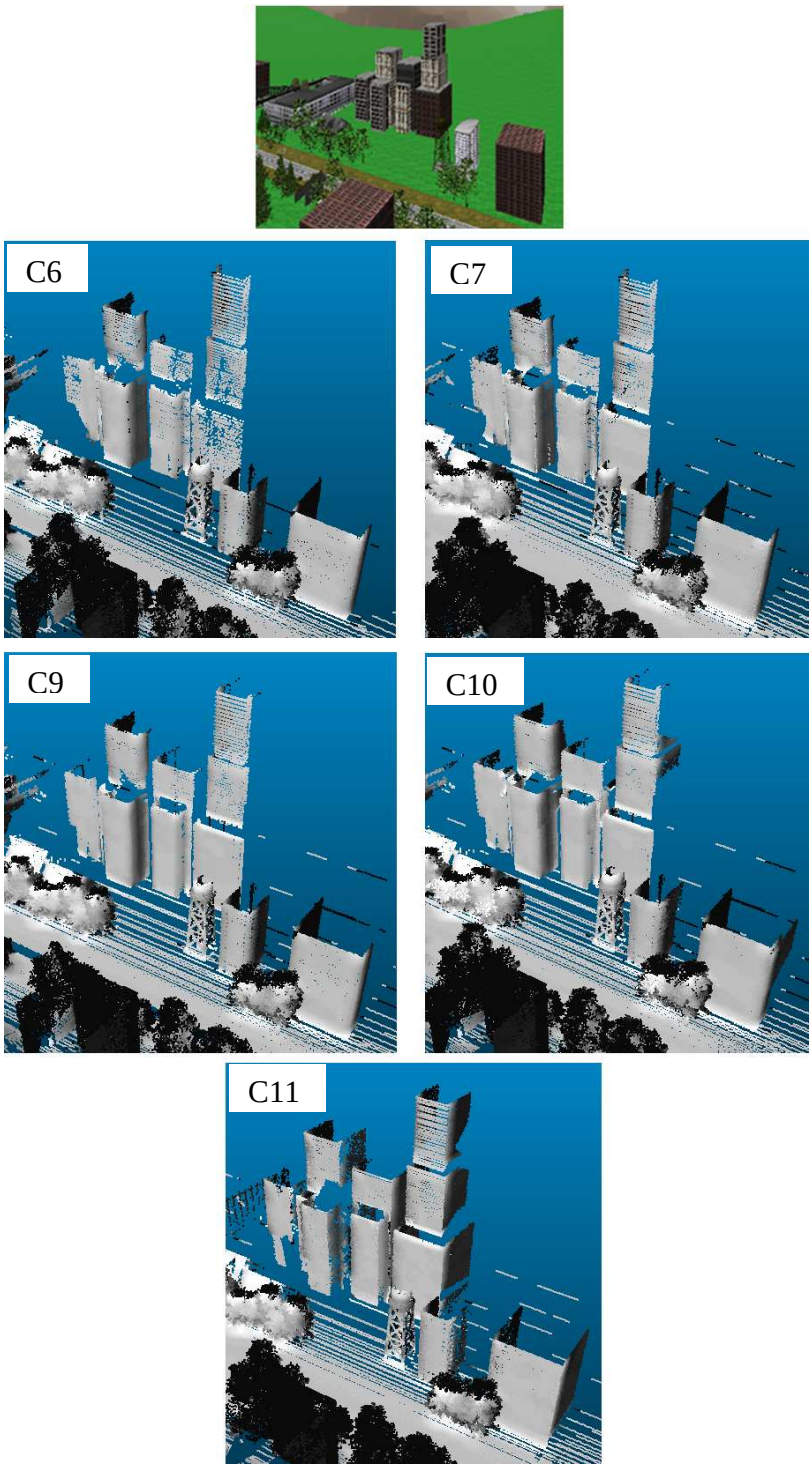

Figure 5-35 : Surface couverte sur un bâtiment lointain

La Figure 5-35 montre la différence de surface couverte sur un bâtiment lointain. Seul le concept 11 permet de couvrir correctement ces zones éloignées.

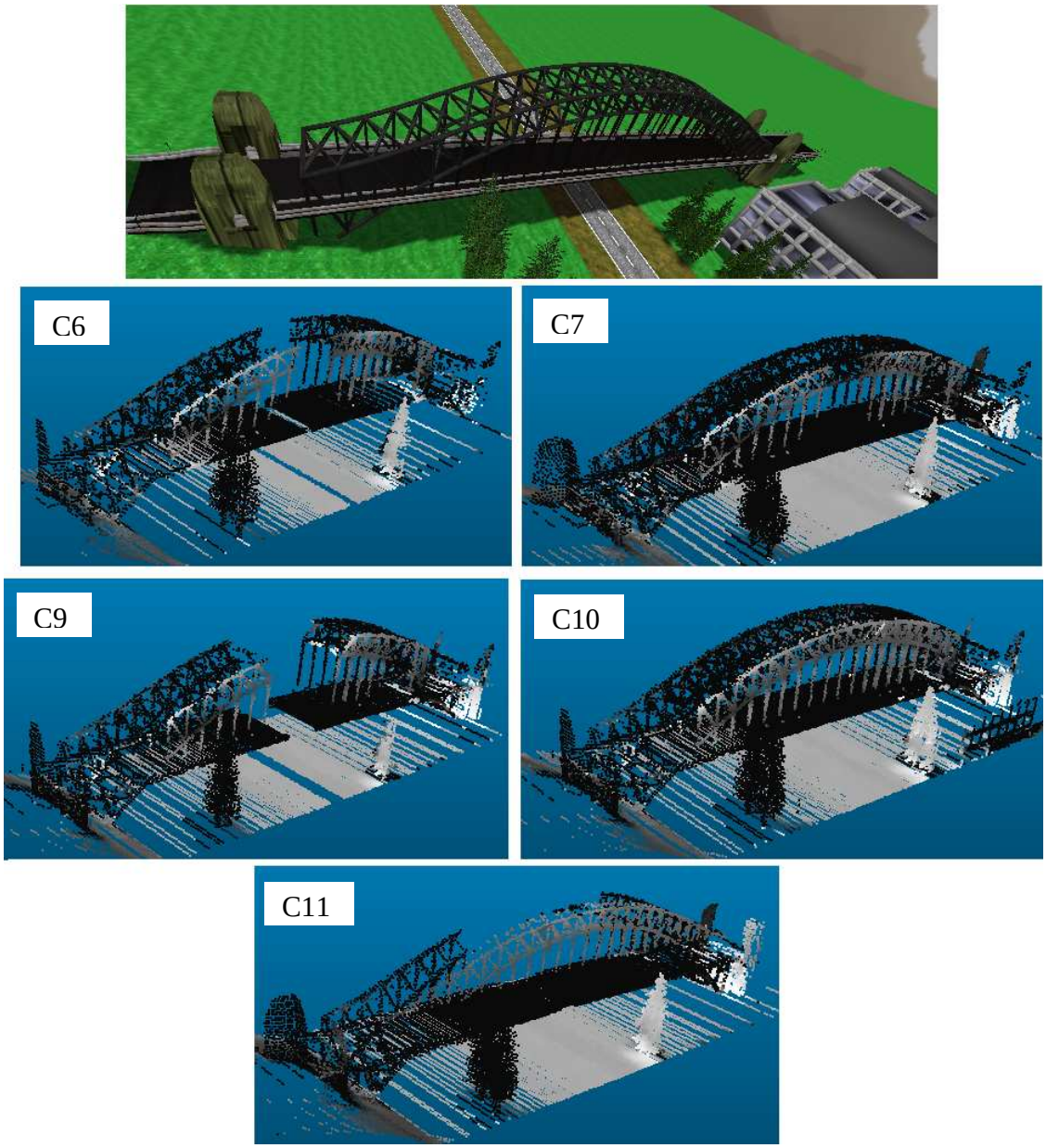

Figure 5-36 : Surface couverte sur un pont

La Figure 5-36 montre la différence de surface couverte sur un pont. Les concepts 6 et 9 utilisant deux scanners laser « Multi-plans » avec chaque scanner orienté sur un seul côté, la zone du milieu du pont ainsi que le sol ne sont pas couverts. En revanche, les concepts 7 et 10 qui utilisent trois scanners couvrent ces zones manquantes.

*Conclusion de l'analyse*

La Table 5-16 présente une synthèse des comparaisons des différents concepts.

Table 5-16 : Récapitulatif de l'analyse des concepts

| | Mono-plan vertical | Mono-plan incliné | Papillon à deux | Papillon à trois | 2V | 3V | 2← | 3← | 1 K |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Résolution | 0 | + | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ |
| Complétude | 0 | + | + | ++ | + | +++ | ++ | +++ | +++ |
| Coût | 0 | 0 | - | -- | - | -- | - | -- | 0 |
| Taille | 0 | 0 | - | -- | - | -- | - | -- | 0 |
| Complexité | 0 | 0 | - | -- | - | -- | - | -- | 0 |
| Synthèse | **0** | ++ | **0** | -- | **0** | - | + | - | +++ ++ |

L'utilisation d'un scanner de type « Multi-plans » permet d'acquérir des données redondantes avec un seul scanner. En revanche, les scanners de forme en V et de forme en flèche ← ont un champ de vision réduit, d'où la nécessité d'avoir plusieurs scanners de ce type.

La résolution des concepts de type « Multi-plans » est similaire à celle des concepts 3, 3bis et 4 qui utilisent plusieurs scanners de type « Mono-plan ».

La complétude est améliorée avec le concept en K. Même s'il utilise un seul scanner, il couvre beaucoup plus de zones que les concepts à deux scanners, voire autant de zones que les concepts à trois scanners.

La taille et le coût du système sont plus raisonnables avec le concept en K qui n'a qu'un seul scanner intégré, qu'avec les concepts à plusieurs scanners.

En faisant la synthèse des résultats obtenus, la Table 5-16 représente ainsi clairement les avantages du concept en K. En effet, il est meilleur que tous les autres concepts étudiés, et notamment le concept papillon à deux lasers proposé par la concurrence : en termes de qualité des données acquises, et en termes de coût, de taille et de complexité d'utilisation.

## *5.4 Conclusion*

Nous avons présenté dans ce chapitre l'intérêt de l'utilisation d'un simulateur dans le processus de conception d'un système mobile de cartographie, permettant d'économiser en temps et en coût de conception.

Ensuite, nous avons proposé plusieurs concepts de systèmes en modifiant le type, le nombre de scanners ainsi que les configurations spatiales sur la plateforme. A l'aide d'un simulateur, nous avons pu concevoir et tester les systèmes et réaliser des acquisitions virtuelles afin d'analyser les données.

A l'obtention des résultats d'analyse des nuages de points issus des concepts, nous pouvons conclure que le concept de « Multi-plans : Forme en K » est celui qui est le plus efficace car il répond à la fois à la qualité des données et aux contraintes de taille et de coût de ces systèmes.

# Chapitre 6.

# Prototypage de scanner laser dédié


6.1 INTRODUCTION ..... 126

6.2 PROTOTYPAGE DE SCANNER MULTI-PLANS : FORME EN K ..... 126

*6.2.1 Etude de faisabilité ..... 126*

*6.2.2 Réalisation ..... 131*

6.3 TESTS ET RESULTATS ..... 132

*6.3.1 Acquisition sur chariot ..... 132*

*6.3.2 Acquisition sur véhicule ..... 134*

*6.3.3 Comparaison des scanners de type mono-plan et de forme en K ..... 135*

6.4 CONCLUSION ..... 140

## 6.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, plusieurs concepts ont été imaginés et décrits. Ces différents concepts ont fait l'objet d'une analyse comparative en termes de qualité des relevés laser.

Parmi les différents concepts de scanner, nous avons constaté que le concept dit de « Forme en K » donnait le résultat le plus satisfaisant avec seulement un scanner laser. Par conséquent, ce concept a été retenu pour réaliser un prototypage.

L'objectif du prototypage est de valider l'intérêt d'un tel concept en confirmant les résultats de la simulation et aussi de se confronter aux problèmes de mise en œuvre qui n'auraient pas été perçus.

## 6.2 Prototypage de scanner multi-plans : Forme en K

Dans cette section, nous présentons la phase de prototypage. Pour cela, nous présentons d'abord l'étude de faisabilité du concept, et ensuite, sa réalisation.

### 6.2.1 Etude de faisabilité

Cette étude est basée sur le principe du concept de forme en K qui est présenté ci-dessus au Chapitre 5 (page 114).

L'étude de faisabilité a pour objectif de choisir les technologies des composants internes du prototype. Notre étude porte sur deux points : le premier sur le changement de voies et le second sur le composant de déflexion.

- **Le changement de voies**

Comme le prototype de forme en K produit plusieurs plans, il est nécessaire d'étudier la faisabilité du changement de voies, c'est-à-dire de scanner alternativement sur plusieurs directions avec un seul laser d'origine réparti sur trois voies.

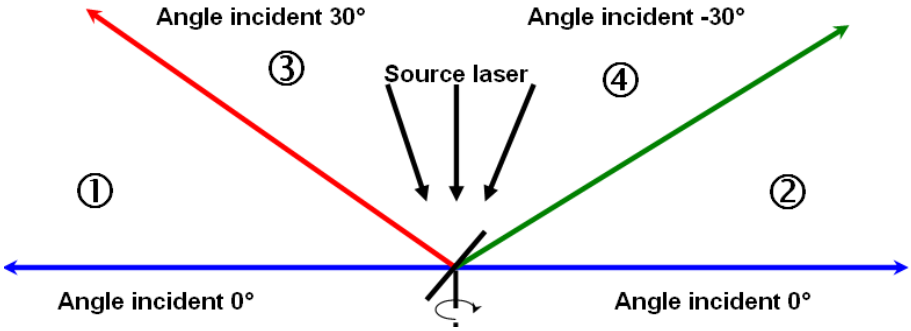


Figure 6-1 : Présentation de quatre demi-plans du concept « forme en K »

Les chiffres ①, ②, ③ et ④ sur la Figure 6-1 représentent chaque demi-plan de 180°. Les deux demi-plans ① et ② proviennent de la voie sans incidence (voie A), le demi-plan ③ provient de la voie avec 30° d'incidence (voie B) et le demi-plan ④ provient de la voie avec -30° d'incidence (voie C).

Le changement de voies peut s'effectuer à chaque demi-plan complet. Les ordres des demi-plans possibles sont les suivants :

① ➔ ② ➔ ③ ➔ ④ ➔ ①… ou ① ➔ ④ ➔ ③ ➔ ② ➔ ①… etc.

Chaque changement de voie nécessitant un certain temps pour avoir tous les plans sans coupure, nous étudions le temps disponible pour chaque basculement d'une voie à une autre.

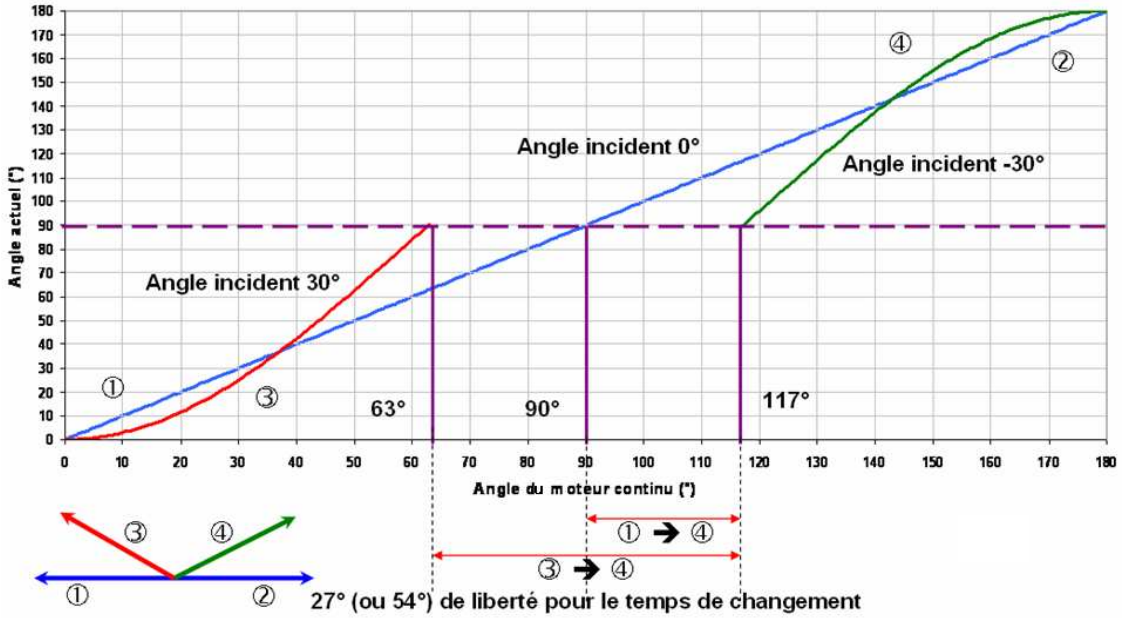


Figure 6-2 : Calcul du temps disponible pour le changement de voies

La Figure 6-2 montre le graphique de l'évaluation de l'angle de la sortie du laser en fonction de l'angle du moteur continu qui varie entre 0° et 360°.

La ligne bleue présente l'évaluation de l'angle de sortie du laser de la voie A (demi-plans ① et ②). Comme on le voit sur la figure, cet angle de sortie suit l'angle du moteur continu de manière linéaire. La Figure 6-3 présente l'espace scanné par le laser produit par la voie A. il s'agit d'un plan.

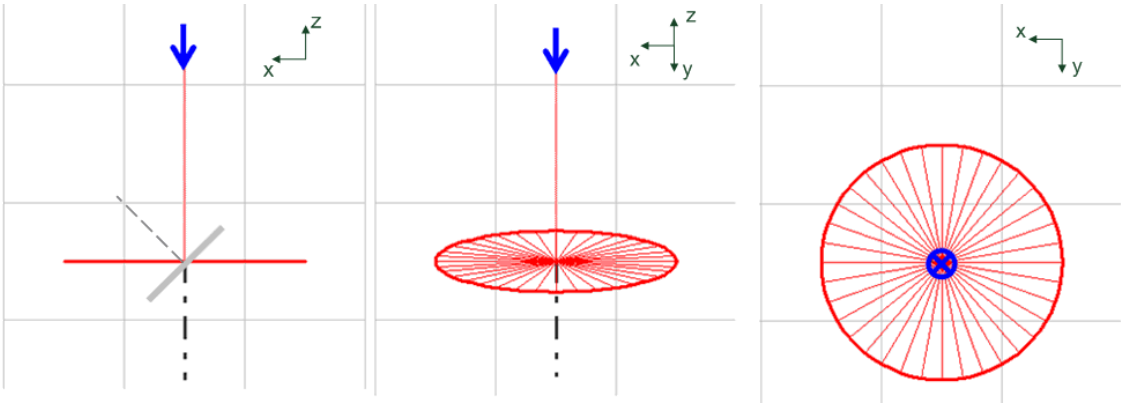


Figure 6-3 : Plan produit par la voie A

Les courbes rouge et verte de la Figure 6-2 présentent l'évolution de l'angle de sortie du laser des voies B et C (demi-plans ③ et ④). Lorsque le laser est réfléchi avec une incidence non nulle par rapport à son axe de rotation, l'espace scanné par le laser ne fait plus un plan mais une surface complexe comme on le voit sur la Figure 6-4 (voir Annexe 3).

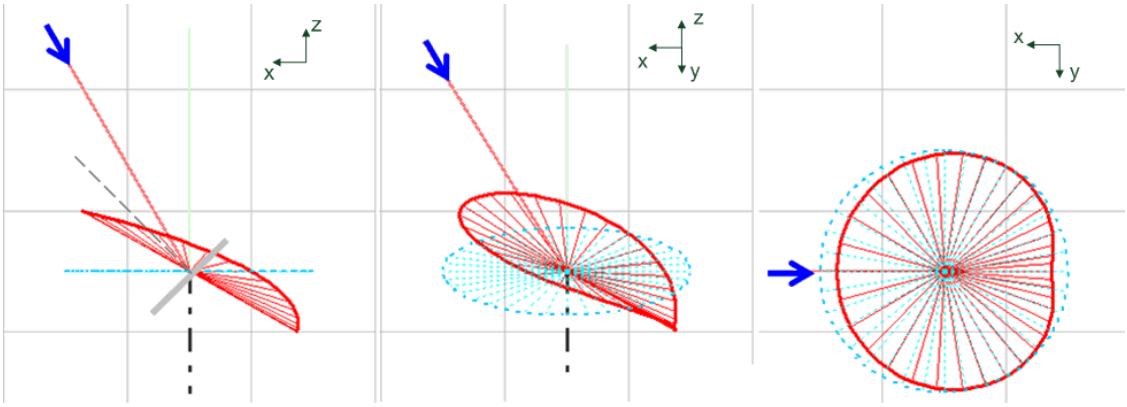


Figure 6-4 : Plan produit par a voie B (ou C)

De ce fait, le laser ainsi réfléchi atteint la limite du demi-plan (90°) avec une certaine avance : le demi-plan est parcouru plus rapidement. Pour une incidence de 30°, la limite du demi-plan (90°) est atteinte lorsque le moteur est à environ 63° (courbe rouge sur la Figure 6-2). Pour la voie avec une incidence de -30°, le demi-plan (90°) ne commence que lorsque le moteur est à environ 117° (courbe verte sur la Figure 6-2).

Ainsi, si nous voulons faire le changement de ① à ④, nous avons environ 27° (90° - 63°) de disponible et si nous voulons faire le changement de ③ à ④, nous avons environ 54° (117° - 63°) de disponible.

Pour traduire cette disponibilité angulaire en disponibilité temporelle, il suffit d'utiliser cette équation avec comme paramètre la fréquence de balayage comme indiqué sur l'Equation 6-1 :

$$t = \frac{\alpha}{2\pi \cdot f_b} \qquad \text{Equation 6-1}$$

Avec $t$ : temps disponible pour le changement (s)
$\alpha$ : angle disponible pour le changement (radian)
$f_b$ : fréquence de balayage (Hz)

Avec le composant de déflexion à utiliser qui a une fréquence de balayage $f_b$ de 60 Hz, nous avons un temps disponible pour le changement de voie qui est de 1,25 ms pour $\alpha$ = 471 mrad (= 27°) ou 2,50 ms pour $\alpha$ = 942 mrad (=54°).

Il pourrait y avoir une autre méthode de changement de voies, effectuée à chaque point mesuré. Pour cette méthode, le temps disponible du changement de voies dépendrait directement de la fréquence d'impulsion laser ( $f_i$ ). Avec le composant technologique prévu ( $f_i$ = 1MHz), nous aurions un temps disponible pour le changement de 1µs maximum, ce qui demanderait un mécanisme de commutation environ 1000 fois plus rapide.

- **Composant de déflexion**

Le concept de forme en K est basé sur l'utilisation d'un miroir à 45° sur moteur continu en tant que composant de déflexion disponible et maîtrisé chez Trimble

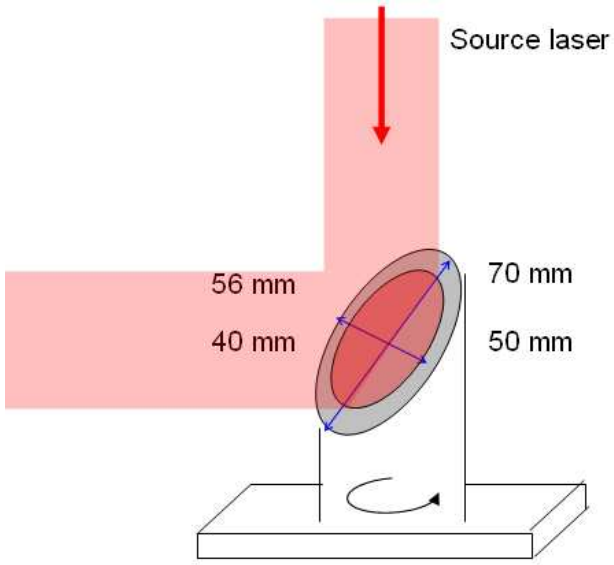


Figure 6-5 : Composant de déflexion à étudier

Comme on voit sur la Figure 6-5, le composant de déflexion est équipé d'un miroir à 45° de taille 70 mm x 50 mm sur le moteur.

Afin de garantir une réception optimale pour la portée souhaitée (100 m), nous avons besoin d'avoir une surface de réception d'un diamètre minimal de 40 mm. Lorsque la direction de sortie du laser est alignée sur l'axe de rotation du miroir (angle incident est égal à 45°), le miroir doit ainsi avoir une taille minimale de 56 mm x 40 mm (56 mm = 40/cos (45°)).

En revanche, lorsque la direction du laser est modifiée (comme pour les voies B et C), la taille du miroir « illuminée » lors de la réception est modifiée[i]. Ceci peut poser un problème car pour garantir une bonne réception et performance sur les voies B et C.

La taille nécessaire du miroir étant variable pour les voies B et C, nous étudions la taille nécessaire en fonction de l'angle du moteur continu et de l'angle incident du laser (Figure 6-6). Pour la voie A, ce composant est bien adapté car la taille nécessaire du miroir est constante pour tout angle de moteur continu à 56 mm x 40 mm.

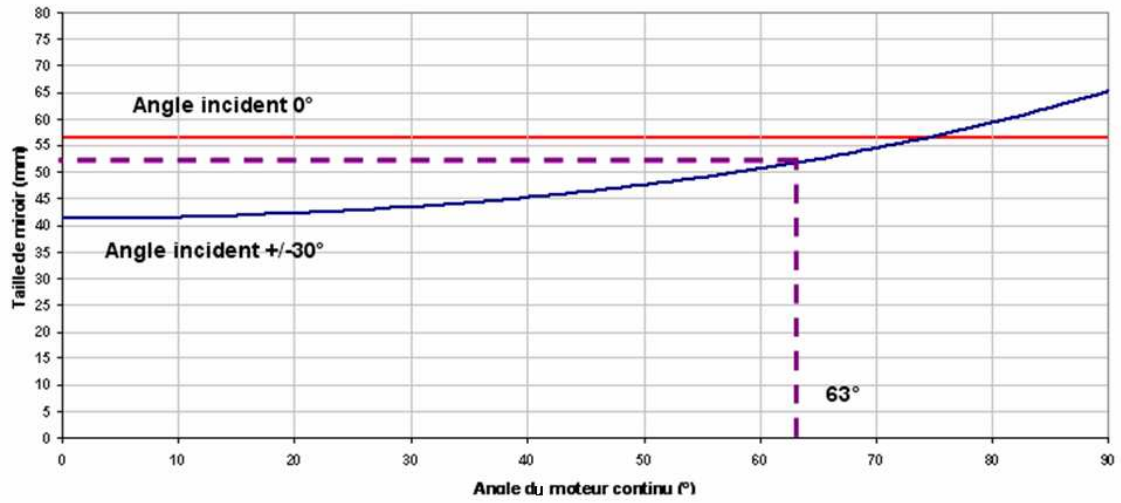


Figure 6-6 : Taille nécessaire du miroir

Pour les voies B et C (angle incident de ± 30°, courbe bleue), la surface couverte augmente avec l'angle du moteur continu. Selon la Figure 6-2 (page 127), nous arrivons à couvrir ± 90° de champ de vision avec seulement ± 63° de l'angle du moteur (angle incident est approximativement de 40°)[ii]. La taille nécessaire du miroir est de 52 mm x 40 mm maximum (52 mm = 40/cos (40°)).

Le composant de déflexion disponible chez Trimble (taille de 70 mm x 50 mm) est ainsi acceptable sans modification.

[i] L'angle incident varie selon la direction du laser (voir Annexe 3). La taille nécessaire du miroir varie selon l'angle incident.

[ii] Résultat du calcul de l'Equation 7-12 en Annexe 3, avec $\alpha = 30°$, $\omega = 45°$ et $\theta = 63°$

### 6.2.2 Réalisation

Après avoir étudié la faisabilité, nous réalisons ensuite le prototype.

D'abord, nous spécifions le prototype en trois parties : la partie commande, la partie acquisition et la partie traitement (Annexe 4). Ensuite, nous développons chacune des parties en utilisant les résultats de la faisabilité (Annexe 5).

Quelques caractéristiques du prototype sont présentées dans la Table 6-1 :

Table 6-1 : Caractéristiques des technologies utilisées pour le prototype

| | |
|---|---|
| Fréquence d'impulsion | 1MHz |
| Fréquence de balayage | 60 Hz |
| Champ de vision | 330° |
| Portée maximale | 100m |

Dans le prototype, nous avons installé une structure de connexion entre le composant de déflexion et le reste du système. En conséquence, nous n'avons pas pu avoir un champ de vision de 360°. Néanmoins, le composant de déflexion doit donc être étudié afin de couvrir un champ de vision de 360°.

La façon de balayer les trois voies que nous avons choisie se fait de la façon suivante : « ① ➔ ② ➔ ③ ➔ ④ ➔ ①… » selon la numérotation des demi-plans de la Figure 6-1.

La Figure 6-7 montre le prototype réalisé.

Figure 6-7 : Prototype réalisé

## 6.3 *Tests et résultats*

### 6.3.1 Acquisition sur chariot

L'objectif de cette acquisition est de valider le concept sur un cas simple. Pour ceci, nous utilisons un chariot sans système de localisation. Nous conduisons le chariot sur un trajet rectiligne avec une vitesse constante.

- **Montage**

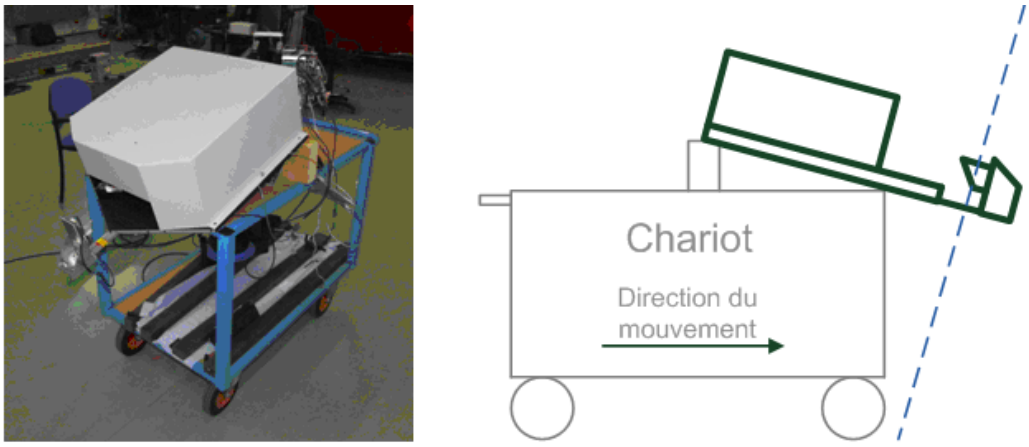


Figure 6-8 : Prototype sur un chariot

Comme on le voit sur la Figure 6-8, le prototype est monté sur un chariot avec environ 20° d'inclinaison autour de l'axe de tangage. Comme nous n'avons pas de système de localisation dans le chariot, nous avons essayé de conduire avec une vitesse constante de 0,2 m/s selon la direction indiquée sur l'image de droite.

- **Zone d'acquisition**

Comme l'objectif de cette acquisition et de valider le concept sur un cas simple, nous essayons d'acquérir les façades d'un bâtiment.

Figure 6-9 : Zone d'acquisition pour le prototype sur chariot

La Figure 6-9 présente la zone d'acquisition que nous avons choisie (bâtiment de Trimble). La direction du mouvement du chariot est représentée par une flèche jaune.

- **Résultat**

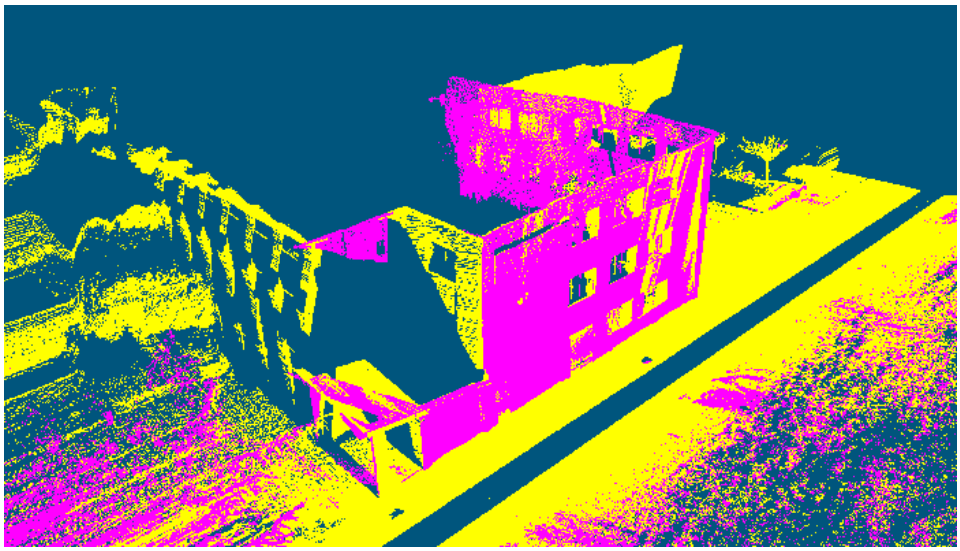

Figure 6-10 : Nuage de points obtenu avec le prototype sur chariot

La Figure 6-10 est le nuage de points obtenu par le prototype sur chariot. Ce nuage est composé de deux nuages de points : l'un provenant du plan principal de balayage (jaune) et l'autre provenant du plan gauche (violet).

Ce résultat montre qu'avec le prototype, nous pouvons acquérir les informations de trois façades du bâtiment en un seul passage. Ce résultat nous permet de confirmer que le scanner multi-plans de « forme en K » peut améliorer le critère de complétude.

### 6.3.2 Acquisition sur véhicule

En intégrant le prototype sur LARA-3D, nous testons le prototype dans un cas urbain.

- **Montage**

Figure 6-11 : Montage de prototype sur LARA-3D

Comme on le voit sur la Figure 6-11, nous ajoutons un support de plus sur le toit de LARA-3D, pour respecter la configuration spatiale du concept (inclinaison de 20° de tangage et hauteur d'environ 2,5 m).

- **Zone d'acquisition**

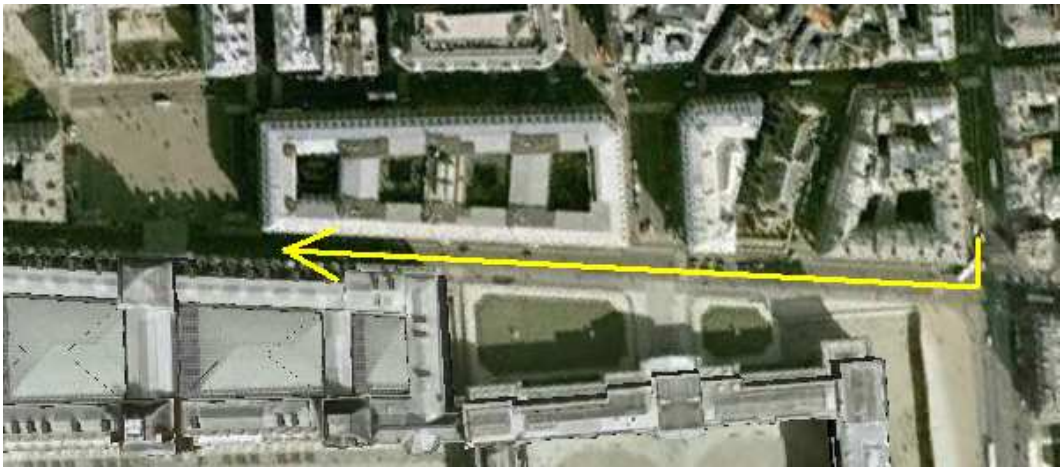

Figure 6-12 : Zone pour la deuxième acquisition sur véhicule

La Figure 6-12 représente la zone retenue pour l'acquisition sur véhicule : il s'agit d'une partie de la rue de Rivoli à Paris, qui est une des zones de test du projet TerraNumerica. La flèche jaune représente la direction de mouvement du véhicule.

- **Résultat**

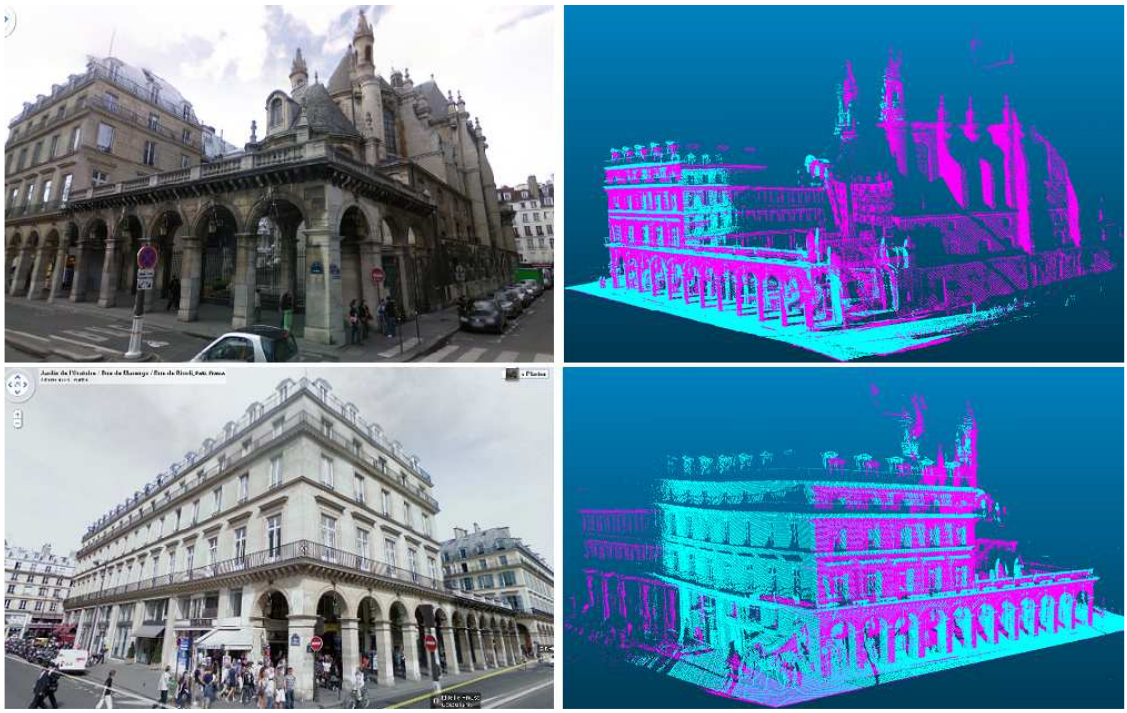

Figure 6-13 : Exemple de nuage de points d'un bâtiment de la rue de Rivoli

La Figure 6-13 représente un exemple de nuage de points d'un bâtiment de la rue de Rivoli. Les données acquises par la voie A sont représentées en couleur rouge dans les images de droite et les données acquises par la voie B sont représentées en couleur bleue. Nous voyons également les trois côtés du bâtiment.

Dans la section suivante, nous procédons à l'analyse comparative des scanners de type mono-plan (concept 1) et de forme en K (concept 11) en situation réelle.

### 6.3.3 Comparaison des scanners de type mono-plan et de forme en K

L'objectif de cette acquisition est de comparer les nuages de points du concept 1 (mono-plan vertical) et du concept 11 (forme en K).

- **Montage du concept 1 (mono-plan vertical)**

Figure 6-14 : Scanner mono-plan sur véhicule

Comme on le voit sur la Figure 6-14, nous montons le prototype (scanner mono-plan) sur le véhicule à une hauteur de 0,75 m. La structure du prototype est telle que présentée sur l'image de droite.

- **Zone d'acquisition**

Figure 6-15 : Zone d'acquisition pour l'analyse des concepts 1 et 11

Nous avons conduit dans une zone de Fontenay-sous-Bois avec environ 300 m de trajectoire (Figure 6-15). Cette zone contient plusieurs bâtiments, avec plusieurs configurations géométriques intéressantes qui permettent d'analyser les différences en termes de complétude. La scène comprend aussi de la végétation, de la signalisation, des voitures sur des parkings.

- **Acquisition**

Nous conduisons le véhicule avec une vitesse constante d'environ 12 km/h (3,3 m/s) pour les deux concepts.

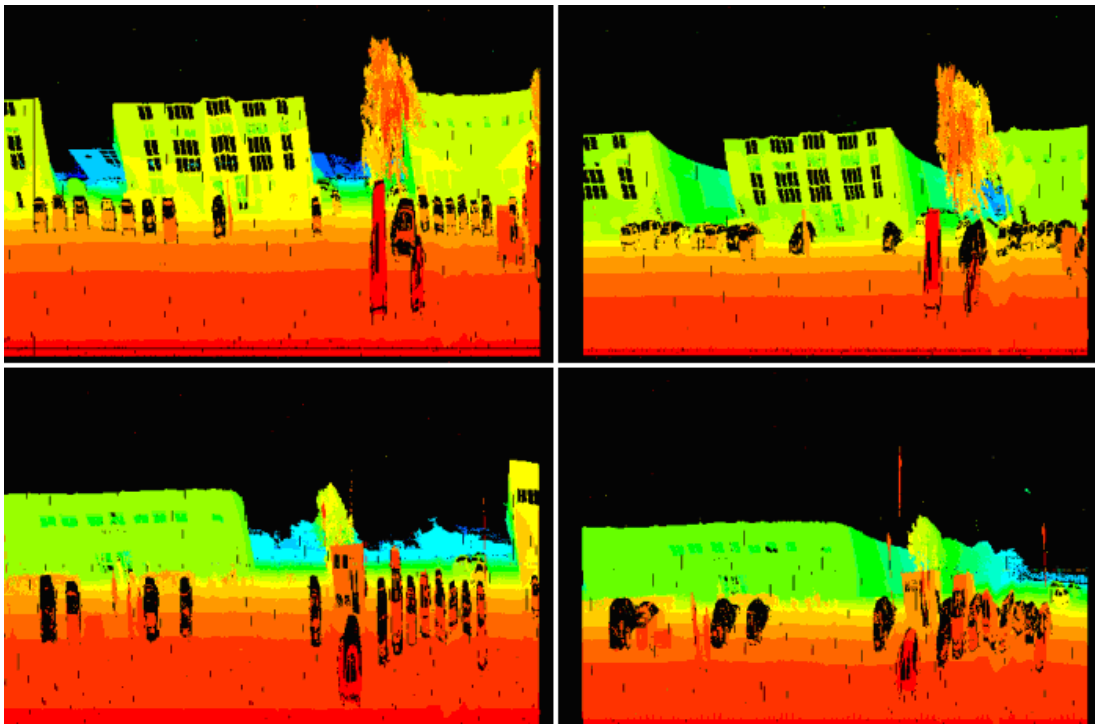

Figure 6-16 : Visualisation des points obtenus

La Figure 6-16 montre la visualisation de l'acquisition en cours. L'image en haut à gauche (une partie de la voie A) représente un bâtiment avec sa façade et aussi le fond de la scène en couleur bleue. L'image en haut à droite (voie B) représente le même bâtiment avec les façades de devant et de côté.

- **Résultat**

Nous analysons les relevés laser sur les critères de résolution et de complétude. La précision n'est pas traitée car elle dépend du système de localisation et cela n'est pas nécessaire pour comparer les deux concepts.

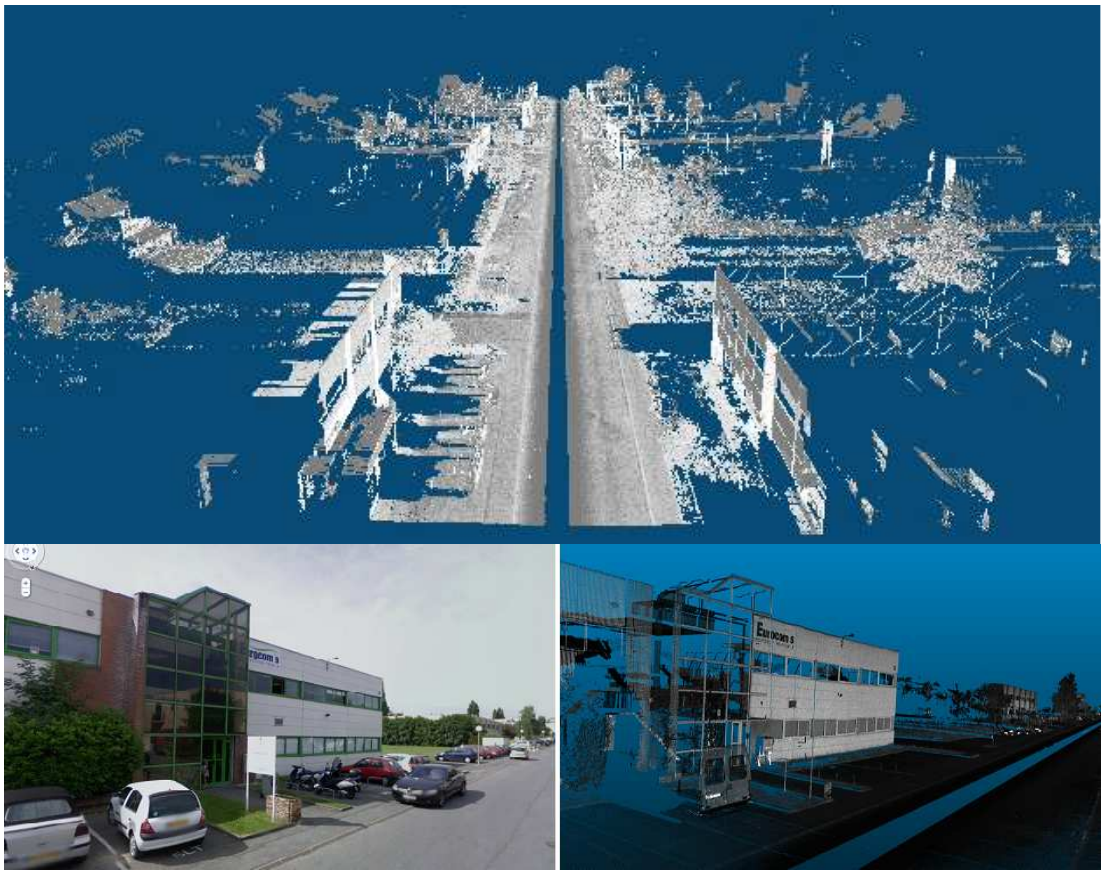

Figure 6-17 : Nuage de points obtenu avec le concept 1 (mono-plan vertical)

La Figure 6-17 montre le nuage de points obtenu avec le prototype du concept 1 « mono-plan vertical ». Comme la trajectoire d'acquisition est droite avec la vitesse de 3,3 m/s et que le prototype est réglé sur une fréquence de rotation de balayage de 60 Hz, nous obtenons des profils de scan tous les 55 mm (3,3 x 1000 / 60).

*Résolution*

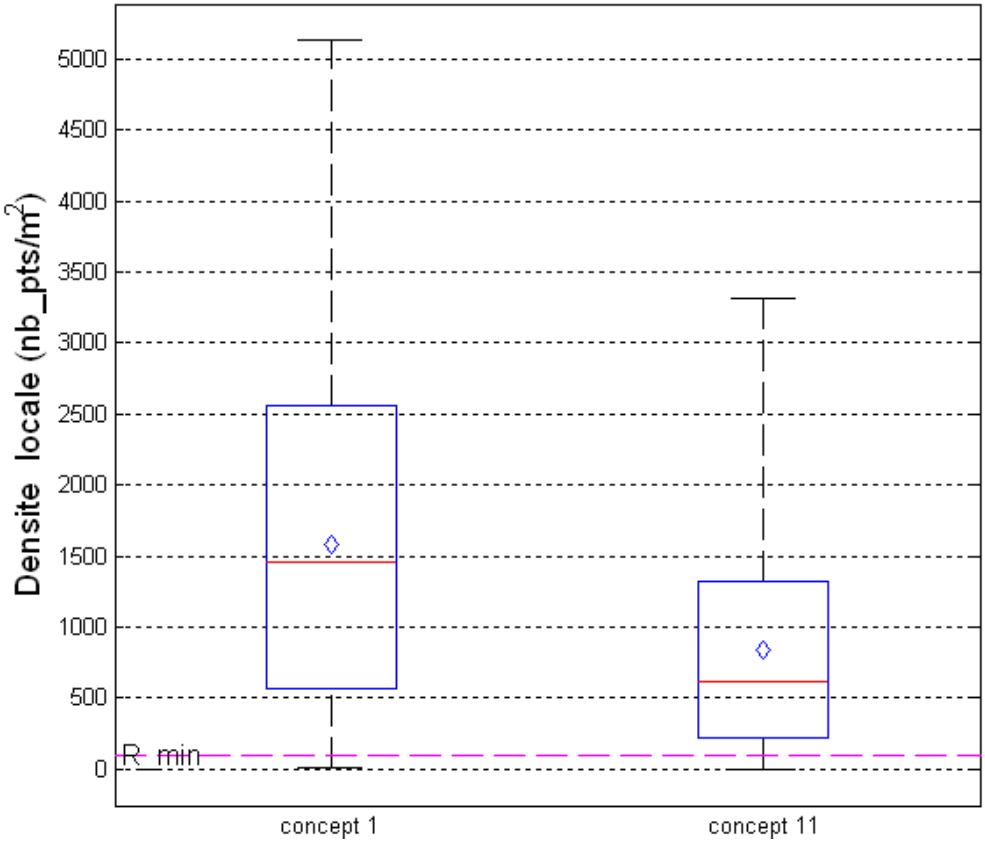


Figure 6-18 : Résolution de données des concepts 1 et 11

La Figure 6-18 montre la résolution des concepts 1 et 11. Pour calculer le Taux de Bonne Résolution (TBR), nous fixons la résolution minimale à 100 points/m$^2$.

Table 6-2 : Valeurs de résolution des prototypes des concepts 1 et 11

| | Concept 1 (mono-plan vertical) | Concept 11 (forme en K) |
|---|---|---|
| Densité (pts/m²) | 1585 | 833 |
| TBR (%) | 94,2 | 84,6 |

La Table 6-2 présente les valeurs de résolution des prototypes des concepts 1 et 11. Le Taux de Bonne Résolution du relevé issu du concept 1 est relativement meilleur que celui du concept 11.

La densité moyenne du concept 1 est aussi supérieure à celle du concept 11, pour deux raisons. D'une part, la position du prototype est différente. En effet, le concept 1 (0,75 m) est monté à un niveau plus bas que le concept 11 (2,5 m), ce qui entraîne la concentration

de points sur le sol. D'autre part, le mode du scan par « changement de voie » du concept 11 entraîne que la distance entre les profils est plus grande que pour le concept 1.

*Complétude*

Table 6-3 : Surface couverte des prototypes des concepts 1 et 11

| | Concept 1 (mono-plan vertical) | Concept 11 (forme en K) |
|---|---|---|
| Surface couverte (m²) | 2425 | 4461 |

La Table 6-3 représente la surface couverte des relevés des prototypes des concepts 1 et 11. Au regard de ces résultats, nous confirmons sans surprise que le concept 11 est meilleur quant au critère de complétude.

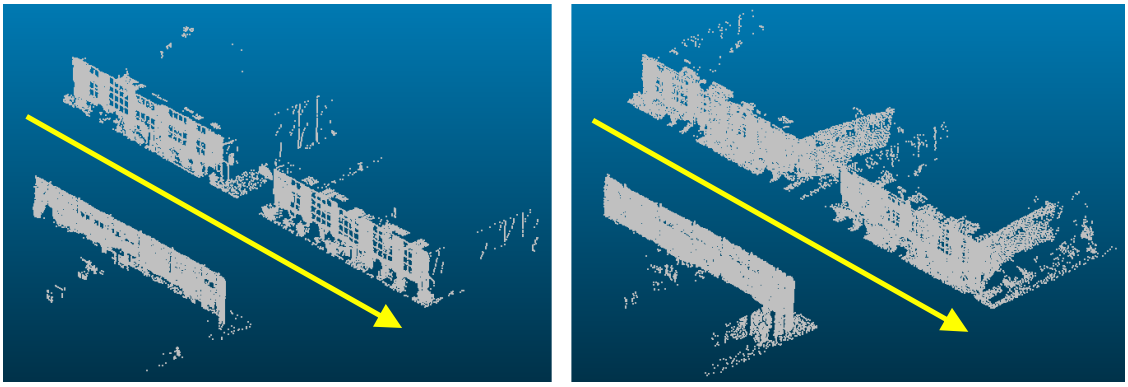

Figure 6-19 : Surface couverte des bâtiments avec les concepts 1 et 11

La Figure 6-19 montre la différence de la surface couverte des deux concepts. Le concept 1 a acquis seulement les façades orientées vers la trajectoire du système (représentée en flèche jaune). En revanche, le concept 11 a acquis plus de façades, non seulement les façades orientées vers la trajectoire du système mais aussi les façades de côté.

## 6.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le développement d'un prototype du concept « Multi-plans : Forme en K ». Avec ce prototype, nous avons fait différents tests d'acquisition de données et nous avons analysé ces données avec la méthode exposée au Chapitre 3.

A l'obtention des résultats d'analyse, nous pouvons affirmer que le concept « Forme en K » améliore la qualité de données, en particulier, la complétude, confirmant le résultat déjà obtenu par simulation.

# Chapitre 7.

# Conclusions et perspectives

7.1 CONCLUSIONS ..... 142
7.2 PERSPECTIVES ..... 143

## *7.1 Conclusions*

L'objectif de cette thèse était de concevoir un système innovant de scanning laser 3D sur une plateforme mobile, en prenant en compte des critères de qualité d'acquisition des nuages de points en fonction de la scène numérisée ainsi que les objectifs applicatifs de cette acquisition.

A travers cette thèse, nous avons passé en revue le domaine de la cartographie 3D d'environnements urbains avec les usages de ces données, en particulier, les données laser.

Comme le nombre d'applications de ces informations devient de plus en plus important, il est nécessaire d'avoir des systèmes qui permettent d'acquérir rapidement des informations cartographiques des objets ou des scènes de grandes dimensions tout en gardant les détails. C'est à cette fin que les systèmes mobiles de cartographie terrestres ont été conçus (Chapitre 2).

Dans le Chapitre 3, nous avons prouvé la rapidité des systèmes mobiles en comparant le temps d'acquisition dans la situation réelle d'un système statique (Trimble VX) avec celui d'un système mobile (LARA-3D).

En revanche, même si le temps total d'acquisition est réduit, la rapidité d'acquisition devient inutile par rapport au système statique si la qualité des données acquises n'est pas garantie, car nous devons ajouter le temps supplémentaire pour améliorer la qualité des données soit par ré-acquisition, soit par un post-traitement.

Nous avons donc présenté une méthodologie d'analyse de la qualité des données laser sur trois critères : la précision, la résolution et la complétude. A l'aide de cette analyse, nous pouvons étudier les relevés issus de différents systèmes d'acquisition laser.

Nous avons ensuite étudié l'impact de la géométrie de systèmes d'acquisition sur la qualité des données en prototypant certains systèmes en réel (Chapitre 4). Nous avons ainsi observé que la variation de l'angle de lacet et de tangage influent les critères de résolution et de complétude.

En revanche, l'acquisition de données en situation réelle est longue et difficile, car la réalisation de systèmes n'est pas évidente. De plus, nous ne pouvons pas étudier correctement et uniquement l'impact de la géométrie car le problème de la localisation n'est pas séparable.

Dès lors, nous avons montré, dans le Chapitre 5, l'intérêt de l'utilisation d'un simulateur dans le processus de conception d'un système mobile de cartographie, ce qui permet d'économiser du temps et des dépenses de conception.

Ensuite, nous avons proposé plusieurs concepts de systèmes en modifiant le type, le nombre de scanners ainsi que leurs configurations spatiales sur la plateforme. A l'aide du

simulateur, nous avons virtuellement réalisé des systèmes et avons fait des acquisitions simulées afin d'analyser les données.

A l'obtention des résultats d'analyse, le concept de type « Multi-plans : Forme en K » a été choisie pour le prototypage car elle répond de manière la plus satisfaisante à la fois à la qualité des données et aux contraintes tels que la taille et le coût du système. Dans le Chapitre 6, nous avons rendu compte de la réalisation du prototype utilisant ce concept et l'avons validé en situation réelle.

Cette thèse nous a permis de structurer scientifiquement une démarche de conception industrielle innovante à travers la définition de critères de qualité de nuages de points, de l'utilisation de méthodes de simulation avancées et de l'analyse des données résultantes de cette démarche. Le travail de collaboration effectué avec le laboratoire universitaire et l'équipe R&D industrielle a permis d'enrichir cette thèse par la complémentarité des exigences du monde scientifique et du monde de l'ingénierie.

## *7.2 Perspectives*

La méthodologie d'analyse de la qualité que nous avons présentée peut être améliorée en ajoutant d'autres critères de qualité.

Cette méthodologie pourrait être proposée comme référence afin de standardiser la comparaison des différents systèmes d'acquisition des données laser.

Le simulateur pourrait être amélioré pour augmenter le réalisme, en ajoutant des fonctions d'acceptation des points liées aux conditions extérieures tel que le type d'objet.

Nous pourrions améliorer le prototype réalisé en modifiant les positions des composants afin de minimiser la taille du système et en étudiant les différents composants tels que l'EDM et le composant de déflexion afin d'augmenter sa performance. Nous pourrions également diversifier les différents modes de scan afin que le prototype soit plus efficace selon les applications.

# Liste des publications

## *Revues à comité de lecture :*

**H. J. Yoo**, F. Goulette, J. Senpauroca, G. Lepère, *Simulation based comparative analysis for the design of laser terrestrial mobile mapping systems*, « Bulletin of Geodetic Sciences – Special Issue on Mobile Mapping Technology », ISSN 1413-4853, 2009

**H. J. Yoo**, F. Goulette, J. Senpauroca, G. Lepère, D. Gruyer, *Aide à la conception par simulation de systèmes de cartographie mobile à scanner laser*, « Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection », ISSN 1768-9791, 2010

## *Conférence avec Actes :*

**H. J. Yoo**, F. Goulette, J. Senpauroca, G. Lepère, *Analysis and improvement of laser terrestrial mobile mapping systems configurations*, « ISPRS Commission V Technical Symposium – Close Range Image Measurement Techniques », 2010, Newcastle

**H. J. Yoo**, F. Goulette, J. Senpauroca, G. Lepère, *Comparative analysis based on simulation for the design of laser terrestrial mobile mapping systems*, « 6th International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT) », 2009, Sao Paulo

**H. J. Yoo**, F. Goulette, J. Senpauroca, G. Lepère, D. Gruyer, *Aide à la conception par simulation de systèmes de cartographie mobile à scanner laser*, « Colloque Technique Laser pour l'Etude Environnements Naturels et Urbains », 2009, Le Mans

## *Conférence sans Actes :*

**H. J. Yoo**, *Mobile Mapping System: Interdisciplinary study between Perception and Localization Domains*, « Conférence Annuelle de l'Association des Scientifiques Coréens en France », 2009, Lyon
- Reçu « Prix d'ASCoF »

## *Dépôt de brevet :*

(En cours d'étude)

# Bibliographie


I. Abuhadrous, *Système embarqué temps réel de localisation et de modélisation 3D par fusion multi-capteur*, thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2005

M. Alba, A. Giussani, F. Roncoroni, M. Scaioni, *Review and Comparison of Techniques for Terrestrial 3D-View Georeferencing*, International Symposium on Mobile Mapping Technology, 2007

M. Alshawa, E. Smigiel, P. Grussenmeyer and T. Landes, *Integration of a Terrestrial Lidar on a Mobile Mapping Platform - First Experiences*, International Symposium on Mobile Mapping Technology, 2007

M. Alshawa, P. Grussenmeyer et E. Smigiel, *Contribution of photogrammetry to the improvement of navigation data in a low cost TLS based land mobile mapping system*, International Symposium on Mobile Mapping Technology 2009, Juillet 2009, Sao Paolo

L. Amoureus, M.P.H. Bomers, R. Fuser and M. Tosatto, *Integration of LiDAR and Terrestrial Mobile Mapping Technology for the Creation of a Comprehensive Road Cadastre*, International Symposium on Mobile Mapping Technology, 2007

P. Arsenault, C. Giroud, *Development of a Vehicular Mobile Mapping and Imaging System*, International Symposium on Mobile Mapping Technology, 2007

T. Asai, M. Kanbara, N. Yokoya, *3D modeling of outdoor scenes by integrating stop-and-go and continuous scanning*, International Symposium on Mobile Mapping Technology, 2007

ASTM International, *Standard Terminology for Three-Dimensional (3D) Imaging systems*, Designation : E 2544-09b, 2010

D. Barber, J. Mills, S. Smith-Voysey, *Geometric Validation of a Ground-based Mobile laser scanning system*, ISPRS Journal of Photogrammetry & remote Sensing, 2007

O. Bentrah, *Reconstruction de la géométrie d'acquisition de séquence d'images acquises par un véhicule en milieu urbain*, thèse de doctorat, IGN, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006.

G. Bolzon, G. Caroti, A. Piemonte, *Accuracy Chech of Road's Cross Slope Evaluation Using MMS Vehicle*, International Symposium on Mobile Mapping Technology, 2007

C. Boussard, N. Hautière, D. Gruyer, *Prototypage d'un capteur monoculaire générique de visibilité pour véhicule traceur*, Majestic 2006, 22-24 novembre, Lorient.

X. Brun, J-E. Deschaud and F. Goulette, *On-The-Way City Mobile Mapping Using Laser Range Scanner And Fisheye Camera*, International Symposium on Mobile Mapping Technology, 2007

J. E. Deschaud, *Modélisation 3D d'environnements par système mobile avec couplage Scanner laser/Caméra*, thèse de doctorat, MINES ParisTech, 2010

S.F. El-Hakim, P. Boulanger, F. Blais, J.-A. Beraldin and G. Roth, *A Mobile System for Indoor 3-D Mapping and Positioning*, Optical 3-D Measurement Techniques, Zurich, Sept.1997

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

K. Gajdamowicz, D. Öhman and M. Horemuz, *Mapping and 3D Modelling of Urban Environment Based On LiDAR GPS IMU and Image Data*, International Symposium on Mobile Mapping Technology, 2007

F. Goulette et C. Laurgeau, *Capteurs et numérisation 3D*, Chapitre 1 du livre « Images de profondeur », Hermès, 2001

F. Goulette, I. Abuhadrous, F. Nashashibi, S. Ammoun, C. Laurgeau, *An Integrated On-Board Laser Range Sensing System for On-the-Way City and Road Modelling*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 34, Part A, 2006.

B. Grinstead, A. Koschan, D. Page, A. Gribok, and M. Abidi, *Vehicle-borne Scanning for Detailed 3D Terrain Model Generation*, SAE (Society of Automotive Engineers) Commercial Vehicle Engineering Congress, Chicago, IL, SAE Technical Paper 2005-01-3557, November, 2005

B. Grinstead, S. Sukumar, D. Page and A. Koschan, *Mobile Scanning System for the Fast Digitization of Existing Roadways and Structures*, Sensor Review, Vol.26, Number 4, 283-289, 2006

D. Gruyer, C. Royere, S. Glaser, SiVIC, *une plate forme de prototypage d'environnement routier et de capteurs virtuels pour la conception et l'évaluation de systèmes d'aide à la conduite*, Journée Automatique Automobile, Bordeaux, novembre 2005

D. Gruyer, C. Royere, N. du Lac, G. Michel, J.M. Blosseville, *SiVIC and RTMaps, interconnected platforms for the conception and the evaluation of driving assistance systems*, ITSC'06, London, october 2006

A. Howard, D. F. Wolf and G. S. Sukhatme September, *Towards 3D Mapping in Large*

*Urban Environments*, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pages 419-424 Sendai, Japan, 2004

T. Kingston, V. Gikas, C. Laflamme, C. Larouche, *An Integrated Mobile Mapping System for Data Acquisition and Automated Asset Extraction*, International Symposium on Mobile Mapping Technology, 2007

C. Laflamme, T. Kingston et R. Mccuaig, *Automated Mobile Mapping for Asset Managers*, TS 38 – Engineering Surveys for Construction Works I, Munich, October 2006

D. Manandhar and R. Shibasaki, *Geo-referencing of Multi-sensor Range Data for Vehicle-borne Laser Mapping System (VLMS)*, ACRS, Vol. 2, 932-937, Taiwan, 2000a

D. Manandhar and R. Shibasaki, *Prototype Development for Vehicle-based Laser Mapping System*, IAPRS, Vol. XXXIII, Amsterdam, 2000b

D. Manandhar and R. Shibasaki, *Vehicle-Borne Laser Mapping System (VLMS) for 3-D GIS*, IEEE, 2001a

D. Manandhar and R. Shibasaki, *Vehicle-Borne Laser Mapping System (VLMS) for 3-D Urban GIS Database*, CUPUM, 2001b

D. Manandhar and R. Shibasaki, *Vehicle-borne Laser Mapping System (VLMS) A New Observation System for 3-D Mapping of Urban Areas*, URBAN, 2001c

D. Manandhar and R. Shibasaki, *Feature Extraction from Range Data*, ACRS, Singapore, 2001d

D. Manandhar and R. Shibasaki, *Auto-Extraction of Urban Features From Vehicle-borne laser data*, IAPRS, Vol. 34, Part 4, "GeoSpatial Theory, Processing and Applications", Ottawa, 2002

T. Ridene, *Co-recalage de données hétérogènes géo-référencées : contributions à la correction de relevés laser mobiles*, thèse de doctorat, MINES ParisTech, 2010

JCGM 200 : 2008, Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)

J. Roul, *Conception et développement d'un télémètre pour scanner 3D mobile, rapport de stage*, Trimble, 2009

P. Schaer, J. Skaloud, S. Landtwing, K, Legat, *Accuracy Estimation for Laser Point Cloud Including Scanning Geometry*, International Symposium on Mobile Mapping Technology, 2007

J. Shan et C. K. Toth, Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing, CRC Press, IBAN 978-1-4200-5142-1

W. C. Stone, M. Juberts, N. Dagalakis, J. Stone et J. Gorman, *Performance Analysis of Next-Generation LADAR for Manufacturing, Construction, and Mobility*, NISTIR 7117, Mai 2004

J. W. Tukey, *Exploratory Data Analysis*, Addison-wesley, Reading, MA. 1977

V. Ussyshkin, *Mobile Laser Scanning Technology for Surveying Application: From Data Collection to End-Products*, FIG Working Week 2009, Eilat, Israel, May 2009

G. Vosselman et Hans-Gerd Maas, *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*, ISBN 978-1904445-87-6, Whittles Publishing, 2010

S-J. Yu, S. Sukumar, A. Koschan, D. Page and M. Abidi, *3D Reconstruction of Road Surfaces Using an Integrated Multi-sensory Approach*, Optics and Lasers in Engineering 45 808-818, 2007

*Site web*

[web 3DLM] http://www.3dlasermapping.com/
[web Applanix] http://www.applanix.com/solutions/airborne/dss.html
[web CAOR] http://caor.mines-paristech.fr/
[web Civitec] http://www.civitec.net/
[web GoogleMaps] http://maps.google.fr/
[web IBEO] http://www.ibeo-as.com/
[web IGN] http://recherche.ign.fr/labos/matis/
[web InterGeo] http://www.intergeo.de/en/englisch/index.php
[web MDL] http://www.mdl.co.uk
[web Optech] http://www.optech.ca/press_LYNX_Release.htm
[web Riegl] http://www.riegl.com/
[web RMS] http://en.wikipedia.org/wiki/Root_mean_square
[web RTMaps] http://www.intempora.com
[web SICK] http://www.sick.com/
[web SITECO] http://www.sitecoinf.it/
[web TeleAtlas] http://www.teleatlas.com/index.htm
[web TerraNumerica] http://www.parisdeveloppement.com/fileadmin/user_upload/animation/circuits_2007/circuits_2007/presentation_intervenants/TerraNumerica_Presentation_07-10-25_PIT2007__fra_.pdf
[web Trimble] http://www.trimble.com
[web Velodyne] http://www.velodyne.com
[web Versailles] http://www.gvn.chateauversailles.fr/

# Annexe 1. Adaptation du Trimble GX

*Synchronisation*

Le chemin pour enregistrer les données acquises du scanner Trimble GX vers l'unité de stockage (par exemple, un disque dur) est représenté sur la Figure 7-1.

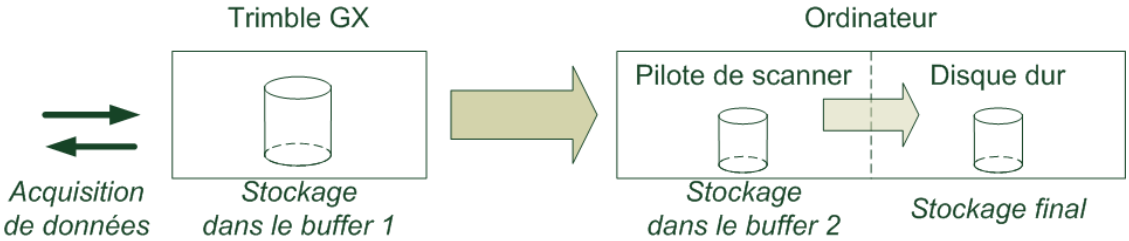


Figure 7-1 : De l'acquisition à l'enregistrement de données

Les données sont d'abord stockées dans la mémoire tampon (*buffer*) du scanner. Si la mémoire tampon de scanner est pleine, les données stockées sont transférées vers le pilote (*driver*) et stockées dans la mémoire tampon du pilote. Ensuite le logiciel récupère les données de la mémoire tampon du pilote afin d'enregistrer dans le stockage final, un disque dur.

Afin d'augmenter la vitesse de rapatriement des données du scanner vers le pilote, nous minimisons la taille de la mémoire tampon du scanner en modifiant le code du « *firmware* ».

En revanche, comme RTMaps est un logiciel qui récupère les données directement du pilote, nous pouvons mettre l'horodatage sur les données seulement après le passage de la mémoire tampon du pilote.

Mais cette datation ne peut pas toujours être synchronisée avec les autres données car il y a d'autres gestions de la mémoire par le système d'exploitation de l'ordinateur, de ce fait le temps entre le moment de l'envoi d'impulsion laser du scanner et le moment de datation par RTMaps n'est pas constant.

De plus, comme le scanner Trimble GX attend le signal retour du laser avant de lancer une nouvelle mesure, la fréquence d'impulsion n'est pas constante mais variable selon la distance de l'objet détecté, ainsi la datation exacte pour chaque mesure n'est pas garantie.

Néanmoins, pour ce prototype, une synchronisation parfaite n'étant pas strictement nécessaire, nous restons à ce niveau de datation des données.

*Contrôle par RTMaps*

Comme LARA-3D est développé avec RTMaps pour contrôler et enregistrer les données issues de différents capteurs, nous avons développé un composant de RTMaps qui permet de contrôler le scanner Trimble GX afin de contrôler tous les capteurs de système sous RTMaps.

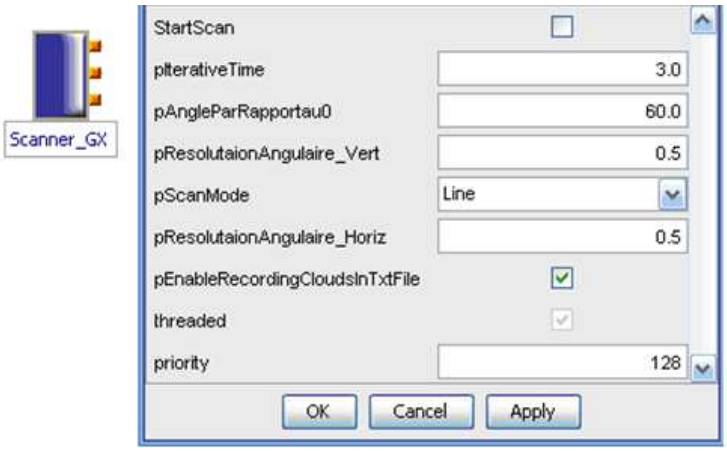


Figure 7-2 : Composant de scanner Trimble GX

La Figure 7-2 montre le composant scanner Trimble GX avec ses propriétés, dont voici le détail :

- StartScan : commencer ou arrêter le scan
- pIterativeTime : temps d'attente pour recevoir la commande de « StartScan »
- pAngleParRapportau0 : définir l'orientation de la tête de scanner
- pResolutionAngulaire_Vert : définir la résolution angulaire verticale (degré)
- pScanMode : « line » pour une simple rotation verticale, « space » pour deux rotations verticale et horizontale
- pResolutionAngulaire_Horiz : définir la résolution angulaire horizontale (degré) pour le mode « space »
- pEnableRecordingCloudsInTxtFile : enregistrer ou non les données dans un fichier « .neu » sous forme de cartésiennes avec l'information de luminance

Le logiciel RTMaps acquiert les informations issues de scanner Trimble GX et du système de localisation et les enregistre avec la datation lors de l'acquisition.

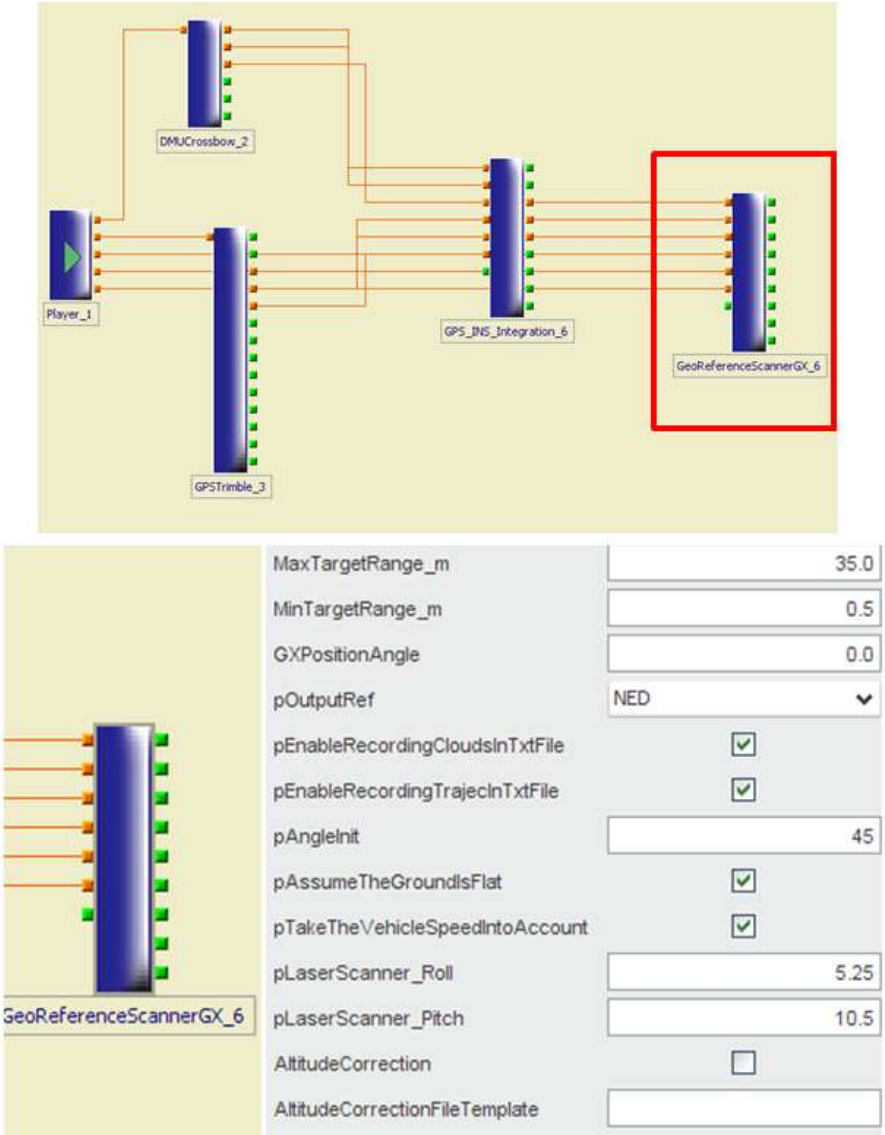


Figure 7-3 : Génération de nuage de points

Comme on le voit sur la Figure 7-3, les données enregistrées sont traitées pour générer un nuage de points par un nouveau composant créé par Taha Ridene, docteur au sein de l'équipe MMS de CAOR, pour notre prototype, Trimble GX sur LARA-3D [Ridene, 2010].

# Annexe 2. Adaptation du simulateur

Pour que les données simulées soient réalistes, nous faisons quelques adaptations du simulateur, plus spécifiquement sur le module du scanner laser du simulateur SiVIC en filtrant les points qui ne sont pas dans la portée.

La portée est la distance maximale que l'on peut mesurer avec la télémétrie laser. Celle-ci n'est pas une valeur constante mais variable selon les conditions.

- **Conditions pour la portée**

On peut définir la portée comme la distance à laquelle on prend 50% de points pris[i] sur un albédo de 20%[ii]. Si les conditions sont modifiées, la portée doit être redéfinie. Par exemple, sur un albédo de 100% (signal retour 5 fois plus grand), la portée sera 2,24 ($=\sqrt{5}$) fois plus grande que celle sur un albédo de 20%[iii].

Il y a plusieurs conditions qui peuvent jouer sur la portée ; le type d'objet à numériser en est une. Selon le type de surface, soit spéculaire, soit absorbante ou soit diffusante, le signal retour sera différent bien que l'objet soit à la même distance. L'angle incident modifie la puissance de signal retour. De toutes ces conditions, pour la simulation, nous n'en retenons que deux, l'albédo (luminance) et l'angle incident pour estimer la portée réelle.

*Albédo (luminance)*

Le simulateur permet de récupérer l'information de couleur en rouge, vert et bleu (RVB). A partir de cette information, on peut calculer la luminance (L) avec l'Equation 7-1 :

$$L = \frac{1}{2} \cdot \left( MAX(R,V,B) + MIN(R,V,B) \right) \qquad \text{Equation 7-1}$$

*Angle incident*

Pour connaître l'angle incident en chaque point, on détermine la normale à un élément de surface triangulaire associée à ce point. On considère les distances relatives (différence vectorielle) à des pairs de points voisins puis on en calcule le produit vectoriel. La

[i] 50% de points pris signifie les signaux retours sont autour du seuil de sensibilité - la puissance moyenne des signaux retours est le seuil de sensibilité

[ii] Dans le cas général du laser en Temps de Vol

[iii] La portée (d) dépend de la puissance du laser. $d \propto \sqrt{p}$

normale au point est la résultante de toues les normales calculées dans son voisinage (Figure 7-4).

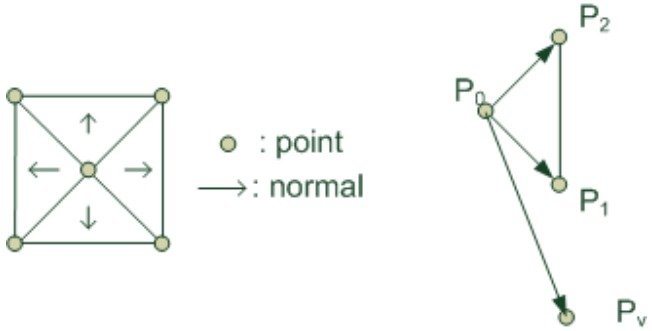


Figure 7-4 : Calcul de normale d'un point

L'orientation de la normale devant être dirigée vers la source laser ($P_v$), on corrige le sens du vecteur $\overrightarrow{N_i^{V,init}}$ en conséquence et on le note $\overrightarrow{N_i^V}$. C'est la somme des $\overrightarrow{N_i^V}$ qui est la normale associée au point (Equation 7-2).

$$\overrightarrow{N_{P_0}} = \sum_i \overrightarrow{N_i^V} \text{ avec } \overrightarrow{N_i^V} = \begin{cases} \overrightarrow{N_i^{V,init}} & \theta < 90° \\ -\overrightarrow{N_i^{V,init}} & \theta \geq 90° \end{cases} \qquad \text{Equation 7-2}$$

$$\overrightarrow{N_i^{V,init}} = \overrightarrow{P_1 - P_0} \wedge \overrightarrow{P_2 - P_0}$$

$$\theta = \arccos(\overrightarrow{N_i^{V,init}} \cdot \overrightarrow{P_v - P_0})$$

Avec $\overrightarrow{N_{P_0}}$ = normale du pixel $P_0$

$\overrightarrow{N_i^V}$ = normale de surface i au voisin du pixel $P_0$ finale

$\overrightarrow{N_i^{V,init}}$ = normale de surface i au voisin du pixel $P_0$ initiale

$P_1$ et $P_2$ sont des pixels voisins du $P_0$

$\theta$ = angle entre $\overrightarrow{N_i^{V,init}}$ et le vecteur $\overrightarrow{P_v - P_0}$ (degré)

$P_v$ est la position d'acquisition du $P_0$

### ➢ Calcul de la portée réelle dans la simulation

Avec les connaissances de la luminance ($L$) et de l'angle incident ($\theta$) à chaque point d'impact, nous pouvons calculer sa portée réelle ($d$) dans la simulation. Pour ce faire, il est nécessaire de connaître la portée initiale et les conditions prédéfinies (albédo $\alpha$ et angle incident de 0°). L'Equation 7-3 montre comment on obtient la portée réelle à partir de nos données.

$$d = \sqrt{\cos\theta} \cdot d_{init} \cdot L/\alpha \qquad \text{Equation 7-3}$$

### ➢ Communication avec RTMaps

Il y a deux types de données provenant du simulateur SiVIC, l'état du véhicule (la position x, y, z et la vitesse angulaire x, y z) et les données du scanner (la distance, la couleur RVB, l'angle incident de chaque point d'impact). Ces données sont fusionnées dans RTMaps et en sortie, on obtient un nuage de points qui est l'ensemble des points acceptés avec les informations : la coordonnée cartésienne (x, y, z), la luminance et la couleur.

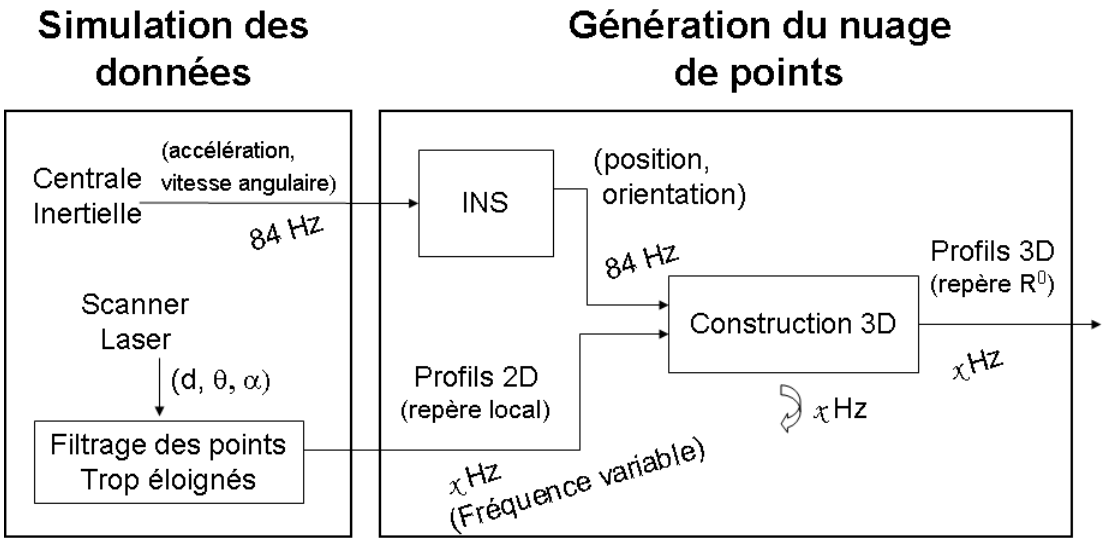


Figure 7-5 : Génération du nuage de points dans le simulateur

La Figure 7-5 montre le traitement de données issues de la simulation et la génération du nuage de points. La centrale inertielle de SiVIC fournit actuellement et de façon provisoire des données sans bruit (un bruit assurerait plus de réalisme). Nous n'avons donc pas besoin d'autre capteur de localisation. Le scanner laser produit des données associées aux points obtenus (distance $d$, angle incident $\theta$, luminance/albédo $\alpha$). Les points qui sont trop éloignés (non-acceptés) sont éliminés.

Après avoir filtré les points non acceptables, nous passons à l'étape de reconstruction du nuage de points grâce à l'information de position et d'orientation du véhicule.

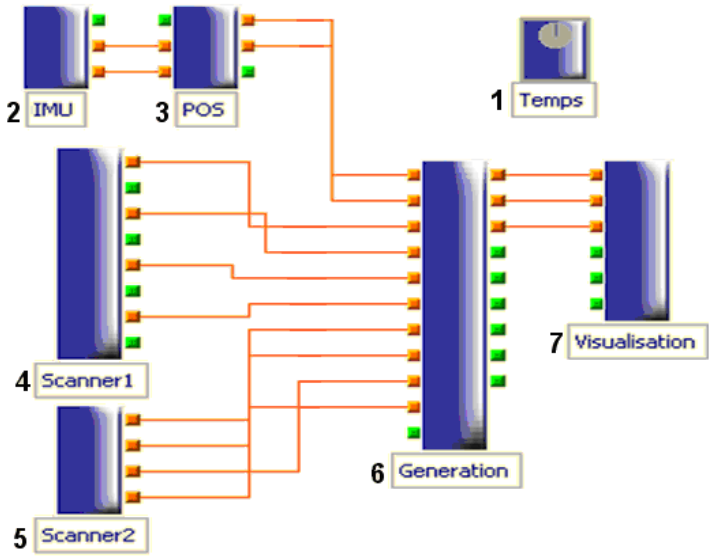

Figure 7-6 : Diagramme de RTMaps

Comme le montre de la Figure 7-6, il y a sept composants dans le diagramme de RTMaps pour cette application.

Le composant n°1 (Temps) synchronise le temps de SiVIC avec le temps de RTMaps.

La centrale inertielle du véhicule dans SiVIC envoie les informations des accélérations en x, y et z et des vitesses angulaires sur trois axes (roulis, tangage et lacet) du véhicule pour une durée donnée vers le composant n°2 (IMU) de RTMaps. Ensuite ces données sont transmises vers le composant n°3 (POS) pour calculer la position et l'orientation du véhicule à chaque instant par rapport à la position et à l'orientation connues à l'instant t0.

Le scanner laser dans SiVIC envoie les informations de distance vers le composant n°4 (Scanner1) et les informations de l'albédo et de l'angle incident vers le composant n°5 (Scanner2) de RTMaps.

Le composant n°6 (Génération) reçoit les données de composant n°3 (information de position et d'orientation de véhicule pour chaque instant) et les données de composant n°4 et n°5 (données associées aux points pour chaque balayage). Dans ce composant, on filtre les points non acceptables et ensuite on calcule la reconstruction du nuage de points. Cette reconstruction est paramétrée par la position et l'orientation (inclinaison) du scanner laser qui est monté sur le véhicule. Ensuite, on projette les points dans l'espace 3D. Chaque point a une position absolue dans l'espace.

Le composant n°7 (visualisation) est un visualisateur de nuage de points.

# Annexe 3. Déflexion optique et espace scanné

Avant d'élaborer les différents concepts de scanner laser, nous étudions dans cette section la relation entre la déflexion optique et l'espace scanné.

L'espace scanné est défini par plusieurs paramètres du scanner. Dans cette section, nous nous limitons au cas d'utilisation d'un scanner utilisant un moteur à courant continu (MCC) sur un axe fixe.

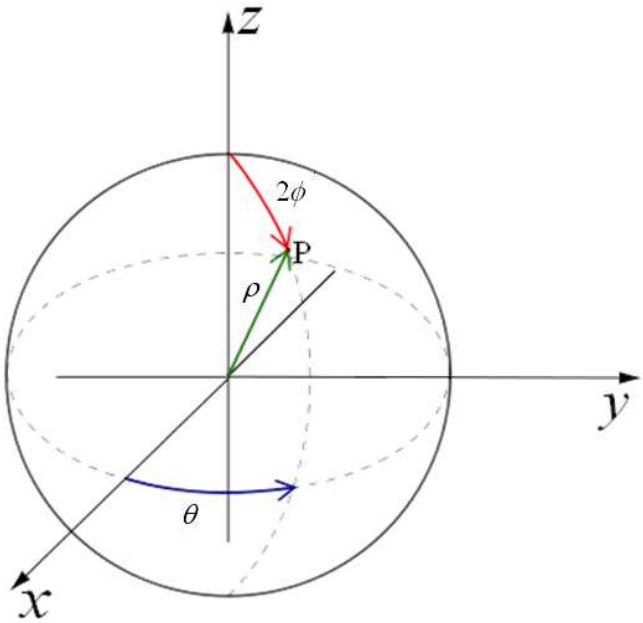


Figure 7-7 : Représentation des coordonnées sphérique

La Figure 7-7 représente les coordonnées sphériques. Un point « p » dans l'espace est défini par trois paramètres : une distance ($\rho$) et deux angles ($\theta$, $\phi$).

Nous définissons d'abord quelques paramètres pour notre cas, l'utilisation d'un miroir simple monté sur un MMC. Nous considérons que le point (0, 0, 0) est le point contact du laser sur le miroir. La distance, représentée en $\rho$, est fonction du temps de parcours du faisceau laser. Un angle, représenté en $\theta$, est l'angle de rotation de moteur (dans cette section, l'axe de rotation est sur l'axe z, soit (0, 0, 1)'). Un autre angle, représenté en $\phi$, est l'angle incident du laser défini par le vecteur normal au miroir et la direction du laser.

Nous appelons $\vec{u}_m^{\theta}$ le vecteur normal au miroir à l'angle $\theta$, $\vec{u}_l$ le vecteur dans la direction du laser émis et enfin $\vec{u}_r^{\theta}$ le vecteur du laser réfléchi à l'angle $\theta$. Tous ces vecteurs sont unitaires.

- **Calcul des vecteurs**

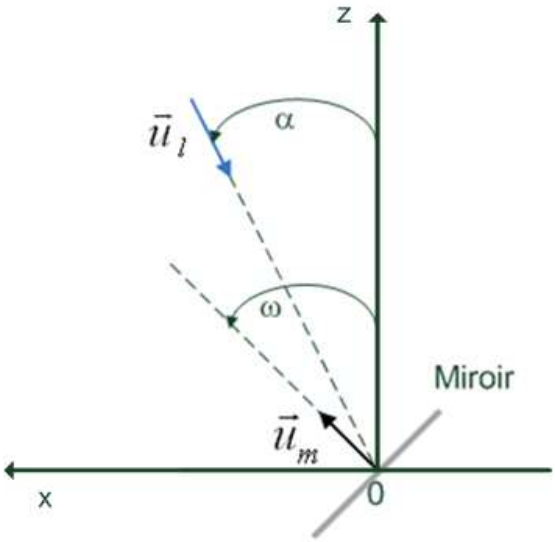


Figure 7-8 : Représentation des angles d'inclinaison $\alpha$ et $\omega$

La Figure 7-8 représente les angles d'inclinaison par rapport à l'axe de rotation. L'angle $\alpha$ est l'inclinaison pour la direction du laser émis et l'angle $\omega$ est l'inclinaison pour la normale du miroir.

*Calcul du vecteur normal au miroir*

La relation entre le vecteur $\vec{u}_m^0$ et l'angle $\omega$, lorsque l'angle $\theta$ est égal à 0, est la suivante (l'Equation 7-4) :

$$\vec{u}_m^0 = \begin{pmatrix} \sin\omega \\ 0 \\ \cos\omega \end{pmatrix} \qquad \text{Equation 7-4}$$

Comme nous cherchons la direction réelle du faisceau laser réfléchi sur le miroir du scanner, compte tenu de l'angle $\theta$, nous appliquons la matrice de rotation $R$ au vecteur $\vec{u}_m^0$, on obtient alors le vecteur normal au miroir en fonction de l'angle $\theta$ et de l'angle $\omega$, $\vec{u}_m^{\theta}$ (l'Equation 7-5):

$$\vec{u}_m^{\theta} = R \cdot \vec{u}_m^{0} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sin\omega \\ 0 \\ \cos\omega \end{pmatrix}$$

$$\vec{u}_m^{\theta} = \begin{pmatrix} \sin\omega \cdot \cos\theta \\ \sin\omega \cdot \sin\theta \\ \cos\omega \end{pmatrix} \qquad \text{Equation 7-5}$$

*Calcul du vecteur de direction du laser*

Pour la source laser, nous considérons qu'elle est toujours sur l'espace où z > 0 et la direction est vers le centre du repère, c'est-à-dire que la valeur z du $\vec{u}_l$ est toujours négative. Le vecteur $\vec{u}_l$ en fonction de l'angle $\alpha$ est la suivante (l'Equation 7-6) :

$$\vec{u}_l = \begin{pmatrix} -\sin\alpha \\ 0 \\ -\cos\alpha \end{pmatrix} \qquad \text{Equation 7-6}$$

L'angle $\alpha$ peut varier entre ]- $\omega$ ; $\omega$[ avec $\omega$, l'angle d'inclinaison du miroir. La condition nécessaire est que le faisceau laser passe au point (0, 0, 0), le centre du miroir de déflexion, comme on le voit sur la Figure 7-8. Dans cette section, nous considérons seulement la variation de la direction du laser dans le plan XZ.

*Calcul du vecteur du laser reflété*

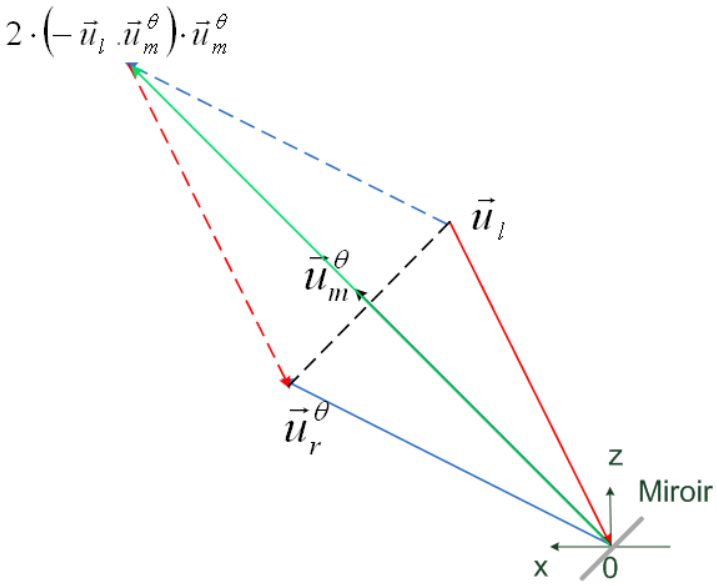


Figure 7-9 : Représentation de vecteur du laser reflété $\vec{u}_r^{\theta}$

La Figure 7-9 représente le vecteur $\vec{u}_r^{\theta}$ en couleur bleu. Ce vecteur est calculé à partir du vecteur $\vec{u}_l$ (en couleur rouge) et du vecteur $\vec{u}_m^{\theta}$ (en couleur noir) avec l'Equation 7-7 :

$$\vec{u}_r^{\theta} = \vec{u}_l + 2 \cdot \left(-\vec{u}_l \,.\vec{u}_m^{\theta}\right) \cdot \vec{u}_m^{\theta} \qquad \text{Equation 7-7}$$

- **Plans géométriques**

Avec les vecteurs que nous avons présentés, nous pouvons imaginer la géométrie de plan selon les valeurs d'angle $\alpha$, $\omega$.

*Plan de référence*

Pour le premier plan, nous définissons un plan de référence avec un miroir à 45° ($\omega = \pi/4$) sur le moteur continu et le vecteur de direction du laser est sur l'axe z ($\alpha = 0$). A l'aide de l'Equation 7-7, nous obtenons vecteur $\vec{u}_r^{\theta}$ (l'Equation 7-8) :

$$\vec{u}_r^{\theta} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} + 2 \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \bullet \begin{pmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ 1 \end{pmatrix} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{pmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\vec{u}_r^{\theta} = \begin{pmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ 0 \end{pmatrix} \qquad \text{Equation 7-8}$$

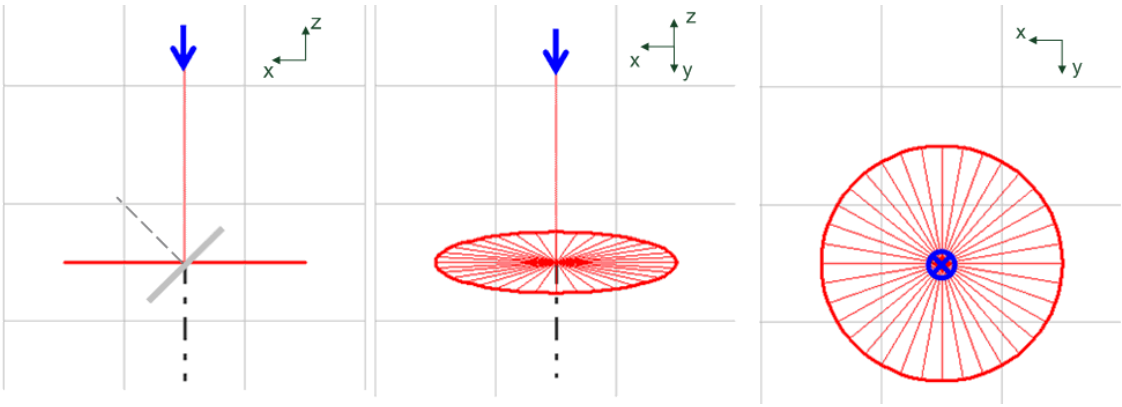


Figure 7-10 : Plan avec $\alpha = 0$, $\omega = \pi/4$ (référence)

La Figure 7-10 décrit le plan produit avec $\alpha = 0$ et $\omega = \pi/4$ (référence). La ligne noire représente l'axe de rotation du moteur. La ligne rouge représente l'axe du laser qui provient de la flèche bleue (vecteur de sortie laser) vers le centre du miroir (le miroir est

représenté en couleur grise sur l'image de gauche avec sa normale en ligne pointée en gris la moment lorsque l'angle $\theta$ est égal à 0°).

Dans cette explication, nous considérons que la distance parcourue est identique en tout point ($\rho$ identique) et que l'angle $\phi$ est constant pour tout l'angle $\theta$, ce qui crée un cercle parfait comme on voit sur la figure.

*Plan avec la variation de l'angle du miroir*

A partir de ce plan de référence, nous pouvons avoir le deuxième plan en modifiant l'angle du miroir ($\omega$ variable) et le vecteur de direction du laser est sur l'axe z ($\alpha = 0$). A l'aide de l'Equation 7-7, nous obtenons vecteur $\vec{u}_r^{\theta}$ (l'Equation 7-9) :

$$\vec{u}_r^{\theta} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} + 2 \cdot \left( \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \bullet \begin{pmatrix} \sin\omega \cdot \cos\theta \\ \sin\omega \cdot \sin\theta \\ \cos\omega \end{pmatrix} \right) \cdot \begin{pmatrix} \sin\omega \cdot \cos\theta \\ \sin\omega \cdot \sin\theta \\ \cos\omega \end{pmatrix}$$

$$\vec{u}_r^{\theta} = \begin{pmatrix} 2 \cdot \cos\omega \cdot \sin\omega \cdot \cos\theta \\ 2 \cdot \cos\omega \cdot \sin\omega \cdot \sin\theta \\ -1 + 2 \cdot \cos^2\omega \end{pmatrix} \qquad \text{Equation 7-9}$$

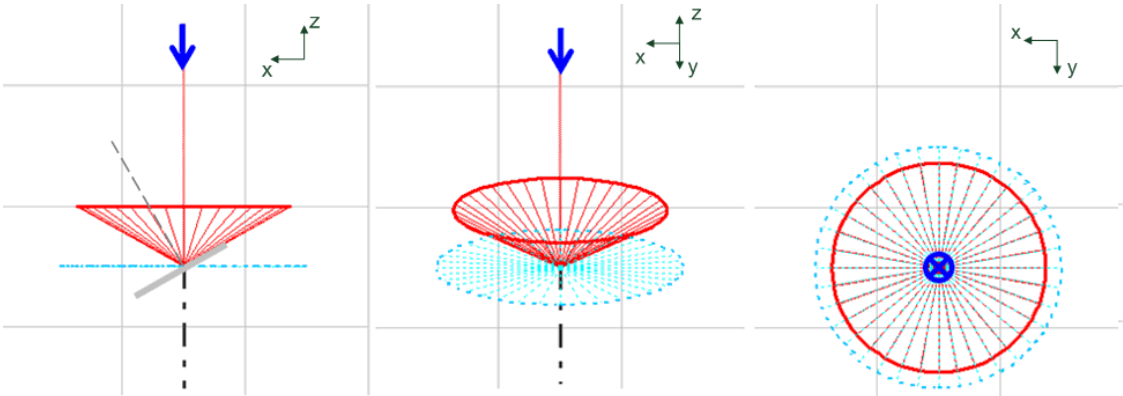


Figure 7-11 : Plan avec $\alpha = 0$, $\omega = \pi/6$

La Figure 7-11 décrit le plan produit avec $\alpha = 0$ et $\omega = \pi/6$. La variation de l'angle du miroir modifie la géométrie du plan en forme en cône. Le plan est orienté vers un côté par rapport au plan de référence (représenté en bleu clair).

*Plan avec la variation de la direction du laser*

Pour le troisième plan, nous définissons un plan en modifiant la direction du laser ($\alpha$ variable) et l'angle du miroir reste fixe à 45° ($\omega = \pi/4$). A l'aide de l'Equation 7-7, nous obtenons vecteur $\vec{u}_r^{\theta}$ (l'Equation 7-10) :

$$\vec{u}_r^{\theta} = \begin{pmatrix} -\sin\alpha \\ 0 \\ -\cos\alpha \end{pmatrix} + 2 \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{pmatrix} \sin\alpha \\ 0 \\ \cos\alpha \end{pmatrix} \bullet \begin{pmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ 1 \end{pmatrix} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{pmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\vec{u}_r^{\theta} = \begin{pmatrix} \sin\alpha \cdot (\cos^2\theta - 1) + \cos\alpha \cdot \cos\theta \\ \sin\alpha \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta + \cos\alpha \cdot \sin\theta \\ \sin\alpha \cdot \cos\theta \end{pmatrix} \qquad \text{Equation 7-10}$$

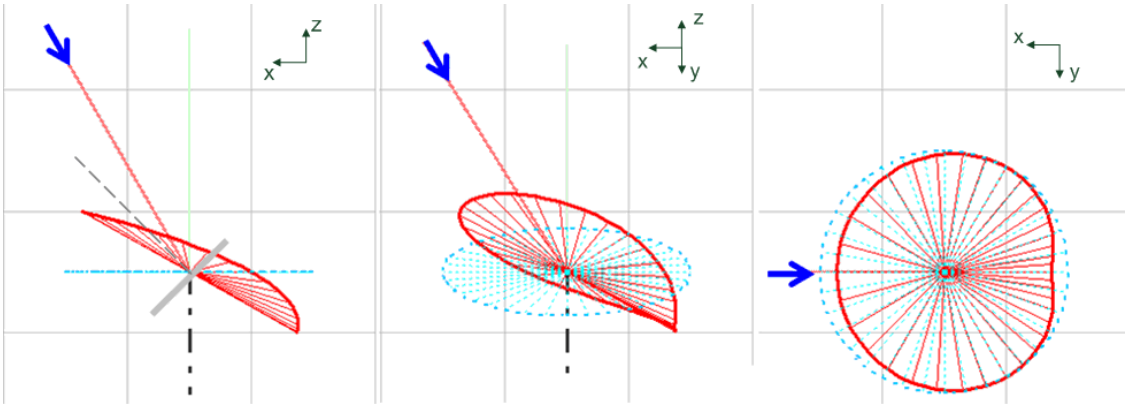


Figure 7-12 : Plan avec $\alpha = \pi/6$, $\omega = \pi/4$

La Figure 7-12 décrit le plan produit avec $\alpha = \pi/6$ et $\omega = \pi/4$. La variation de la direction du laser modifie la géométrie du plan, du coup beaucoup plus en forme en « chip ». Pour une plage de variation de l'angle du miroir, le plan croise avec le plan de référence (représenté en bleu clair).

*Plan avec les variations de l'angle du miroir et de la direction du laser*

Pour le quatrième plan, nous modifions à la fois l'angle du miroir ($\omega$ variable) et la direction du laser ($\alpha$ variable). A l'aide de l'Equation 7-7, nous obtenons vecteur $\vec{u}_r^{\theta}$ (l'Equation 7-11) :

$$\vec{u}_r^{\theta} = \begin{pmatrix} -\sin\alpha \\ 0 \\ -\cos\alpha \end{pmatrix} + 2\cdot\left(\begin{pmatrix} \sin\alpha \\ 0 \\ \cos\alpha \end{pmatrix} \bullet \begin{pmatrix} \sin\omega\cdot\cos\theta \\ \sin\omega\cdot\sin\theta \\ \cos\omega \end{pmatrix}\right)\cdot\begin{pmatrix} \sin\omega\cdot\cos\theta \\ \sin\omega\cdot\sin\theta \\ \cos\omega \end{pmatrix}$$

$$\vec{u}_r^{\theta} = \begin{pmatrix} \sin\alpha\cdot(2\cdot\sin^2\omega\cdot\cos^2\theta-1)+2\cdot\cos\alpha\cdot\sin\omega\cdot\cos\omega\cdot\cos\theta \\ 2\cdot\sin\alpha\cdot\sin^2\omega\cdot\sin\theta\cdot\cos\theta+2\cdot\cos\alpha\cdot\sin\omega\cdot\cos\omega\cdot\sin\theta \\ 2\cdot\sin\alpha\cdot\sin\omega\cdot\cos\omega\cdot\cos\theta+\cos\alpha\cdot(2\cdot\cos^2\omega-1) \end{pmatrix} \quad \text{Equation 7-11}$$

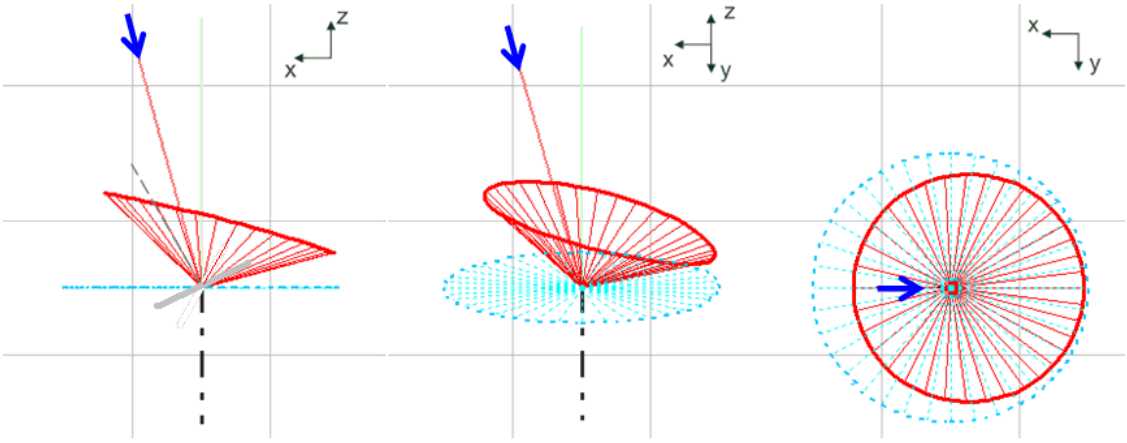


Figure 7-13 : Plan avec $\alpha = \pi/12$, $\omega = \pi/6$

La Figure 7-13 décrit le plan produit avec $\alpha = \pi/12$ et $\omega = \pi/6$. Les variations de l'angle du miroir et de la direction du laser modifient la géométrie de plan en forme en cône biaisé.

### ➢ Calcul de l'angle incident

Comme l'angle incident $\phi$ est l'écart entre les deux vecteurs $\vec{u}_l$ et $\vec{u}_m^{\theta}$, nous pouvons le calculer en fonction des trois angles $\alpha$, $\omega$ et $\theta$ avec l'Equation 7-12 :

$$\phi = \arccos\left(-\vec{u}_l \,.\vec{u}_m^{\theta}\right) = \arccos\left(\begin{pmatrix} \sin\alpha \\ 0 \\ \cos\alpha \end{pmatrix} \bullet \begin{pmatrix} \sin\omega\cdot\cos\theta \\ \sin\omega\cdot\sin\theta \\ \cos\omega \end{pmatrix}\right)$$

$$\phi = \arccos\left(\sin\alpha\cdot\sin\omega\cdot\cos\theta + \cos\alpha\cdot\cos\omega\right) \qquad \text{Equation 7-12}$$

La Figure 7-14 représente les graphiques de l'angle incident $\phi$ en fonction des trois angles $\alpha$, $\omega$ et $\theta$. Les graphiques ①, ② et ③ correspondent à $\alpha = 0°$. L'angle $\phi$ ne varie pas en fonction de $\theta$ mais de $\omega$ ($\phi=\omega$). Les graphiques ④, ⑤ et ⑥ correspondent à $\alpha = 15°$. L'angle $\phi$ varie en fonction de $\theta$ et de $\omega$. Les graphiques ⑦, ⑧ et ⑨ correspondent à $\alpha = 30°$. L'angle $\phi$ varie aussi en fonction de $\theta$ et de $\omega$. Pour les six derniers graphiques, nous observons que l'angle $\phi$ varie de $\omega$-$\alpha°$ (lorsque $\theta = 0°$) jusqu'à $\omega$+$\alpha°$ (lorsque $\theta = 180°$).

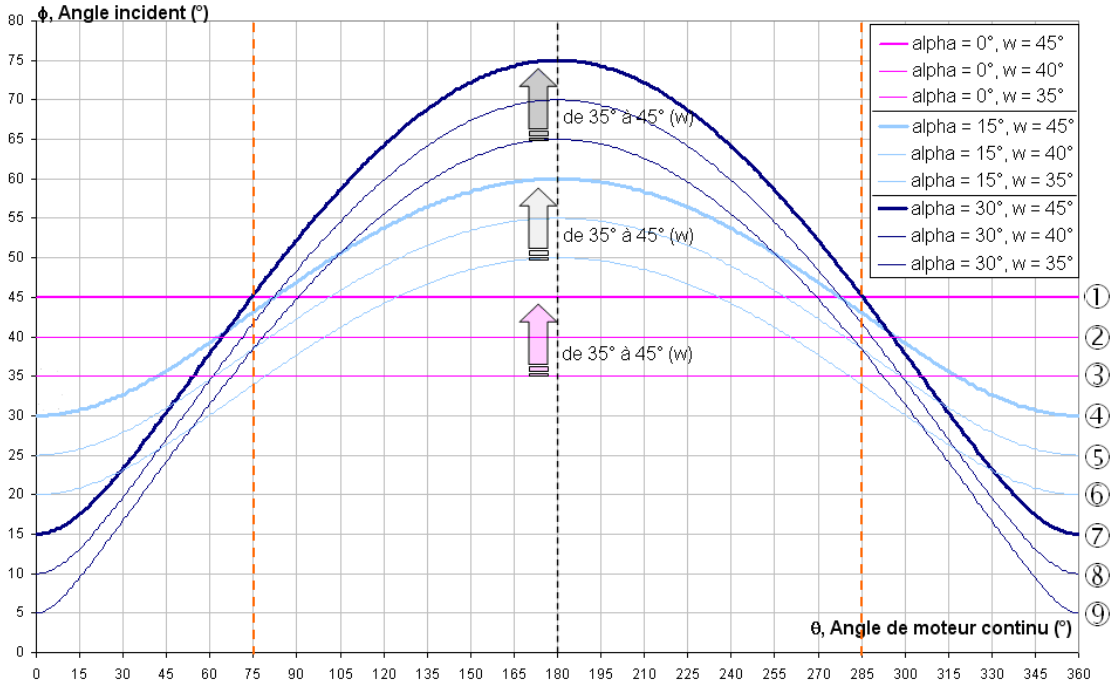


Figure 7-14 : Graphique de l'angle incident $\phi$ en fonction des angles $\alpha$, $\omega$ et $\theta$

# Annexe 4. Spécification du prototype

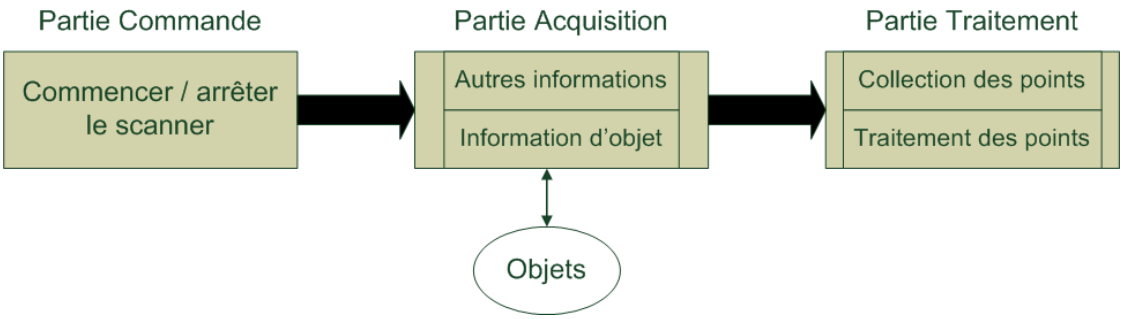


Figure 7-15 : Schéma fonctionnel d'un scanner

Comme le montre la Figure 7-15, le schéma fonctionnel d'un scanner peut se diviser en trois parties consécutives.

La partie Commande envoie l'ordre de démarrage ainsi que quelques paramètres comme la vitesse d'acquisition, le temps d'acquisition et quelques conditions.

La partie Acquisition est active dès qu'elle reçoit l'ordre de démarrage. Selon les paramètres de la partie Commande, le scanner fait l'acquisition des informations de la scène (distance, angles, luminance, …).

Les informations acquises sont transférées vers la partie Traitement. Les points collectés sont traités et stockés dans une unité de stockage. Une fois la condition d'arrêt satisfaite (comme par exemple, temps d'acquisition atteint), le scanner arrête l'acquisition puis termine le traitement.

Par la suite, nous définissons les spécifications de chaque partie nécessaire à l'implémentation du concept en « Forme en K ».

### ➢ Partie Commande

La partie Commande doit permettre de définir le mode de scan. Les utilisateurs peuvent indiquer les paramètres de fonctionnement comme la résolution, etc. Cette partie les traduit afin de définir les valeurs des paramètres bas niveau à envoyer vers la partie Acquisition.

### ➢ Partie Acquisition

Après avoir reçu l'ordre de démarrage du scan, la partie Acquisition entre en action. Les paramètres sont communiqués aux différents composants. Ensuite, cette partie gère l'acquisition des données de la scène à numériser.

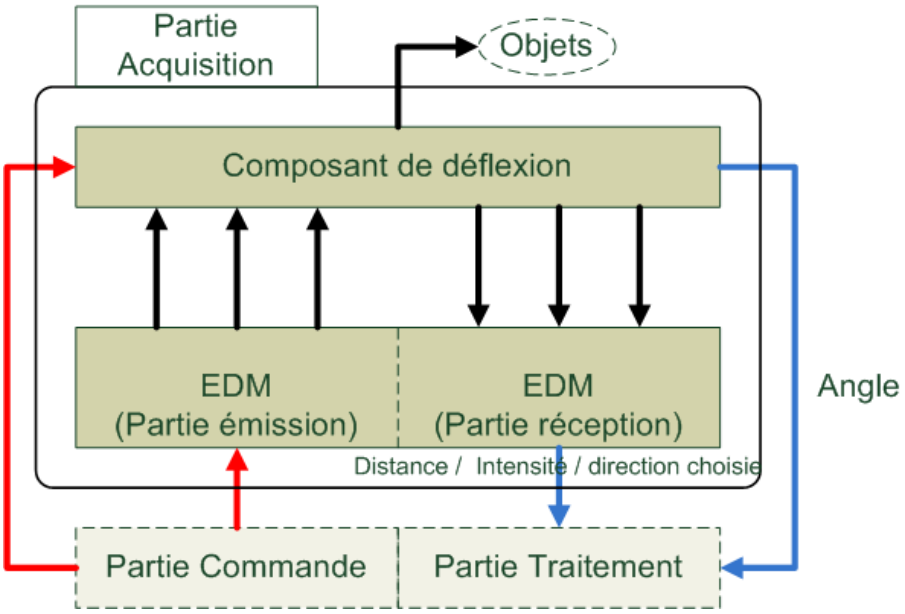

Figure 7-16 : Présentation de partie Acquisition

La Figure 7-16 montre la partie Acquisition avec les deux principaux composants technologiques en œuvre : la télémétrie laser (EDM) et le composant de déflexion du laser. Ces composants sont paramétrés avec les commandes de la partie Commande (représenté en flèches rouges). Après le parcours des impulsions laser (flèches noires), les informations acquises sont envoyées à la partie Traitement (flèches bleues).

Au-delà de la mesure de distance, dans ce concept l'EDM doit produire trois différentes directions de visée laser dirigées vers le miroir de déflection (3 voies optiques). Selon la commande du type de balayage, le changement de voie optique est fait pour chaque impulsion laser ou pour chaque demi-tour de moteur du composant de déflexion.

Les informations de distance parcourue par l'impulsion laser ainsi que la luminance (via l'EDM), de la voie optique sélectionnée (via l'EDM) et de la position angulaire (via le composant de déflexion) sont envoyées à la partie Traitement après avoir être datées afin d'être synchronisées avec les autres données issues du système de localisation.

### ➢ Partie Traitement

Les données acquises et les paramètres sont donc envoyés vers la partie Traitement. Cette partie reçoit et collecte et traite les données en fonction de paramètres afin de générer un nuage de points.

# Annexe 5. Développement du prototype

## ➢ Partie Commande

Pour la partie Commande, nous créons un fichier qui contient une liste des paramètres dont nous avons besoin. Les paramètres sont les suivants : les fréquences d'impulsion et de balayage, la vitesse de véhicule initiale, l'angle d'inclinaison sur trois axes et le mode de scan.

Les fréquences d'impulsion et de balayage peuvent être modifiées selon la résolution souhaitée (résolution angulaire). La vitesse initiale du véhicule n'est utile qu'à la visualisation (pour séparer les profils entre eux) et à l'estimation de l'état de véhicule en cours d'acquisition. L'angle d'inclinaison sur trois axes sert à appliquer une matrice de rotation directement sur les données pour mieux les visualiser en cours d'acquisition et aussi afin de simplifier la fusion des données avec celles de la localisation. Le mode de scan permet de définir essentiellement le mode de balayage. Comme nous avons plusieurs plans de balayages, nous choisissons les profils actifs et leur ordre pendant l'acquisition.

Dans le fichier de paramètres, il y a également d'autres informations comme les valeurs d'offset de distance, d'angle et les valeurs de portée minimale et maximale afin de faciliter l'accès aux réglages du prototype.

## ➢ Partie Acquisition

Pour la partie Acquisition, nous utilisons les composants technologiques développés au sein de l'équipe R&D Scanner chez Trimble. Sur la base de ces technologies disponibles, des développements spécifiques sont nécessaires pour permettre la réalisation du concept en « Forme en K ». En particulier le composant EDM (télémétrie laser) est l'objet d'une évolution majeure afin de pouvoir mesurer des distances non pas dans une direction de visée mais dans plusieurs directions. Nous étudions aussi une méthode de datation pour la synchronisation des données au niveau système.

*EDM*

L'EDM est composé de deux parties : une partie qui envoie des signaux (faisceau laser) vers l'extérieur du système et une partie qui reçoit des signaux provenant de l'extérieur du système (signaux diffusés sur l'objet).

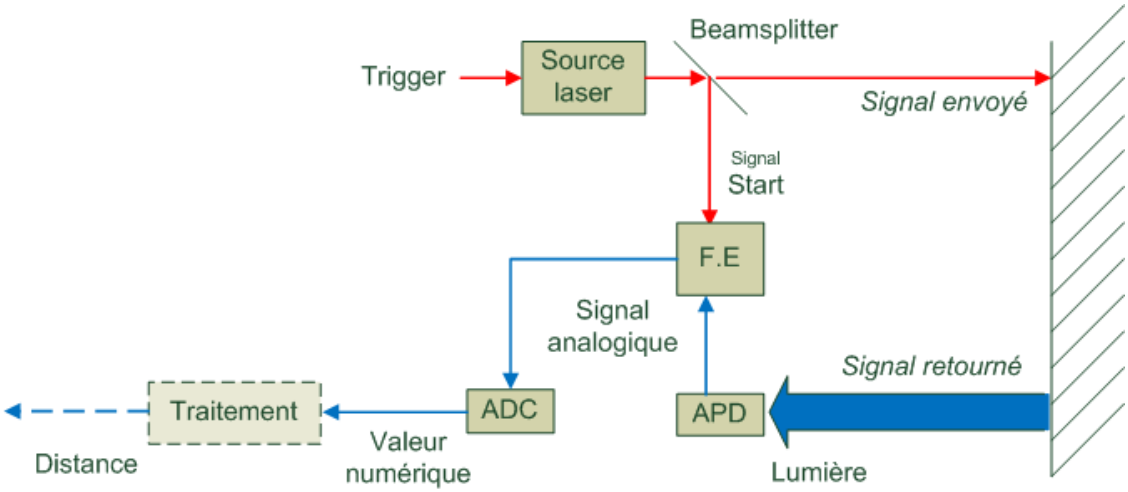

Figure 7-17 : Schéma structurel de l'EDM

La Figure 7-17 représente le schéma structurel simplifié de la télémétrie laser.

Pour la partie émission, le trigger permet à la source laser d'envoyer les impulsions aux instants adéquats. A la sortie de la source, le faisceau laser est divisé en deux : une petite partie pour la mesure du signal « Start » et l'autre partie envoyée à l'extérieur sur l'objet.

Dans la partie réception, l'impulsion lumineuse rétrodiffusée par l'objet est convertie en signal analogique par une diode APD (*Avalanche Photo Diode*) pour obtenir une bonne sensibilité. Le signal « Stop » est amplifié ou atténué, puis regroupé avec le signal « Start » dans un composant électronique, nommé F.E (*Front End*). Enfin cet ensemble des deux signaux analogique « Start » et « Stop » est numérisé à l'aide d'un convertisseur ADC (*Analogue-to-Digital Convertor*). Ces données numériques sont traitées pour obtenir la mesure de distance.

Après l'étude du temps disponible pour le changement de voie (voir la section 6.2.1), nous recherchons plusieurs méthodes possibles pour la réalisation de l'évolution de l'EDM.

La recherche des méthodes est faite avec Julien Roul, stagiaire opticien chez Trimble sous direction de Stéphane Rialland qui a réalisé le montage des trois voies optiques (partie émission de l'EDM) pour le prototype [Roul, 2009].

Parmi les différentes options d'implémentation, nous nous sommes décidés pour une implémentation intégrant deux sources laser et un séparateur du faisceau laser (*beam-splitter*) pour la partie émission de l'EDM pour des raisons de complexité et de temps de réalisation. Le développement d'un produit industriel s'orienterait probablement vers un autre choix pour des raisons de coût : une seule source laser partagée entre les 3 voies.

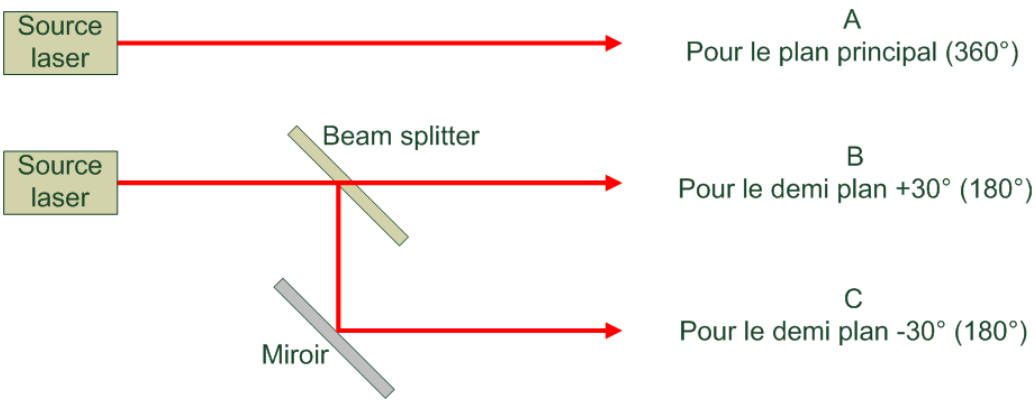


Figure 7-18 : Principe de partie émission d'EDM

La Figure 7-18 est un schéma technique de la partie émission laser. Nous utilisons une source laser pour la voie avec une incidence nulle par rapport à l'axe de rotation qui permet d'obtenir un plan de balayage de 360° (voie A dite voie principale).

Une autre source laser est dédiée aux deux autres voies qui produisent les demi-plans de 180°. Cette source est séparée par un séparateur du faisceau de 50/50, c'est-à-dire qu'une moitié de la puissance du laser est sur une voie (voie B) et une autre moitié est sur l'autre voie (voie C).

La partie réception d'un EDM est en général constituée de trois composants : un APD (Avalanche Photodiode, photodiode à avalanche permettant la transformation du signal lumineux en un signal électrique), une carte Front End (F.E., permettant la mise en forme du signal) et un convertisseur analogique-numérique (ADC) (Figure 7-17, page 170). Pour implémenter ce concept, nous avons décidé d'utiliser trois APDs, une unique carte F.E et un ADC. Pour passer de 3 signaux électriques issus des APDs à une voie de mise en forme et de numérisation, une carte nommée « carte de Switch » a été déveolpée et réalisée par Auguste d'Aligny au sein de l'équipe R&D Scanner.

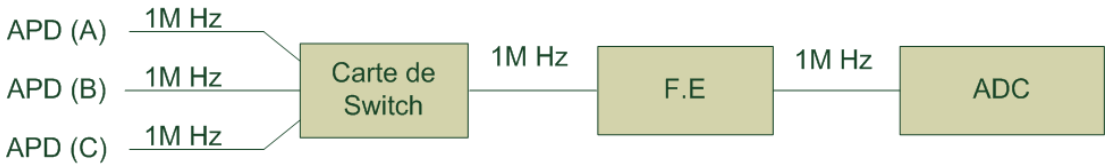


Figure 7-19 : Principe de partie réception d'EDM

La Figure 7-19 montre le principe de la partie réception de l'EDM pour le prototype.

Chaque APD est dédié à une voie optique produite par la partie émission de l'EDM. Tous les trois APDs sont reliés à la carte de Switch qui permet de choisir une des trois voies. Par exemple, si nous utilisons la fréquence d'impulsion de 1MHz, tous les APDs reçoivent les signaux à la fréquence de maximum de 1MHz.

La carte de Switch choisit une voie parmi les trois et la laisse passer à la carte F.E à la fréquence de 1MHz puis les signaux mis en forme sont envoyés à l'ADC à la même

fréquence. Le changement de voies est 1,25 ms ou 2,50 ms (changement pour tous les demi-plans, avec fréquence de balayage de 60 Hz).

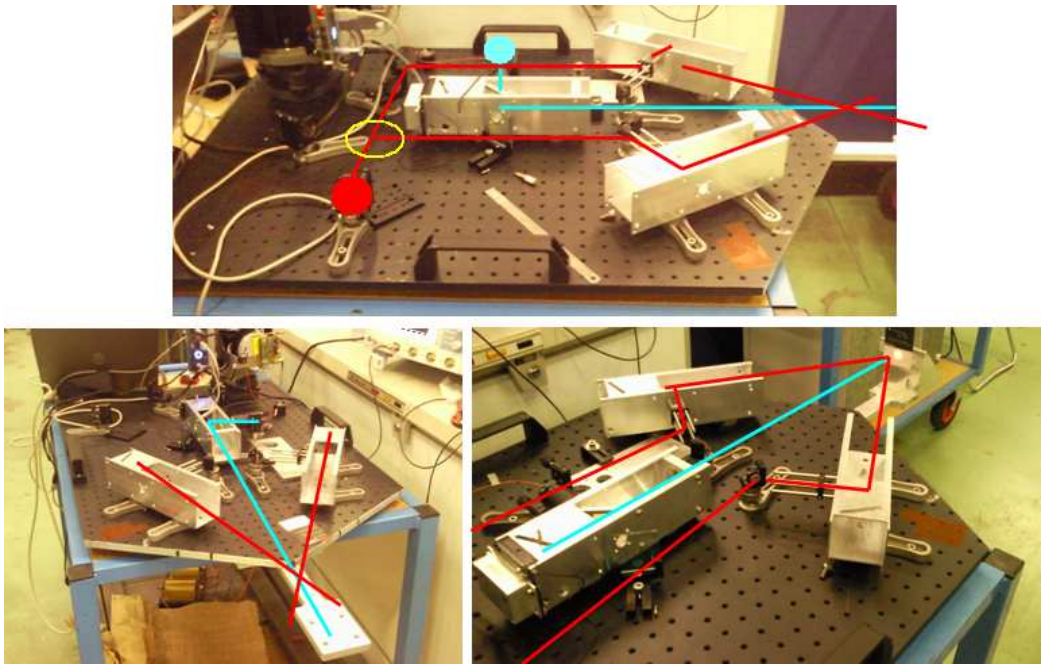

Figure 7-20 : Montage d'EDM

La Figure 7-20 montre le montage de l'EDM. Les trois voies optiques sont montées avec trois poutres sur une plaque de support noire.

Une source laser dédiée à la voie A (sans incidence, représentée en cercle bleu dans l'image en haut) suit le chemin optique représenté en ligne bleu. Une autre source laser dédiée aux voies B et C (avec ± 30° d'incidence, représentée en cercle rouge dans l'image en haut) suit les chemins optiques représentés en ligne rouge. Cette deuxième source est séparée en deux par un *beam-splitter* situé dans la zone de cercle jaune de l'image en haut. Les trois chemins optiques se croisent en un point qui est le centre du miroir du composant de déflexion.

### *Composant de déflexion*

Il existe plusieurs types de composants de déflexion selon le type de déflexion et le type de motorisation.

Le composant de déflexion peut être motorisé avec un moteur continu. Nous pouvons monter différents types du miroir : miroir simple et polygone.

Le montage avec un miroir simple met en œuvre un miroir orienté à 45°, par rapport au faisceau laser, en rotation autour de l'axe de ce faisceau.

Cette technique permet d'avoir un balayage de 360° autour de l'axe de rotation du moteur.

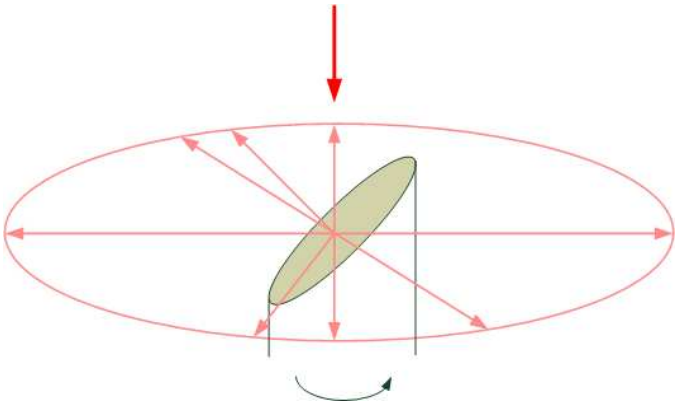

Figure 7-21 : Moteur continu avec miroir simple

Comme on le voit sur la Figure 7-21, nous pouvons avoir un balayage plan de 360° autour de composant de déflexion si l'émission laser est dans l'axe de rotation du miroir comme indiqué par flèche rouge.

Le montage avec miroir polygone permet de concentrer les balayages sur une certaine zone d'intérêt en ayant plus de balayages pour une seule rotation du miroir.

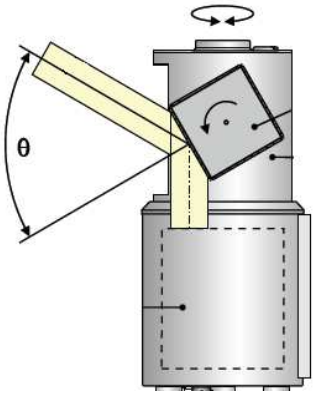


Figure 7-22 : Moteur continu avec miroir polygone (Source [web Riegl])

En revanche, l'angle total de balayage est diminué. Dans l'exemple de la Figure 7-22, le scanner LMS-Z210ii de Riegl, un miroir carré est monté sur moteur continu. Si le moteur tourne à 25 Hz, nous pouvons avoir 100 profils de scan par seconde sur une zone.

En revanche, l'angle d'ouverture maximum $\theta$ est de 80° selon la brochure technique car les discontinuités d'énergie reçue en passant d'une surface du miroir polygone à l'autre impliquent des pertes de mesures en réception. L'angle total de réception pour un tour de moteur est donc au maximum de 320° (4 fois 80°), soit 40° de perte.

Dans le montage de type galvanomètre, le faisceau laser est envoyé perpendiculairement à l'axe de rotation du miroir. Le montage « galvanomètre » permet de maintenir une

direction fixe si souhaité. Cette technologie est intéressante lorsqu'on veut moyenner plusieurs mesures sur un point donnée pour obtenir une meilleure précision.

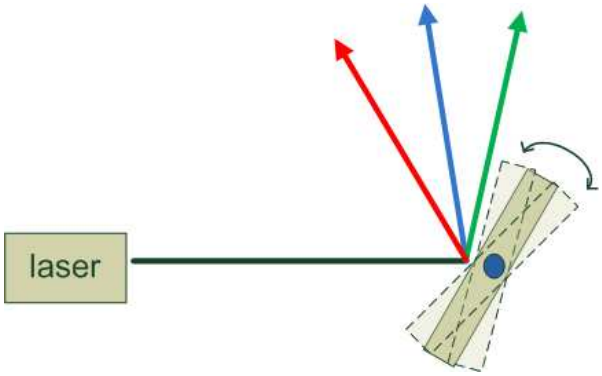


Figure 7-23 : Principe de montage « galvanomètre »

La Figure 7-23 montre le principe de montage « galvanomètre ». Contrairement au moteur continu, le composant de déflexion oscille dans un champ de vision. En revanche, lorsqu'on veut fixer sur une position, il est nécessaire de prévoir un temps de stabilisation.

Il y a d'autres possibilités pour modifier la direction du laser [Stone et al, 2004]. Ces composants peuvent être associés avec des codeurs qui mesurent et transmettent l'information de l'angle à la partie traitement.

Après l'étude de faisabilité de la taille nécessaire du miroir (voir la section 6.2.1), celui que nous avons choisi est un miroir simple faisant un angle de 45° avec l'axe de rotation sur un moteur en rotation continue.

### *Compteurs pour datation*

Pour que les données soient horodatées à l'instant de l'acquisition, nous effectuons la datation dans la partie Acquisition ce qui permet de minimiser le temps de décalage entre l'instant d'acquisition et l'instant de la datation.

Nous mettons trois compteurs. Le premier compteur permet d'enregistrer le signal PPS (*Pulse Per Second*) qui est un signal provenant du GPS reçu toutes les secondes. La raison d'utilisation du signal PPS est qu'il peut être envoyé aux autres systèmes en même temps ce qui permet de tout synchroniser.

La réception du signal PPS au moins une fois est une condition nécessaire pour commencer le scan. Mais comme le signal PPS n'est pas toujours captable faute de satellites observés dans certains environnements, nous mettons en place un deuxième compteur qui compte toutes les secondes à l'aide d'une horloge interne au scanner (générée par un FPGA). Ce deuxième compteur fonctionne indépendamment des conditions extérieures. Avec ces deux compteurs, nous pouvons dater les données mais uniquement avec une résolution d'une seconde.

Pour augmenter la résolution de datation, nous ajoutons un troisième compteur qui compte le nombre de profils. La valeur de ce troisième compteur va jusqu'à la valeur de fréquence de balayage et recommence à zéro afin de ne pas utiliser, inutilement, une grande mémoire.

Chaque point obtenu est associé aux valeurs des trois compteurs pour la datation.

- **Partie Traitement**

La partie Acquisition envoie les informations acquises à la partie Traitement. Les informations pour chaque point sont : la distance mesurée, la luminance et la voie optique choisie (via l'EDM), l'angle de rotation du miroir (via le composant de déflexion) et les valeurs des 3 compteurs. Ces informations sont enregistrées sous la forme d'une trame.

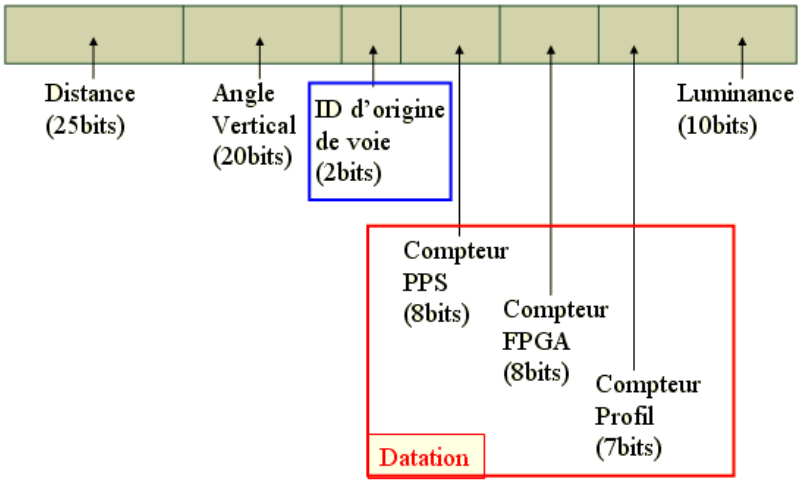


Figure 7-24 : Trame de données (10 octets)

La Figure 7-24 représente la trame d'un point qui est codée sur 10 octets. Les 25 premiers bits sont alloués pour l'information de distance. Les 20 bits suivants le sont pour l'information de l'angle vertical. Nous allouons 2 bits, pour identifier la voie origine du point. Nous allouons 23 bits pour la datation et 10 bits pour l'information de luminance.

Après avoir reçu chaque point, nous le traitons en cinq étapes: datation, conversion, visualisation, enregistrement et estimation de vitesse de véhicule.

### *Datation*

Nous récupérons les valeurs des trois compteurs. Le rôle du compteur PPS est de dater les données avec le temps de référence. Mais comme celui-ci risque de ne pas pouvoir compter s'il n'y a pas de PPS, alors le compteur FPGA est en support pour compenser une perte de signal GPS et donc PPS.

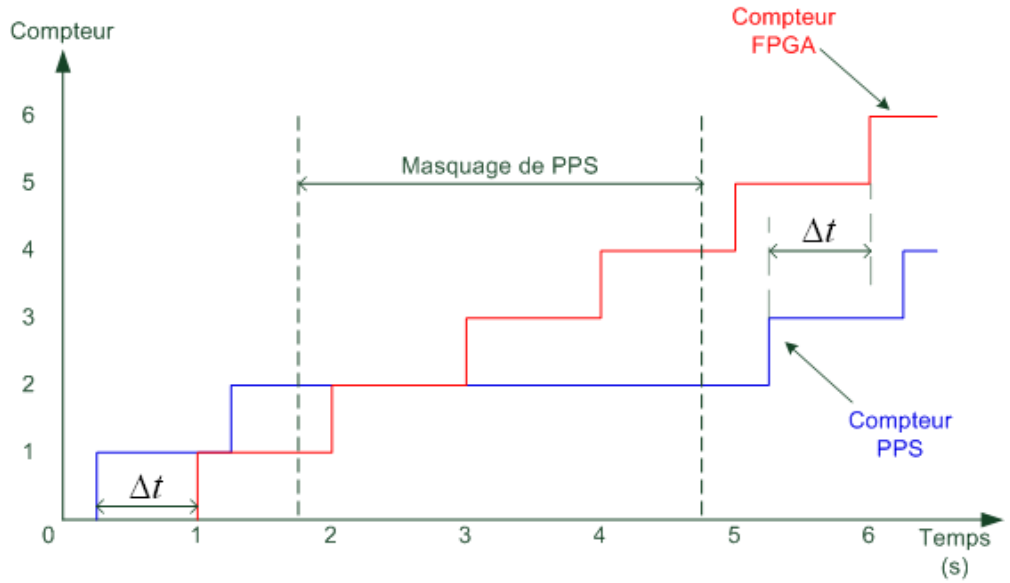


Figure 7-25 : Compteurs de PPS et de FPGA

Comme on le voit sur la Figure 7-25, pendant 6 secondes, le compteur PPS ne peut pas compter jusqu'à 6 mais seulement jusqu'à 4 à cause du masquage de PPS pendant 3 secondes (ligne bleu).

En revanche, le compteur FPGA compte bien jusqu'à 6 (ligne rouge). Nous faisons alors la datation avec le compteur FPGA en décalant le temps $\Delta t$ qui est la différence de temps obtenu entre l'activation du compteur FPGA et du compteur PPS ($\Delta t < 1$). $\Delta t$ est mis à jour en permanence si les deux compteurs sont activés afin de minimiser les erreurs accumulées.

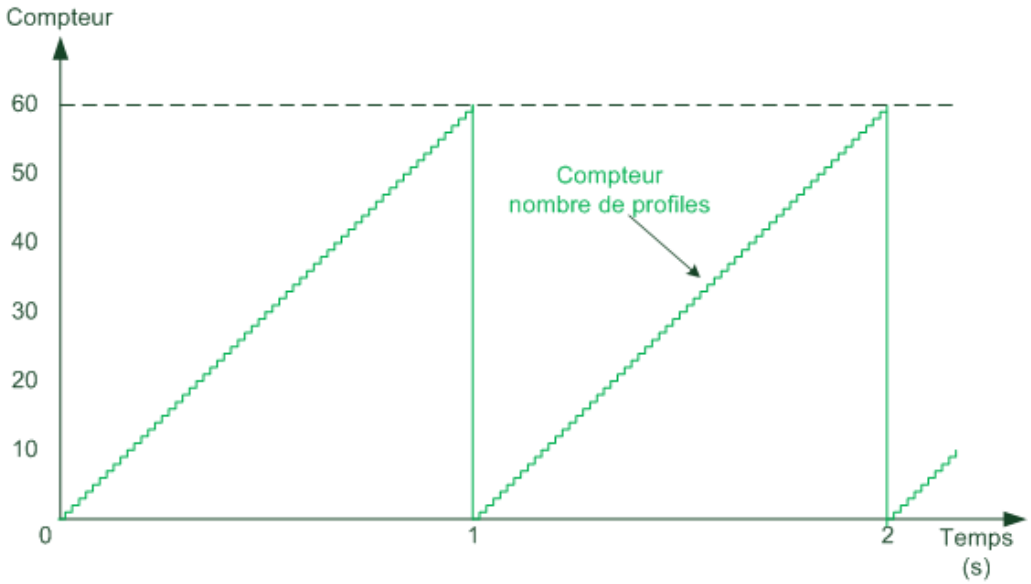


Figure 7-26 : Compteur de nombre de profils

Le compteur du nombre de profils permet d'affiner la datation. Comme on le voit sur la Figure 7-26, le compteur compte le nombre de profil de 0 à la valeur de fréquence de balayage moins 1 (par exemple, 59 pour 60 Hz).

La valeur de datation est calculée par l'Equation 7-13 :

$$t_p = C_{FPGA} - \Delta t + \frac{C_{profile}}{f_b} \qquad \text{Equation 7-13}$$

Avec $t_p$ : valeur de datation pour le point $p$ (s)

$C_{FPGA}$ : valeur du compteur FPGA

$\Delta t$ : différence de temps obtenu entre l'activation du compteur FPGA et du compteur PPS ($\Delta t < 1$) (s)

$C_{profile}$ : valeur du compteur de nombre de profils

$f_b$ : fréquence de balayage (Hz)

*Conversion*

Nous traduisons les informations de chaque point. D'abord, nous convertissons les valeurs binaires en valeurs décimales.

Pour l'information de distance (25 bits), elle est codée initialement comme une quantité d'échantillons de temps (15 bits pour la partie entière et 10 bits pour la partie décimale). Le temps de parcours est alors calculé avec l'Equation 7-14 :

$$\Delta t = \frac{n_{ech}}{f_{ech}} \qquad \text{Equation 7-14}$$

Avec $\Delta t$ : temps de parcours (s)

$n_{ech}$ : nombre d'échantillons

$f_{ech}$ : fréquence d'échantillonnage (Hz)

Une fois le temps de parcours calculé, nous déduisons la distance parcourue à l'aide de l'Equation 2-1 (page 26).

Pour l'information d'angle (20 bits), elle est initialement codée comme le nombre de pas angulaire. L'angle en radian est calculé avec l'Equation 7-15 :

$$\alpha = \frac{2\pi \cdot n_{step}}{N_{step}} \qquad \text{Equation 7-15}$$

Avec $\alpha$ : l'angle vertical (radian)

$n_{step}$ : nombre de pas

$N_{step}$ : nombre total de pas pour 360°

La distance et l'angle vertical sont corrigés avec des offsets prédéfinies.

Pour l'information de luminance (10 bits), sa valeur est actuellement variable de 0 à 255. Comme la luminance est la valeur de l'intensité du laser qui dépend aussi de la distance, il est nécessaire de corriger la valeur de la luminance en fonction de la distance.

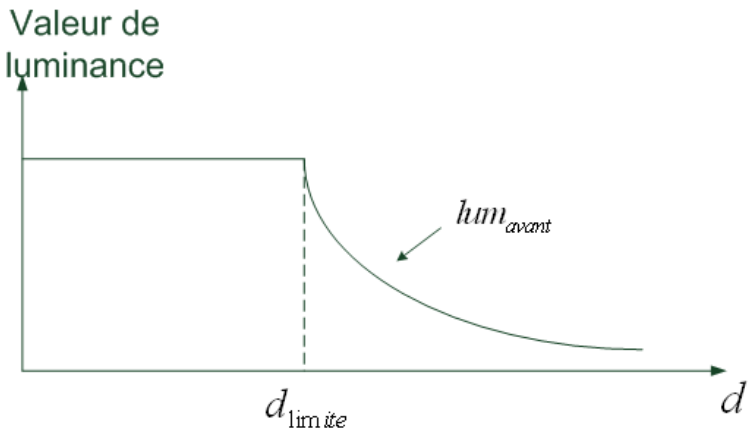


Figure 7-27 : Valeur de luminance fonction de distance

La Figure 7-27 montre la variation de luminance fonction de distance sous les mêmes conditions (albédo, angle incident, etc.). La valeur de luminance est constante jusqu'à une certaine distance et ensuite elle diminue selon la distance
Cette valeur est corrigée à l'aide de l'Equation 7-16 :

$$lum_{apres} = \frac{lum_{avant} \cdot d^2}{d_{limite}{}^2} \qquad \text{Equation 7-16}$$

Avec $lum_{apres}$ : valeur luminance après la correction

$lum_{avant}$ : valeur luminance avant la correction

$d$ : distance mesurée (m)

$d_{limite}$ : distance maximale pour la valeur de luminance constante (m)

Ensuite, selon la voie d'origine du point mesuré, nous déduisons sa position 3D par une transformation de coordonnée polaire en coordonnée cartésienne.

*Enregistrement*

Après avoir traité les données, nous les enregistrons dans un fichier ; nous proposons de les enregistrer de deux façons.

La première est d'enregistrer les données en coordonnées cartésiennes (x, y, z) avec la luminance et la datation. Cette façon permet de synchroniser les données avec le système de localisation.

La seconde est d'enregistrer les données toujours en coordonnées cartésiennes avec la luminance mais après avoir appliqué la vitesse du véhicule. Cette deuxième façon permet d'utiliser le système lorsqu'il n'y a pas d'information de localisation et que le trajet est rectiligne et à vitesse constante.

*Visualisation*

Afin de vérifier le fonctionnement de scanner pendant l'acquisition, nous développons la visualisation de données acquises.

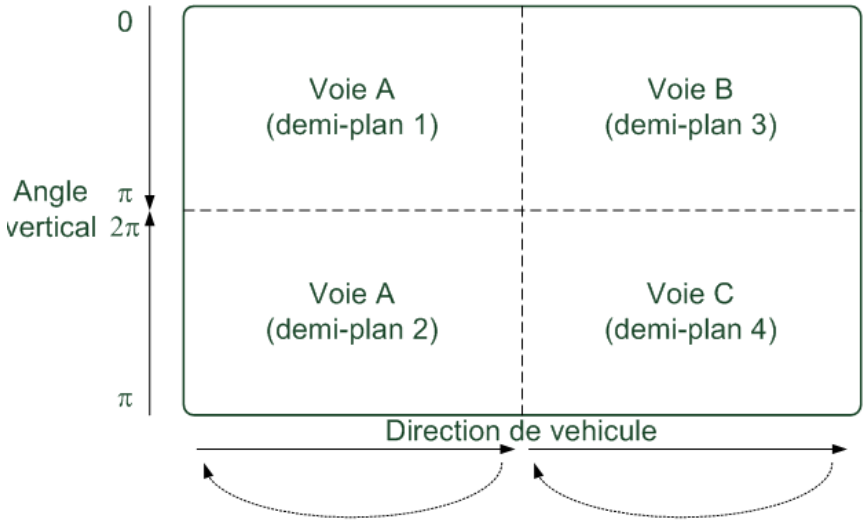


Figure 7-28 : Fenêtre de visualisation

Comme le montre la Figure 7-28, la fenêtre de visualisation contient quatre sous fenêtres pour visualiser les quatre demi-plans séparément.

L'axe vertical représente l'angle vertical (de moteur continu) de 0 à $2\pi$. Pour que la partie ciel de la scène se positionne toujours dans la zone haute de chaque sous-fenêtre, l'ordre de pixel pour angle vertical est de 0 à $\pi$ en sens croissant puis de $2\pi$ à $\pi$ en sens décroissant (avec l'angle vertical 0 vers le ciel).

L'axe horizontal représente la direction de véhicule. Comme nous avons l'information de vitesse du véhicule (initiale ou estimée), nous déplaçons les points selon cet axe de manière la plus cohérente possible.

La zone de visualisation étant limitée, lorsqu'elle est pleine et que l'acquisition se poursuit, la visualisation est décalée de façon à toujours voir les derniers points acquis.

Sur cette base, nous avons deux options de visualisation : une avec seulement l'information de luminance et l'autre avec les informations de luminance et de distance.

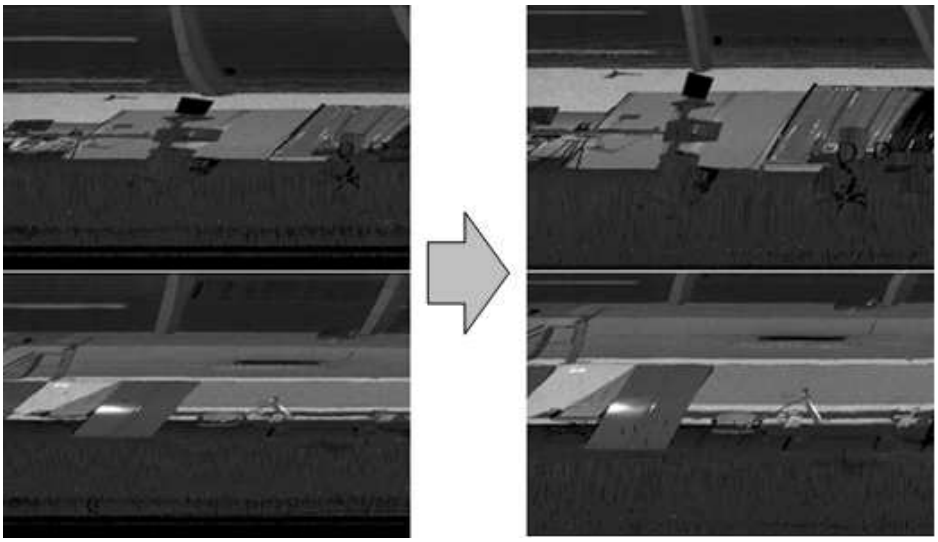

Figure 7-29 : Visualisation d'acquisition, version 1

La Figure 7-29 est un exemple de visualisation voie A avec la luminance (version 1) dans le laboratoire de Trimble. Chaque pixel représente la luminance du point correspondant avec la couleur noire pour la valeur 0 et la couleur blanche pour la valeur 255.

Mais comme on le voit dans l'image de gauche de la figure, les zones ciel et sol prennent beaucoup de place alors qu'ils ne contiennent pas beaucoup d'informations intéressantes. Une amélioration de l'axe vertical de visualisation est proposée afin de permettre une visualisation plus facilement interprétable en cours d'acquisition.

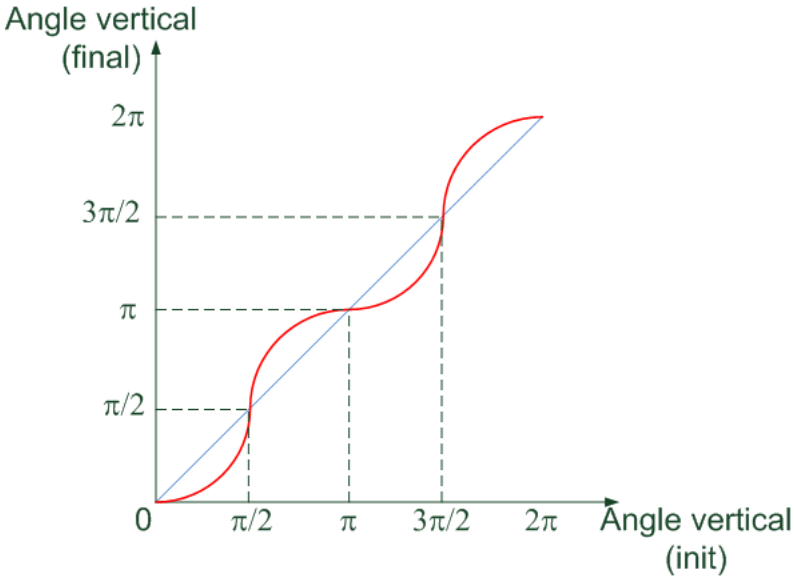


Figure 7-30 : Amélioration sur l'axe vertical de visualisation

Le principe de l'amélioration sur l'axe vertical est montré sur la Figure 7-30. Au lieu d'utiliser la valeur d'angle vertical directe comme sur l'axe bleu, nous appliquons une fonction cosinus qui permet de minimiser les zones ciel et sol et de maximiser la zone centrale (Equation 7-17) :

$$\theta_f = -\frac{\pi}{2} \cdot \cos\theta_i + \frac{\pi}{2} \qquad 0 \le \theta_i < \pi$$

Equation 7-17

$$\theta_f = \frac{\pi}{2} \cdot \cos\theta_i + \frac{3\pi}{2} \qquad \pi \le \theta_i < 2\pi$$

Avec $\theta_f$ : angle vertical final (radian)

$\theta_i$ : angle vertical initial (radian)

La Figure 7-31 est un exemple de visualisation voie A avec la luminance et la distance (version 2) dans le laboratoire de Trimble. Chaque pixel représente la luminance et la distance de point correspondant avec la couleur RVB (avec l'amélioration sur l'axe vertical) afin de visualiser les deux informations.

Figure 7-31 : Visualisation d'acquisition, version 2

Dans un premier temps, nous différencions la couleur selon la distance mesurée. Comme le montre de la Table 7-1, nous choisissons cinq distances entre distances minimale et maximale ( $D_{\min} = D_0 < D_1 < D_2 < D_3 < D_4 = D_{\max}$ ) et nous donnons la couleur dédiée.

Table 7-1 : Variation de couleur fonction de distance

| | $D_0$ | $D_1$ | $D_2$ | $D_3$ | $D_4$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Couleur | Rouge | Jaune | Vert | Cyan | Bleu |
| Rouge | 255 | 255 | 0 | 0 | 0 |
| Vert | 0 | 255 | 255 | 255 | 0 |
| Bleu | 0 | 0 | 0 | 255 | 255 |

Les autres distances qui sont entre deux de ces cinq distances choisies prennent leurs couleurs avec l'Equation 7-18 :

$$\begin{aligned} C^k &= C_i^k + (-1)^i \cdot 255 \cdot \frac{D - D_i}{D_j - D_i} && (C_i^k \neq C_j^k) \\ C^k &= C_i^k && (C_i^k = C_j^k) \end{aligned} \qquad \text{Equation 7-18}$$

Avec $D_i$ , $D_j$ : distances choisies ( $i, j \in \{0,1,2,3,4\},\ i < j$ ) (m)

$D$ : distance mesurée quelconque qui est entre $D_i < D < D_j$ (m)

$k$ : rouge, vert ou bleu

$C^k$ : couleur $k$ dédié à distance $D$

$C_i^k$ , $C_j^k$ : couleur $k$ dédié à distance $D_i$ et $D_j$

Ensuite, nous appliquons la valeur de luminance qui fait diminuer la luminance avec l'Equation 7-19 :

$$C_{final}^{RVB} = C_{init}^{RVB} \times \frac{lum}{lum_{\max}} \qquad \text{Equation 7-19}$$

Avec $C_{final}^{RVB}$ : couleur rouge, vert et bleu après l'application de valeur de luminance

$C_{init}^{RVB}$ : couleur rouge, vert et bleu avant l'application de valeur de luminance

$lum$ : valeur de luminance dédiée

$lum_{\max}$ : valeur de luminance maximale (généralement 255)

Pour la Figure 7-31, nous avons choisi les distances qui sont de 40 %, 50 % et 60 % entre les distances minimale et maximale afin de différencier plus autour de distance de 50 %.

*Estimation de vitesse*

Une même partie de la scène va être numérisée deux fois même s'il s'agit d'acquisitions avec des angles d'incidence différents. Grâce à cette redondance d'information, nous pouvons estimer la vitesse du véhicule.

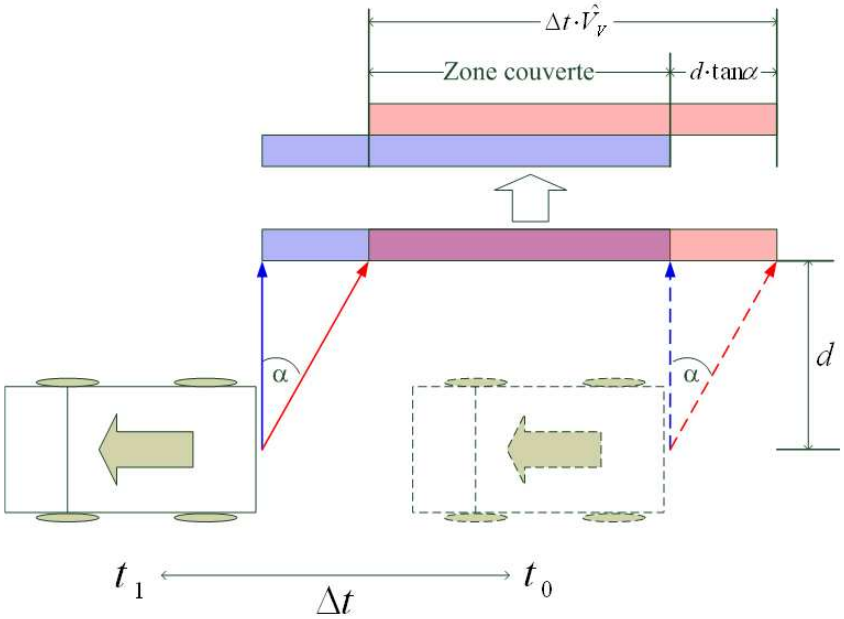


Figure 7-32 : Principe d'estimation de vitesse de véhicule

La Figure 7-32 montre le principe d'estimation de la vitesse de véhicule. Pendant le temps d'acquisition $\Delta t$, le demi-plan ①, représenté en flèche bleu, produit les données (rectangle bleu) et le demi-plan ③, représenté en flèche rouge, produit les données (rectangle rouge).

En corrélant les deux ensembles de données, nous pouvons les consolider. Ensuite, nous estimons la vitesse du véhicule avec l'Equation 7-20 :

$$C = \frac{\Delta t \cdot \hat{V}_V - d \cdot \tan\alpha}{\Delta t \cdot \hat{V}_V}$$

$$\hat{V}_V = \frac{d \cdot \tan\alpha}{\Delta t \cdot (1 - C)} \qquad \text{Equation 7-20}$$

Avec $C$ : ratio de zone couverte par rapport à la zone totale
$\Delta t$ : temps de passage entre $t_0$ et $t_1$ (s)
$\hat{V}_V$ : vitesse estimée de véhicule (m/s)
$d$ : distance entre le scanner et l'objet détecté (m)
$\alpha$ : angle entre deux profils (radian)

# Analyse et conception de scanners laser mobiles dédiés à la cartographie 3D d'environnements urbains

**RESUME :**

Cette thèse a été effectuée en collaboration entre le Centre de Robotique CAOR de MINES ParisTech et MENSI Trimble sous convention CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche), afin de concevoir un nouveau système de scanner laser innovant dédié aux systèmes mobiles de cartographie. Pour cela, nous avons développé une méthode d'analyse qualitative des relevés laser et une démarche de conception par simulation d'un système mobile de cartographie. Nous avons ensuite élaboré plusieurs concepts de scanners laser mobiles. A l'aide du simulateur, nous avons virtuellement réalisé ces concepts et avons fait des acquisitions simulées afin d'analyser les données. Après avoir obtenu les résultats de l'analyse, nous avons choisi un concept, réalisé son prototypage et effectué son évaluation en situation réelle.

**Mots clés :** Cartographie 3D, Systèmes mobiles de cartographie, Scanner laser mobile, Analyse de qualité, Conception de systèmes, Prototypage

# Analysis and design of mobile laser scanners dedicated to the 3D mapping of urban environments

**SUMMARY :**

This thesis is a collaboration between the Robotics Centre CAOR of MINES ParisTech and MENSI-Trimble under the CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche) convention, to design an innovative laser scanning system dedicated to mobile mapping systems. We developed a method for the qualitative analysis of point-cloud data and the conception of a mobile mapping system using simulation. We elaborated several concepts for mobile laser scanners, which we realized virtually using the simulator. We performed data acquisitions in order to analyze the simulated data. We chose the most suitable concept, based on our analysis results, constructed a prototype and assessed its performance in a real environment.

**Keywords :** 3D mapping, Mobile mapping systems, Mobile laser scanner, Analysis of quality, Conception of systems, Prototyping

MINES ParisTech

ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY