

Titre: Conception et intégration d'un capteur LIDAR 3D pour la navigation autonome des robots mobiles en terrain inconnu

Auteur: Jean-Philippe Roberge

Date: 2013

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Roberge, J.-P. (2013). Conception et intégration d'un capteur LIDAR 3D pour la navigation autonome des robots mobiles en terrain inconnu [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/1092/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/1092/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Richard Gourdeau
Advisors:

Programme: génie électrique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CONCEPTION ET INTÉGRATION D'UN CAPTEUR LIDAR 3D POUR LA
NAVIGATION AUTONOME DES ROBOTS MOBILES EN TERRAIN INCONNU

JEAN-PHILIPPE ROBERGE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)
AVRIL 2013

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

CONCEPTION ET INTÉGRATION D'UN CAPTEUR LIDAR 3D POUR LA
NAVIGATION AUTONOME DES ROBOTS MOBILES EN TERRAIN INCONNU

présenté par : ROBERGE Jean-Philippe

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. SAUSSIÉ David, Ph.D., président

M. GOURDEAU Richard, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. LAMARCHE Tom, M.Sc.A., membre

À mon père...

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier particulièrement mon directeur de recherche, Richard Gourdeau, pour son encadrement, son soutien et sa confiance. Je lui suis très reconnaissant de m'avoir donné l'opportunité de travailler sur un projet aussi passionnant. Je tiens également à exprimer toute ma gratitude à Tom Lamarche, mon superviseur à l'Agence spatiale canadienne durant cette recherche. Par sa très grande compétence, ses idées et sa rigueur, il a contribué à augmenter significativement la qualité de ce travail.

Un énorme merci à l'ensemble du groupe du développement de l'exploration spatiale de l'Agence spatiale canadienne. J'ai eu la chance unique de pouvoir travailler dans un milieu fascinant au sein d'une équipe constituée de gens tout à fait exceptionnels qui m'ont apporté énormément, tant au niveau professionnel qu'humain. Merci notamment à David Gingras, qui m'a transmis une grande quantité de connaissances au sujet de la robotique mobile et des algorithmes de navigation autonome ; Simon Rocheleau, pour sa complicité et son grand coup de main lors de la conception mécanique ; Sylvain Mondor, pour son humanisme et son empressement à aider ; Érick Dupuis et Éric Martin, pour l'encadrement et les encouragements.

Merci à ma famille et à mes amis, je vous suis très redevable de votre soutien. Je remercie en particulier ma mère Nicole Quessy qui m'a encouragé dans les moments plus difficiles et qui m'a donné un grand coup de main pour la correction de ce mémoire. Un merci très spécial à ma conjointe Roxane Léouzon pour sa grande écoute et pour avoir supporté beaucoup de soirs et de week-ends lors desquels j'étais occupé à travailler.

Je veux enfin remercier le conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG), le fonds de recherche du Québec - nature et technologies (FQRNT) ainsi que l'Agence spatiale canadienne pour les fonds octroyés lors de cette recherche.

RÉSUMÉ

L'étude de la planète Mars suscite un intérêt grandissant au sein de la communauté scientifique. Étant donné la distance séparant la Terre de cet astre, ainsi que l'environnement particulièrement hostile y régnant, son exploration tire avantage de l'utilisation de robots mobiles (*rovers*). Les fenêtres de communication peu nombreuses de même que les délais importants justifient le déploiement d'intelligence artificielle sur ces plates-formes mobiles afin de maximiser leur autonomie. L'un des enjeux primordiaux est alors la capacité que possèdent de tels robots de naviguer de façon autonome et donc de percevoir l'environnement au moyen de systèmes de vision avancés.

Le projet de recherche dont il est question dans ce mémoire s'articule autour de ce thème et est réalisé en collaboration avec l'Agence spatiale canadienne (ASC). L'objectif principal vise la conception d'un système de vision tridimensionnelle permettant à un robot mobile de naviguer de façon autonome. Il concerne plus particulièrement la conception, l'intégration et l'étude de *CORIAS* (*C*ontinuous *R*ange and *I*ntensity *A*cquisition *S*ystem), un système de vision utilisant la technologie lidar (*L*ight *D*etection *A*nd *R*anging). Le système en question utilise comme capteur principal un lidar LMS111 de la compagnie SICK. L'appareil développé au cours de cette recherche répond non seulement à l'objectif principal, mais il est également doté des caractéristiques suivantes :

- La reproduction tridimensionnelle de l'environnement s'effectue dans un rayon maximum de 20 mètres.
- L'acquisition des données se fait à raison d'un débit maximal de 27 050 points par seconde.
- Le temps requis pour balayer complètement l'environnement avec des paramètres d'opération typiques (une résolution de $0,25^\circ$ en élévation et de $0,50^\circ$ en azimuth) est d'environ 29 secondes.
- Le système peut transmettre les mesures d'intensité associées aux points acquis.
- Les résolutions verticale (élévation) et horizontale (azimut) sont configurables et assez fines pour détecter des obstacles.
- Le système présente un niveau raisonnable de protection face aux conditions environnementales hostiles (poussière, pluie, neige, etc).

CORIAS nécessite seulement une alimentation de 24 volts DC et un lien Ethernet pour être opéré. Il peut ainsi être installé aisément sur plusieurs types de plates-formes. L'ordinateur de bord du robot envoie au système de vision les commandes à accomplir. Le micro-contrôleur, pièce centrale du système, opère sous Linux et agit comme serveur TCP-IP. Il se charge entre autres de la gestion des commandes, ainsi que du préconditionnement et du transfert des données. Le traitement des données s'effectue quant à lui sur l'ordinateur de bord, où des algorithmes visant à filtrer les points et à extraire la surface navigable sont mis à contribution.

À l'été 2011, *CORIAS* fut d'abord utilisé sur le terrain d'émulation de Mars (TÉM) de l'ASC à des fins de validation. Durant cette campagne de tests qui s'échelonna sur trois jours, plus de 112 balayages complets et géoréférencés furent acquis avec succès. Les données recueillies lors de cette expérience servirent à générer un modèle numérique du TÉM et furent diffusées à titre de base de données scientifiques dans l'*International Journal of Robotics Research* (IJRR). À l'été 2012, *CORIAS* fut intégré au robot mobile *Juno*, une plate-forme robotique de recherche et développement utilisée par l'ASC.

ABSTRACT

The study of Mars is of growing interest among the scientific community. Given the large distance between this planet and the Earth, as well as the hostile environment prevailing there, its exploration takes advantage of using rovers. The rare communication windows, along with the important delays occurring during communications, justify artificial intelligence deployment on these mobile platforms in order to maximize their autonomy. Hence, one of the crucial issues is the ability the rover has to autonomously navigate and thus, to properly detect its environment with the help of advanced vision systems.

The research project discussed in this thesis focuses on this theme and is done in collaboration with the Canadian Space Agency (CSA). The main objective is to design a three-dimensional vision system enabling a mobile robot to navigate autonomously. It relates more particularly to the design, integration and study of *CORIAS* (COntinuous Range and Intensity Acquisition System), a vision system using lidar (LIght Detection And Ranging). The system uses a LMS111, manufactured by SICK, as its main sensor. The device developed in this research project not only meets the main objective, but it also has the following characteristics :

- The three-dimensional reproduction of the environment is performed within a 20 meter radius.
- The maximum data acquisition rate is 27 050 points per second.
- The time required to complete a full-coverage scan performed with typical operation parameters (0,25° elevation and 0,50° azimuth resolutions) is around 29 seconds.
- The system is able to transmit the intensity measurements associated with the acquired points.
- Vertical (elevation) and horizontal (azimuth) resolutions are configurable and fine enough to detect obstacles.
- The system has a reasonable level of protection against bad weather conditions (dust, rain, snow, etc.).

CORIAS only requires a 24 volts DC power supply and an Ethernet link to be operated. It can be installed easily on a large variety of platforms. The rover's on-board computer is responsible for communicating with the vision system and provides the commands it needs to accomplish. The microcontroller, which is the central part of the system, operates on Linux and acts as a TCP-IP server. It is responsible, among other things, for managing

all the commands, pre-processing data and transferring these to the rover's computer. Data processing is then performed on the rover's onboard computer, where algorithms aiming at filtering points and extracting the navigable mesh are involved.

In the summer of 2011, *CORIAS* was first used on CSA's Mars Emulation Terrain (MET) for validation purposes. During this three-day test campaign, over 112 georeferenced full-coverage scans were successfully acquired. The data produced by this experiment was used to generate MET's digital elevation map and was shared as a scientific database in the International Journal of Robotics Research (IJRR). In the summer of 2012, *CORIAS* was finally integrated on the *Juno* rover, a robotic platform for research and development used by CSA.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xiii
LISTE DES FIGURES	xiv
LISTE DES ANNEXES	xvii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xviii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	3
1.1 Les systèmes de vision couramment utilisés en navigation autonome	3
1.1.1 Caméra stéréoscopique	3
1.1.2 Lidar	7
Lidar 2D	8
Lidar 3D	9
1.1.3 Systèmes de vision à capteurs mixtes	13
1.1.4 Autres	14
Radar	14
Sonar	15
Système à triangulation active	15
Flash lidar 3D	15
1.2 Caractérisation	16
1.3 Étalonnage	17
1.4 Traitement des données	20
1.4.1 Traitement de l'intensité	20

Approche par modèle	22
Approche par données	24
CHAPITRE 2 DÉFINITION DES OBJECTIFS DE RECHERCHE	27
2.1 Mise en contexte	27
2.1.1 Principes de la navigation autonome	29
2.1.2 Environnement d'expérimentation et de validation	32
2.2 Objectif global	33
2.3 Définition des objectifs spécifiques	33
CHAPITRE 3 CONCEPTION	35
3.1 Choix du matériel et design mécanique	35
3.1.1 Lidar	36
3.1.2 Table rotative	37
3.1.3 Moteur intelligent	39
3.1.4 Microcontrôleur et circuits électriques	39
3.1.5 Boîte d'engrenages	41
3.1.6 Cabinet électrique	41
3.1.7 Pièces usinées	42
Support du moteur et de la boîte d'engrenages	42
Supports de la table tournante	42
Support du lidar	43
Support de l'assemblage global	43
3.1.8 Assemblage global	44
Les configurations d'assemblage	46
3.2 Design électrique	47
3.2.1 Interconnexions	47
3.2.2 Gestion de l'alimentation	47
3.2.3 Amplification des signaux de l'encodeur incrémental	48
3.2.4 Ajout d'une interface RS-232 au microcontrôleur	48
3.3 Architecture informatique	48
3.3.1 Recompilation du noyau du NGW100	49
3.3.2 Configuration des réseaux de communication	49
3.3.3 Programmes informatiques	50
3.3.4 Gestion des requêtes	50
3.3.5 Fonctionnalités	51
3.3.6 Communications	52

3.4	Principe de fonctionnement	52
3.4.1	Initialisation du système	52
3.4.2	Balayage d'une scène	53
CHAPITRE 4 CARACTÉRISATION ET ÉTALONNAGE		55
4.1	Caractérisation du LMS111	55
4.1.1	Montage expérimental	55
4.1.2	Effet du temps d'opération	59
4.1.3	Effet de la fréquence d'acquisition	60
4.1.4	Effet du niveau de la tension d'alimentation	61
4.1.5	Effet des propriétés de surface	62
	Effet de la couleur	62
4.1.6	Effet de la distance	69
4.1.7	Effet de l'angle d'incidence	72
4.1.8	Effet des conditions d'éclairage	73
4.2	Étalonnage de <i>CORIAS</i>	75
4.2.1	Étalonnage intrinsèque	75
	Modèle mathématique du système	75
	Réalisation de l'étalonnage intrinsèque	77
4.2.2	Étalonnage extrinsèque	82
	Définition de la procédure d'étalonnage extrinsèque	83
CHAPITRE 5 TRAITEMENT DES DONNÉES		86
5.1	Traitement des mesures de distance	86
5.1.1	Suppression de l'empreinte du robot	86
5.1.2	Création du maillage en triangles irréguliers	87
5.1.3	Suppression des triangles indésirables	88
5.1.4	Transformation en coordonnées cartésiennes	90
5.1.5	Autres traitements	90
5.2	Traitement de l'intensité	91
5.2.1	Normalisation en fonction de la distance	92
5.2.2	Normalisation en fonction de l'angle d'incidence	94
5.2.3	Effet de la normalisation	97
CHAPITRE 6 RÉSULTATS ET ANALYSES		101
6.1	Caractéristiques du produit final	102
6.1.1	Masse et niveau de protection	102

6.1.2	Coûts	103
6.1.3	Consommation électrique	103
6.1.4	Temps et vitesse d'acquisition	104
6.1.5	Les configurations d'assemblage	105
6.2	Validation du système	107
6.3	Usage du système pour la navigation autonome	110
6.4	Discussion sur les avantages et les limitations	112
6.5	Problèmes rencontrés	114
CONCLUSION		116
RÉFÉRENCES		119
ANNEXES		129

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Caractéristiques techniques du lidar LMS111	37
Tableau 3.2	Caractéristiques techniques de la table tournante RTHM-190	38
Tableau 4.1	Moyenne et écart-type des mesures en fonction du niveau de gris	65
Tableau 4.2	Moyenne et écart-type des mesures en fonction de la couleur	65
Tableau 4.3	Moyenne et écart-type des mesures - couleurs à fini réfléchissant	67
Tableau 4.4	Moyenne et écart-type de la distance et de l'intensité en fonction de la distance réelle	70
Tableau 4.5	Valeurs des paramètres avant et après le processus d'optimisation	80
Tableau 4.6	Dispersion des données pour certaines régions planaires	80
Tableau 6.1	Masse des composants du système	102
Tableau 6.2	Coût des composants du système	103
Tableau 6.3	Caractéristiques de certaines configurations typiques de balayage	105

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Principe de la vision stéréoscopique	4
Figure 1.2	Identification de la profondeur Z_R à l'aide de la disparité ($y_G - y_D$) . .	5
Figure 1.3	Principe de fonctionnement du lidar 2D	8
Figure 1.4	Diverses méthodes de balayage des lidars 3D	9
Figure 1.5	Phénomène des pixels mixtes	12
Figure 2.1	Robot mobile <i>Red</i> équipé du système de vision précédent	27
Figure 2.2	Robot mobile <i>Juno</i>	28
Figure 2.3	Principe de la navigation autonome (adapté de Rekleitis <i>et al.</i> (2009a))	29
Figure 2.4	Modélisation d'un robot à action différentielle (adapté d'Astolfi (1999))	30
Figure 2.5	Terrain d'émulation de Mars	32
Figure 3.1	Système de vision : Extérieur	35
Figure 3.2	Système de vision : Intérieur	36
Figure 3.3	Lidar LMS111	37
Figure 3.4	Table rotative : RTHM-190	38
Figure 3.5	Moteur intelligent : SM1720D	39
Figure 3.6	Plate-forme NGW100 de la compagnie Atmel	40
Figure 3.7	Carte électronique secondaire	41
Figure 3.8	Boîte d'engrenages BLH20-1 de la compagnie On Drives	42
Figure 3.9	Sous-assemblage : moteur - boîte d'engrenages - table rotative	43
Figure 3.10	Support du lidar	44
Figure 3.11	Support de l'assemblage global	44
Figure 3.12	Comparaisons entre le modèle CAO et le produit tel que conçu	45
Figure 3.13	Position estimée du centre de masse par CAO	46
Figure 3.14	Les deux configurations d'assemblage de <i>CORIAS</i>	46
Figure 3.15	Comparaison des champs de vision des deux configurations d'assemblage	47
Figure 3.16	Configuration du réseau de communication	49
Figure 3.17	Principe de gestion des clients et de leurs requêtes	51
Figure 3.18	Format des trames de communication entre <i>CORIAS</i> et le(s) client(s) .	52
Figure 3.19	Principe de l'exécution d'un balayage en sens anti-horaire	53
Figure 4.1	Embase universelle à plomb laser	56
Figure 4.2	Principe de positionnement des expériences de caractérisation	57
Figure 4.3	Configuration des trépieds	58
Figure 4.4	Diamètre du laser du lidar en fonction de la distance (SICK, 2012) . .	58

Figure 4.5	Dérive des mesures en fonction du temps d'opération	60
Figure 4.6	Effet de la fréquence d'acquisition	61
Figure 4.7	Effet de la tension d'alimentation	62
Figure 4.8	Distribution des mesures pour différents tons de gris	63
Figure 4.9	Moyenne et écart-type des mesures pour différents tons de gris	64
Figure 4.10	Distribution des mesures pour diverses couleurs à fini mâât	66
Figure 4.11	Distribution des mesures pour diverses couleurs à fini réfléchissant	68
Figure 4.12	Moyenne et écart-type des mesures en fonction de la distance réelle	69
Figure 4.13	Distributions particulières des mesures pour certaines plages de distances	72
Figure 4.14	Moyenne et écart-type des mesures pour différents angles d'incidence	73
Figure 4.15	Configuration de l'expérience sur les conditions d'éclairage	74
Figure 4.16	Représentation d'un point dans le repère du lidar	75
Figure 4.17	Repère fixe de <i>CORIAS</i> (<i>C</i>) et repère du lidar (<i>L</i>)	76
Figure 4.18	Calibration intrinsèque de <i>CORIAS</i>	78
Figure 4.19	Représentation de la boîte par <i>CORIAS</i> avant la calibration intrinsèque	79
Figure 4.20	Comparaison entre le modèle nominal et le modèle étalonné	81
Figure 4.21	<i>CORIAS</i> installé sur le robot <i>Juno</i>	82
Figure 4.22	Représentation de <i>CORIAS</i> installé sur le robot <i>Juno</i>	83
Figure 4.23	Représentation du panneau de référence et du plan moyen (vue du dessus)	85
Figure 5.1	Principe de l'algorithme de Delaunay 2D	87
Figure 5.2	Triangles d'ombre	89
Figure 5.3	Principe de création des triangles de frontière	89
Figure 5.4	Extraction de la surface navigable	91
Figure 5.5	Interpolation des données expérimentales de l'expérience 4.1.6	93
Figure 5.6	Interpolation des données expérimentales de l'expérience 4.1.7	95
Figure 5.7	Représentation de l'angle incident θ_i , émergent θ_e et de phase α	96
Figure 5.7	Impact de l'intensité sur la visualisation d'une scène	99
Figure 5.8	Nuage de points à intensité normalisée acquis sur le TÉM	100
Figure 6.1	<i>CORIAS</i> intégré sur le robot <i>Juno</i>	101
Figure 6.2	Nuage de points obtenus par les deux configurations d'assemblage	106
Figure 6.3	Montage expérimental utilisé pour valider le système de vision	107
Figure 6.4	Modèle numérique du TÉM produit par le système de vision (vue #1)	108
Figure 6.5	Modèle numérique du TÉM produit par le système de vision (vue #2)	109
Figure 6.6	Trajectoires parcourues lors d'expériences de navigation autonome	110
Figure 6.7	Manoeuvre de contournement d'obstacle	111
Figure 6.8	<i>Juno</i> sur une colline aux parois abruptes	111

Figure 6.9	Descente d'une colline avec obstacles	112
------------	---	-----

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Schémas de fabrication mécanique	129
Annexe B	Schéma de principe : interconnexions	135
Annexe C	Analyse de sensibilité et validation de la fonction objectif	137

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AM-CW	Amplitude Modulated - Continuous Wave
ASC	Agence spatiale canadienne
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BIOS	Basic Input Output System
CAO	Conception assisté par ordinateur
CORIAS	COntinuous Range and Intensity Acquisition System
CSA	Canadian Space Agency
DC	Direct Current
DEL	Diode électroluminescente
EHF	Extremely High Frequency
EMF	Eclipse Modeling Framework
FCL	Full Coverage Lidar
FM-CW	Frequency Modulated - Continuous Wave
FTP	File Transfert Protocol
Hazcam	Hazard Avoidance Camera
ICP	Iterative Closest Point
IJRR	International Journal of Robotics Research
IP-xx	Ingress Protection Rating
IRD	Interface Requirements Document
Lidar	LIght Detection And Ranging
NASA	National Aeronautics and Space Administration
Navcam	Navigation Camera
Pancam	Panoramic Camera
SD	Secure Digital
SLAM	Simultaneous Localization And Mapping
SOCP	Second-Order Cone Program
SQP	Sequential Quadratic Programming
TCP-IP	Transmission Control Protocol - Internet Protocol
TÉM	Terrain d'émulation de Mars
TriDAR	Triangulation and Lidar
UDP	User Datagram Protocol
USART	Universal Synchronus/Asynchronus Receiver/Transmitter

Paramètres fonctionnels :

$\{X_L, Y_L, Z_L\}$	Repère du lidar
$\{X_C, Y_C, Z_C\}$	Repère de <i>CORIAS</i>
$\{X_N, Y_N, Z_N\}$	Repère de navigation du robot mobile
$\{\theta, \phi, r\}$	Angle d'azimut, angle d'élévation et distance
C_{Ver}, C_{Hor}	Champs de vision vertical et horizontal
R_{Ver}, R_{Hor}	Résolutions verticale et horizontale
f_{Lidar}	Fréquence de rotation du miroir interne du lidar en Hertz
f_{Moteur}	Fréquence de rotation du moteur en Hertz
V_{Aq}	Vitesse d'acquisition en $\frac{points}{seconde}$
T_{Aq}	Temps d'acquisition en seconde
N_{points}	Nombre de points
$Az, \acute{E}l$	Azimut et élévation

Étalonnage :

$\{\delta_\theta, \delta_\psi, \delta_\gamma\}$	Incertitudes sur les angles d'Euler
$\{\delta_x, \delta_y, \delta_z\}$	Incertitudes sur les translations
${}^L P$	Points exprimés dans le repère du lidar
${}^C P$	Points exprimés dans le repère de <i>CORIAS</i>
${}^N T_C$	Matrice d'installation de <i>CORIAS</i>
$\{p_1, p_2, p_3\}$	Paramètres du plan de référence

Traitement de l'intensité :

I_B, I_T	Intensité brute et Intensité transmise par le capteur
$\{\theta_i, \theta_e, \alpha\}$	Angles d'incidence, d'émergence et de phase
$\{a, b\}$	Paramètres d'un amplificateur opérationnel
$S()$	Spline cubique
$P()$	Polynôme d'ordre trois
$I_{DistNorm}$	Intensité normalisée en fonction de la distance
$I_{AngleNorm}$	Intensité normalisée en fonction de l'angle d'incidence
I_{SLS}	Fonction d'intensité de <i>Schoenberg-Lommel-Seeliger</i>
I_{LLS}	Fonction d'intensité de <i>Lambert-Lommel-Seeliger</i>
C	Matrice de covariance
$\tilde{m}_{i,j,k}$	Moment central normalisé d'ordre $i + j + k$
$\lambda_{1,2,3}$	Valeurs propres de la matrice de covariance
T_P	Indice de planéité

INTRODUCTION

L'être humain a toujours exploré l'inconnu pour assurer sa survie et assouvir sa soif de connaissances. Dans cette perpétuelle quête, il n'a cessé de tourner son regard vers les astres. De l'époque des civilisations anciennes jusqu'à aujourd'hui, en passant par Copernic puis Galilée, l'étude des corps célestes a permis d'obtenir des réponses à des questions aussi importantes que fondamentales. L'astronomie est probablement la plus vieille des sciences physiques étudiées par l'homme (Waerden et Huber, 1973). Au fil du temps, des outils de plus en plus spécialisés ont vu le jour et ont contribué à repousser les frontières de l'inexploré. Débutant à la fin des années 1950, l'ère spatiale a ajouté une toute nouvelle dimension à l'étude des astres : l'exploration spatiale. Durant la guerre froide, c'est dans la frénésie de la course à l'espace qu'une grande quantité d'engins ont ainsi quitté l'atmosphère terrestre afin d'accomplir des missions scientifiques de tous genres. C'est à cette époque que plusieurs sondes furent envoyées avec succès vers la Lune. En 1966, pour la première fois de l'histoire, les Soviétiques réussirent à faire atterrir une sonde (*Luna 9*) sur la Lune. Les Américains accomplirent le même exploit quelques mois plus tard avec la sonde *Surveyor 1*. En juillet 1969, c'est l'apogée du programme spatial américain *Apollo*, avec le succès d'*Apollo 11*, la toute première mission habitée sur la Lune.

C'est aussi durant cette période qu'a débuté l'envoi de sondes vers d'autres planètes du système solaire, dont Mars. La communauté scientifique commença à accorder un intérêt grandissant à cette dernière en raison, entre autres, de ses caractéristiques et de son histoire similaires à celles de la Terre (NASA, 2013d). Cependant, vu la distance importante séparant la Terre de cet astre, ainsi que l'environnement hostile y régnant, son exploration pose un défi important. C'est ce qui explique que, depuis 1960, un peu plus de la moitié des missions visant à envoyer des sondes vers Mars se sont soldées par des échecs (NASA, 2013a). Il existe néanmoins plusieurs grands succès. Par exemple, en 1976, les missions *Viking 1* et 2 posèrent pour la première fois des engins sur Mars. En 1997, plus de deux décennies après, la mission *Mars Pathfinder* y fit déployer pour la première fois un robot mobile : *Sojourner*. En 2004, les robots *Spirit* et *Opportunity* débutèrent une mission qui leur fit parcourir, jusqu'à présent, plus d'une quarantaine de kilomètres au total (NASA, 2013c). Tout récemment, en 2012, le robot mobile *Curiosity* fut déployé avec succès et amorça une mission scientifique d'envergure qui, en principe, devrait durer au moins deux ans.

Étant donné les fenêtres de communication limitées entre la Terre et Mars, de même que les délais importants affectant les communications (environ 20 minutes en moyenne (NASA, 2013b)), la téléopération des robots mobiles reste ardue. De là l'intérêt important d'augmenter l'autonomie de ces engins afin de maximiser la distance franchissable et du même coup, les

retombés scientifiques. C'est ce qui explique que les futurs robots explorateurs de planètes seront appelés à parcourir de façon autonome une distance considérable. L'un des enjeux primordiaux est alors leur capacité de percevoir l'environnement au moyen de systèmes de vision avancés.

C'est dans ce contexte que viennent s'insérer les travaux de recherche en exploration planétaire de l'agence spatiale canadienne (ASC). Dans l'approche mise de l'avant par l'ASC, un robot perçoit et interprète son environnement avant de se déplacer. Pour réaliser cette fonction de perception, l'ASC préconise depuis plusieurs années l'utilisation de la technologie lidar (*LIght Detection And Ranging*) (Dupuis *et al.*, 2005; Gingras *et al.*, 2010). Or, les capteurs lidars 3D actuellement disponibles sur le marché restent peu adaptés aux activités de recherche menées par l'ASC. En outre, bien que le système de vision présenté dans les travaux de Lamarche (2009) ait bien servi les activités de recherche de l'ASC ces dernières années, il requiert néanmoins un délai important pour acquérir une représentation 3D complète de l'environnement. De plus, de nouvelles technologies étant depuis apparues sur le marché, il était maintenant possible de concevoir un système plus performant et donc, de répondre à cette problématique. Ce mémoire présente ainsi la conception, l'intégration et l'étude d'un nouveau système de vision tridimensionnelle basé sur la technologie lidar et adapté à la navigation des robots mobiles en terrain inconnu.

L'ouvrage est divisé en six chapitres. Le premier contextualise la recherche en présentant plusieurs types de systèmes de vision en fonction sur des robots mobiles autonomes mentionnés dans la littérature. Il revoit aussi certaines méthodes établies permettant de caractériser et d'étalonner ces appareils. Il étudie enfin le traitement des données, particulièrement en ce qui a trait aux mesures d'intensité. Le second chapitre présente d'abord certains principes de la navigation autonome mis de l'avant par l'ASC, ce qui permet ensuite de définir l'objectif global et les objectifs spécifiques visés par la recherche. Le troisième chapitre détaille quant à lui la conception du système de vision tant au niveau mécanique, électrique que logiciel. Le chapitre suivant expose la méthodologie et les résultats reliés à la caractérisation et à l'étalonnage. Le cinquième chapitre aborde le traitement des données. Il débute par la revue de certains des algorithmes utilisés par l'ASC pour le filtrage et l'extraction de la surface navigable, et s'attarde ensuite sur la méthode employée pour traiter les mesures d'intensité produites par le système. Finalement, le dernier chapitre fait état des principaux résultats découlant de l'exécution du projet de recherche. Il présente les caractéristiques globales du système de vision conçu, explique la procédure de validation et expose le déroulement de quelques expériences de navigation autonome réalisées en utilisant l'appareil de vision développé. C'est aussi dans ce dernier chapitre que les avantages et les limitations sont analysés, de même que certains problèmes rencontrés au cours de la recherche.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Dans un premier temps, ce chapitre vise à présenter différents systèmes de vision couramment utilisés en robotique mobile. L'accent est d'abord mis sur l'état de l'art dans ce domaine. De nombreux exemples de robots mobiles pertinents au contexte d'application seront cités à titre comparatif. De plus, les raisons pour lesquelles la technologie lidar fut choisie seront clairement identifiées.

Par la suite, l'implantation des appareils de vision de type lidar à bord de robots mobiles est approfondie. Dans cette optique, un des aspects importants est d'abord d'identifier les paramètres qui influencent les mesures du capteur et de quantifier leur effet (caractérisation). Aussi, afin d'assurer une précision et une répétabilité accrues, il est nécessaire d'établir une procédure d'étalonnage adéquate du système de vision. Ensemble, l'étalonnage et la caractérisation permettent de tirer le maximum d'information des données acquises, d'où leur importance primordiale. L'étude de plusieurs travaux touchant ces deux thèmes est présentée en soulignant justement les méthodes desquelles s'inspirent la caractérisation et l'étalonnage de *CORIAS*.

Un sujet intimement lié à l'implantation d'un système de vision est certainement le traitement des données qu'il génère. Un survol de certaines des recherches effectuées dans le domaine du traitement des nuages de points est donc réalisé. Un intérêt particulier est accordé au traitement spécial que nécessitent les valeurs d'intensité en soulignant la valeur ajoutée que représentent ces données dans le cadre de la navigation autonome.

1.1 Les systèmes de vision couramment utilisés en navigation autonome

Cette section présente les principaux moyens de vision employés dans le domaine de la robotique mobile. Elle se limite cependant aux systèmes les plus couramment utilisés et les plus pertinents pour l'application inhérente à cette recherche.

1.1.1 Caméra stéréoscopique

La caméra stéréoscopique est un système composé de deux (ou plus de deux) capteurs optiques passifs permettant d'obtenir non seulement l'image, mais aussi la profondeur des pixels se trouvant dans leur champ de vision commun. Le principe de fonctionnement de cet appareil repose sur la triangulation, tel qu'illustré à la figure 1.1.

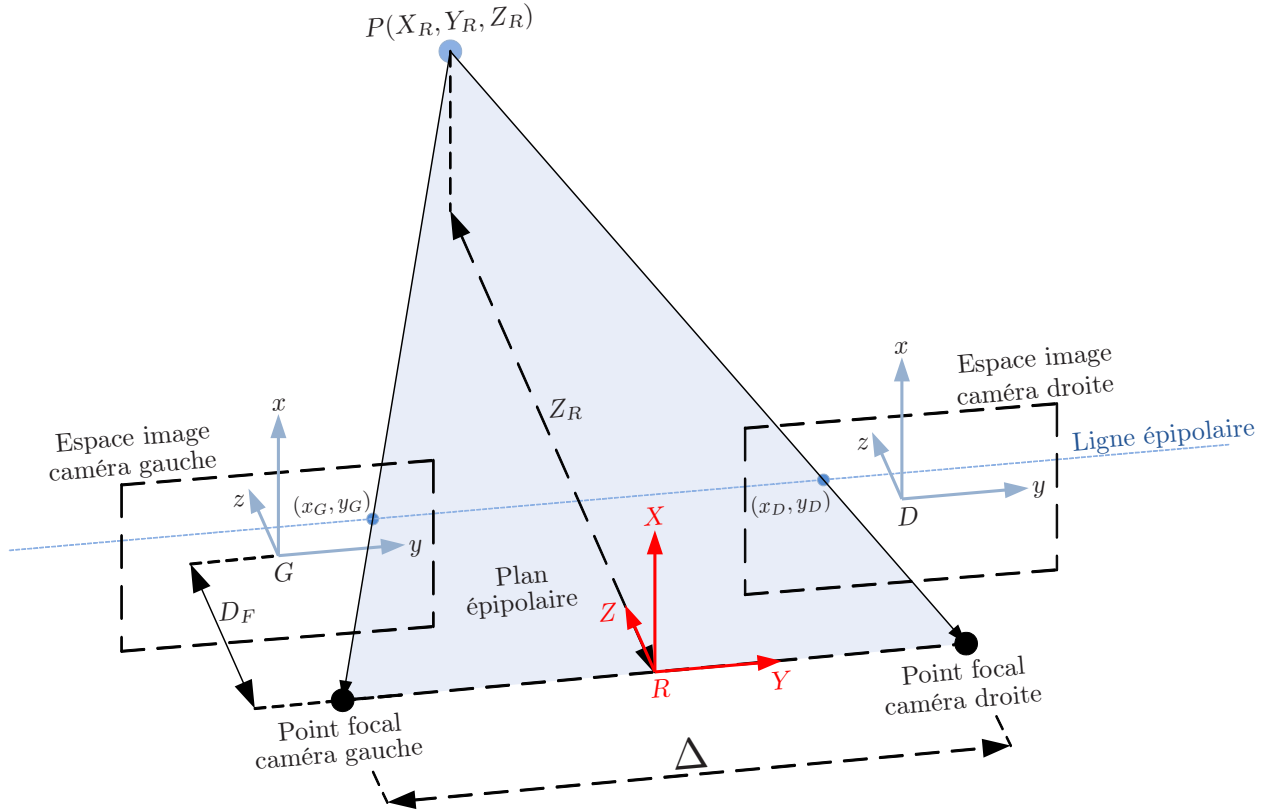


Figure 1.1 Principe de la vision stéréoscopique

Soit un point P observé simultanément par deux capteurs optiques identiques orientés parallèlement l'un par rapport à l'autre et séparés d'une distance Δ connue. Ici, ce qui doit être déterminé est la profondeur Z_R de ce point par rapport à un repère de référence noté R situé arbitrairement au centre des deux appareils. La distance D_F est la longueur existant entre le point focal du capteur et son espace image¹. Il est évident que le point P sera représenté de manière différente dans l'espace image de chacun des capteurs optiques. C'est cette différence dans la représentation, appelée disparité, qui permet de trouver la profondeur Z_R . La méthode utilisée pour identifier cette profondeur est assez directe et repose sur le raisonnement géométrique illustré à la figure 1.2.

1. L'espace image d'un capteur optique correspond au plan dans lequel l'image réelle est reconstituée par un certain nombre de pixels.

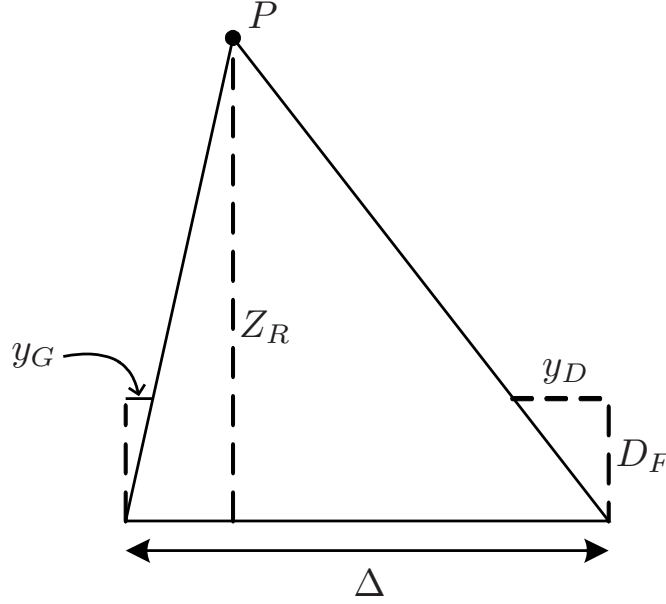


Figure 1.2 Identification de la profondeur Z_R à l'aide de la disparité ($y_G - y_D$)

Elle repose sur une propriété des triangles semblables :

$$\frac{\Delta + y_D - y_G}{Z_R - D_F} = \frac{\Delta - d}{Z_R - D_F} = \frac{\Delta}{Z_R} \quad (1.1)$$

où d est la disparité. En isolant la profondeur Z_R dans cette dernière équation :

$$Z_R = \frac{D_F \Delta}{d} \quad (1.2)$$

La caméra stéréoscopique est l'un des systèmes de vision très populaires utilisés pour la navigation autonome et aussi l'un des plus anciens. Beaucoup d'équipes de recherche utilisent ce moyen pour obtenir une représentation tridimensionnelle de l'environnement dans lequel un robot évolue. Dans la littérature, il s'agit de l'approche la plus populaire pour répondre au problème de la localisation et de la cartographie simultanées (SLAM) (Tong et Barfoot, 2011). D'ailleurs, tous les robots mobiles martiens envoyés à ce jour par la NASA utilisent ce moyen comme principal outil de vision. Le célèbre *Sojourner*, premier robot mobile ayant opéré avec succès sur Mars, possède une caméra stéréoscopique produisant des images en noir et blanc. Celle-ci servait à la navigation, mais aussi à l'évitement d'obstacles et à la gestion d'expériences scientifiques (Stone, 1996; Mishkin *et al.*, 1998). Les MERs *Spirit* et *Opportunity* utilisent 4 caméras stéréoscopiques (une Pancam, une Navcam et deux Hazcams) entre autres pour la navigation, l'odométrie visuelle et la cartographie des lieux (Maki *et al.*,

2003; Bell *et al.*, 2003; Cheng *et al.*, 2005; Maimone *et al.*, 2007). Le robot mobile *Curiosity*, la toute dernière plate-forme mobile de la NASA posée sur Mars en août 2012, utilise 6 caméras stéréoscopiques : quatre Hazcams et deux Navcams, qui sont exactement les mêmes Hazcams et Navcams que celles installées sur les MERs (Maki *et al.*, 2012).

La caméra stéréoscopique possède l'avantage d'être peu coûteuse, de consommer peu d'énergie et d'avoir une petite masse comparativement à d'autres systèmes de vision. Beaucoup de modèles ne possèdent aucune pièce mobile, les rendant moins susceptibles aux bris et donc plus intéressants pour la navigation sur d'autres planètes. Pour les applications terrestres, la grande variété de modèles disponibles sur le marché permet de cibler les besoins particuliers d'un robot et de son environnement.

Par contre, un désavantage net lié à l'utilisation de la caméra stéréoscopique est sa dépendance aux conditions d'éclairage ambiant. Ceci est dû à la nature passive des capteurs optiques. Dans un environnement obscur, ce système de vision ne génère pas de données utilisables. Dans le contexte de l'exploration planétaire, cela se traduit par un système inutile pour la navigation nocturne, ce qui le rend très contraignant. Par exemple, Furgale et Barfoot (2010) présentent des expériences de localisation par vision stéréoscopique qui se soldent par des échecs lorsque l'éclairage ambiant est insuffisant. À l'inverse, un éclairage trop intense peut produire de l'éblouissement et rendre difficile, voire impossible, l'obtention de représentations tridimensionnelles de qualité. L'idée d'utiliser alors un système actif tel que la technologie lidar est attrayante, entre autres parce que ces systèmes sont peu sensibles aux conditions d'éclairage. La caméra stéréoscopique nécessite également un traitement informatique important avant d'obtenir une scène en trois dimensions (Hebert, 2000). Ceci est dû en grande partie au défi important posé par la vision stéréoscopique : la recherche de correspondance. Cette recherche consiste à trouver une paire de points correspondants dans les images reçues par les capteurs optiques, ce qui n'est pas trivial. La recherche de correspondance utilise les notions de plan épipolaire et de ligne épipolaire (voir figure 1.1). Le plan épipolaire est défini par trois points : le point mesuré et le point focal des capteurs optiques gauche et droit. L'intersection du plan épipolaire avec l'espace image est la ligne épipolaire. Il se trouve qu'à chacun des points d'une ligne épipolaire de l'espace image gauche est associé un point sur la ligne épipolaire droite correspondante, ce qui permet de réduire le problème d'appariement des points à une recherche dans une seule dimension (Yong-guo *et al.*, 2012). Les techniques utilisées sont typiquement la méthode des moindres carrés ou l'analyse de corrélation. Pour chaque ligne épipolaire, il faut effectuer cette recherche de correspondance pour obtenir la profondeur des pixels. Malgré cette réalité, la plupart des systèmes stéréoscopiques utilisent leur propre carte graphique pour effectuer ces opérations et les ordinateurs d'aujourd'hui sont assez puissants pour soutenir ces opérations en temps réel ou presque.

Néanmoins, la qualité des images 3D dépend directement du succès à apparier les points et cet appariement est difficile dans des environnements présentant peu de particularités². Finalement, ce type de système de vision souffre également de son principe de fonctionnement par triangulation (Hebert, 2000). En effet, plus la distance (Δ) séparant les capteurs optiques est grande, meilleure sera la résolution, mais plus le problème de correspondance sera difficile à résoudre. De plus, la précision sur la profondeur calculée ainsi que la profondeur maximale pouvant être mesurée sont généralement inférieures à celles des capteurs lidars.

1.1.2 Lidar

Le lidar est un capteur actif de plus en plus utilisé en robotique mobile, se servant du laser comme médium de mesure. Il existe plusieurs types de lidars et ces derniers peuvent être regroupés en deux catégories distinctes : les lidars analytiques et les lidars de cartographie (Litvak *et al.*, 2012). Cette section s'attarde exclusivement sur la dernière catégorie, étant donné que les lidars analytiques ne sont pas utilisés pour la navigation autonome. Quatre principes de fonctionnement régissent les lidars de cartographie, Lamarche (2009) en fait un bon tour d'horizon.

Le principe de *mesure du temps de vol d'impulsion laser* consiste à mesurer le temps pris par une impulsion laser pour parcourir l'aller-retour entre le lidar et une cible. La distance entre le lidar et la cible est ensuite déterminée directement par cette mesure.

Le principe de *différence de phase* consiste à émettre un signal laser modulé en amplitude à haute fréquence qui sera réfléchi par une cible et dont la réflexion sera ensuite captée par le récepteur. La mesure du déphasage entre le signal émis et le signal reçu permet d'obtenir la distance entre le lidar et la cible. Dans la littérature cette méthode est parfois désignée par le terme AM-CW pour *Amplitude Modulated-Continuous Wave*.

Le principe de *détection de cohérence*, nécessite l'émission d'un signal laser modulé en fréquence. Le signal émis frappe alors une cible qui le réfléchit vers le récepteur. La fréquence de battement obtenue en mélangeant le signal source avec le signal capté permet de déterminer la distance entre le lidar et la cible. Dans la littérature, cette méthode est parfois nommée FM-CW pour *Frequency Modulated-Continuous Wave*.

Finalement, le principe de *mesure par triangulation* consiste à émettre un faisceau laser non-modulé. Une série de capteurs sont installés pour capter la réflexion de ce faisceau sur une cible. L'endroit où la réflexion est captée permet de déterminer par triangulation la distance entre le lidar et la cible.

2. Un exemple d'un tel environnement serait une plaine de couleur uniforme. Dans ce contexte, le problème d'appariement est difficile à résoudre.

Lidar 2D

Généralement, un lidar 2D fonctionne à l'aide d'un mécanisme de balayage rotatif, tel que présenté à la figure 1.3.

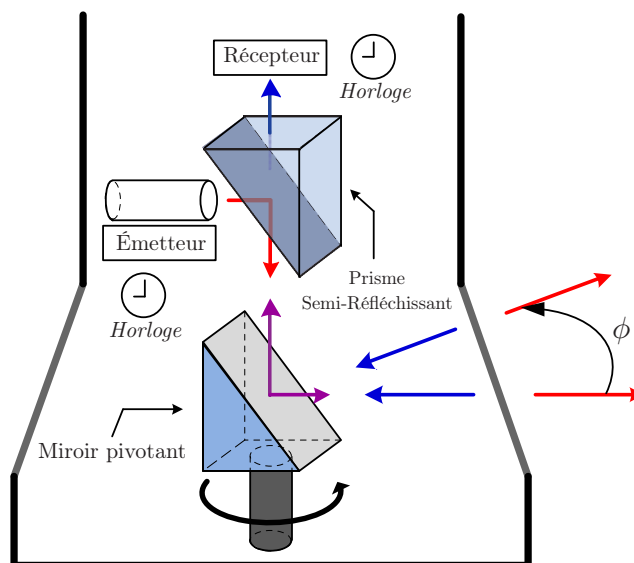


Figure 1.3 Principe de fonctionnement du lidar 2D

Dans la littérature, plusieurs exemples de robots utilisant ce type de capteurs peuvent être répertoriés. Tseng *et al.* (2010) étudient la navigation d'un petit robot autonome, dans un environnement intérieur, à l'aide d'un SICK LMS100 balayant dans un plan horizontal fixe. Il est évident que ce système de vision offre des moyens limités lorsqu'utilisé seul. Par exemple, les obstacles situés strictement au-dessus ou en-dessous du plan d'acquisition ne sont pas visibles et peuvent compromettre une navigation sécuritaire. Une autre utilisation populaire des lidars 2D est la cartographie. Thrun *et al.* (2003); Hahnel *et al.* (2004); Maurelli *et al.* (2009) utilisent tous des lidars 2D installés sur des plates-formes mobiles pour générer des cartes 3D. Le principe consiste à déplacer une plate-forme sur laquelle un de ces capteurs est embarqué et de superposer ensuite chacun des plans balayés. Ayant une représentation tridimensionnelle de l'environnement, il est alors possible d'utiliser l'information pour faire de la navigation autonome. Cette approche peut toutefois être contraignante dans la mesure où elle nécessite un déplacement afin de pouvoir représenter l'environnement.

Lidar 3D

Le capteur lidar 3D est un moyen de vision tout indiqué permettant la navigation autonome de plates-formes mobiles et ce, dans énormément de contextes différents. Son principe de fonctionnement est généralement le même que celui du lidar 2D à la différence près que le lidar 3D possède un mécanisme supplémentaire permettant l'acquisition dans la troisième dimension. Il existe plusieurs approches pour obtenir un tel lidar 3D en utilisant un lidar 2D commercial. La figure 1.4 illustre certaines de ces méthodes. Wulf et Wagner (2003) font la comparaison et l'analyse des principaux modes de balayage.

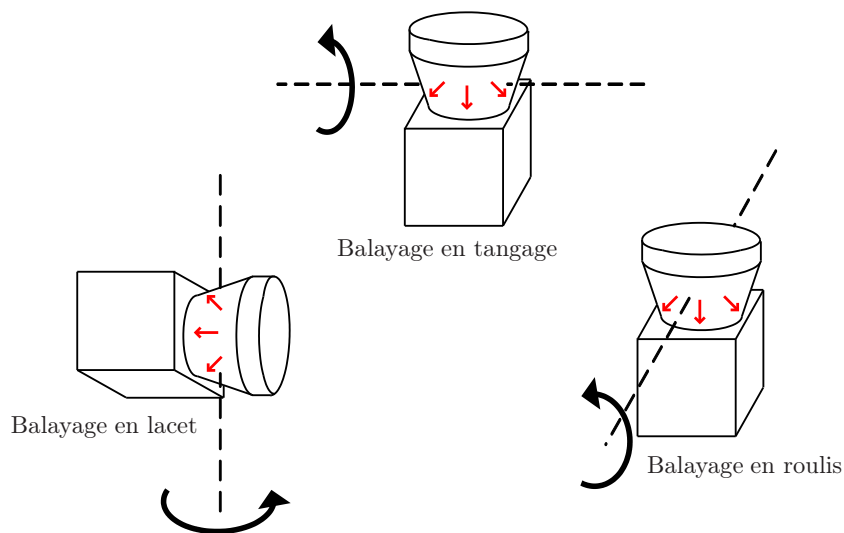


Figure 1.4 Diverses méthodes de balayage des lidars 3D

Une méthode très populaire est de faire pivoter le lidar 2D autour d'un axe horizontal. Dans la littérature, cette méthode réfère au balayage en tangage (ou *pitching-scan*). Broten et Collier (2006) conçoivent un lidar 3D à l'aide d'un SICK LMS211 pivotant de manière continue selon cette méthode. Dans la même lignée, Baker *et al.* (2004) utilisent deux SICK LMS200 (un à l'avant, l'autre à l'arrière) à bord d'un robot explorateur de mines qui effectue aussi la cartographie des lieux. Surmann *et al.* (2003); Muller *et al.* (2006) outillent leur plate-forme mobile avec un SICK LMS200 installé dans cette configuration pour la localisation et la cartographie simultanées (SLAM). Un lidar 3D très performant aussi basé sur cette approche, utilisant cette fois un Hokuyo UTM-30LX, est présenté par Morales *et al.* (2011). Il s'agit d'un système de vision très rapide qui pèse moins d'un kilogramme, tout en restant relativement abordable. Généralement, le balayage en tangage est utilisé pour balayer un volume situé à l'avant du robot mobile. Un avantage lié à cette méthode est qu'elle permet l'acquisition rapide des points situés dans cette région. C'est aussi une configuration qui permet de faire

des balayages à couverture totale³ de manière efficace. Toutefois, les mécanismes nécessaires à la réalisation de ce genre de balayage sont généralement plus massifs et donc plus énergivores que ceux nécessités, par exemple, pour le balayage en azimuth.

Une autre méthode consiste à faire pivoter le lidar 2D autour d'un axe vertical. Dans la littérature, cette méthode est nommée « balayage en azimuth » (ou *yawing-scan*). Brenneke *et al.* (2003) utilisent cette façon de faire avec un SICK LMS291 pour la localisation et la cartographie simultanées. Wulf *et al.* (2004) présentent également un lidar 3D utilisant cette configuration avec un SICK LMS291. L'intérêt dans ce dernier système est l'utilisation de collecteurs tournants (*slip rings*) permettant une rotation continue en azimuth, sans limite de course. Finalement, le balayage en azimuth est aussi la méthode utilisée par l'ASC ces dernières années (Rekleitis *et al.*, 2008; Dupuis *et al.*, 2008; Rekleitis *et al.*, 2009a,b; Gingras *et al.*, 2010). Lamarche (2009) détaille la conception et l'intégration du lidar 3D en service avant la réalisation de *CORIAS*, utilisant un SICK LMS200 monté pour le balayage en azimuth. Cette configuration est mieux adaptée pour réaliser une acquisition à couverture totale, bien qu'il soit toujours possible de couvrir une seule région d'intérêt. D'un autre côté, comparés aux systèmes à balayage en tangage, les systèmes à balayage en azimuth nécessitent généralement plus de temps pour détecter la région située à l'avant d'un robot.

La littérature présente également quelques exemples de balayage en roulis (ou *rolling-scan*), malgré que ce soit une approche moins populaire. Wulf et Wagner (2003) proposent un lidar 3D utilisant ce mode de balayage. Cette façon de faire donne de bons résultats, mais elle permet seulement de voir vers l'avant, ce qui n'est pas optimal pour les techniques de localisation basées sur la vision.

La littérature présente d'autres configurations moins communes de lidars 3D utilisant des lidars 2D commerciaux. Par exemple, Ryde et Hu (2008); Schlemper *et al.* (2011) emploient respectivement un LMS200 et un LMS221 avec un miroir plat pivotant qui dévie les rayons laser du capteur vers une région située directement à l'avant du robot mobile. Ceci procure l'avantage de réduire la masse de l'appareillage à mouvoir puisque c'est le miroir qui pivote au lieu du capteur. Par contre, le champ de vision du capteur se trouve diminué par cette configuration, étant donné que seul un sous-ensemble de rayons laser peut être réfléchi par le miroir. Aussi, le miroir pivote seulement dans un intervalle angulaire limité, au-delà duquel les rayons ne sont plus réfléchis ou sont réfléchis vers des régions peu pertinentes telles que vers le haut. Ces deux faits ont comme conséquence une couverture très limitée de l'environnement dans lequel se trouve le robot. Ng *et al.* (2004) utilisent un miroir hexagonal au lieu d'un miroir plat simple pour réfléchir les rayons laser. Ceci permet la rotation continue du miroir

3. Un balayage à couverture totale désigne un balayage couvrant entièrement l'environnement, e.g. 360° en azimuth par 180° en élévation.

et assure une acquisition plus naturelle offrant en outre une plus grande rapidité. Cependant, ce système souffre aussi d'une couverture réduite de l'environnement.

Plusieurs compagnies commercialisent les lidars 3D. Ces derniers sont utilisés dans une vaste étendue d'applications allant de la reproduction 3D d'objets pour l'ingénierie inverse, ou encore la création de cartes topographiques, jusqu'au domaine de la navigation autonome de robots mobiles. Des modèles populaires de lidar 3D disponibles sur le marché sont les HDL-32E⁴ et HDL-64E⁴ ainsi que le ILRIS-3D⁵. La voiture autonome de Google utilise un Velodyne HDL-64E comme capteur principal (Guizzo, 2011). Fong *et al.* (2008); McManus *et al.* (2011) utilisent quant à eux un ILRIS-3D pour la navigation autonome de leur robot mobile. En 2007, l'ASC utilisait aussi un ILRIS-3D embarqué sur une plate-forme mobile P2AT⁶ pour ses expériences de navigation autonome (Bakambu *et al.*, 2006; Rekleitis *et al.*, 2007a,b). Cependant, puisque ces produits sont souvent très dispendieux et/ou lourds et/ou énergivores, il s'avère souvent plus approprié de concevoir un lidar 3D à partir d'un lidar 2D commercial. À cet effet, les lidars 2D les plus populaires utilisés par ces systèmes sont sans contredit les produits de la compagnie SICK AG et Hokuyo Automatic Company. Al-Temeemy (2011) utilise quant à lui le lidar 1D AR-4000LV⁷ embarqué sur une unité panoramique et basculante (*pan-tilt unit*) pour obtenir un lidar 3D. Ce système est cependant mieux adapté à la reconstruction tridimensionnelle d'objets qu'à la navigation autonome.

Un avantage net lié à l'utilisation d'un système actif de type lidar est qu'il n'est pas sensible aux conditions d'éclairage ambiant et fonctionne bien même dans l'obscurité totale. Les distances maximales pouvant être acquises varient en fonction des appareils, mais peuvent atteindre quelques centaines de mètres. Il existe des lidars pouvant sonder jusqu'à quelques kilomètres, mais ces derniers sont plus massifs et moins souvent propices à la robotique mobile. La précision sur les mesures de distance est en général de l'ordre de quelques millimètres et ce, même à de grandes distances. La vitesse d'acquisition est habituellement très rapide, variant de quelques centaines de points par seconde pour les systèmes lents, jusqu'à plusieurs centaines de milliers de points par seconde pour les systèmes rapides. À titre d'exemple, le lidar ILRIS-3D génère 2000 points par seconde (Tripp *et al.*, 2003), le Hokuyo UTM-30LX et le SICK LMS111 produisent environ 27 000 points par seconde (Hokuyo, 2009; SICK, 2012) tandis que le Velodyne HDL-64E produit pas moins de 1,3 million de points par seconde (Velodyne, 2010b).

D'un autre côté, les lidars 3D sont munis de plusieurs pièces mobiles, ce qui les rend plus sujets aux bris mécaniques. De plus, le capteur lidar peut générer de fausses mesures

4. Velodyne Lidar Inc.

5. Optech Inc.

6. Marque déposée MobileRobots de Adept Technology Inc.

7. Marque déposée Acuity de Schmitt Industries Inc.

lorsqu'en présence de matériaux très réfléchissants comme les métaux polis et le verre. Ce défaut s'explique par le fait qu'il se produit une réflexion quasi spéculaire lorsqu'un rayon laser percute un matériau très réfléchissant. Un autre phénomène indésirable survient lorsqu'un seul rayon laser incident percute deux cibles de distances différentes. Quand cela se produit, une double réflexion est renvoyée vers le lidar. La façon dont ce dernier gère les multiréflexions dépend alors de son principe de fonctionnement. Souvent, les appareils fonctionnant sous le principe de *mesure du temps de vol d'impulsion laser* effectuent alors une moyenne du temps de vol des deux réflexions, pondérée par l'intensité de ces dernières, pour déterminer la distance. Le résultat obtenu est un point non pas situé sur l'une ou l'autre des surfaces, mais bien entre les deux. Ce phénomène est mieux connu dans la littérature sous le nom du pixel mixte (*mixed pixel*). Les matériaux pouvant générer ce genre de problème sont typiquement les matériaux translucides tels que la vitre, le plastique transparent et l'eau (donc la pluie). Ce phénomène survient aussi aux extrémités des objets sondés. Sa fréquence d'apparition est aussi accentuée par le fait qu'en pratique, le laser est imparfait et qu'il possède un angle de divergence non nul. Le principe des pixels mixtes est illustré à la figure 1.5. Aussi, les lidars sont souvent plus lourds et plus énergivores que d'autres types de systèmes de vision, étant donné leur mécanisme plus complexe. Cependant, des lidars de plus en plus légers et peu énergivores voient le jour année après année. Les lidars Hokuyo sont réputés pour être des systèmes très légers. Par exemple, les modèles UTM-30LX et UTM-30LN ne pèsent que 210 grammes sans leurs câbles électriques (Hokuyo, 2009).

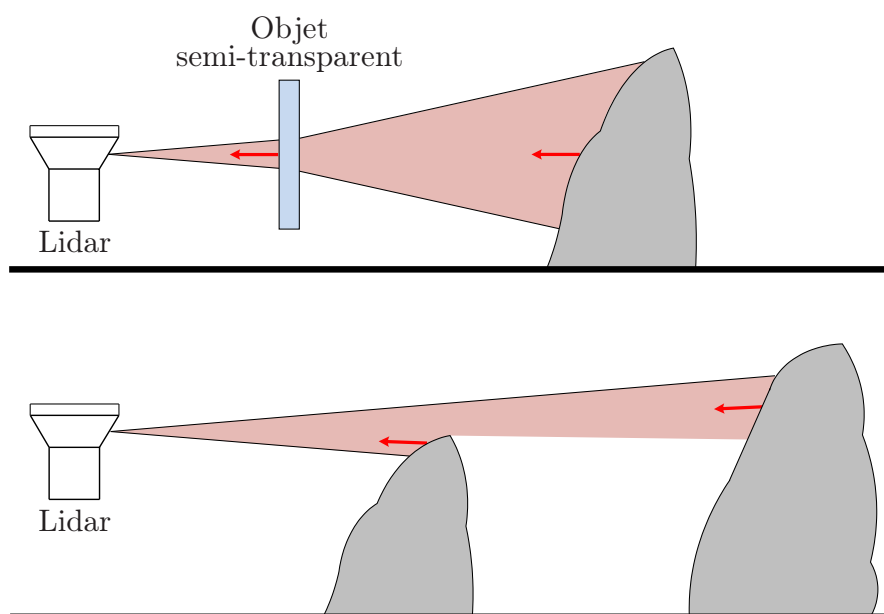


Figure 1.5 Phénomène des pixels mixtes

L'évolution des lidars permettra vraisemblablement d'en équiper les futurs robots mobiles qui exploreront les objets célestes. D'ailleurs, la technologie possède déjà du temps de vol spatial. Par exemple, le TriDAR (*Triangulation and Lidar*) fabriqué par Neptec est un appareil ayant participé à des missions spatiales et qui est constitué de deux sous-systèmes de vision utilisés de manière complémentaire : un système de triangulation active et un lidar fonctionnant selon le principe de mesure du temps de vol (Ruel et Luu, 2010). Cet outil de vision fut utilisé avec succès pour le rendez-vous et l'amarrage du vaisseau Discovery à la station spatiale internationale lors de la mission STS-128. Il fut ensuite de nouveau utilisé lors des missions STS-131 et STS-135. D'autres types de lidar furent embarqués à bord de certains satellites⁸. Un lidar analytique était aussi embarqué à bord de *Phoenix*, une plate-forme robotique stationnaire qui a atterri sur Mars en 2008. Bien qu'à ce jour aucun lidar 3D n'ait été intégré à des robots autonomes explorateurs de planète, il s'agit d'un sujet d'actualité étudié par plusieurs agences spatiales dont l'ASC (Rekleitis *et al.*, 2009a).

1.1.3 Systèmes de vision à capteurs mixtes

Le principe des systèmes de vision à capteurs mixtes est de fusionner de façon complémentaire l'information provenant de différentes technologies de capteur pour réaliser un système global plus performant. C'est désormais un standard en robotique mobile, la plupart des robots performants d'aujourd'hui étant équipés de tels systèmes. Énormément de combinaisons technologiques sont possibles pour optimiser la navigation des robots autonomes.

Par exemple, les cinq véhicules autonomes ayant réussi à franchir la ligne d'arrivée du Grand Darpa Challenge 2005 utilisaient tous des systèmes de vision à capteurs mixtes. *Stanley*, le robot qui a remporté l'épreuve, utilise 5 lidars 2D disposés sur le haut du véhicule pour la perception de l'environnement à courte distance, une caméra vidéo couleur pour la perception à moyenne distance et deux RADARs pour la détection des gros obstacles à de grandes distances (Thrun *et al.*, 2006). *Sandstorm* et *H1ghlander*, arrivés respectivement en deuxième et en troisième positions, utilisent chacun 4 lidars 2D SICK LMS291 pour les courtes distances et un lidar 2D Riegl LMS-Q140i pour les plus longues distances, *Sandstorm* possède en plus un RADAR pour la longue portée (Urmson *et al.*, 2006). Les radars sont fréquemment utilisés en complément aux lidars entre autres puisqu'ils ont l'avantage de ne pas être sensibles aux matières en suspension tel que la poussière, la pluie et la fumée. En effet, la plupart de ces appareils utilisent une longueur d'onde qui pénètre ce genre de substances qui nuisent toutefois aux lidars, d'où l'intérêt d'utiliser conjointement ces deux capteurs.

8. Daukantas (2009) fait une bonne revue des satellites et des autres types d'engins spatiaux sur lesquels des lidars furent installés.

Surmann *et al.* (2003) fusionnent une caméra avec un lidar 3D pour recaler des textures sur les nuages de points acquis. Le robot utilisé par Lamon *et al.* (2006) met en oeuvre trois lidars 2D, un lidar 3D et deux caméras vidéo. Similairement au travail précédent, les auteurs fusionnent les données du lidar 3D avec celles d'une des caméras vidéo afin de recaler des textures sur les nuages de points acquis. L'intérêt de cette fusion étant de faciliter l'identification des différents objets composant la scène 3D en se servant de la couleur. La caméra permet donc de segmenter et de classifier plus aisément les nuages de points.

Une nouvelle approche de plus en plus populaire consiste à fusionner le lidar 3D avec la caméra stéréoscopique. D'ailleurs, Litvak *et al.* (2012) soutiennent qu'il s'agit là d'une tendance dans le développement de systèmes de vision pour l'exploration spatiale extraplanétaire. La fusion des données générées peut se faire a priori et/ou a posteriori. Dans la fusion a priori, les données acquises par un lidar 2D ou 3D servent à diminuer le temps de calcul informatique que nécessite le problème d'appariement des points de la caméra stéréoscopique, tel que présenté dans l'article de Badino *et al.* (2011). La fusion a posteriori consiste quant à elle à utiliser les données générées par les deux capteurs pour produire une carte tridimensionnelle améliorée, tel que réalisé par Ronnholm *et al.* (2007).

1.1.4 Autres

D'autres types de capteurs moins adaptés à l'application dont il est question dans la présente recherche sont cependant utilisés par d'autres genres de robots. Sans en faire le tour complet, certains restent néanmoins dignes de mention.

Radar

Le radar est peu souvent utilisé seul pour la navigation autonome. Par contre, il peut être utile pour la fusion avec d'autres technologies complémentaires. La plupart des radars utilisés dans le cadre de la navigation autonome servent à détecter des obstacles potentiels. Ces appareils émettent généralement un signal radio EHF (*Extremely High Frequency*) ayant une longueur d'onde de l'ordre du millimètre. Ils peuvent habituellement sonder à des distances allant jusqu'à quelques centaines de mètres. Une application assez répandue de ces capteurs est le régulateur de vitesse adaptatif. Gholamhossein et Khaloozadeh (2008) présentent un tel exemple d'application et se basent uniquement sur le radar pour détecter les autres véhicules et choisir une vitesse appropriée. Les trois premiers robots mobiles ayant terminé le Grand Darpa Challenge 2005 utilisaient aussi un radar pour détecter les gros obstacles éloignés (Thrun *et al.*, 2006; Urmson *et al.*, 2006).

Sonar

Le sonar a l'avantage d'être économique, mais possède une précision limitée et une incertitude importante au niveau de l'angle auquel les distances sont mesurées. Aussi, la portée de ce type de technologie est limitée seulement à quelques mètres. Choi *et al.* (2005) étudient la localisation et la cartographie simultanées (SLAM) dans un environnement structuré en utilisant un robot équipé de 16 sonars. Ce travail démontre qu'il est possible d'effectuer de la navigation autonome à l'aide de capteurs économiques. Cependant, cette technologie reste inadaptée à la navigation autonome performante en environnement non structuré.

Système à triangulation active

Les systèmes à triangulation active utilisent un émetteur laser qui projette un patron connu vers la scène, ainsi qu'un capteur optique qui détecte la réflexion de ce patron spécial. En analysant les paramètres du patron dans l'image reçue, il est alors possible d'obtenir des mesures de distance. Un exemple est présenté par Basaca *et al.* (2010), où les auteurs se servent d'un tel système pour la détection et l'évitement d'obstacles. La précision de ce genre de système est de l'ordre de quelques millimètres sur les distances mesurées. En contrepartie, leur plage d'opération se limite souvent à quelques mètres et leur temps d'acquisition est plus lent que la technologie lidar. De plus, ces systèmes souffrent du compromis à faire entre la résolution et la distance séparant l'émetteur du capteur optique.

Flash lidar 3D

Le flash lidar 3D constitue une technologie prometteuse pour la robotique mobile (Lamarche, 2009). Leur principe de fonctionnement consiste en l'émission d'un signal laser modulé en fréquence qui couvre une grande partie de la scène. Une multitude de détecteurs captent alors simultanément la réflexion de ce signal et permettent de dresser un tableau de profondeurs. De plus en plus de capteurs de ce type arrivent sur le marché et il y a multiplication des travaux touchant la navigation à l'aide de ces derniers. Par exemple, Natale *et al.* (2010) étudient la détection et le suivi d'une cible à l'aide d'un flash lidar. Un fait intéressant est que cette technologie possède du temps de vol spatial. En effet, le DragonEye⁹ fut testé avec succès lors de la mission STS-127 (NASA, 2009; SpaceX, 2009). La NASA s'intéresse aussi à cette technologie en tant que capteur principal pour assister l'atterrissage automatique des futurs robots mobiles sur la Lune et sur Mars (Amzajerdian *et al.*, 2010). Malgré ces points favorables, la plupart des flash lidars 3D restent mal adaptés pour la navigation autonome. En effet, ces appareils sont souvent sensibles aux conditions d'éclairage ambiant et ne possèdent qu'un champ de vision restreint.

9. Un produit d'Advanced Scientific Concepts.

1.2 Caractérisation

La caractérisation d'un système de vision consiste à décrire le plus complètement possible l'ensemble des paramètres affectant les mesures effectuées par l'appareil et à quantifier leur impact. La caractérisation peut également s'étendre à la description mathématique du bruit affectant les mesures. L'intérêt de la caractérisation réside dans l'interprétation des données : le fait de bien connaître les facteurs d'influence et l'imprécision du système permet de tirer le maximum d'information des données acquises, en corrigeant par exemple celles-ci a posteriori à l'aide d'un modèle.

Plusieurs méthodes peuvent être répertoriées quant à la caractérisation des systèmes de vision actifs. Par exemple, Pito (1995) a étudié l'influence de plusieurs paramètres sur la mesure de distance et d'intensité d'un lidar Perceptron¹⁰ de type AM-CW. Ces paramètres comprennent entre autres l'angle d'incidence des rayons laser sur la cible, la réflectivité de la cible, le temps d'opération de l'appareil de mesure, la résolution utilisée lors de la mesure et l'ordre de grandeur des distances à mesurer. Kweon *et al.* (1991) ont aussi réalisé un travail de caractérisation du Perceptron, en étudiant toutefois quelques variables différentes, entre autres ; l'influence des réflexions internes, des zones ombragées, de la température, de la lumière ambiante et du type de matériel mesuré. Reina et Gonzales (1997) proposent un modèle de correction de la mesure de distance subséquent à la caractérisation d'un lidar Explorer¹¹ de type temps-de-vol.

Ces techniques sont toujours d'actualité et furent d'ailleurs reprises totalement ou en parties dans plusieurs travaux plus récents. Luo et Zhang (2004) utilisent ces principes et effectuent la caractérisation d'un lidar AccuRange 4000¹². Dans la même lignée, Okubo *et al.* (2009); Park *et al.* (2010) caractérisent des capteurs plus récents, soit respectivement le lidar UBG-04LX¹³ et UBG-04LX-F01¹³. Ye et Borenstein (2002) réalisent la caractérisation d'un LMS200¹⁴, un capteur beaucoup plus similaire du point de vue technique au LMS111¹⁴. La méthode employée consiste à utiliser un rail de positionnement linéaire ainsi qu'une table tournante pour positionner et orienter précisément les différentes cibles à étudier. Koceski *et al.* (2009) ont effectué une expérience de caractérisation d'un capteur laser LD-OEM1000¹⁴. Pour ce faire, la méthode employée place les différentes cibles à étudier sur un trépied. Par la suite, un télémètre laser très précis sert à positionner et à orienter lesdites cibles par rapport au repère du LD-OEM1000. La méthode employée a l'avantage d'être moins onéreuse que celle développée par Ye et Borenstein (2002) et permet tout de même l'étude de l'effet des

10. Perceptron Inc. of Farmington Hills Michigan

11. Schwartx Electro-optics Inc.

12. Acuity Research

13. Hokuyo Automatic Company

14. SICK inc.

mêmes paramètres sur les mesures de distance et d'intensité. Alwan *et al.* (2005) caractérisent le capteur infrarouge PBS-03JN¹⁵ et s'attardent aussi sur l'effet de la grosseur des cibles sur la mesure de distance.

1.3 Étalonnage

L'étalonnage (en anglais *calibration*) assure une plus grande précision d'un système par des ajustements à la suite de comparaisons avec un étalon de mesure. Pour un système de vision de type lidar 3D, il existe plusieurs types d'étalonnage et une multitude d'approches. Cette section en fait un survol en insistant sur les travaux plus pertinents à la présente recherche. On retrouve dans la littérature trois principaux types d'étalonnage concernant les lidars 3D : l'étalonnage temporel, l'étalonnage intrinsèque et l'étalonnage extrinsèque.

La méthode temporelle s'intéresse à l'identification des décalages temporels survenant entre chacune des émissions de rayon laser et à la synchronisation des horloges des processeurs du système de vision. Un tel exemple d'étalonnage est présenté par Mark Sheehan et Newman (2012), où les auteurs effectuent l'étalonnage temporel d'un système de vision utilisant trois lidars 2D, tous installés sur une table rotative commandée par un microcontrôleur. Ce dernier exemple illustre bien l'importance que revêt l'étalonnage temporel. En effet, advenant une mauvaise synchronisation entre la table rotative et les différents capteurs lidars, des erreurs d'angles surviendront et contamineront l'interprétation de l'ensemble des mesures.

L'étalonnage intrinsèque s'intéresse à l'estimation des paramètres internes du capteur lidar qui définissent la configuration (position et orientation) de chaque rayon laser que ce dernier émet. Bien que les fabricants étalonnent normalement leur appareil de mesure, il arrive souvent qu'il y ait un bénéfice à procéder à ce type d'étalonnage. Les méthodes utilisées sont principalement géométriques. Celles-ci consistent généralement à employer différentes cibles connues afin de définir de manière assez précise les paramètres géométriques à identifier, par exemple le déphasage angulaire entre chacun des rayons laser émis. Muhammad et Lacroix (2010) effectuent un étalonnage intrinsèque du Velodyne HDL-64E en utilisant cette approche. Dans ce travail, les auteurs mettent sur pied un modèle géométrique du capteur qui admet trois paramètres incertains : la distance mesurée et les deux angles définissant l'orientation du rayon laser émis. Par la suite, des plans positionnés à différentes distances du capteur sont balayés. Une analyse en composantes principales est alors effectuée sur les mesures des plans d'étalonnage, ce qui permet de définir mathématiquement les différents plans mesurés par le capteur. Finalement, les auteurs élaborent un problème d'optimisation non linéaire sur les paramètres incertains qui consiste à minimiser la somme des variances en x, y, z . Ceci

15. Hokuyo Automatic Co.

permet d'identifier les paramètres incertains et d'améliorer substantiellement l'interprétation des données transmises par l'appareil de mesure.

L'étalonnage extrinsèque, de son côté, consiste à déterminer précisément la pose du système de vision dans un repère de référence, par exemple dans le repère de base d'un robot mobile. Ceci revient donc à identifier les six paramètres de la matrice de transformation définissant la pose du système de vision¹⁶. Cet étalonnage est nécessaire puisque les erreurs commises sur les six degrés de liberté de la pose du capteur se propageront directement dans l'interprétation des mesures du lidar. Par exemple, des erreurs d'orientation de seulement 1° en azimuth et en élévation résultent en une erreur de position de l'ordre de 0.5 mètre à des distances de 20 mètres. Vu son importance, plusieurs recherches proposent des solutions pour aborder ce type d'étalonnage. La plupart repose sur des principes géométriques qui consistent à balayer une cible ou une scène connue pour ensuite retrouver précisément la pose du système à l'aide de la minimisation d'une fonction objectif appropriée. Un exemple notable d'étalonnage extrinsèque est celui présenté par James Underwood (2007) où les auteurs étalonnent un lidar 2D installé sur un robot mobile. Dans ce travail, un poteau recouvert de matériel réfléchissant¹⁷ et perpendiculaire au sol est utilisé. Le robot se déplace et le système de vision recueille plusieurs données. Après avoir obtenu assez d'observations de cette scène pré-déterminée, un problème d'optimisation non linéaire est formulé en fonction des six degrés de liberté de la pose à identifier. Plus précisément, les auteurs proposent la minimisation des variances en x et y pour les points reliés au poteau, ainsi que la minimisation de la variance en z pour les points reliés au sol. Ceci suppose bien entendu un poteau compact et un sol bien horizontal-plan. La méthode adoptée pour résoudre ce problème d'optimisation est alors la programmation quadratique séquentielle (SQP). Un thème tout aussi important abordé dans cette recherche est l'énoncé de critères mathématiques nécessaires au succès de l'étalonnage. On mentionne particulièrement l'importance qu'aucune des dérivées partielles de la fonction objectif par rapport aux paramètres à identifier ne soient triviales. Dans le cas d'une fonction objectif de type variance, les critères à respecter sont les suivants :

$$\frac{\partial {}^rP}{\partial \rho} \neq 0 \quad \forall \rho \in S \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial^2 {}^rP}{\partial \rho \partial \zeta} \neq 0 \quad \exists \zeta \in V, \forall \rho \in S \quad (1.4)$$

rP est la relation qui exprime les points donnés par le système de vision dans le repère de référence r , ρ est un paramètre incertain, S est l'ensemble des paramètres incertains et V

16. Dans la littérature, cette matrice est souvent désignée sous le nom de « matrice d'installation ».

17. L'utilisation de matériel réfléchissant sert à segmenter plus facilement les points qui représentent le poteau, en se servant de l'intensité.

est l'ensemble des variables indépendantes influençant la position des points P . L'équation 1.3 stipule que tous les paramètres incertains doivent avoir un effet sur les points exprimés dans le repère de référence afin de permettre leur identification. L'équation 1.4 indique que les paramètres incertains ne doivent pas influencer tous les points de la même façon. En effet, un paramètre ne respectant pas ce critère ne change pas la variance, ce qui rend donc impossible son identification à l'aide d'une fonction objectif de type variance. Cette méthode est généralisée pour l'étalonnage de plus d'un capteur dans l'article de James P. Underwood et Scheduling (2010). Un exemple analogue à ces méthodes est présenté par Gao et Spletzer (2010), où l'étalonnage de deux lidars est effectué simultanément en utilisant des collants réfléchissants disposés sur des poteaux mâts. Dans cette recherche, les auteurs proposent également la minimisation d'une fonction objectif de type variance, mais posent cette fois le problème sous forme de l'optimisation d'un cône de deuxième ordre (SOCP). Ceci leur permet d'obtenir une solution en quelques secondes tout au plus, donc significativement plus rapidement qu'en utilisant des méthodes non-linéaires. D'ailleurs, les auteurs soutiennent que leur méthode peut être utilisée en temps réel. Cependant, bien que le SOCP soit plus efficace à résoudre au niveau du temps, des erreurs de linéarisation amènent un certain lot d'imprécision. Sheehan *et al.* (2010); Mark Sheehan et Newman (2012) proposent d'optimiser une fonction mathématique indiquant le degré d'organisation d'un nuage de points pour identifier la pose de leur système de vision. Concrètement, les auteurs utilisent pour ce faire la mesure de l'entropie quadratique de Rényi.

Que ce soit pour l'étalonnage intrinsèque ou extrinsèque, les approches géométriques nécessitent des cibles et/ou des scènes particulières afin d'identifier totalement ou en partie la pose d'un système de vision. Par exemple, le balayage d'un seul plan perpendiculaire à un système de vision ne permet pas l'identification des six degrés de liberté de l'appareil. Il est donc évident qu'une attention particulière doit être accordée au choix des cibles et/ou des scènes. Celles-ci devraient être suffisamment complexes et précises pour permettre de retrouver précisément les paramètres à identifier, sans être trop compliquées à construire et à mettre en oeuvre. Xiang et Wu (2006) utilisent seulement une barre de bois droite pour étalonner un lidar 3D. Bien que la démarche soit très simple, le prix à payer est l'identification de seulement trois paramètres de la pose du système. Antone et Friedman (2007) conçoivent une cible pyramidale spéciale basée sur un polypode qui permet de retrouver les six paramètres de la pose en effectuant un seul balayage 2D. Cet objet d'étalonnage est aussi repris dans les travaux de Yang *et al.* (2011). Cette cible est intéressante, mais la méthode proposée n'utilise qu'un petit nombre de points pour effectuer l'étalonnage, ce qui diminue la précision de l'approche. Il reste toutefois possible d'exécuter plusieurs balayages et/ou d'utiliser plus d'une de ces cibles pour augmenter la précision. Choudhuri (2007) utilise un cuboctaèdre modifié appelé RAC

(*Reduced-Ambiguity Cuboctahedron*) pour retrouver la pose d'un TriDAR. La cible fut conçue de manière à permettre de retrouver la pose d'un système de vision à l'aide de l'ICP de façon optimale. Une telle cible pourrait donc aussi être utilisée pour l'étalonnage, mais reste tout de même difficile à construire. Muhammad et Lacroix (2010); Atanacio-Jimenez *et al.* (2011) utilisent des surfaces planaires pour l'étalonnage. Les surfaces planaires ont l'avantage d'être plus simples à mettre en oeuvre, mais doivent être orientées précisément pour permettre une identification adéquate de la pose.

1.4 Traitement des données

Les données que génèrent les lidars 3D doivent être traitées afin de pouvoir les utiliser pour la navigation autonome. L'ASC, dans le cadre de ses activités de recherche en robotique mobile, a déjà développé un ensemble d'algorithmes qui ont démontré leur efficacité à traiter ce type de données. Un bon aperçu des différentes étapes du traitement, dont une partie est reprise pour la présente recherche, se trouve dans les travaux de Lamarche (2009); Gingras (2010); Gingras *et al.* (2010), et est approfondie au chapitre 5. Cette section se concentre plutôt sur le traitement de l'intensité. Ceci est nécessaire puisque *CORIAS*, comparativement à l'ancien système de vision qui était en service sur Red¹⁸ et décrit par Lamarche (2009), permet aussi d'obtenir la valeur d'intensité associée à chacune des mesures de distance. Il est donc essentiel d'étudier le traitement de cette information dans le contexte de la navigation autonome.

1.4.1 Traitement de l'intensité

Lorsque *CORIAS* sonde l'environnement, il émet une série d'impulsions laser dont certaines seront réfléchies vers le capteur. Le capteur mesure alors la distance et l'intensité associées à chacune de ces réflexions et renvoie ces informations sous forme d'entiers positifs. La valeur d'intensité est sujette au principe de conservation de l'énergie :

$$I_I = I_R + I_T + I_A \quad (1.5)$$

I_I est l'intensité du rayon incident, I_R est l'intensité de la réflexion (mesurée par le capteur), I_T est l'intensité du rayon transmis et I_A est l'intensité absorbée, tous en Watt/mètre². Également ;

$$1 = R + T + A \quad (1.6)$$

18. *Red* est le nom donné à l'ancienne plate-forme robotique utilisée pour les activités de recherche en robotique mobile de l'ASC.

R est le coefficient de réflexion du matériel frappé par le rayon, T est son coefficient de transmission et A son coefficient d'absorption. L'intérêt premier de la mesure d'intensité pour la navigation autonome réside dans la segmentation et la classification des points. En effet, des objets distincts ont souvent des coefficients de réflexion R inégaux et réfléchiront donc la lumière avec une intensité différente, ce qui permet de différencier les éléments d'une scène. Un autre exemple commun est la visualisation des nuages de points, qui peuvent souvent contenir plusieurs centaines de milliers de points, et qui sont définitivement plus faciles à interpréter lorsque ces derniers sont colorés en fonction de l'intensité. De leur côté, Stipes *et al.* (2008) dérivent les valeurs d'intensité et utilisent une valeur-seuil dynamique afin d'extraire les arêtes dans un nuage de points. Ye (2008) utilise les valeurs d'intensité conjointement aux valeurs de distance pour détecter des pixels mixtes.

Bien qu'elles soient très utiles, les mesures d'intensité brutes ne sont pas uniquement fonctions de R . Elles sont aussi fonctions de paramètres supplémentaires rendant plus difficile de différencier les éléments d'une scène. Des facteurs non-négligeables, autres que R , influencent les valeurs d'intensité. Les principaux sont notamment la distance entre le capteur et l'élément touché par le rayon, ainsi que l'angle d'incidence que forme un rayon avec l'élément incident (cible). Il est donc avantageux de normaliser les valeurs d'intensité en fonction de la distance et de l'angle d'incidence, dans le but d'obtenir une carte d'intensité qui représente plus fidèlement les différences entre chacun des composants de la scène. Il est possible d'accomplir ceci d'une part parce que le lidar renvoie directement la valeur de distance associée aux valeurs d'intensité. D'autre part, les angles d'incidence peuvent être calculés en déterminant l'équation du plan moyen interpolant un point et son voisinage (Hofle et Pfeifer, 2007). Une méthode plus générale visant à déterminer l'angle d'incidence d'un point en fonction de ses points voisins est celle présentée par Gross et Thoennessen (2006); Jutzi et Gross (2008). Cette dernière consiste à segmenter le nuage de points en régions planaires. Pour chacun des points, la matrice de covariance du point et de son voisinage est calculée et un test de planéité est effectué (West *et al.*, 2004) :

$$P = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_1} \quad (1.7)$$

P est la planéité du point et $\lambda_{1,2,3}$ sont les valeurs propres de la matrice de covariance du point triées en ordre décroissant. Si la planéité d'un point est vérifiée, alors sa valeur d'intensité est normalisée en fonction de l'angle d'incidence associé au plan auquel il appartient.

Dans la littérature, il existe deux approches répandues pour trouver la relation appropriée permettant de normaliser les valeurs d'intensité : l'approche par modèle et l'approche par données.

Approche par modèle

Afin de normaliser les valeurs d'intensité, l'approche par modèle consiste à se référer à un modèle physique liant cette intensité aux variables desquelles elle dépend. Dans la littérature, différents modèles sont proposés, ces derniers reposant généralement sur différentes lois issues du domaine de l'optique et/ou de la physique des ondes. En ce qui a trait à la normalisation de l'intensité en fonction de la distance, une approche répandue découle de l'équation-radar¹⁹ appliquée au lidar telle que démontrée par Jelalian (1992); Wagner *et al.* (2006) :

$$P_r = \frac{P_t D_r^2}{4\pi R^4 \beta_t^2} \sigma \quad (1.8)$$

P_r est la puissance reçue par le récepteur du lidar, P_t est la puissance émise par le transmetteur du lidar, D_r est le diamètre de l'ouverture du récepteur, R est la distance entre le capteur et la cible²⁰, β_t est le diamètre au transmetteur du rayon émis et σ est appelé « coupe transversale de la rétrodiffusion » . Ce dernier paramètre est entièrement défini par les caractéristiques du matériel incident, il est donné par :

$$\sigma = \frac{4\pi}{\Omega} \rho A_s \quad (1.9)$$

Ω est l'angle solide du cône de la rétrodiffusion, ρ est la réflectivité de l'élément incident et A_s est l'aire de l'empreinte que forme le laser sur la cible. Si le rayon incident est parfaitement normal à la surface de la cible (angle d'incidence nul) de tel sorte que l'aire A_s est circulaire, alors :

$$A_s = \frac{\pi R^2 \beta_t^2}{4} \quad (1.10)$$

En substituant 1.9 et 1.10 dans l'équation 1.8 :

$$P_r = \frac{\pi \rho P_t D_r^2}{4 R^2 \Omega} \quad (1.11)$$

Donc, pour un angle d'incidence nul, si toutes les variables de l'équation-radar sont constantes à l'exception de la distance R et si la cible est lambertienne²¹ de telle sorte que Ω est constant, alors la puissance captée par le récepteur peut s'exprimer par (Kaasalainen *et al.*, 2011) :

$$P_r = \frac{K_1}{R^2} \quad (1.12)$$

19. Dans certains travaux, l'équation-radar est parfois appelée « équation-lidar » ou encore « équation du télémètre laser », notamment dans les travaux de Pfeifer *et al.* (2007, 2008).

20. Ici, la cible est supposée parfaitement homogène.

21. Une cible « lambertienne » est une cible qui possède des caractéristiques de réflexion diffuse idéales.

K_1 est une constante qui regroupe les variables P_t , D_r et β_t . L'équation 1.12 implique une puissance inversement proportionnelle à R^2 . Ceci est vrai pour toute cible étendue, c'est-à-dire pour toute cible qui couvre entièrement l'empreinte du laser, mais ne tient plus pour les cibles non-étendues. Par exemple, pour une cible-point plus petite que l'aire de l'empreinte du laser, comme un grain de sable, A_s ne dépend pas de R et la puissance captée est alors inversement proportionnelle à R^4 . Similairement, pour une cible linéaire qui couvre seulement une partie de l'empreinte du laser, par exemple un fil électrique, A_s dépend linéairement de R et la puissance captée est inversement proportionnelle à R^3 . Les cibles étendues seront toutefois considérées pour la suite des démarches. L'équation 1.12 peut donc être utilisée pour normaliser l'intensité en fonction de la distance. Cette façon de faire est discutée dans plusieurs travaux, entre autres ceux de Luzum *et al.* (2004); Jutzi et Gross (2008); Kaasalainen *et al.* (2011). Puisque la mesure d'intensité est directement liée à la puissance captée par l'appareil, l'intensité normalisée en fonction de la distance, $I_{DistNorm}$, peut alors s'exprimer simplement par :

$$I_{DistNorm} = C_1 R^2 \quad (1.13)$$

C_1 est un facteur de proportionnalité. Jelalian (1992); Hofle et Pfeifer (2007); Pfeifer *et al.* (2008); Jutzi et Gross (2008) suggèrent un modèle plus complexe que l'équation 1.8, mais plus exact :

$$P_r = \frac{P_t D_r^2}{4\pi R^4 \beta_t^2} \eta_{sys} \eta_{atm} \sigma \quad (1.14)$$

η_{sys} est une fonction d'ajustement qui tient compte des paramètres du système. Par exemple, elle permet de corriger la puissance en tenant compte de la fréquence d'émission / réception des impulsions laser. η_{atm} est une fonction d'ajustement qui permet de prendre en compte le niveau de transmission de l'atmosphère. Par exemple Hofle et Pfeifer (2007) utilisent :

$$\eta_{atm} = 10^{\frac{-2Ra}{10000}} \quad (1.15)$$

R est la distance, et a le coefficient d'atténuation atmosphérique en décibels. Jutzi et Gross (2008) utilisent une équation similaire :

$$\eta_{atm} = e^{-2\alpha R} \quad (1.16)$$

α est le coefficient d'atténuation atmosphérique. La démarche élaborée jusqu'ici suppose par contre un rayon parfaitement normal à la cible. Soit désormais un angle d'incidence (ψ) défini comme le plus petit angle entre le vecteur orienté selon la trajectoire du rayon laser et le vecteur normal à la surface de la cible. Alors, pour tout $\psi \neq 0$, la loi de Lambert stipule que la coupe transversale de la rétrodiffusion est proportionnelle au cosinus de l'angle d'incidence

(Hofle et Pfeifer, 2007) et l'équation 1.8 devient simplement :

$$P_r = \frac{P_t D_r^2}{4\pi R^4 \beta_t^2} \eta_{sys} \eta_{atm} \sigma \cos(\psi) \quad (1.17)$$

Si toutes les variables de l'équation 1.17 sont constantes à l'exception de l'angle d'incidence ψ , alors :

$$P_r = K_2 \cos(\psi) \quad (1.18)$$

K_2 est une constante qui combine P_t , D_r , R , β_t , σ , η_{sys} et η_{atm} . Cette dernière équation peut être utilisée pour normaliser l'intensité en fonction de l'angle d'incidence :

$$I_{AngleNorm} = C_2 \cos^{-1}(\psi) \quad (1.19)$$

Il est donc possible de normaliser l'intensité en fonction de la distance et de l'angle d'incidence en utilisant une équation de la forme :

$$I_{Norm} = C R^2 \cos^{-1}(\psi) \quad (1.20)$$

Ou encore, en tenant compte de 1.14 et de 1.16 :

$$I_{Norm} = C R^2 e^{2\alpha R} \cos^{-1}(\psi) \quad (1.21)$$

Le facteur de proportionnalité C est généralement déterminé à l'aide de méthodes expérimentales, α peut aussi être déterminé expérimentalement, ou encore à l'aide de chartes de références.

Approche par données

L'approche par données consiste à bâtir une ou plusieurs fonctions mathématiques qui permettent d'exprimer l'intensité comme fonction de la distance et de l'angle d'incidence. Ces fonctions pourront servir subséquemment pour la normalisation. Elles mettent en oeuvre des paramètres a priori inconnus qu'il suffit d'identifier par le biais d'expériences et de techniques d'ajustement de courbe (*curve fitting*). Avec l'approche par données, tous les effets physiques ayant une répercussion sur l'intensité seront partiellement compensés par le modèle mathématique établi. Ceci permet de corriger en partie l'intensité en fonction des variables physiques connues (e.g. la distance), mais aussi en fonction des variables inconnues et/ou non mesurées (Hofle et Pfeifer, 2007). Souvent, les fonctions mathématiques utilisées dans

l'approche par données prennent une forme similaire à celle présentée par Pfeifer *et al.* (2008) :

$$I + e_I = i(r, \rho, \alpha, \dots) \quad (1.22)$$

I est l'intensité, e_I est le résidu et $i()$ est une fonction d'estimation de l'intensité. Cette dernière est construite de façon expérimentale et dépend généralement de la distance (r), de la réflectivité de la cible (ρ) ainsi que de l'angle d'incidence (α). La fonction $i()$ ne se limite toutefois pas à ces seules variables et peut tenir compte d'encore plus de paramètres. Bien que la structure de la fonction $i()$ soit arbitraire, il est souhaitable qu'elle respecte certains critères afin de ne pas bâtir, par exemple, une fonction mathématique vide de sens physique. Pfeifer *et al.* (2008) font d'ailleurs mention des critères suivants :

1. La fonction $i()$ doit bien représenter les données. Afin de mesurer le niveau de représentation des données par $i()$, il est possible d'étudier les résidus :

$$e_{I,j} = i(r_j, \rho_j, \alpha_j) - I_j \quad (1.23)$$

$e_{I,j}$ est le résidu de l'intensité du point j , où $j = 1, \dots, n$, et n est le nombre total de points. Il suffit alors de calculer l'écart-type des résidus pour obtenir un indice de représentation des données :

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum e_{I,j}^2}{n - u}} \quad (1.24)$$

σ_0 est l'écart-type des résidus et u est le nombre de paramètres inconnus de la fonction $i()$

2. La fonction $i()$ ne doit pas contredire des principes physiques de base. Par exemple, il faut que l'intensité décroisse lorsque la distance croît ou lorsque l'angle d'incidence augmente.
3. La fonction $i()$ doit conserver, autant que possible, les principales propriétés mathématiques que possèdent les données. Par exemple, si ces dernières possèdent une propriété de monotonie, $i()$ devrait aussi partager cette propriété.

Pfeifer *et al.* (2007) proposent un critère supplémentaire :

4. Autant que possible, la fonction $i()$ devrait être d'une forme simple tels que le sont les fonctions polynomiales d'ordre peu élevé, les fonctions logarithmiques et exponentielles. Le nombre de paramètres à identifier devrait lui aussi être minimal, de manière à éviter la sur-paramétrisation.

Hofle et Pfeifer (2007) utilisent l'approche par données et testent différentes fonctions mathématiques pour prédire l'intensité en fonction de la distance, pour un lidar ALTM3100²² installé sur un avion. Ils étudient plus particulièrement deux fonctions pour normaliser l'intensité en fonction de la distance :

$$i_1(r) = \frac{i_{1000}}{ar^2 + br + (1 - 1000^2a - 1000b)} \quad (1.25)$$

$$i_2(r) = (1 - 1000c_1 - 1000^2c_2 - \dots) + c_1r + c_2r^2 + \dots \quad (1.26)$$

$i_{1,2}$ représentent l'intensité, r est la distance, i_{1000} est l'intensité d'une surface de référence à 1 000 mètres et a, b, c_1, c_2 sont des paramètres inconnus à identifier. Leur démarche consiste à survoler une région possédant un coefficient de réflexion R supposé quasi-constant (e.g., une route asphaltée). Les auteurs ne considèrent que les points ayant un angle d'incidence presque identique. Finalement, tous les rayons laser qui n'ont pas frappé de cibles étendues sont rejetés²³. Une fois les données pertinentes identifiées, un algorithme de minimisation de l'erreur au carré est employé afin de déterminer la valeur des paramètres. Pfeifer *et al.* (2008) utilisent l'approche par données après avoir discuté des limitations inhérentes à l'approche par modèle. Ils abordent l'approche par données en étudiant principalement deux catégories de modèles mathématiques :

1. L'*approche par séparation*, qui admet des modèles mathématiques de la forme :

$$I + e_I = i_1(r)i_2(k) + i_3 \quad (1.27)$$

Où ;

$$k = \rho \cos(\alpha) \quad (1.28)$$

I est l'intensité mesurée, r est la distance, ρ est le coefficient de réflexion et α est l'angle d'incidence.

Et ;

2. L'*approche par rassemblement*, qui admet des modèles mathématiques de la forme :

$$I + e_I = i_4(k, i_5(r)) \quad (1.29)$$

Ces façons de faire leur permettent d'obtenir des résultats plus concluants que ceux obtenus à l'aide de l'approche par modèle.

22. Optech Inc.

23. Les auteurs suppriment les points pour lesquels le lidar a reçu une double réflexion.

CHAPITRE 2

DÉFINITION DES OBJECTIFS DE RECHERCHE

Dans un premier temps, ce chapitre présente le contexte dans lequel s'inscrit le travail de recherche. L'objectif global et les objectifs spécifiques seront ensuite énoncés. Ils serviront de points de référence pour la suite du travail en ce qui concerne la méthodologie, la conception et la validation du produit final.

2.1 Mise en contexte

Dans le cadre de ses activités de recherche en robotique mobile, l'ASC vise à développer des systèmes et des algorithmes permettant à un robot mobile de franchir de grandes distances¹ de façon autonome. Pour ce faire, elle se sert de robots mobiles développés par l'industrie en les utilisant comme plates-formes pour la recherche et le développement. Au début de ce projet, l'ASC utilisait un robot mobile Pioneer 2-AT² modifié (voir la figure 2.1). Ce dernier était d'ailleurs équipé du système de vision basé sur la technologie lidar en fonction à cette époque. Lamarche (2009) décrit justement la conception et l'intégration de ce système, nommé FCL³.

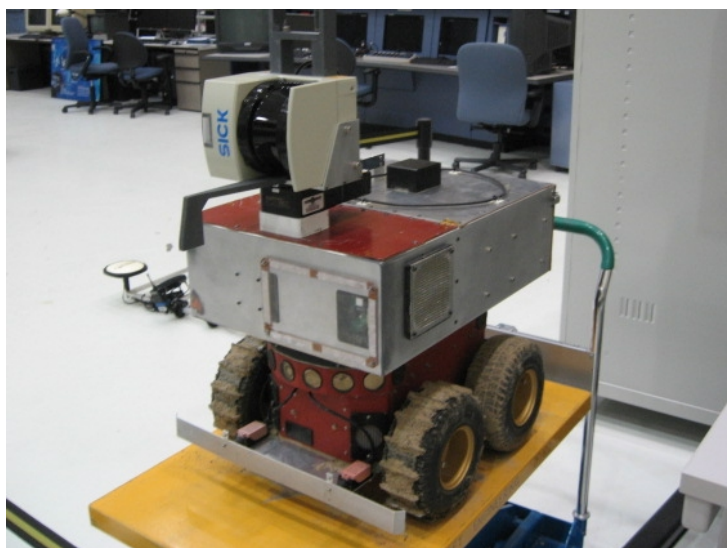


Figure 2.1 Robot mobile *Red* équipé du système de vision précédent

-
1. Le terme « grandes distances » réfère à des distances qui dépassent l'horizon sensoriel du robot.
 2. Adept MobileRobots
 3. *Full Coverage Lidar*

Bien que tous les robots mobiles envoyés à ce jour sur Mars employaient des caméras passives comme capteurs principaux pour la représentation 3D de l'environnement, l'ASC mise plutôt sur le lidar pour accomplir cette même fonction. Ce fait s'explique par les multiples avantages reliés aux lidars⁴, entre autres leur insensibilité aux conditions d'éclairage, leur excellente précision et le fait qu'ils nécessitent une plus petite puissance de traitement informatique que celle associée aux caméras stéréoscopiques (Rekleitis *et al.*, 2009a,b). Bien que le FCL ait servi de manière satisfaisante les activités de recherche de l'ASC durant ces dernières années, de nouveaux capteurs lidars ont fait leur apparition sur le marché permettant dès lors la conception d'un système de vision plus performant. Un des principaux inconvénients relié au capteur FCL est son faible débit de données imposé par la disponibilité d'un seul lien série RS-232 pour communiquer, rendant impossible le balayage en continu. Cette dernière caractéristique oblige donc la réalisation des balayages de façon séquentielle, c'est-à-dire en effectuant des arrêts à chaque angle d'azimut pour permettre au lidar d'acquérir ses données et au système de les retransmettre au client. Conséquemment, une seule acquisition à couverture totale prend un temps variant entre 4 et 10 minutes environ (Lamarche, 2009), dépendamment de la résolution choisie. Ceci peut être contraignant, étant donné que durant la période allouée au balayage, le robot demeure immobile et que les algorithmes de navigation subséquents sont en attente de ces données essentielles.

Ces dernières années, l'ASC a octroyé plusieurs contrats à l'industrie pour la conception de robots mobiles, afin de créer une expertise canadienne dans ce domaine. Dans ce contexte, le groupe de robotique de l'ASC a pris possession en 2010 d'un nouveau robot mobile à action différentielle nommé *Juno*⁵ (illustré à la figure 2.2). Celui-ci diffère en plusieurs points de



Figure 2.2 Robot mobile *Juno*

4. Ceux-ci sont discutés à la section 1.1.2.

5. Conçu principalement par Neptec Technologies Corp. et Ontario Drive & Gear Ltd.

l'ancien robot Pioneer 2-AT. Il est plus gros et plus lourd, mais aussi plus rapide, plus robuste et mieux préparé à accueillir des charges utiles permettant des opérations telles que le forage, l'excavation, la préparation des sites d'atterrissage et même le transport d'astronaute(s) (Neptec Design Group, 2013). Le moment était donc idéal pour concevoir un nouveau système de vision 3D plus performant pouvant ensuite être installé sur ce nouveau robot.

2.1.1 Principes de la navigation autonome

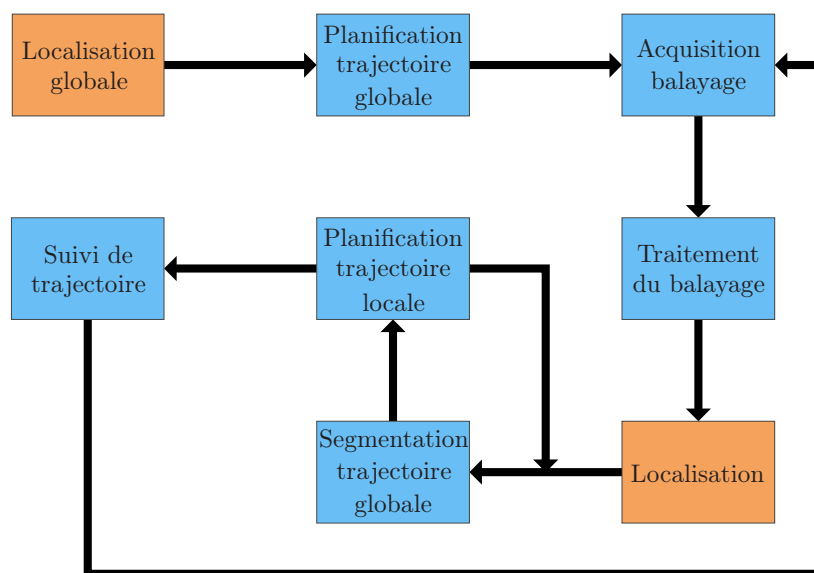


Figure 2.3 Principe de la navigation autonome (adapté de Rekleitis *et al.* (2009a))

Afin d'effectuer la navigation autonome, l'ASC met de l'avant la méthode cyclique représentée par la figure 2.3. Cette approche suggère qu'une carte⁶ est disponible a priori et que la position du robot dans cette carte est connue de manière assez précise⁷. Un opérateur détermine une destination à atteindre dans la carte et un algorithme crée alors une trajectoire globale. C'est ensuite le système de vision qui entre en jeu en effectuant un balayage à couverture totale. Les données recueillies sont alors traitées par une série d'algorithmes expliqués au chapitre 5. Entre autres, certains algorithmes basés sur l'ICP corrigent l'odométrie du robot et le localisent plus précisément, tandis que d'autres déterminent la surface navigable et atteignable entourant le robot, à l'intérieur d'un certain rayon. Ces informations permettent de segmenter la grande trajectoire globale et de déterminer une destination locale à atteindre sur cette zone navigable et atteignable. Par la suite, une trajectoire liant la position actuelle

6. Plus ou moins détaillée

7. En ce qui a trait à l'orientation du robot, celle-ci peut être déterminée à l'aide de capteurs installés directement sur le robot. Par exemple, à l'aide d'un capteur de soleil (*Sun sensor*) et d'une centrale inertielle.

du robot à cette destination locale est définie de manière à minimiser l'énergie nécessaire au déplacement. La définition de cette trajectoire, basée sur des équations issues du domaine des écoulements de fluide, est expliquée en détails par Gingras (2010). Finalement, l'étape du suivi de trajectoire est celle où le contrôleur commande automatiquement les moteurs du robot de façon à ce qu'il suive cette trajectoire efficacement, c'est-à-dire avec une erreur de suivi minimale ainsi qu'une vitesse appréciable, mais sécuritaire.

Le contrôleur dont il est question est fortement inspiré des travaux d'Astolfi (1999). Le principe repose sur la modélisation simple du robot à action différentielle illustrée à la figure 2.4.

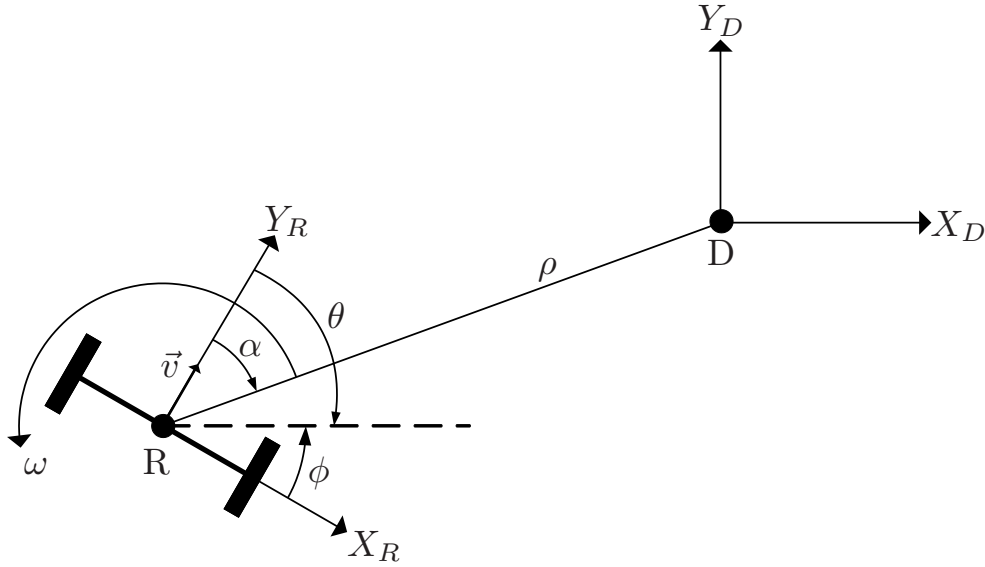


Figure 2.4 Modélisation d'un robot à action différentielle (adapté d'Astolfi (1999))

R est le repère associé au robot mobile et D est celui associé à la destination à atteindre. Les équations cinématiques du robot sont données par :

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \|\vec{v}\| \cos(\theta) \\ \dot{y} &= \|\vec{v}\| \sin(\theta) \\ \dot{\theta} &= \omega\end{aligned}\tag{2.1}$$

En considérant des conditions initiales nulles et le changement de coordonnées suivant :

$$\begin{aligned}\rho &= \sqrt{x^2 + y^2} \\ \alpha &= -\theta + \arctan\left(\frac{-y}{-x}\right) \\ \phi &= \frac{\pi}{2} - \theta\end{aligned}\tag{2.2}$$

Les équations cinématiques sont alors données par :

$$\begin{aligned}\dot{\rho} &= -\|\vec{v}\| \cos(\alpha) \\ \dot{\alpha} &= \frac{\|\vec{v}\| \sin(\alpha)}{\rho} - \omega \\ \dot{\phi} &= -\omega\end{aligned}\tag{2.3}$$

En utilisant la loi de commande proposée par Astolfi (1999), c'est-à-dire :

$$\begin{aligned}\|\vec{v}\| &= k_\rho \rho \\ \omega &= k_\alpha \alpha + k_\phi \phi\end{aligned}\tag{2.4}$$

Les équations du système cinématique linéarisé autour du point d'équilibre $\alpha = 0$, sous forme de modèle d'état, s'expriment alors par :

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_\rho & 0 & 0 \\ 0 & k_\rho - k_\alpha & -k_\phi \\ 0 & -k_\alpha & -k_\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho \\ \alpha \\ \phi \end{bmatrix}\tag{2.5}$$

Afin d'assurer la stabilité de ce système, il suffit de poser les gains k_ρ , k_α et k_ϕ de sorte que les valeurs propres de la matrice d'état soient toutes à partie réelle négative. Ceci implique le respect de trois critères, tel que démontré par Astolfi (1999). Il est possible de formuler un ensemble de critères encore plus puissants en contraignant en outre la dynamique angulaire (états α et ϕ) afin qu'elle ne soit pas oscillante, tout en constatant que le modèle d'état 2.5 est bloc-diagonal. Ce système d'ordre 3 peut donc être découpé en un sous-système d'ordre 1 (état ρ) et un sous-système d'ordre 2 (états α et ϕ). Le polynôme caractéristique du sous-système d'ordre 2 est de la forme :

$$P(s) = s^2 + (k_\alpha + k_\phi - k_\rho)s - k_\rho k_\phi = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2\tag{2.6}$$

Pour garantir que le régime transitoire ait une dynamique critiquement amortie ou sur-amortie, il faut avoir la condition $\zeta \geq 1$, ce qui se traduit par le critère :

$$\zeta = \frac{k_\alpha + k_\phi - k_\rho}{2\sqrt{-k_\rho k_\phi}} \geq 1\tag{2.7}$$

Puisque le critère 2.7 implique que $k_\alpha + k_\phi - k_\rho > 0$, seulement deux autres critères sont nécessaires afin d'assurer la stabilité locale du système complet :

$$k_\rho > 0 \quad (2.8)$$

$$k_\phi < 0 \quad (2.9)$$

En choisissant k_ρ , k_α et k_ϕ de façon à ce que les critères 2.7, 2.8 et 2.9 soient respectés, le coefficient d'amortissement ζ de la dynamique angulaire sera ≥ 1 et toutes les valeurs propres du système 2.5 seront à partie réelle négative. Le contrôleur permet alors bel et bien de mouvoir le robot de manière autonome le long de la trajectoire désirée jusqu'à la destination locale. Une fois arrivé, le système de vision refait l'acquisition d'un balayage à couverture totale et le cycle de la figure 2.3 recommence. Il en va ainsi jusqu'à ce que le robot atteigne la destination finale déterminée a priori par l'opérateur.

2.1.2 Environnement d'expérimentation et de validation

En plus de ses laboratoires intérieurs, l'ASC dispose d'un laboratoire extérieur spécialement conçu pour les expériences de navigation autonome (figure 2.5). Ce dernier occupe une surface de 120m \times 60m et reproduit plusieurs caractéristiques géométriques typiques de la planète Mars. Ce terrain servira de lieu d'expérimentation et de validation pour ce projet.



Figure 2.5 Terrain d'émulation de Mars

2.2 Objectif global

L'objectif principal de ce travail de recherche est de concevoir un appareil pouvant agir à titre de système de vision 3D complet pour un robot mobile (e.g. le robot *Juno* tel qu'illustré à la figure 2.2) effectuant des opérations de navigation autonome telles que discutées à la section 2.1.1. Plus précisément, il s'agit de la conception d'un appareil apte à accomplir la fonction *Acquisition balayage* de la figure 2.3.

2.3 Définition des objectifs spécifiques

La conception d'un système de vision complet est un projet d'envergure impliquant l'atteinte de plusieurs objectifs spécifiques importants. Cette section en dresse la liste et permet ainsi d'énoncer clairement les points auxquels le produit du projet de recherche doit répondre. Dans cette optique, le système de vision devra :

- Pouvoir effectuer un balayage à couverture totale (360° en azimuth $\times 180^\circ$ en élévation) de façon continue (sans arrêts).
- Minimiser le temps associé à la réalisation d'un balayage à couverture totale. Idéalement, le temps associé à cette opération devrait être en deçà d'une minute, en considérant des résolutions typiquement utilisées en navigation (e.g. $0,5^\circ$ en azimuth et $0,25^\circ$ en élévation).
- Posséder une masse totale inférieure à celle du système de vision précédent, soit d'environ 7,3 kg (Lamarche, 2009).
- Avoir une consommation d'énergie électrique inférieure à 30 Watts.
- Permettre au client d'utiliser toutes les fonctionnalités offertes par le capteur lidar (transmettre les mesures de distance et d'intensité d'un balayage, changer la résolution, obtenir le statut et les paramètres de configuration de l'appareil).
- Offrir une interface de montage mécanique conforme aux standards définis par l'Agence spatiale canadienne (2010).
- Ne nécessiter qu'un câble d'alimentation de 24 volts DC et un câble Ethernet, conformément aux standards de l'Agence spatiale canadienne (2010).
- Offrir un niveau acceptable de protection vis-à-vis les conditions environnementales (e.g. poussière, pluie, température). Idéalement, le système devrait atteindre un niveau de protection équivalent à la norme IP-54 et pouvoir opérer entre -10°C et 40°C .
- Être accompagné d'une interface logicielle permettant une utilisation aisée ainsi qu'une intégration facile aux algorithmes développés par l'ASC. Afin d'être conforme aux standards de l'ASC, un modèle EMF (*Eclipse Modeling Framework*) écrit en Java devra être développé.

La recherche devra aussi :

- Mettre en oeuvre des expériences permettant de caractériser le capteur lidar.
- Établir une procédure d'étalonnage précise et simple à exécuter.
- Étudier le traitement des mesures d'intensité.

CHAPITRE 3

CONCEPTION

Dans ce chapitre, le choix du matériel composant le système est d'abord exposé, tout en précisant les différentes considérations et caractéristiques ayant mené à cette sélection. Les étapes de la conception mécanique de même que l'assemblage global en résultant sont ensuite présentés. Suivra l'architecture électrique du système, celle-ci se subdivisant en deux parties : le système d'alimentation et les circuits des signaux. Finalement, l'architecture informatique est expliquée de manière à présenter les différents algorithmes ainsi que les principes de communication utilisés.

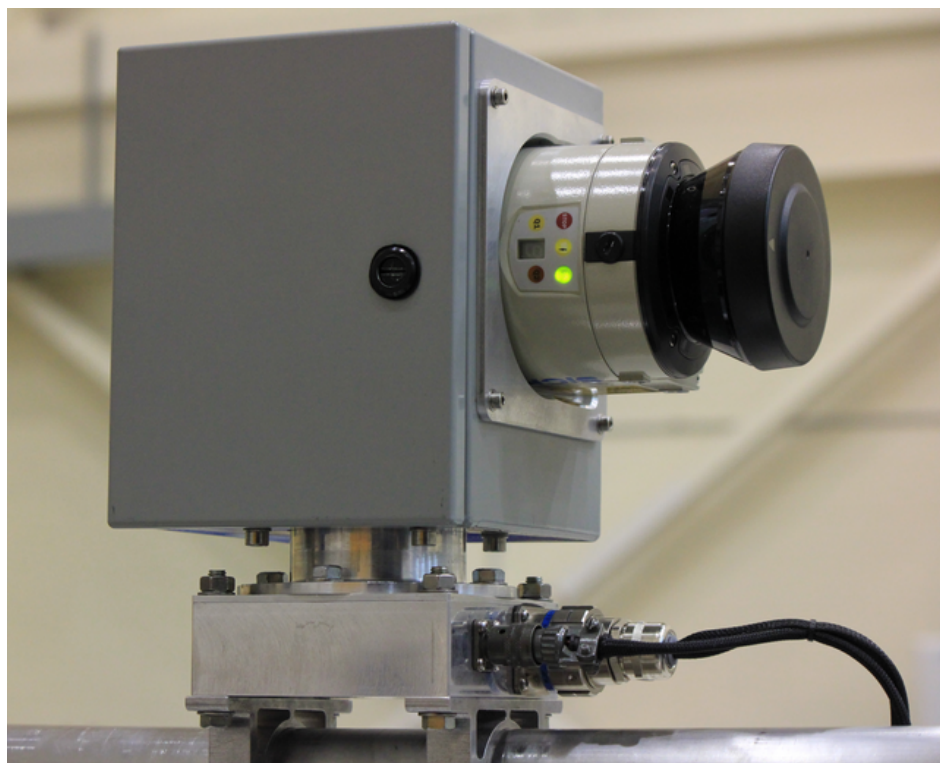


Figure 3.1 Système de vision : Extérieur

3.1 Choix du matériel et design mécanique

L'ensemble du matériel fut choisi sur la base de plusieurs critères, dont la minimisation de la masse, du volume et de la consommation d'énergie, ainsi que la capacité à résister aux environnements hostiles (e.g. : poussière, pluie, etc...). Le système de vision tel que construit est présenté aux figures 3.1 et 3.2.

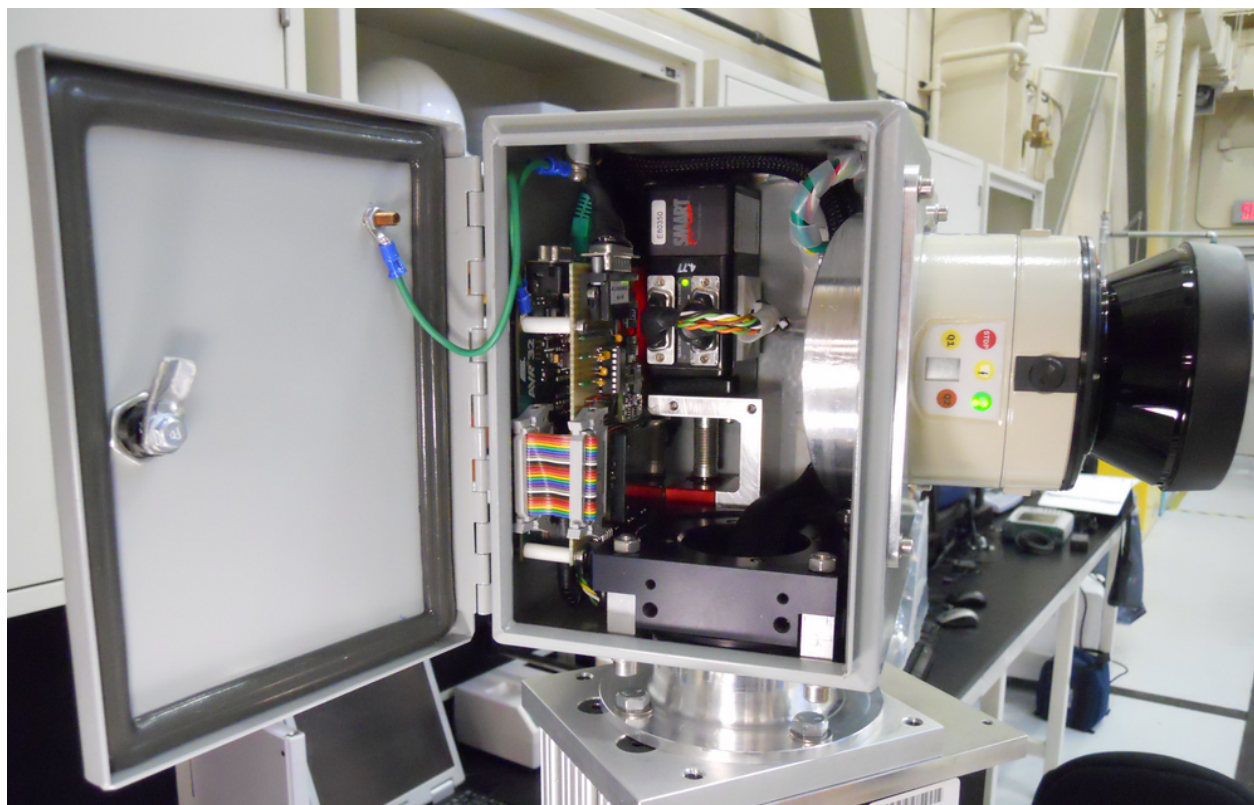


Figure 3.2 Système de vision : Intérieur

3.1.1 Lidar

Le lidar est la pièce centrale du système. Il s'agit d'un capteur permettant la mesure de distances à l'aide d'impulsions laser. Le modèle choisi est le LMS111 (figure 3.3) de la compagnie SICK. Ses principales caractéristiques sont résumées au tableau 3.1.

Le LMS111 fonctionne selon le principe de mesure du temps de vol (SICK, 2012) et permet de mesurer l'environnement en coordonnées polaires dans un rayon maximal de 20 mètres. Le capteur émet radialement des impulsions laser réparties dans un champ de vision maximal de 270 degrés à l'aide d'un miroir en rotation. La fréquence à laquelle ces impulsions laser sont émises est directement liée à la résolution angulaire souhaitée. En plus de mesurer les temps de vol associés à chacune des impulsions laser, le capteur mesure aussi l'intensité des réflexions. Il transmet ses données en format hexadécimal ou ASCII par l'entremise d'un lien Ethernet utilisant le protocole TCP-IP. Le LMS111 possède de plus une entrée pour des signaux provenant d'un encodeur incrémental, permettant donc de synchroniser l'acquisition des données avec la position angulaire du système.



Figure 3.3 Lidar LMS111

Tableau 3.1 Caractéristiques techniques du lidar LMS111

Champs de vision	270°
Résolution angulaire	0,25° ou 0,5°
Fréquence de balayage	25Hz (0,25°) ou 50Hz (0,5°)
Portée maximale	20m
Résolution	1mm
Erreur systématique	±30mm (typ.), ±40mm (max.)
Écart-type (1σ)	12mm (typ.), 20mm (max.)
Longueur d'onde	$\lambda = 905\text{nm}$ (infrarouge)
Classe du laser	1 (sécuritaire pour les yeux)
Résistance aux intempéries	IP-67
Température d'opération	0°C à 50°C, -30°C à 50°C ¹
Tension d'alimentation	24V, accepte 10,8V à 30V
Puissance sans chauffage	16W (typ.) 20W (Max.)
Puissance avec chauffage	55W (typ.) 60W (Max.)
Masse	1,1 kg

3.1.2 Table rotative

La table rotative permet au système d'effectuer des rotations en azimut en se servant du mouvement généré par un moteur. En tournant continuellement, le lidar se trouve alors à balayer l'environnement non pas dans un plan fixe, mais plutôt dans une série de plans

1. Lorsque le système de chauffage est actif.

obliques successifs. Au terme d'une rotation complète, l'environnement est entièrement balayé par le lidar et il est alors possible d'obtenir une représentation tridimensionnelle. La table tournante choisie pour accomplir cette fonction est fabriquée par IntelLiDrives. Il s'agit du modèle RTHM-190 (voir la figure 3.4), ses principales caractéristiques sont présentées au tableau 3.2.

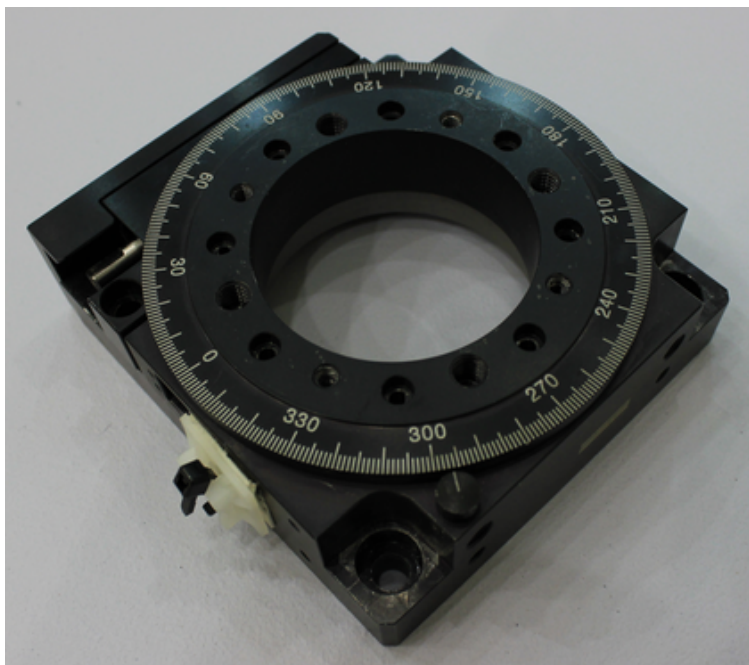


Figure 3.4 Table rotative : RTHM-190

Tableau 3.2 Caractéristiques techniques de la table tournante RTHM-190

Répétabilité	15 arc-sec
Ratio entrée/sortie	180 : 1
Charge axiale maximale	10 kg
Charge radiale maximale	2 kg
Vitesse d'entrée maximale	1 800 RPM
Masse	0,35 kg

Cette table a l'avantage d'être économique, légère et son ouverture centrale est grande par rapport à son volume. Cette dernière caractéristique est fort utile puisqu'une grande ouverture permet le passage de plusieurs câbles électriques. Dans le futur, il est envisageable que l'ASC ajoute des instruments scientifiques sur le dessus du système de vision. Il sera alors possible de faire passer les câbles nécessaires au fonctionnement de ces appareils à travers la boîte, et à travers la table tournante. De plus, un interrupteur situé à l'intérieur de la table tournante se ferme lorsque celle-ci est à 0° , permettant ainsi d'initialiser le système à une position angulaire connue.

3.1.3 Moteur intelligent

Le moteur est responsable du mouvement de rotation en azimuth du système de vision. C'est le moteur intelligent SM1720D de la compagnie Animatics (figure 3.5) qui joue ce rôle.



Figure 3.5 Moteur intelligent : SM1720D

Ce moteur est dit « intelligent » parce qu'il supporte l'exécution de programmes conçus par l'utilisateur. Le SM1720D est fort versatile et permet de contrôler le mouvement du rotor avec plusieurs types de contrôleurs. Il est entre autres possible de commander le mouvement de l'arbre en position, en vitesse ainsi qu'en couple. Dans le cadre de ce projet, seuls les deux premiers modes sont utilisés. Un encodeur générant 2 000 impulsions (post quadrature) par tour permet de connaître avec une bonne précision le mouvement du rotor. Puisque le moteur entraîne une boîte d'engrenages de ratio 1 : 1 et une table rotative de ratio 1 : 180, l'encodeur génère donc 360 000 impulsions par tour complet du plateau de la table tournante. Cette grande résolution est appréciée puisqu'il est primordial d'être aussi précis que possible au niveau de l'orientation en azimuth du système de vision.

3.1.4 Microcontrôleur et circuits électriques

Un microcontrôleur interfacé sur une plate-forme de développement est nécessaire afin de gérer les commandes provenant de(s) client(s)², de commander le lidar et le moteur, et de pré-conditionner les données provenant du lidar avant de les retransmettre au(x) client(s). Le

2. Ici, *client* désigne l'ordinateur duquel provient les commandes à exécuter.

LMS111 transmet ses données à l'aide d'un lien TCP via une interface Ethernet. Le client, par souci d'efficacité et pour respecter les standards de l'ASC (Agence spatiale canadienne, 2010), doit lui aussi employer cette méthode pour communiquer avec *CORIAS*. Par conséquent, la plate-forme de développement doit pouvoir gérer deux liens TCP-IP indépendants et posséder deux interfaces Ethernet. Par soucis de simplicité, seules les plates-formes possédant deux ports Ethernet disponibles d'emblée sur le marché furent considérées³. Celle qui fut choisie est la NGW100 de la compagnie Atmel (figure 3.6).

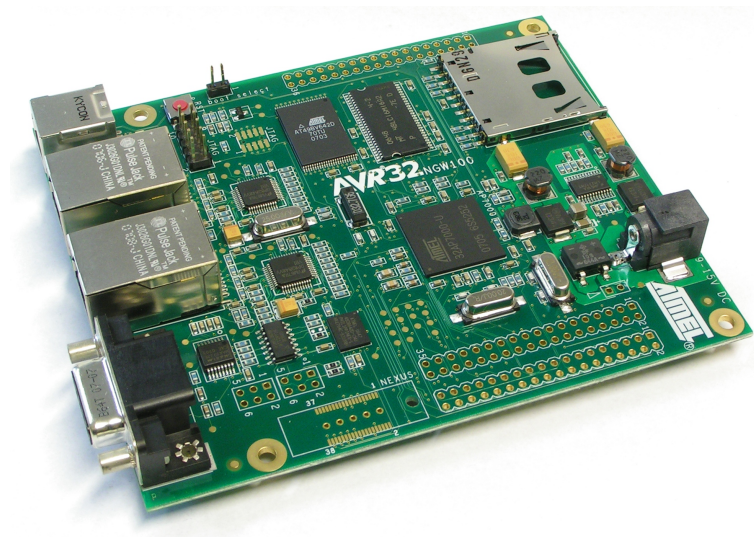


Figure 3.6 Plate-forme NGW100 de la compagnie Atmel

Cette dernière utilise le microcontrôleur AT32AP7000 qui est largement utilisé dans l'industrie. Typiquement, la carte NGW100 sert de passerelle réseau (d'où NGW pour *Network GateWay*) entre un réseau local et un réseau étendu. Il est donc possible de s'en servir de la même façon en considérant le(s) client(s) comme composant(s) du réseau local et le lidar comme composant du réseau étendu. La carte NGW100 présente plusieurs avantages supérieurs aux autres options disponibles sur le marché au moment de la conception⁴. Entre autres, en plus de posséder deux ports Ethernet et un port série, elle offre un port USB et une entrée pour une carte SD. De plus, le système d'exploitation Linux est installé sur cette dernière. En plus de la rendre uniforme avec la plupart des ordinateurs servant à la robotique à l'ASC, cette caractéristique permet de travailler dans un environnement structuré et assure une performance accrue. La carte de développement possède aussi un serveur FTP qui simplifie grandement le transfert de fichiers.

3. Ceci procure entre autres l'avantage d'utiliser de l'équipement facilement remplaçable.

4. Lors du développement de ce travail, une nouvelle plate-forme fut lancée par Atmel : la NGW100 mkII qui est en quelque sorte la nouvelle génération du NGW100 et qui pourrait remplacer cette dernière.

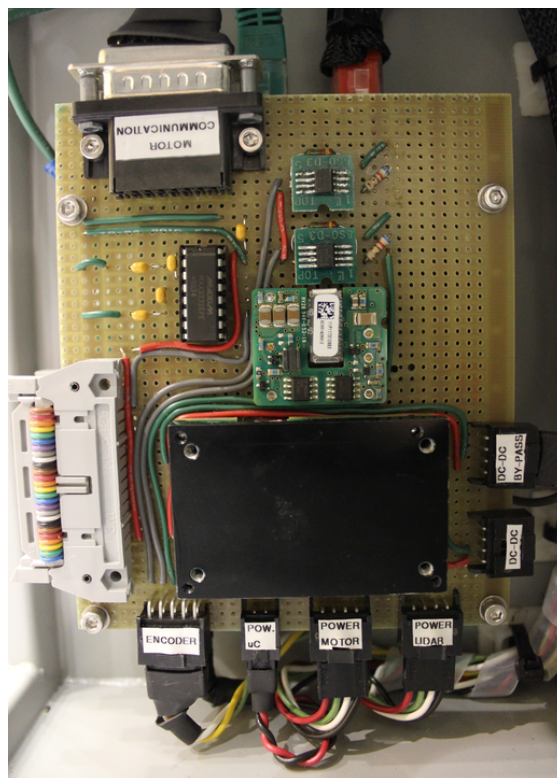


Figure 3.7 Carte électronique secondaire

La carte NGW100 est assemblée avec une seconde carte électronique qui contient tous les circuits électriques nécessaires au fonctionnement du système de vision (figure 3.7). C'est sur cette carte que se retrouvent notamment les composants reliés à la gestion de l'alimentation électrique, un deuxième port RS-232 avec son transducteur, ainsi que des amplificateurs qui rehaussent les signaux provenant de l'encodeur optique du moteur.

3.1.5 Boîte d'engrenages

La boîte d'engrenages (figure 3.8) sert uniquement à rendre l'assemblage plus compact. Elle fait le lien entre le moteur et la table tournante en permettant un assemblage à angle droit de ces deux composants. La boîte d'engrenages choisie possède un ratio de 1 : 1 entre l'entrée et la sortie. Il s'agit du modèle BLH20-1, fabriqué par la compagnie On Drives.

3.1.6 Cabinet électrique

Pour le choix du cabinet, des outils de CAO furent d'abord utilisés afin d'explorer la façon d'assembler les composants du système de sorte que ces derniers soient le plus compact possible. Par la suite, seuls les plus petits cabinets pouvant emmagasiner le volume occupé



Figure 3.8 Boîte d'engrenages BLH20-1 de la compagnie On Drives

par les composants furent considérés. Les dimensions du cabinet sélectionné au final sont de $8'' \times 6'' \times 6''$ (Hauteur \times Largeur \times Profondeur), correspondant au modèle EJ866 de la compagnie Hammond Manufacturing.

L'avantage de ce cabinet est sa petite taille et son niveau de résistance aux intempéries⁵. Il s'agit du plus petit cabinet standard trouvé sur le marché permettant l'assemblage du système complet. Ce dernier présente toutefois le désavantage d'être fait d'acier et d'avoir par conséquent une masse importante. La fabrication sur mesure d'un cabinet en aluminium, beaucoup plus léger, reste toutefois possible dans le futur.

3.1.7 Pièces usinées

Les plans de fabrication des pièces usinées sont présentés à l'annexe A. Cette section présente une courte description de chacune d'entre elles.

Support du moteur et de la boîte d'engrenages

Ce support permet de contraindre le moteur par rapport à la boîte d'engrenages (tel qu'illustré à la figure 3.9) et de fixer ce sous-assemblage sur le cabinet.

Supports de la table tournante

Les trois supports de la table tournante sont identiques et servent à fixer la table tournante ainsi qu'à positionner l'arbre d'entrée de cette dernière dans l'axe de l'arbre de sortie de la boîte d'engrenages.

5. Le cabinet est conforme aux normes IP-66 et NEMA 3R,4,12,13 (avant l'usinage).

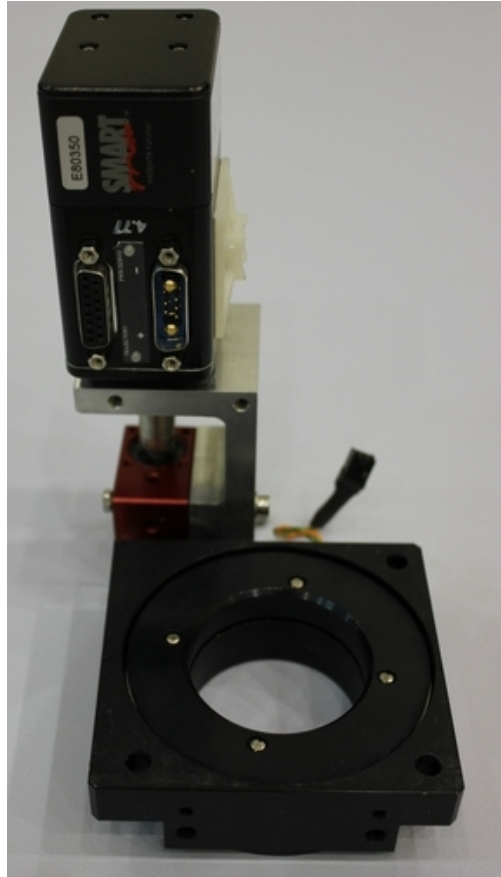


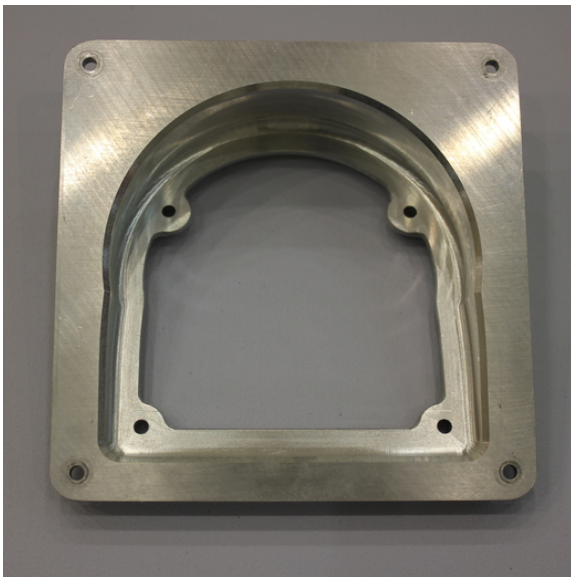
Figure 3.9 Sous-assemblage : moteur - boîte d'engrenages - table rotative

Support du lidar

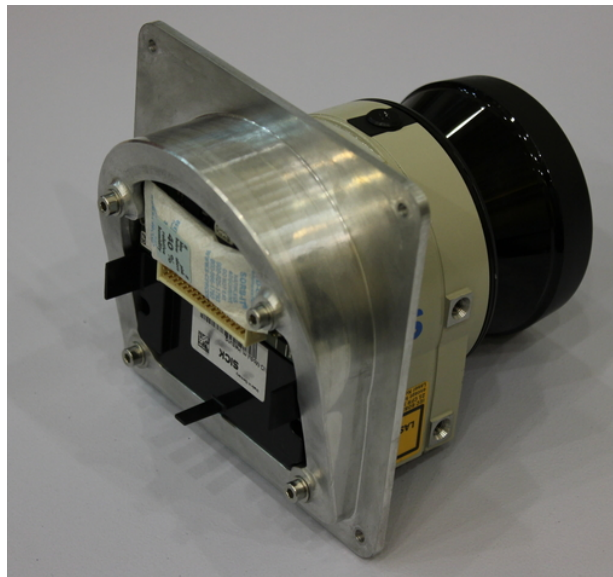
Le support du lidar (figure 3.10a) remplace une partie de l'arrière du LMS111 et permet de fixer le lidar sur le cabinet. Sa base est de forme carrée, de manière à permettre au lidar de se positionner dans deux configurations différentes (figure 3.10), chacune décalée de 90° . La profondeur de cette pièce fut choisie de façon à positionner le centre de masse de l'équipement le plus près possible de l'axe de rotation de la table tournante.

Support de l'assemblage global

Le support de l'assemblage global (figure 3.11) est l'interface mécanique du système de vision avec le « monde extérieur ». Sa base possède 4 trous de passage permettant au système de s'intégrer à n'importe quelle plate-forme conforme aux normes IRD de l'Agence spatiale canadienne (2010).

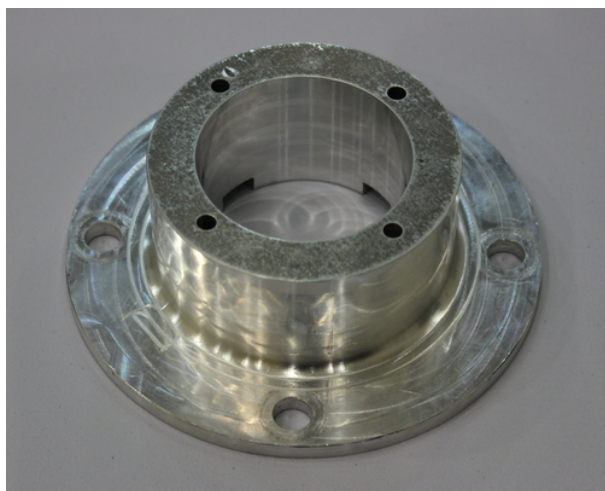


(a) Support du lidar

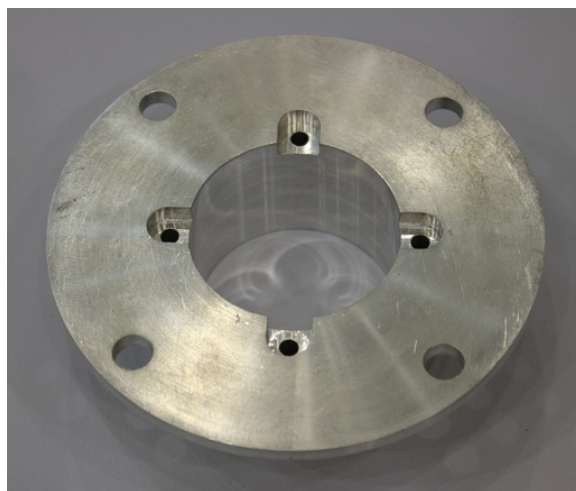


(b) Assemblage du lidar avec son support

Figure 3.10 Support du lidar



(a) Support vu du dessus



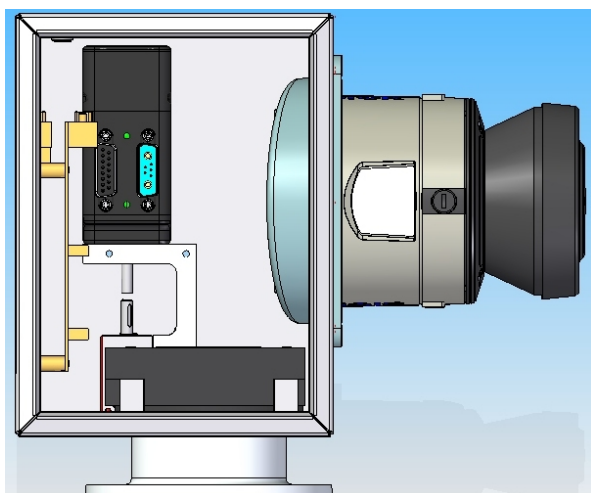
(b) Support vu du dessous

Figure 3.11 Support de l'assemblage global

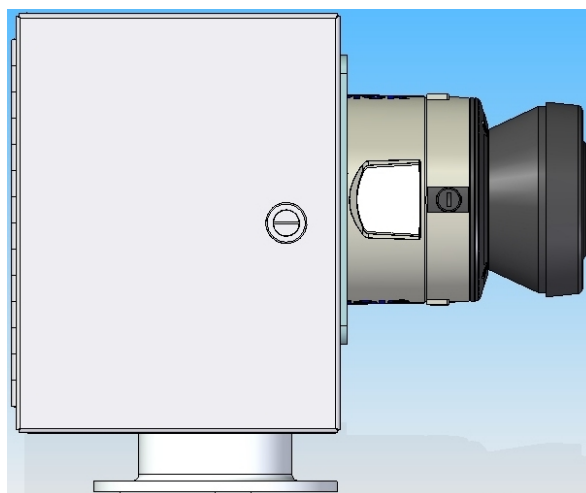
3.1.8 Assemblage global

L'assemblage de tous les éléments précédemment mentionnés dans un logiciel de CAO est illustré à la figure 3.12. Les images du haut montrent ce qui était prévu lors de la conception, alors que les images du bas illustrent le système tel que construit. La sphère bleue illustrée à

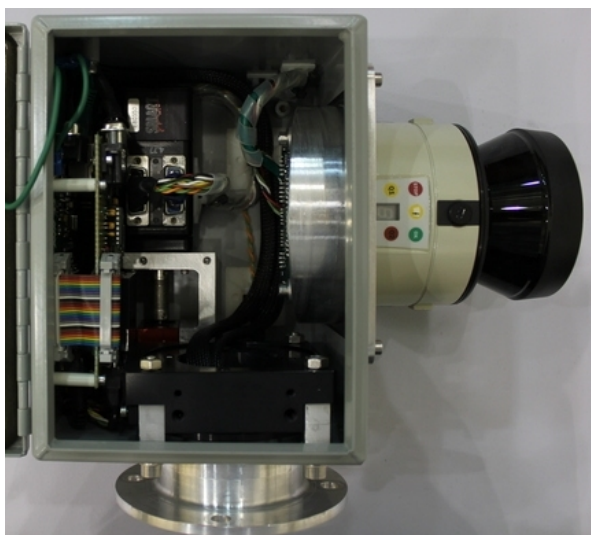
la figure 3.13 représente la position du centre de masse⁶ calculée par le logiciel de CAO. Le centre de masse est situé près de l'axe de rotation de la table tournante de manière à répartir le plus également possible la charge sur le roulement à billes de la table tournante.



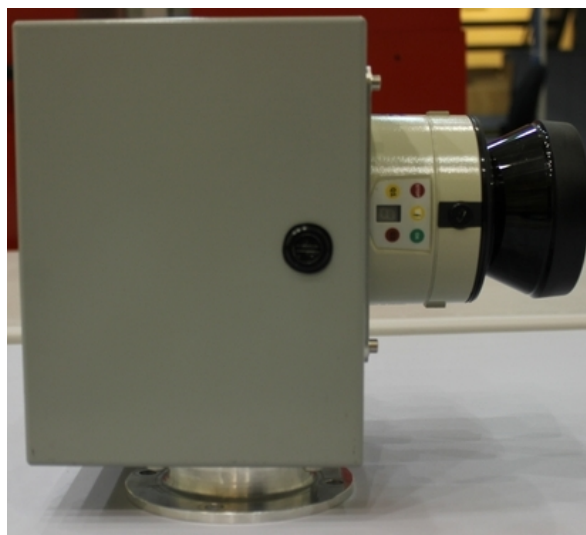
(a) CAO : Assemblage ouvert



(b) CAO : Assemblage fermé



(c) Produit réel : Assemblage ouvert



(d) Produit réel : Assemblage fermé

Figure 3.12 Comparaisons entre le modèle CAO et le produit tel que conçu

6. Il s'agit du centre de masse du système complet sans le support de l'assemblage global, étant donné que ce dernier ne contribue pas à la charge transmise à la table tournante.

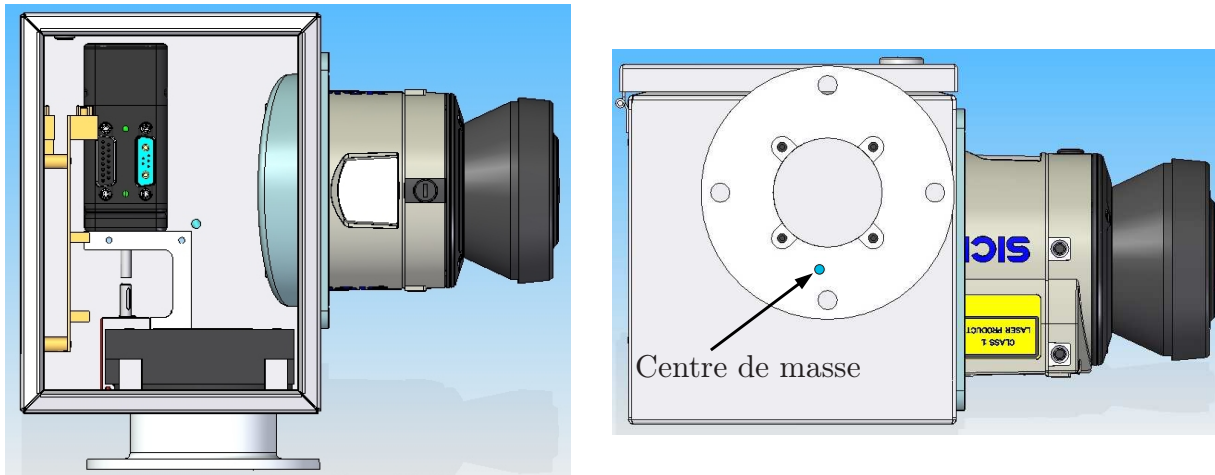
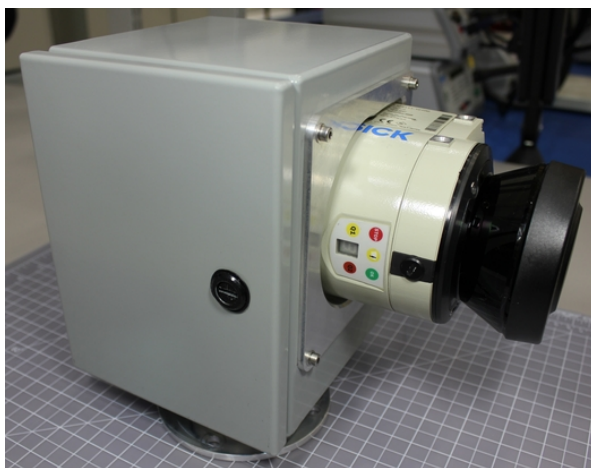


Figure 3.13 Position estimée du centre de masse par CAO

Les configurations d'assemblage

Il est à noter qu'il existe deux configurations d'assemblage possibles du système, tel qu'illustré à la figure 3.14. Dans la première configuration (vue de gauche), le lidar est orienté vers l'avant et le système nécessite une rotation complète de 360° en azimut afin de représenter tout l'environnement dans lequel se trouve le robot. Dans la deuxième configuration, le lidar est orienté vers le bas et une rotation de 180° est alors suffisante pour représenter l'environnement du robot. La zone couverte par le champ visuel du lidar diffère selon la configuration choisie, tel qu'illustré à la figure 3.15. Ces configurations d'assemblage présentent des avantages et des inconvénients qui sont discutés au chapitre 6.



(a) Configuration 1



(b) Configuration 2

Figure 3.14 Les deux configurations d'assemblage de *CORIAS*

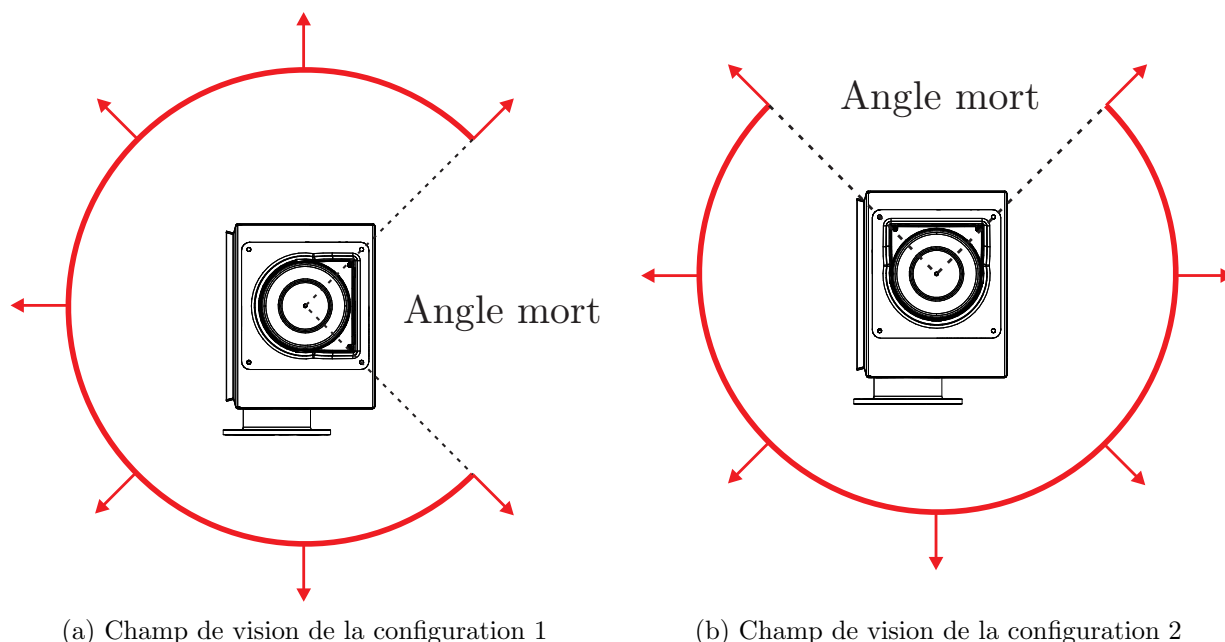


Figure 3.15 Comparaison des champs de vision des deux configurations d'assemblage

3.2 Design électrique

3.2.1 Interconnexions

L'annexe B présente un schéma de principe illustrant les connexions électriques reliant les composants du système.

3.2.2 Gestion de l'alimentation

Une gestion de l'alimentation électrique est nécessaire afin de fournir les différents niveaux de tension spécifiques à chacun des composants du système de vision. Le système nécessite idéalement une alimentation électrique de 24 volts DC pouvant fournir 4 ampères. Il accepte toutefois tout niveau de tension variant de 22 à 34 volts, un requis provenant des normes IRD de l'Agence spatiale canadienne (2010). Ceci est possible grâce à un convertisseur DC-DC qui assure une tension de 24 volts DC stable à sa sortie. Advenant le cas où l'alimentation externe fournie au système serait déjà régulée à 24 volts DC, il est possible de contourner le convertisseur DC-DC pour empêcher la consommation inutile d'énergie, simplement en changeant de point de connexion sur la carte électronique (voir l'annexe B). Une protection thermique coupe l'alimentation électrique lorsque la température à l'intérieur du cabinet dépasse 50°C.

3.2.3 Amplification des signaux de l'encodeur incrémental

L'encodeur optique du moteur génère des signaux en quadratures (deux phases) qui possèdent des niveaux de tensions variant de 0 volt (bas) à 5 volts (haut), tandis que le lidar reçoit des signaux variant de 0-12 volts (bas) à 21-24 volts (haut). Le circuit électrique dont il est ici question amplifie donc les deux phases de l'encodeur en signaux variant de 0 à 24 volts. Ceci est réalisé par deux amplificateurs opérationnels non-inverseurs (un pour chaque phase).

3.2.4 Ajout d'une interface RS-232 au microcontrôleur

Un lien RS-232 est nécessaire pour que le microcontrôleur puisse communiquer avec le moteur. La carte de développement NGW100 d'Atmel offre un connecteur DB-9 agissant comme interface RS-232. Ce port série est configuré par défaut comme étant la sortie de la console (*Console Output*) du microcontrôleur. Cette réalité fait en sorte qu'au démarrage, une série de caractères ASCII (correspondant à l'information affichée à l'écran lors de l'initialisation du microcontrôleur) sont transmis par le biais de ce port. Ceci cause problème puisqu'en connectant le port au moteur intelligent, le moteur devient dysfonctionnel lorsqu'il reçoit ces milliers caractères.

Une solution envisagée pour régler ce problème fût de désactiver le port lors de l'initialisation. Toutefois, au démarrage, le port du NGW100 permet diverses fonctionnalités qui justifient de le laisser inchangé. Par exemple, c'est par ce port qu'il est possible de remplacer le noyau⁷ du système d'exploitation Linux, de mettre-à-jour le *firmware*, de changer le BIOS et de faire du déverminage de façon approfondie.

Pour ces raisons, la solution adoptée fût plutôt d'ajouter un port RS-232 supplémentaire. Pour ce faire, il fallu réaliser le circuit de transmission/réception nécessaire, en plus de modifier et de recompiler le noyau Linux en conséquence. Le nouveau port RS-232 peut alors être dédié à la communication avec le moteur sans que ce dernier ne soit perturbé lors du démarrage du microcontrôleur. Ainsi, le port du NGW100 demeure libre et peut continuer à être utilisé pour effectuer des opérations de bas niveau.

3.3 Architecture informatique

Plusieurs algorithmes informatiques assurent le bon fonctionnement du système. Ils furent implantés spécifiquement au niveau du microcontrôleur ainsi qu'au niveau du moteur intelligent. Cette section explique le fonctionnement général de ces algorithmes ainsi que les principales manipulations informatiques appliquées au système.

7. Le noyau est le coeur du système d'exploitation, c'est ce qui permet entre autres aux programmes d'interagir avec le matériel physique.

3.3.1 Recompilation du noyau du NGW100

La recompilation du noyau du NGW100 fut rendue nécessaire par l'ajout d'un port série. Cependant, par souci d'efficacité, plusieurs autres altérations furent effectuées à l'occasion de cette nouvelle compilation.

Une fonction battement du coeur (*Heartbeat*) fut instaurée afin de pouvoir constater visuellement le bon ou le mauvais fonctionnement du microcontrôleur⁸. La recompilation du noyau permit aussi la mise-à-jour de la distribution de Linux qui était initialement embarquée sur le microcontrôleur. Au terme des manipulations, la version initiale Linux v.1.16 fut remplacée par la version plus récente Linux v.2.24. Les autres altérations conséquentes à la recompilation concernent surtout les services offerts par Linux. Il fut effectivement décidé de retirer plusieurs services inutiles à *CORIAS* afin d'alléger le fonctionnement du microcontrôleur.

3.3.2 Configuration des réseaux de communication

La figure 3.16 illustre la configuration des liens de communication du système de vision.

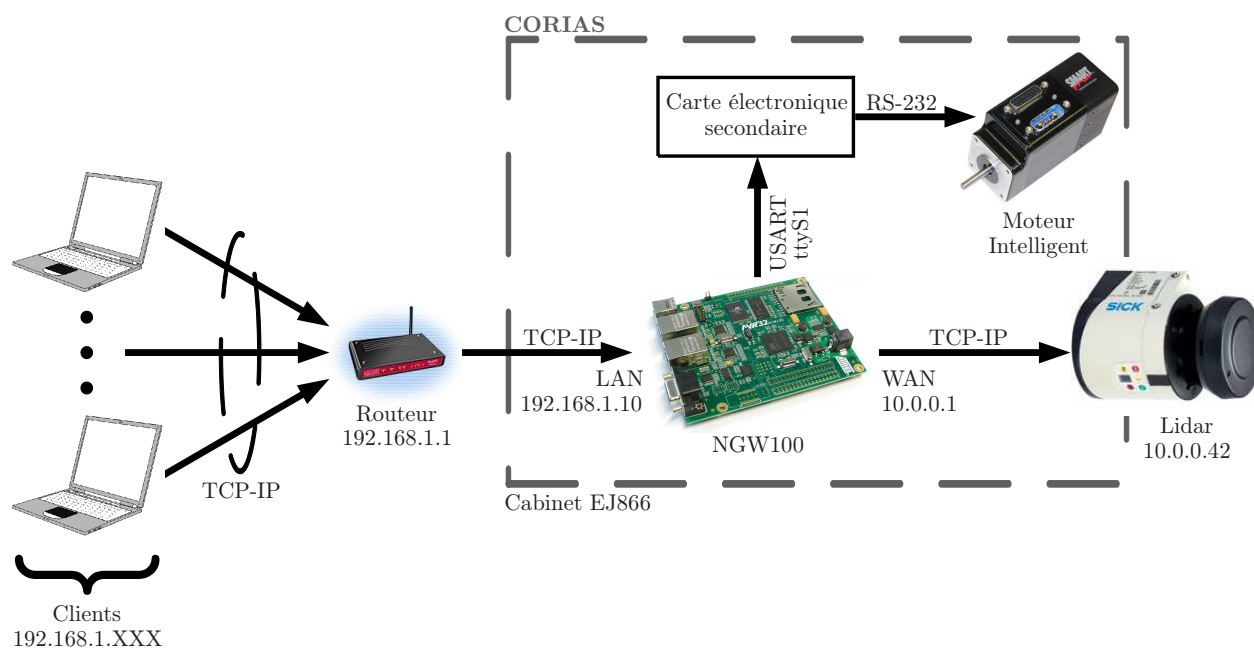


Figure 3.16 Configuration du réseau de communication

8. Le battement de coeur se traduit concrètement par le clignotement d'une DEL dont la fréquence est proportionnelle à la charge de travail demandée au processeur. Si jamais une erreur fatale du système devait survenir, ladite DEL cesse de clignoter.

3.3.3 Programmes informatiques

Deux programmes informatiques furent mis sur pied pour gérer la majeure partie des opérations du système de vision. Le programme principal est installé sur le microcontrôleur. Il gère entre autres la réception et le traitement des requêtes effectuées par le(s) client(s). Il assure aussi la sauvegarde de l'historique des opérations, des états importants du système et des erreurs sur une carte SD (lorsque disponible). Le programme secondaire réside au niveau du moteur intelligent. Lors de l'initialisation du système, son rôle est d'orienter *CORIAS* à un angle de référence (origine). Une fois l'initialisation complétée, il demeure actif en veillant, par mesure de sécurité, à ce que l'orientation du système ne dépasse jamais 380° . Si cela survient, il cesse le mouvement en cours et ramène le système à son orientation d'origine.

3.3.4 Gestion des requêtes

Une fois le système initialisé, le microcontrôleur passe en mode « attente de commandes » et attend qu'un client se connecte et lui communique ses requêtes. Lorsqu'un client se connecte, le programme principal (processus parent) donne naissance à un processus enfant qui s'exécute en parallèle. Le processus parent retourne alors en attente d'une nouvelle connection-client, alors que le processus-enfant se charge d'exécuter l'ensemble des requêtes spécifiées par le client. Il exécute chacune des requêtes du client, tant et aussi longtemps que le client reste connecté. Lorsque le client n'a plus de requêtes à faire parvenir au système, il ferme alors la connection, ce qui termine par le fait même le processus-enfant qui lui était rattaché. De son côté, le processus-parent reste actif tant et aussi longtemps que le système est sous tension. La figure 3.17 illustre le principe de gestion des requêtes et des clients par le système.

Cette approche client(s)-serveur dans la gestion des requêtes permet à plusieurs clients de faire parvenir simultanément des requêtes au système. Ceci rend *CORIAS* plus flexible et est utile dans certains contextes, par exemple dans la perspective où un client voudrait faire annuler la requête erronée d'un autre client ou encore, dans la perspective où un client voudrait connaître l'angle d'azimut actuel sans déconnecter les autres clients. Il est à noter toutefois que chaque client a la même importance et que seul l'ordre des requêtes fixe la priorité dans le traitement : la requête la plus récente est toujours la plus prioritaire. Dans certains cas particuliers, il peut arriver que des clients envoient simultanément des requêtes incompatibles entre elles. Lorsque cette situation survient, seul le client ayant fait parvenir sa requête en dernier sera servi, l'autre client verra sa requête être suspendue et le processus-enfant lui étant rattaché deviendra un processus zombie⁹. Ceci n'affecte toutefois pas l'efficacité du

9. Un processus « zombie » est un processus inactif de manière permanente, mais auquel un identifiant de processus est toujours attribué par le système d'exploitation.

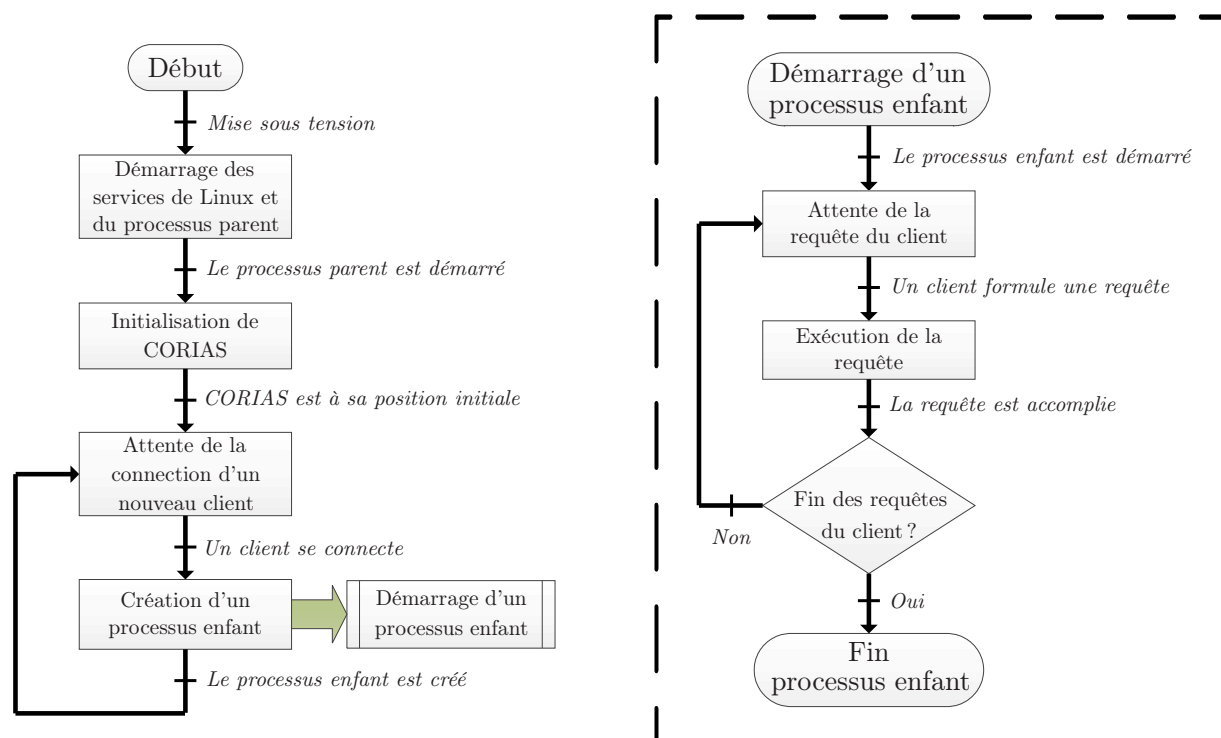


Figure 3.17 Principe de gestion des clients et de leurs requêtes

système. Pour que ce mode de fonctionnement soit profitable, il importe donc que chacun des clients soit responsable, en ce sens qu'aucun d'entre eux ne doit envoyer de requêtes qui pourraient nuire à d'autres clients déjà connectés. Un opérateur peut s'informer du nombre de clients connectés en utilisant les fonctionnalités du système d'exploitation Linux installé sur *CORIAS*.

3.3.5 Fonctionnalités

Lorsqu'un client se connecte au système, il a la possibilité de formuler une multitude de requêtes. La description des principales commandes possibles se résument ainsi :

- Réaliser un balayage continu avec un champ de vision¹⁰ et des résolutions¹¹ définies par le client.

10. Le client définit le champ de vision en spécifiant les angles de départ et d'arrivée de l'azimut et de l'élévation.

11. en azimut et en élévation

- Vérifier que le système est « vivant » en demandant au microcontrôleur d'envoyer un message de confirmation.
- Acquérir un seul balayage dans le plan d'acquisition actuel.
- Obtenir / modifier l'orientation actuelle en azimuth.
- Obtenir le statut du contrôleur interne du capteur lidar.
- Envoyer des commandes directement au moteur intelligent.
- Obtenir / modifier les paramètres de configuration actuels du capteur lidar.
- Avorter toutes les opérations en cours et orienter le système à sa position d'origine.

3.3.6 Communications

Le transfert de messages entre un client et *CORIAS* se fait à l'intérieur de trames respectant un format bien précis utilisant le protocole TCP. Le format des trames est le même que celui décrit par Lamarche (2009), tel qu'illustré à la figure 3.18.

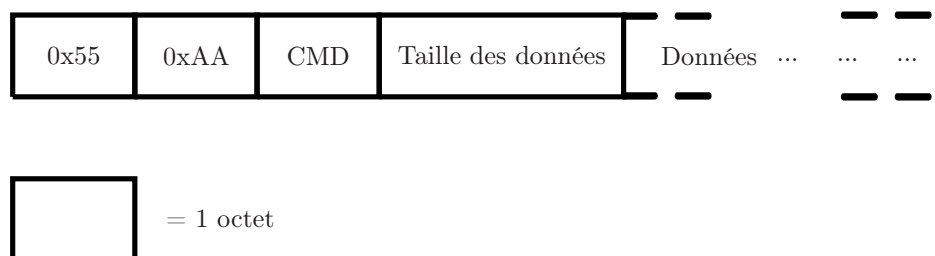


Figure 3.18 Format des trames de communication entre *CORIAS* et le(s) client(s)

3.4 Principe de fonctionnement

3.4.1 Initialisation du système

Dès la mise sous tension du système global, le moteur, le microcontrôleur ainsi que le lidar sont alimentés et démarrent en parallèle. Le microcontrôleur débute séquentiellement chacun des services essentiels au bon fonctionnement de *Linux*. Vers la fin de cette séquence, il exécute automatiquement le programme principal de *CORIAS*. Celui-ci signale tout d'abord au moteur de lancer l'exécution du programme secondaire gérant l'initialisation du système de vision.

Cette initialisation consiste à faire tourner¹² le système de vision en azimuth jusqu'à ce que l'interrupteur de position initiale de la table tournante se ferme. Par souci de répétabilité, il est vérifié que l'interrupteur se ferme toujours dans le même sens de rotation. Lorsque cela se produit enfin, la rotation se poursuit jusqu'à l'atteinte du signal de l'index de l'encodeur. Le système de vision utilise alors ce point comme référence pour s'orienter par rapport au robot et déterminer son origine. *CORIAS* sera prêt à recevoir des commandes uniquement lorsque cette procédure d'initialisation sera complétée.

3.4.2 Balayage d'une scène

Lorsqu'un client envoie une requête de balayage d'une scène, le système engage un processus comportant plusieurs étapes. Dans le cas typique d'un balayage en sens anti-horaire, les principales d'entre elles sont illustrées par le diagramme simplifié de la figure 3.19.

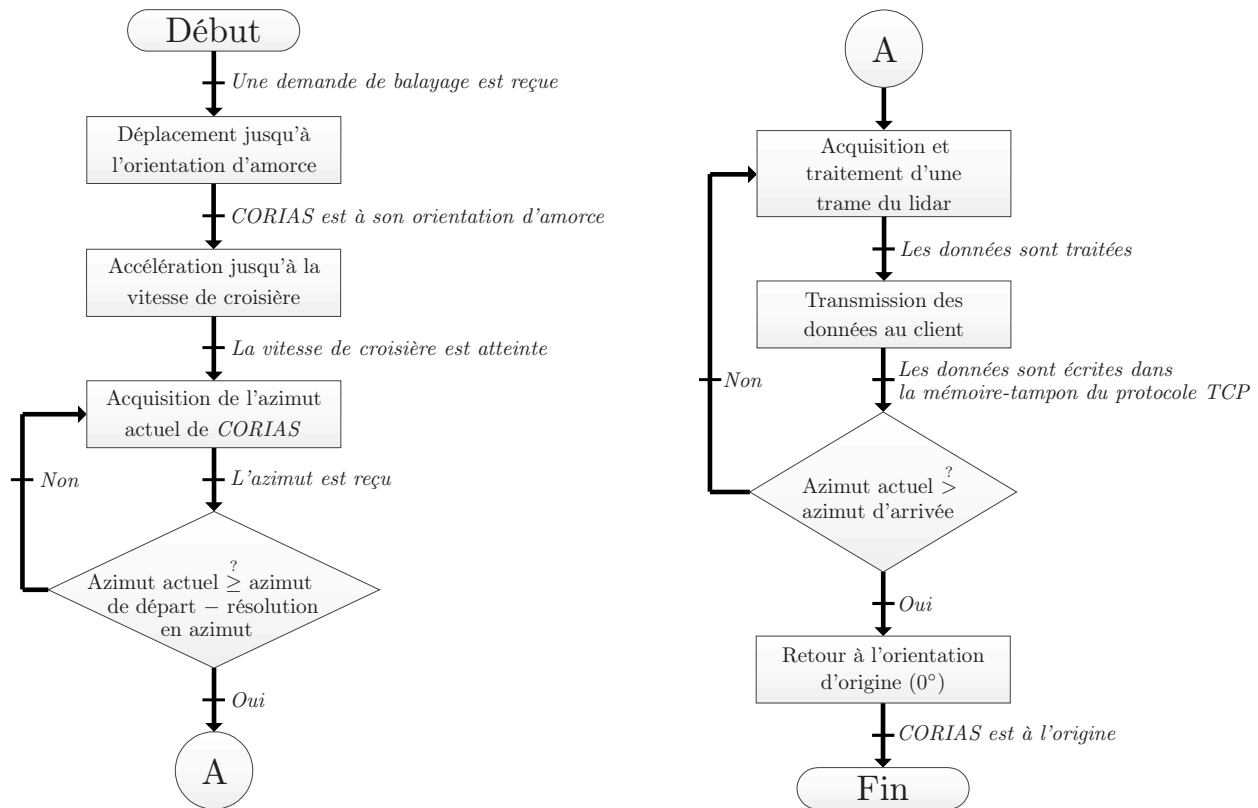


Figure 3.19 Principe de l'exécution d'un balayage en sens anti-horaire¹³

12. La rotation est d'abord de 180° en sens horaire et ensuite de 360° en sens anti-horaire.

13. Dans le cas d'un balayage en sens horaire, seules les inégalités sont inversées.

L'orientation d'amorce est calculée pour chaque requête de balayage et assure que le système ait atteint sa vitesse de croisière avant le passage à l'angle d'azimut de départ¹⁴. Quant à elle, la vitesse de croisière est la vitesse à laquelle *CORIAS* tourne durant l'acquisition des données. Celle-ci dépend des résolutions choisies pour l'azimut et l'élévation et est donnée par :

$$f_{Moteur} = \frac{180 \times R_{Az} \times f_{Lidar}}{360^\circ} \times \text{sgn}(-(Az_{arrivée} - Az_{départ})) \quad (3.1)$$

f_{Moteur} est la fréquence de rotation du moteur en Hertz, 180 provient du ratio 1 : 180 entre le moteur et le plateau de la table tournante, R_{Az} est la résolution de l'azimut en degré, f_{Lidar} est la fréquence de rotation du miroir interne du lidar en Hertz, « sgn » est la fonction signe et $\{Az_{départ}, Az_{arrivée}\}$ sont respectivement l'angle d'azimut de départ et d'arrivée.

Après avoir atteint sa vitesse de croisière, le système interroge de façon répétitive le lidar afin de connaître l'azimut actuel¹⁵. Une fois le système orienté à proximité de l'angle d'azimut de départ, l'acquisition et la transmission des mesures au client s'entament. Ainsi, après chaque rotation de son miroir interne, le lidar transmet au microcontrôleur une trame contenant ses mesures ainsi que l'angle d'azimut à partir duquel celles-ci ont été effectuées. Le programme principal se charge alors d'isoler les données pertinentes et ré-achemine ces dernières vers le client. Ce processus de réception-transmission se poursuit tant et aussi longtemps que le système n'est pas rendu à l'azimut d'arrivée. S'il survient une rupture d'un lien de communication TCP lors des opérations, que ce soit entre le lidar et le microcontrôleur ou entre le microcontrôleur et le client, le système termine son mouvement de rotation et retourne à son orientation d'origine.

14. L'angle d'azimut de départ est l'angle à partir duquel le client désire recevoir des données.

15. Le lidar peut renvoyer cette information grâce à son entrée dédiée aux signaux de l'encodeur du moteur, tel que discuté à la section 3.1.1.

CHAPITRE 4

CARACTÉRISATION ET ÉTALONNAGE

La caractérisation du lidar et l'étalonnage de *CORIAS* permettent de tirer le maximum d'information des données produites. Dans cette optique, ce chapitre aborde d'abord la caractérisation du LMS111, le capteur principal du système, en expliquant l'ensemble des expériences réalisées. Les résultats obtenus sont ensuite exposés et permettent de conclure sur les principaux facteurs influençant les mesures de distance et d'intensité. Le modèle mathématique du système de vision est alors introduit et l'étalonnage intrinsèque est réalisé à partir de ce dernier. Enfin, une procédure simple d'étalonnage extrinsèque est établie afin de déterminer la pose du système¹ par rapport au repère de navigation du robot mobile.

4.1 Caractérisation du LMS111

4.1.1 Montage expérimental

Toutes les expériences de caractérisation se sont déroulées durant deux semaines, dans un laboratoire intérieur de l'ASC, à une température d'environ 23°C et un taux d'humidité de 70%. Excepté pour les expériences sur la tension d'alimentation, le capteur LMS111 était alimenté par une tension de 24 volts DC provenant d'un bloc d'alimentation de la compagnie Agilent. Similairement, la fréquence d'acquisition utilisée était 25Hz (résolution de 0,25°) pour toutes les expériences, sauf celles portant sur la fréquence d'échantillonnage. De plus, la cible utilisée était toujours une feuille de carton blanc, sauf lors des expériences portant sur l'effet des propriétés de surface. Un ordinateur de marque Samsung assurait l'acquisition des données et la commande du lidar. Cet ordinateur était équipé d'un processeur I5 d'Intel (3.3GHz) avec 4GB de mémoire vive et fonctionnait sous le système d'exploitation Linux *Ubuntu 11.10 Oneiric Ocelot*. Une application logicielle écrite en langage C fut développée afin de permettre la cueillette des données et l'envoi des commandes nécessaires au lidar. Le rayon laser utilisé pour la caractérisation du lidar était le rayon central² de l'instrument.

En ce qui a trait au positionnement, la configuration et la méthode utilisées sont pratiquement les mêmes que celles de Koceski *et al.* (2009). Pour chaque expérience, la distance séparant le lidar de la cible fut mesurée précisément, de manière indépendante, à l'aide d'un

1. La pose du système désigne la position et l'orientation du repère de *CORIAS*.

2. Le rayon central constitue la bissectrice du champ de vision du lidar. Puisque ce dernier possède un champ de vision de 270°, il s'agit du 361ième rayon lorsque la résolution est de 0,5° et du 721ième lorsque la résolution est de 0,25°.

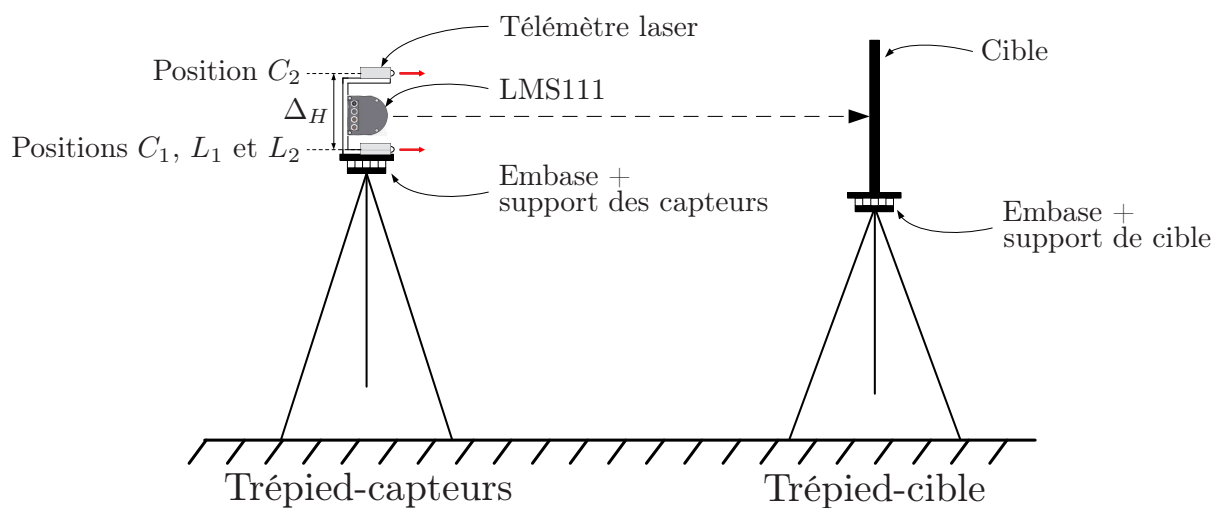
télémètre laser 421D de la compagnie Fluke (possédant une précision de $\pm 1,5\text{mm}$). Deux embases universelles à plomb laser (figure 4.1) utilisées avec des niveaux à bulle sphérique permirent d'aligner et d'orienter le capteur et la cible. La figure 4.2 illustre le principe de positionnement utilisé lors des expériences de caractérisation.



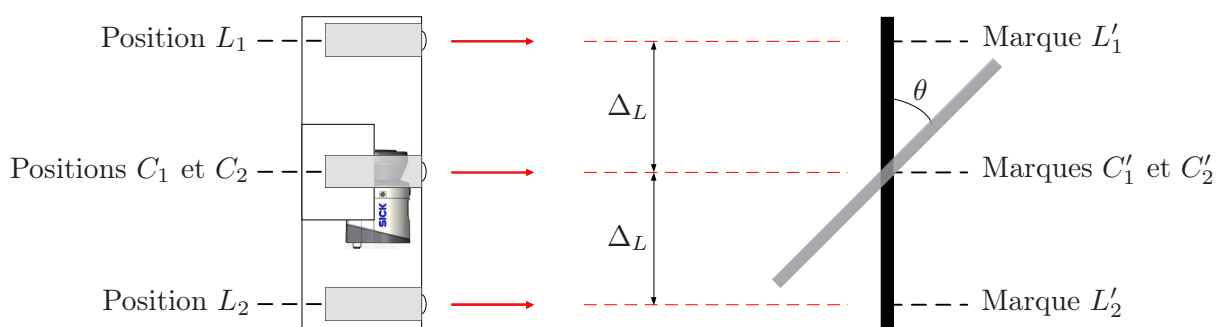
Figure 4.1 Embase universelle à plomb laser

Le lidar fut installé sur un support à capteurs spécialement usiné aux fins des expériences de caractérisation. Ce dernier avait été conçu de manière à permettre que le rayon central du lidar soit parallèle au plan horizontal, tout en ayant le centre géométrique de l'embase universelle situé dans le plan d'acquisition. De plus, ce support permettait de fixer précisément le télémètre laser à deux positions centrales (C_1, C_2) alignées avec le plan d'acquisition du lidar de même qu'à deux positions latérales (L_1, L_2) parallèles à ce dernier. Les trous de passage du support à capteurs avaient été fraisés de manière à assurer un positionnement optimal des instruments lors du vissage. Le montage des capteurs sur le support à capteurs est illustré à la figure 4.3a.

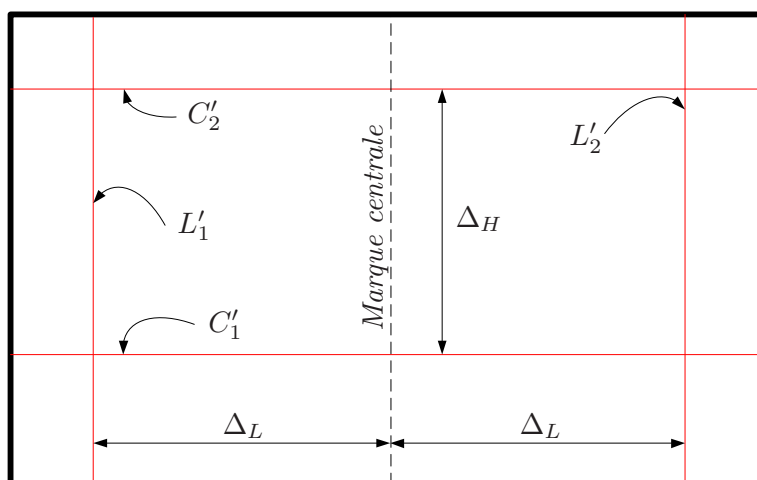
Chacune des cibles étudiées fut disposée sur un support en bois, installé pour sa part sur une table tournante actionnée par un moteur intelligent permettant une résolution d'un millième de degré sur l'orientation des cibles (figure 4.3b). La table tournante et le moteur furent fixés à un support de cible spécialement usiné pour les expériences de caractérisation. Ce dernier avait été conçu de manière à ce que l'axe de rotation de la table tournante soit normal au plateau ajustable de l'embase universelle et aligné avec son centre géométrique. Des marques d'alignement furent tracées sur le support de bois (figure 4.2c) afin de positionner et orienter la cible par rapport au lidar. Comme le diamètre de l'aire transversale des rayons



(a) Principe de positionnement (vue de côté)



(b) Principe de positionnement (vue du dessus)

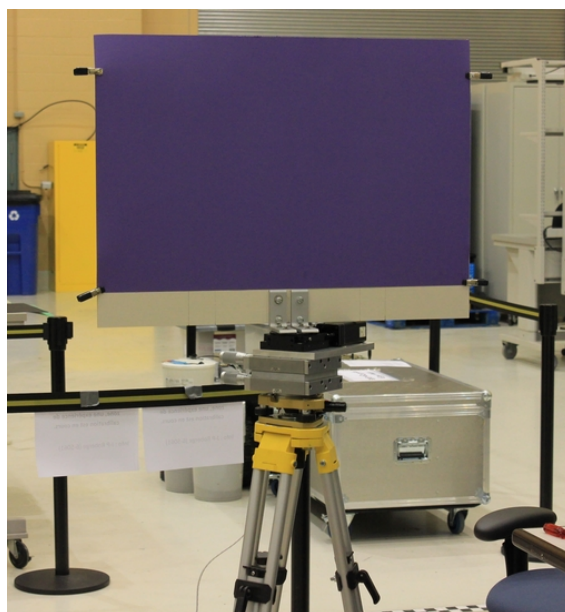


(c) Marques du support de cible

Figure 4.2 Principe de positionnement des expériences de caractérisation



(a) Configuration du LMS111 sur son trépied



(b) Configuration de la cible sur son trépied

Figure 4.3 Configuration des trépieds

laser du lidar croît en fonction de la distance (figure 4.4), le support en bois et les cibles étaient de grandeurs suffisantes pour garantir que le rayon soit intercepté complètement et ce, même pour les plus grandes distances.

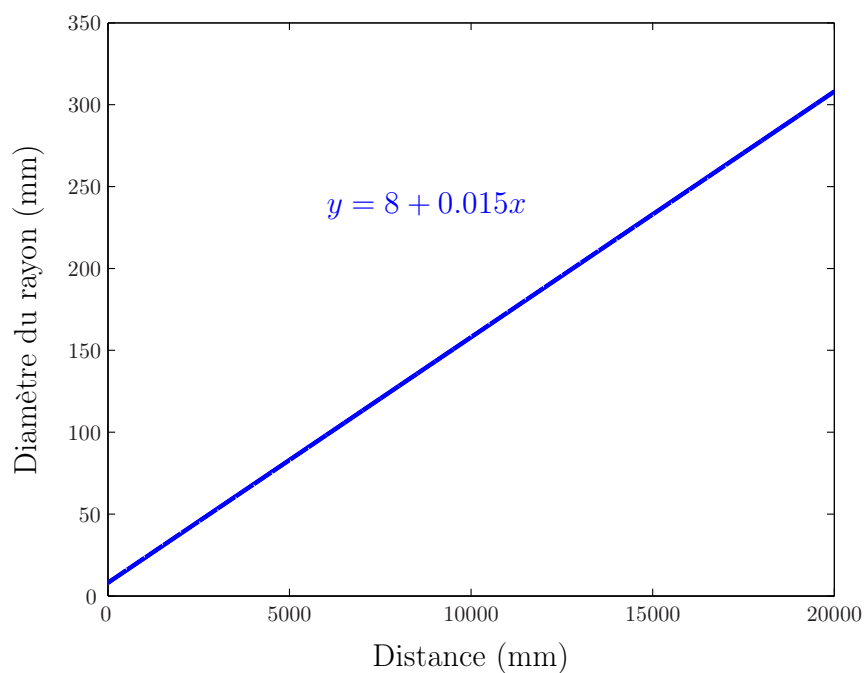


Figure 4.4 Diamètre du laser du lidar en fonction de la distance (SICK, 2012)

Lors des expériences, le trépied des capteurs demeurait à la même position et le trépied de la cible se déplaçait à chaque position d'intérêt le long d'une ligne de mire. Cette dernière était simplement constituée d'une mince corde tendue sur une distance d'un peu plus de 20 mètres. Elle permettait de positionner la cible par rapport aux capteurs en centrant les trépieds sur celle-ci à l'aide du plomb laser des embases.

La première étape dans la réalisation de ces expériences consistait à garantir que, tout en ayant le plomb laser centré sur la ligne de mire, le rayon central du lidar soit parallèle à cette dernière. Pour respecter cette exigence, il fallut tout d'abord utiliser itérativement le plomb laser ainsi que le niveau à bulle sphérique. Par la suite, le trépied-cible fut positionné grossièrement à une distance d'intérêt par rapport au trépied-capteurs, en prenant soin d'aligner le plomb laser avec la ligne de mire. Pour que le rayon central du lidar soit bel et bien normal à la cible, le télémètre fut tout d'abord installé aux positions verticales C_1 et C_2 . La cible fut alors ajustée grossièrement en hauteur ainsi qu'en orientation verticale (tangage) afin que le laser projeté par le télémètre soit centré sur les marques C'_1 et C'_2 lorsque ce dernier était positionné en C_1 et C_2 respectivement. L'ajustement fin de la position et de l'orientation verticale de la cible fut effectué en réglant les vis de calage de l'embase jusqu'à ce que les distances $\overline{C_1C'_1}$ et $\overline{C_2C'_2}$, mesurées par le télémètre, soient égales. Le même principe fut ensuite appliqué pour l'orientation horizontale. Celle-ci fut ajustée à l'aide de la rotation manuelle de la table tournante, jusqu'à ce que les distances $\overline{L_1L'_1}$ et $\overline{L_2L'_2}$ soient égales. L'orientation était considérée parfaite lorsqu'enfin les distances $\overline{C_1C'_1}$, $\overline{C_2C'_2}$, $\overline{L_1L'_1}$ et $\overline{L_2L'_2}$, mesurées par le télémètre, étaient toutes équivalentes. Cette procédure de positionnement et d'ajustement de l'orientation dut être répétée à chaque déplacement du trépied-cible.

4.1.2 Effet du temps d'opération

Cette expérience consiste à étudier la dérive des mesures de distance et d'intensité en fonction du temps d'opération. Plusieurs auteurs tels que Kweon *et al.* (1991); Reina et Gonzales (1997); Ye et Borenstein (2002); Luo et Zhang (2004); Alwan *et al.* (2005); Koceski *et al.* (2009); Okubo *et al.* (2009); Park *et al.* (2010) notent en effet une dérive non négligeable des mesures en fonction du temps d'opération et ce, pour différents modèles de capteurs laser. Une des causes expliquant cette dérive des mesures est l'accroissement de la température à l'intérieur du capteur avec le temps. Kweon *et al.* (1991) confirment une telle dépendance en vérifiant l'impact que produit un système de chauffage électrique sur un lidar Perceptron.

Pour réaliser cette expérience, la cible fut d'abord placée à une distance fixe de 5,615m avec un angle d'incidence de 0° . Une fois le lidar alimenté, il s'initialisa et débuta aussitôt la transmission des données. Pendant plus de six heures, à chaque période de 15 secondes, 100 mesures de distance et 100 mesures d'intensité furent transmises et enregistrées dans

un fichier sur le disque dur de l'ordinateur. Avant de débiter ces opérations, le lidar utilisé avait bénéficié d'une période de repos d'au moins 24 heures afin de garantir qu'il démarrerait à température ambiante ($\approx 23^\circ\text{C}$). La figure 4.5 illustre la dérive de la valeur moyenne de chaque ensemble de 100 mesures en fonction du temps d'opération. Seules les 10 000 premières secondes sont illustrées étant donnée l'absence de variation digne de mention au-delà de cette période.

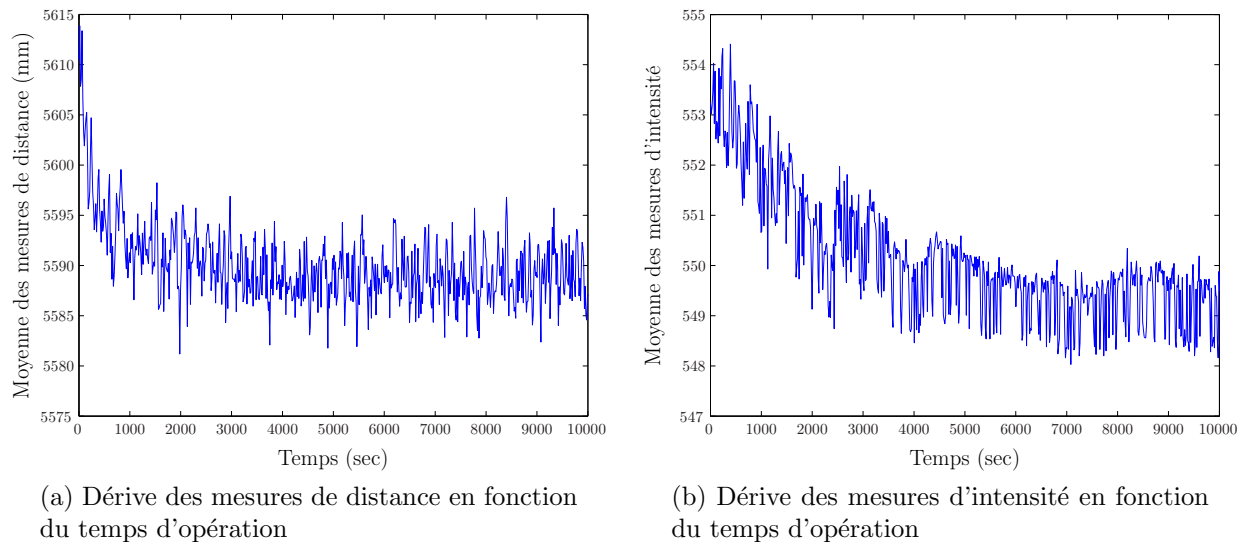


Figure 4.5 Dérive des mesures en fonction du temps d'opération

Les mesures de distance diminuent rapidement au début de la mise en marche du capteur, mais se stabilisent après environ 3 500 secondes. En ce qui a trait aux mesures d'intensité, elles prennent plus de temps à se stabiliser, soit environ 6 000 secondes. En raison de ces résultats, le capteur lidar fut mis sous tension au moins 6 heures avant le début de toutes les prochaines expériences mentionnées dans ce chapitre.

4.1.3 Effet de la fréquence d'acquisition

Lors de cette expérience, le seul paramètre qui fut varié est la fréquence d'acquisition du lidar qui put être configurée à deux valeurs différentes : 25Hz (résolution de $0,25^\circ$) ou 50Hz (résolution de $0,5^\circ$). La cible fut placée à une distance de 5,615m et pour chacune des deux fréquences, 10 000 mesures de distance et autant de mesures d'intensité furent acquises. Les distributions sont illustrées à la figure 4.6.

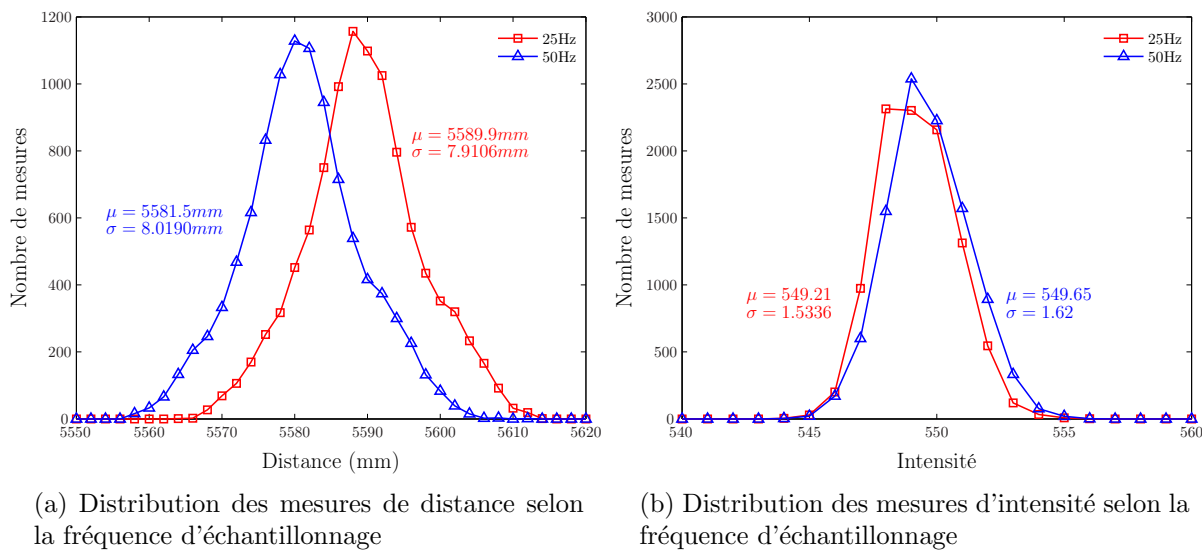


Figure 4.6 Effet de la fréquence d'acquisition

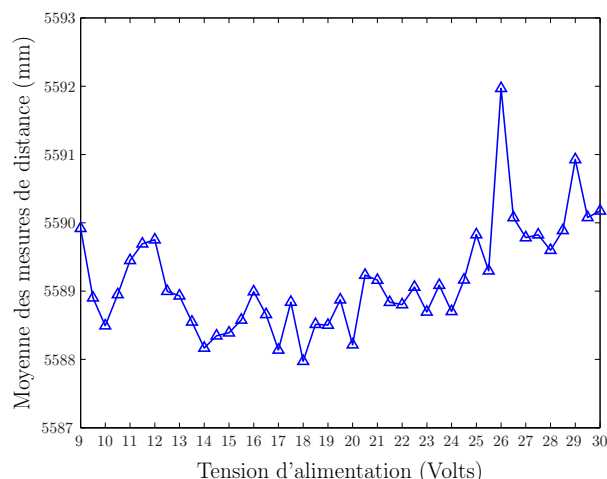
La fréquence d'échantillonnage influence la distribution des mesures de distance. Celle-ci est en moyenne 8,4mm plus grande lorsque la fréquence est à 25Hz. La similarité des écarts-types semblent indiquer un effet non significatif de la fréquence sur la dispersion des données. En ce qui a trait aux mesures d'intensité, aucun impact significatif ne semble être provoqué par le changement de fréquence.

4.1.4 Effet du niveau de la tension d'alimentation

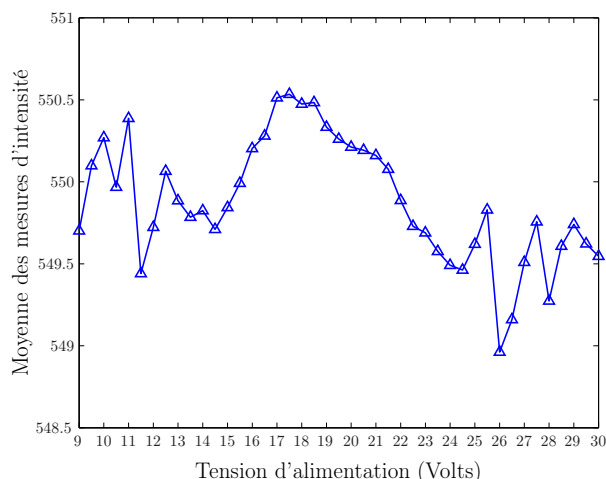
Cette expérience consiste à faire varier la tension d'alimentation du LMS111 afin de vérifier l'impact de tels changements sur les mesures. Le fabricant indique que l'étendue des tensions d'alimentation admissibles est de 10,8 à 30 volts. Par conséquent, après avoir positionné la cible à une distance fixe de 5,615m, la tension d'entrée du lidar fut variée de 9 à 30 volts DC³, par incréments de 0,5 volts. Pour chacune des tensions d'entrée considérée, 10 000 mesures furent acquises. Les figures 4.7a et 4.7b illustrent les résultats obtenus.

Des distances d'environ 2mm plus élevées en moyenne sont observées lorsque le lidar est alimenté par des tensions de l'ordre de 25,5-30 volts, comparativement aux mesures obtenues avec des tensions d'entrée de l'ordre de 14-20 volts. En ce qui concerne l'intensité, la variation des mesures ne permet pas d'indiquer clairement un quelconque impact qui serait provoqué par la tension d'alimentation. Le niveau de tension ne semble donc pas affecter significativement les mesures du lidar puisque ces dernières ne varient pas de manière importante.

3. En dessous de 9 volts, il était impossible d'obtenir des mesures.



(a) Valeur moyenne de la distance en fonction de la tension d'alimentation



(b) Valeur moyenne de l'intensité en fonction de la tension d'alimentation

Figure 4.7 Effet de la tension d'alimentation

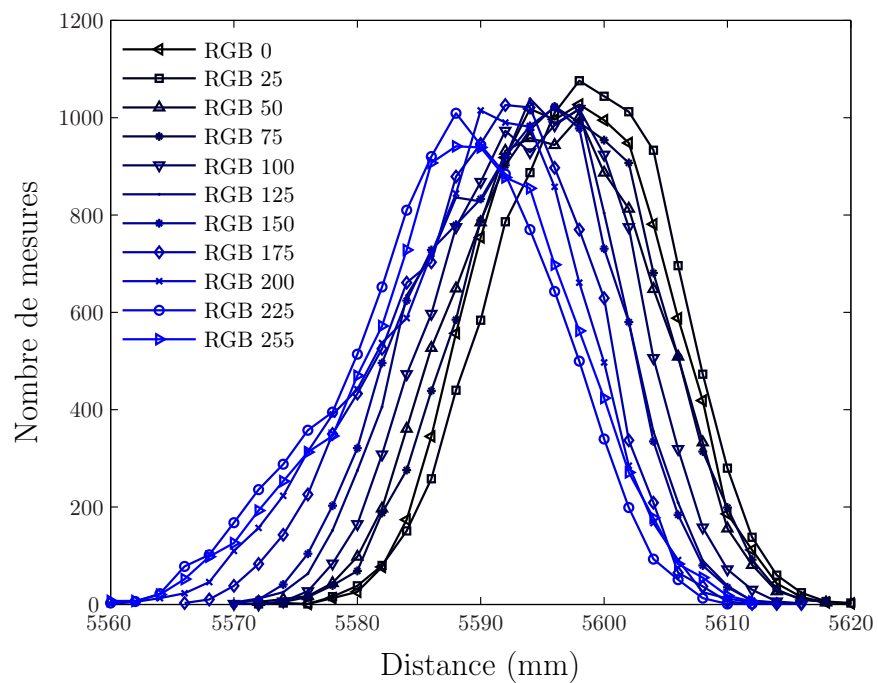
4.1.5 Effet des propriétés de surface

Effet de la couleur

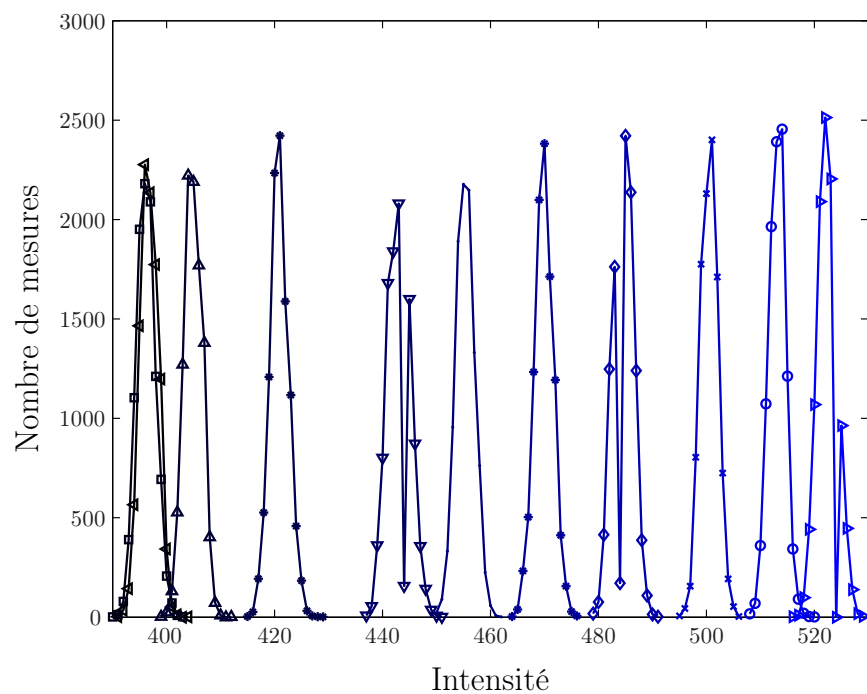
Pour cette expérience, des groupes de cibles de textures similaires au niveau des fibres, mais de couleurs différentes, furent utilisées successivement afin de vérifier l'effet de ce paramètre sur les mesures de distance et d'intensité. Les couleurs sont regroupées en trois catégories distinctes :

1. Les *tons de gris* : Des tons de gris variant du noir (RGB=0) au blanc (RGB=255), imprimés sur papier à l'aide d'une imprimante laser standard.
2. Les *couleurs à fini mât* : Il s'agit de cartons de dix couleurs différentes possédant une surface de fini mât.
3. Les *couleurs à fini réfléchissant* : Soit cinq cartons possédant un fini de surface lustré ou semi-lustré.

Comme pour les expériences précédentes, la cible fut tout d'abord positionnée perpendiculairement au rayon central du LMS111 à une distance fixe de 5,615m. Par la suite, 10 000 mesures de distance et autant de mesures d'intensité furent acquises successivement pour chacune des cibles étudiées. Les résultats observés pour des tons de gris variant de 0 à 255 sont illustrés aux figures 4.8, 4.9 ainsi qu'au tableau 4.1.

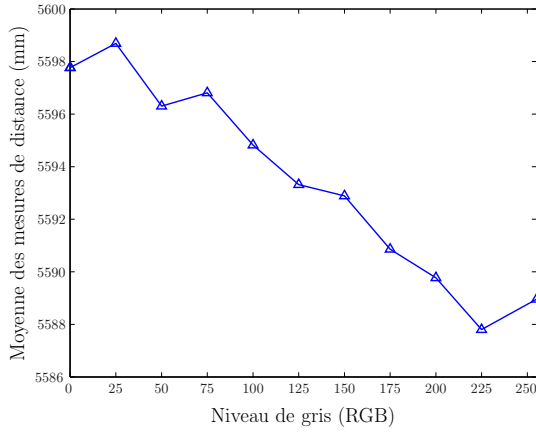


(a) Distribution des mesures de distance pour différents tons de gris

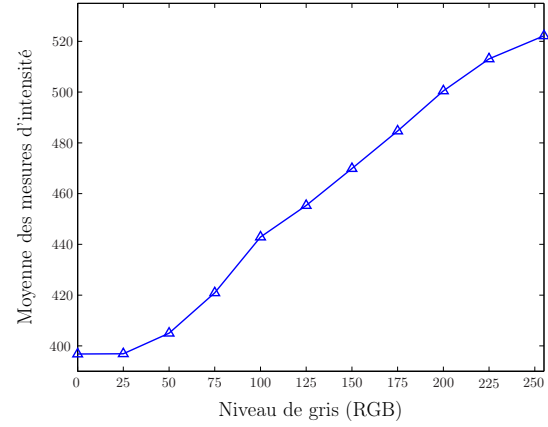


(b) Distribution des mesures d'intensité pour différents tons de gris

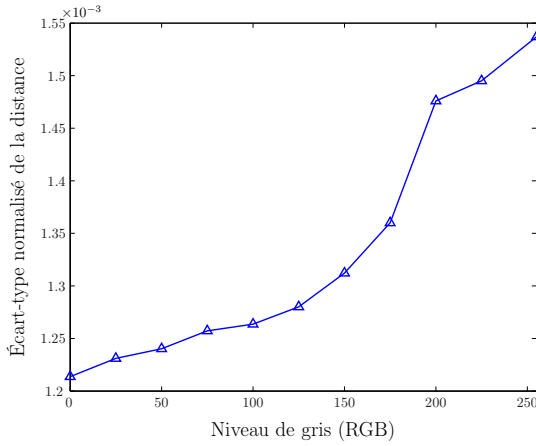
Figure 4.8 Distribution des mesures pour différents tons de gris



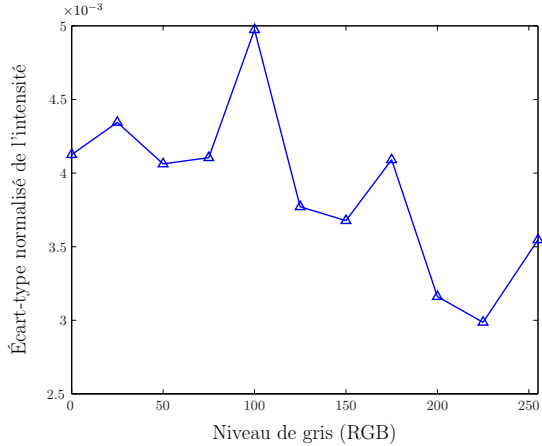
(a) Moyenne des mesures de distance en fonction de différents tons de gris



(b) Moyenne des mesures d'intensité en fonction de différents tons de gris



(c) Écart-type normalisé de la distance en fonction de différents tons de gris



(d) Écart-type normalisé de l'intensité en fonction de différents tons de gris

Figure 4.9 Moyenne et écart-type des mesures pour différents tons de gris

En regard de ces résultats, il est clair que le niveau de gris a une influence directe sur les mesures de distance et d'intensité. Ye et Borenstein (2002); Luo et Zhang (2004); Park *et al.* (2010) notent aussi un effet non-négligeable du niveau de gris sur la distance. Une variation totale d'environ 10mm survient au niveau des mesures de distance, des distances plus courtes étant associées aux couleurs plus pâles. En observant la figure 4.9a, la distance mesurée semble varier linéairement en fonction du niveau de gris. De plus, la figure 4.9c illustre que l'écart-type normalisé⁴ en fonction de la distance varie aussi en fonction du niveau de gris. Cette dernière figure démontre en effet que les mesures de distance sont plus dispersées (σ_{norm} est plus élevé) lorsque les cibles sont plus pâles. Une variation spectaculaire, bien qu'attendue,

4. L'écart-type normalisé est calculé par : $\sigma_{norm} = \frac{\sigma}{\mu}$. Il sert à comparer les écarts-types d'échantillons de moyenne différente.

Tableau 4.1 Moyenne et écart-type des mesures en fonction du niveau de gris

RGB	Distribution de la distance	Distribution de l'intensité
0	$\mu = 5\,597,8\text{mm}$ $\sigma = 6,79\text{mm}$	$\mu = 396,78$ $\sigma = 1,64$
25	$\mu = 5\,598,7\text{mm}$ $\sigma = 6,89\text{mm}$	$\mu = 396,89$ $\sigma = 1,72$
50	$\mu = 5\,596,3\text{mm}$ $\sigma = 6,94\text{mm}$	$\mu = 405,00$ $\sigma = 1,65$
75	$\mu = 5\,596,8\text{mm}$ $\sigma = 7,04\text{mm}$	$\mu = 420,90$ $\sigma = 1,73$
100	$\mu = 5\,594,8\text{mm}$ $\sigma = 7,07\text{mm}$	$\mu = 442,90$ $\sigma = 2,20$
125	$\mu = 5\,593,3\text{mm}$ $\sigma = 7,16\text{mm}$	$\mu = 455,31$ $\sigma = 1,72$
150	$\mu = 5\,592,9\text{mm}$ $\sigma = 7,34\text{mm}$	$\mu = 469,90$ $\sigma = 1,73$
175	$\mu = 5\,590,9\text{mm}$ $\sigma = 7,60\text{mm}$	$\mu = 484,67$ $\sigma = 1,98$
200	$\mu = 5\,589,8\text{mm}$ $\sigma = 8,25\text{mm}$	$\mu = 500,50$ $\sigma = 1,58$
225	$\mu = 5\,587,8\text{mm}$ $\sigma = 8,35\text{mm}$	$\mu = 513,08$ $\sigma = 1,53$
255	$\mu = 5\,589,0\text{mm}$ $\sigma = 8,59\text{mm}$	$\mu = 522,17$ $\sigma = 1,85$

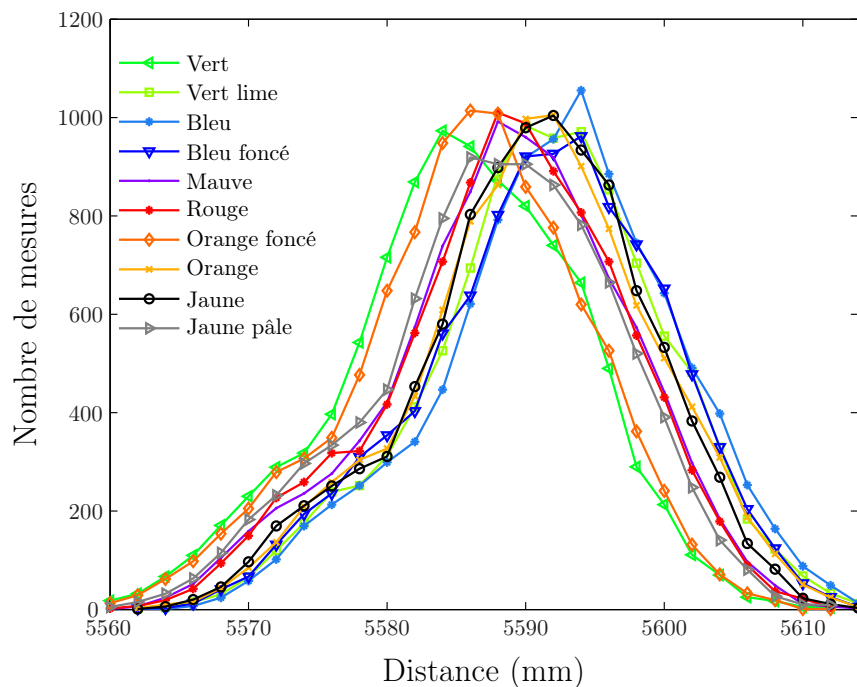
survient aussi au niveau des mesures d'intensité qui affichent pour leur part une variation totale de plus de 120 unités⁵. Bien entendu, ceci s'explique par le fait qu'une couleur foncée réfléchit moins la lumière qu'une couleur pâle. Bien que la relation entre l'intensité et le niveau de gris semble assez linéaire, il est toutefois intéressant de constater un certain plateau pour les deux tons de gris plus foncés.

La même expérience fut aussi réalisée pour les cibles de couleurs à fini mat : les résultats sont présentés à la figure 4.10 ainsi qu'au tableau 4.2.

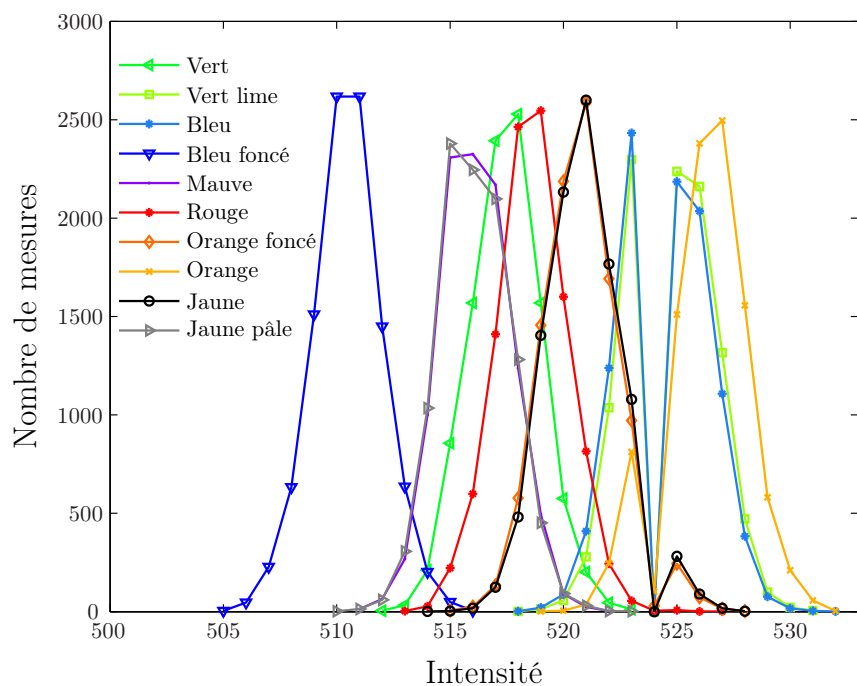
Tableau 4.2 Moyenne et écart-type des mesures en fonction de la couleur

Couleur	Distribution de la distance	Distribution de l'intensité
Vert	$\mu = 5\,585,7\text{mm}$ $\sigma = 8,56\text{mm}$	$\mu = 517,44$ $\sigma = 1,56$
Vert lime	$\mu = 5\,591,7\text{mm}$ $\sigma = 8,50\text{mm}$	$\mu = 524,76$ $\sigma = 1,96$
Bleu	$\mu = 5\,592,6\text{mm}$ $\sigma = 8,58\text{mm}$	$\mu = 524,50$ $\sigma = 1,99$
Bleu foncé	$\mu = 5\,591,6\text{mm}$ $\sigma = 8,64\text{mm}$	$\mu = 510,48$ $\sigma = 1,53$
Mauve	$\mu = 5\,589,0\text{mm}$ $\sigma = 8,65\text{mm}$	$\mu = 516,12$ $\sigma = 1,54$
Rouge	$\mu = 5\,589,0\text{mm}$ $\sigma = 8,57\text{mm}$	$\mu = 518,62$ $\sigma = 1,58$
Orange foncé	$\mu = 5\,586,3\text{mm}$ $\sigma = 8,47\text{mm}$	$\mu = 520,76$ $\sigma = 1,67$
Orange	$\mu = 5\,591,0\text{mm}$ $\sigma = 8,60\text{mm}$	$\mu = 526,31$ $\sigma = 1,80$
Jaune	$\mu = 5\,590,7\text{mm}$ $\sigma = 8,37\text{mm}$	$\mu = 520,86$ $\sigma = 1,68$
Jaune pâle	$\mu = 5\,588,2\text{mm}$ $\sigma = 8,77\text{mm}$	$\mu = 516,09$ $\sigma = 1,56$

5. L'étendue de mesure de l'intensité n'est pas définie par le fabricant. L'intensité minimum pouvant être mesurée par le LMS111 est de 10, tandis que l'intensité maximale n'est pas spécifiée. À titre de référence, SICK (2012) indique toutefois qu'un matériau réfléchissant de 1 250 candela/lux/mètre² génère une valeur maximale de 1 000.



(a) Distribution des mesures de distance pour diverses couleurs à fini mât



(b) Distribution des mesures d'intensité pour diverses couleurs à fini mât

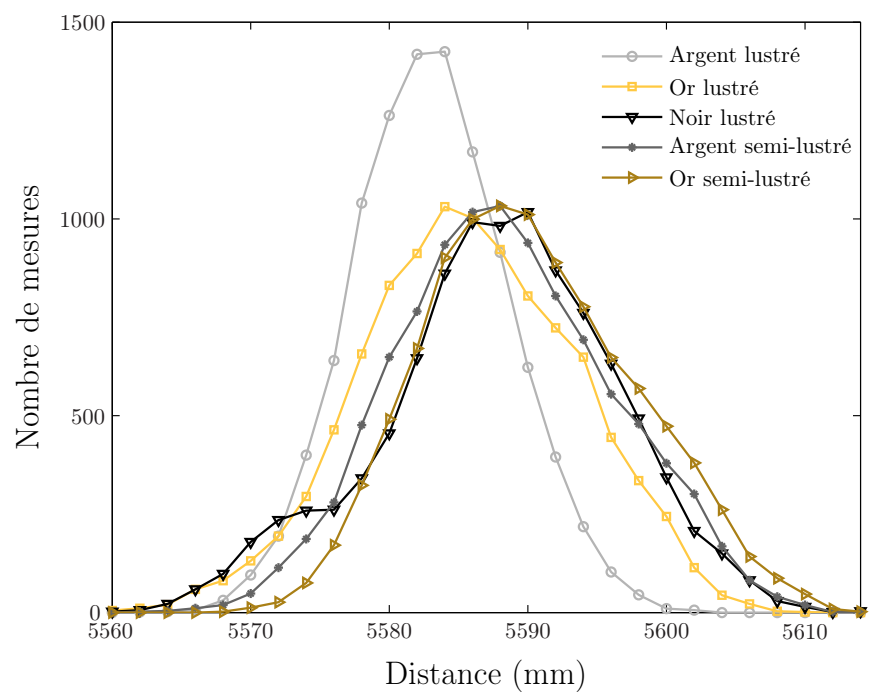
Figure 4.10 Distribution des mesures pour diverses couleurs à fini mât

L'effet des couleurs est noté beaucoup plus au niveau de l'intensité qu'à celui de la distance. Ceci confirme qu'il est possible de se fier sur les mesures d'intensité pour différencier une bonne partie des couleurs ici étudiées. Étrangement, certaines couleurs telles que le vert pâle, le bleu et l'orange créent des distributions bi-modales au niveau de l'intensité. Le même phénomène est remarqué dans l'expérience réalisée par Ye et Borenstein (2002). Quant aux mesures de distance, l'effet des couleurs est moins concluant étant donné que les distributions sont assez regroupées et qu'elles montrent un écart-type semblable. Malgré tout, le vert et l'orange foncé se démarquent un peu du lot avec une plus faible moyenne des distances mesurées. D'ailleurs, la différence maximale de 6,9mm au niveau de la moyenne survient entre le carton vert et le carton bleu. Ye et Borenstein (2002) obtiennent aussi cet écart maximal entre le bleu et le vert lors de la caractérisation d'un SICK LMS200. Les autres couleurs possèdent une moyenne de près de 5 590mm. Cet effet relativement peu influant de la couleur sur la mesure moyenne de la distance est aussi observé dans les travaux de Reina et Gonzales (1997); Ye et Borenstein (2002); Alwan *et al.* (2005); Koceski *et al.* (2009) pour divers types de capteurs laser.

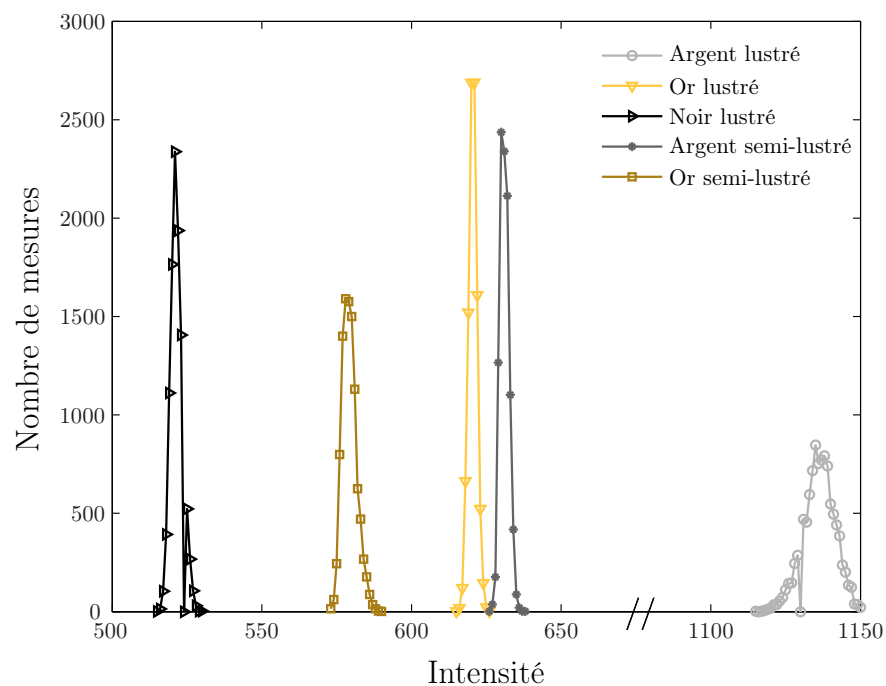
Finalement, la figure 4.11 et le tableau 4.3 montrent les résultats de l'expérience sur les *couleurs à fini réfléchissant*. Ils illustrent bien que la couleur et le fini de surface influencent les valeurs de distance et d'intensité. En ce qui a trait aux distances, les résultats démontrent que ces mesures sont sensibles à la réflectivité de la surface, tout comme à la couleur. En effet, plus la surface est réfléchissante et pâle, plus la moyenne des distances mesurées semble être petite et celle des intensités semble être grande. Ainsi, $Dist_{Argent} < Dist_{Or} < Dist_{Noir}$ et $Int_{Argent} > Int_{Or} > Int_{Noir}$ pour un même fini de surface, alors que $Dist_{Lustré} < Dist_{Semi-lustré}$ et $Int_{Lustré} > Int_{Semi-lustré}$ pour une même couleur. De plus, il est clair que le carton argent de fini lustré crée une distribution très différente au niveau des distances, notamment au niveau de l'écart-type. Ce genre de distribution est très similaire au résultat obtenu par Ye et Borenstein (2002) lorsque la cible étudiée est du papier d'aluminium. L'écart-type maximal de la distance est associé à la plus faible valeur moyenne d'intensité. Inversement, l'écart-type minimal est obtenu lorsque la cible est de couleur argent avec fini lustré, cette dernière possède la plus grande valeur moyenne d'intensité.

Tableau 4.3 Moyenne et écart-type des mesures - couleurs à fini réfléchissant

Couleur	Distribution de la distance	Distribution de l'intensité
Argent lustré	$\mu = 5\,583,5\text{mm}$ $\sigma = 5,54\text{mm}$	$\mu = 1\,136,32$ $\sigma = 5,40$
Or lustré	$\mu = 5\,586,2\text{mm}$ $\sigma = 7,72\text{mm}$	$\mu = 620,49$ $\sigma = 1,41$
Noir lustré	$\mu = 5\,588,3\text{mm}$ $\sigma = 8,40\text{mm}$	$\mu = 521,34$ $\sigma = 1,97$
Argent semi-lustré	$\mu = 5\,588,8\text{mm}$ $\sigma = 7,78\text{mm}$	$\mu = 631,04$ $\sigma = 1,48$
Or semi-lustré	$\mu = 5\,590,6\text{mm}$ $\sigma = 7,57\text{mm}$	$\mu = 579,28$ $\sigma = 2,45$



(a) Distribution de la distance pour diverses couleurs à fini réfléchissant

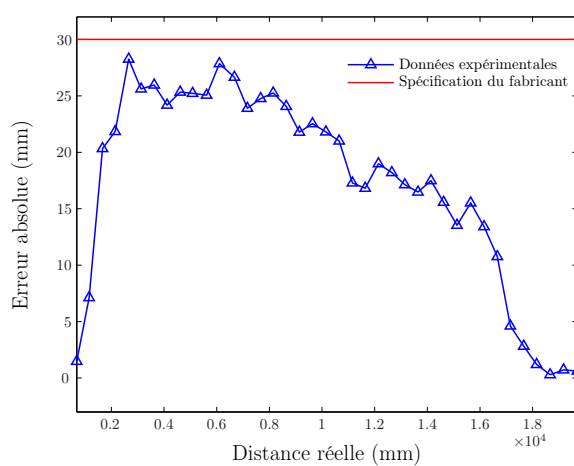


(b) Distribution de l'intensité pour diverses couleurs à fini réfléchissant

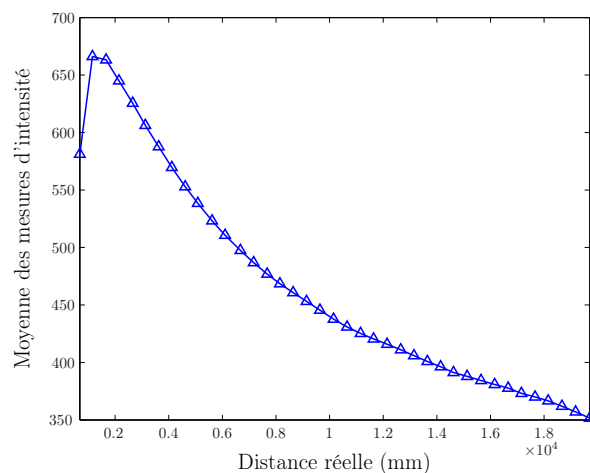
Figure 4.11 Distribution des mesures pour diverses couleurs à fini réfléchissant

4.1.6 Effet de la distance

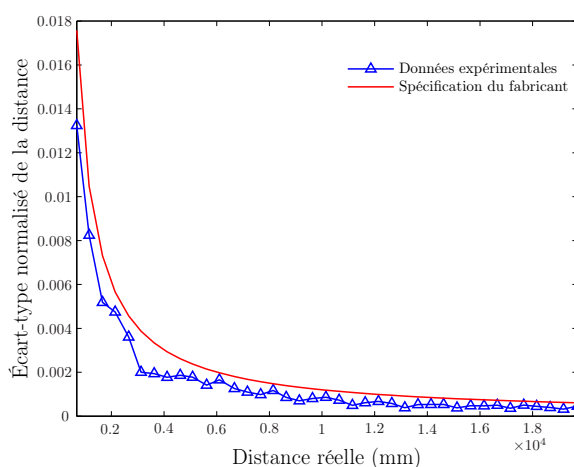
Pour cette expérience, la cible n'était plus située à une distance fixe de l'appareil de mesure. Puisque le fabricant précise que le lidar peut mesurer des distances allant jusqu'à 20m (SICK, 2012), la distance relative de la cible par rapport à l'appareil de mesure fut variée de 0,681m à 19,699m par incréments d'environ 0,5m. À chaque changement de position de la cible, la procédure décrite à la section 4.1.1 était répétée de manière à garantir une précision optimale pour chacune des mesures. Une fois la cible bien contrainte par rapport au lidar, 10 000 mesures de distance et autant de mesures d'intensité étaient acquises. La figure 4.12 et le tableau 4.4 illustrent les résultats.



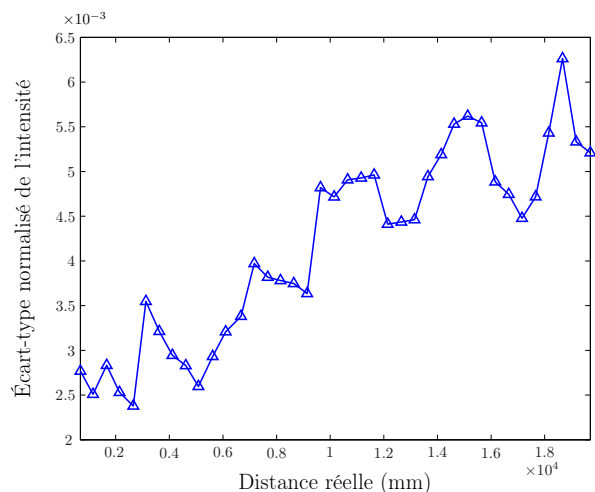
(a) Valeur moyenne de l'erreur en fonction de la distance réelle



(b) Valeur moyenne de l'intensité en fonction de la distance réelle



(c) Écart-type normalisé des distances mesurées en fonction de la distance réelle



(d) Écart-type normalisé des mesures d'intensité en fonction de la distance

Figure 4.12 Moyenne et écart-type des mesures en fonction de la distance réelle

Tableau 4.4: Moyenne et écart-type de la distance et de l'intensité en fonction de la distance réelle

Distance réelle	Distribution de la distance	Distribution de l'intensité
681mm	$\mu = 682,5\text{mm}$ $\sigma = 9,04\text{mm}$	$\mu = 581,18$ $\sigma = 1,61$
1 153mm	$\mu = 1 145,9\text{mm}$ $\sigma = 9,45\text{mm}$	$\mu = 666,14$ $\sigma = 1,67$
1 662mm	$\mu = 1 641,7\text{mm}$ $\sigma = 8,51\text{mm}$	$\mu = 663,19$ $\sigma = 1,88$
2 143mm	$\mu = 2 121,2\text{mm}$ $\sigma = 10,07\text{mm}$	$\mu = 644,98$ $\sigma = 1,63$
2 655mm	$\mu = 2 626,7\text{mm}$ $\sigma = 9,47\text{mm}$	$\mu = 625,56$ $\sigma = 1,49$
3 127mm	$\mu = 3 101,4\text{mm}$ $\sigma = 6,21\text{mm}$	$\mu = 606,21$ $\sigma = 1,15$
3 626mm	$\mu = 3 600,0\text{mm}$ $\sigma = 6,97\text{mm}$	$\mu = 587,64$ $\sigma = 1,89$
4 115mm	$\mu = 4 090,8\text{mm}$ $\sigma = 7,24\text{mm}$	$\mu = 569,69$ $\sigma = 1,68$
4 616mm	$\mu = 4 590,7\text{mm}$ $\sigma = 8,55\text{mm}$	$\mu = 552,85$ $\sigma = 1,56$
5 083mm	$\mu = 5 057,8\text{mm}$ $\sigma = 8,98\text{mm}$	$\mu = 538,43$ $\sigma = 1,40$
5 615mm	$\mu = 5 589,9\text{mm}$ $\sigma = 7,91\text{mm}$	$\mu = 523,21$ $\sigma = 1,53$
6 101mm	$\mu = 6 073,1\text{mm}$ $\sigma = 10,06\text{mm}$	$\mu = 510,72$ $\sigma = 1,64$
6 672mm	$\mu = 6 645,3\text{mm}$ $\sigma = 8,35\text{mm}$	$\mu = 497,42$ $\sigma = 1,68$
7 168mm	$\mu = 7 144,1\text{mm}$ $\sigma = 7,81\text{mm}$	$\mu = 486,83$ $\sigma = 1,93$
7 670mm	$\mu = 7 645,2\text{mm}$ $\sigma = 7,49\text{mm}$	$\mu = 476,85$ $\sigma = 1,82$
8 145mm	$\mu = 8 119,7\text{mm}$ $\sigma = 9,50\text{mm}$	$\mu = 468,43$ $\sigma = 1,77$
8 642mm	$\mu = 8 618,0\text{mm}$ $\sigma = 7,38\text{mm}$	$\mu = 460,75$ $\sigma = 1,73$
9 140mm	$\mu = 9 118,2\text{mm}$ $\sigma = 6,37\text{mm}$	$\mu = 453,18$ $\sigma = 1,65$
9 638mm	$\mu = 9 615,5\text{mm}$ $\sigma = 7,71\text{mm}$	$\mu = 445,56$ $\sigma = 2,15$
10 146mm	$\mu = 10 124,2\text{mm}$ $\sigma = 8,72\text{mm}$	$\mu = 437,66$ $\sigma = 2,06$
10 650mm	$\mu = 10 629,0\text{mm}$ $\sigma = 7,77\text{mm}$	$\mu = 430,83$ $\sigma = 2,11$
11 156mm	$\mu = 11 138,7\text{mm}$ $\sigma = 5,50\text{mm}$	$\mu = 425,33$ $\sigma = 2,10$
11 641mm	$\mu = 11 624,2\text{mm}$ $\sigma = 7,15\text{mm}$	$\mu = 420,51$ $\sigma = 2,09$
12 145mm	$\mu = 12 126,0\text{mm}$ $\sigma = 8,10\text{mm}$	$\mu = 415,82$ $\sigma = 1,83$
12 650mm	$\mu = 12 631,8\text{mm}$ $\sigma = 7,31\text{mm}$	$\mu = 411,01$ $\sigma = 1,82$
13 148mm	$\mu = 13 130,9\text{mm}$ $\sigma = 5,04\text{mm}$	$\mu = 405,91$ $\sigma = 1,81$
13 647mm	$\mu = 13 630,5\text{mm}$ $\sigma = 7,21\text{mm}$	$\mu = 400,91$ $\sigma = 1,98$
14 140mm	$\mu = 14 122,5\text{mm}$ $\sigma = 7,53\text{mm}$	$\mu = 396,26$ $\sigma = 2,06$
14 618mm	$\mu = 14 602,4\text{mm}$ $\sigma = 7,80\text{mm}$	$\mu = 391,24$ $\sigma = 2,16$
15 129mm	$\mu = 15 115,5\text{mm}$ $\sigma = 5,69\text{mm}$	$\mu = 387,92$ $\sigma = 2,18$
15 644mm	$\mu = 15 628,5\text{mm}$ $\sigma = 7,46\text{mm}$	$\mu = 384,30$ $\sigma = 2,13$

Tableau 4.4: Moyenne et écart-type de la distance et de l'intensité en fonction de la distance réelle (Suite)

Distance réelle	Distribution de la distance	Distribution de l'intensité
16 157mm	$\mu = 16\,143,6\text{mm}$ $\sigma = 7,60\text{mm}$	$\mu = 380,81$ $\sigma = 1,86$
16 661mm	$\mu = 16\,650,2\text{mm}$ $\sigma = 8,29\text{mm}$	$\mu = 377,71$ $\sigma = 1,79$
17 155mm	$\mu = 17\,150,4\text{mm}$ $\sigma = 6,17\text{mm}$	$\mu = 373,13$ $\sigma = 1,67$
17 661mm	$\mu = 17\,658,2\text{mm}$ $\sigma = 8,86\text{mm}$	$\mu = 369,98$ $\sigma = 1,75$
18 153mm	$\mu = 18\,151,8\text{mm}$ $\sigma = 8,15\text{mm}$	$\mu = 366,60$ $\sigma = 1,99$
18 664mm	$\mu = 18\,663,7\text{mm}$ $\sigma = 7,34\text{mm}$	$\mu = 361,96$ $\sigma = 2,27$
19 172mm	$\mu = 19\,172,7\text{mm}$ $\sigma = 6,16\text{mm}$	$\mu = 357,01$ $\sigma = 1,90$
19 699mm	$\mu = 19\,699,6\text{mm}$ $\sigma = 9,00\text{mm}$	$\mu = 351,64$ $\sigma = 1,83$

L'erreur croît rapidement pour les plus petites distances étudiées, atteint un plateau et décroît ensuite lentement pour les distances $\geq 6\,672\text{mm}$. Un résultat similaire est obtenu par Park *et al.* (2010), qui observent des variations cycliques de l'erreur en fonction de la distance réelle. Les mesures de distance sont conformes aux marges de précision indiquées par le fabricant. En effet, l'erreur demeure en tout temps inférieure à l'erreur systématique typique spécifiée par le fabricant. L'écart-type normalisé de la distance montre également un niveau de dispersion en deçà de la limite donnée par le fabricant (voir la section 3.1.1). L'écart-type normalisé décroît avec la distance réelle, ce qui implique que la répétabilité du télémètre laser augmente avec la distance. En ce qui a trait à l'intensité, la forme des résultats illustrés à la figure 4.12b est similaire à celle présentée par Kaasalainen *et al.* (2011) pour un lidar SICK LMS151.

Une particularité observée lors des expériences portant sur l'effet des distances est la perte de la distribution normale standard au niveau des mesures de distance et d'intensité, pour certaines plages de distances étudiées. Ce phénomène, illustré à la figure 4.13, fut noté pour les distributions de distance lorsque les plages de distances réelles étaient $\leq 2\,143\text{mm}$, tandis qu'il fut observé pour les distributions d'intensité surtout lorsque les distances réelles étaient entre $1\,374\text{mm}$ et $1\,662\text{mm}$. Toutefois, en ce qui a trait à l'intensité, de telles distributions non standards furent aussi constatées pour d'autres distances, notamment lors des expériences sur les tons de gris (voir la section 4.1.5, en particulier la figure 4.8b). Ces distributions non standards furent par ailleurs reproduites à plusieurs reprises avec succès afin de confirmer leur existence. Cette particularité, sous toutes réserves, ne semble pas documentée dans la littérature actuelle.

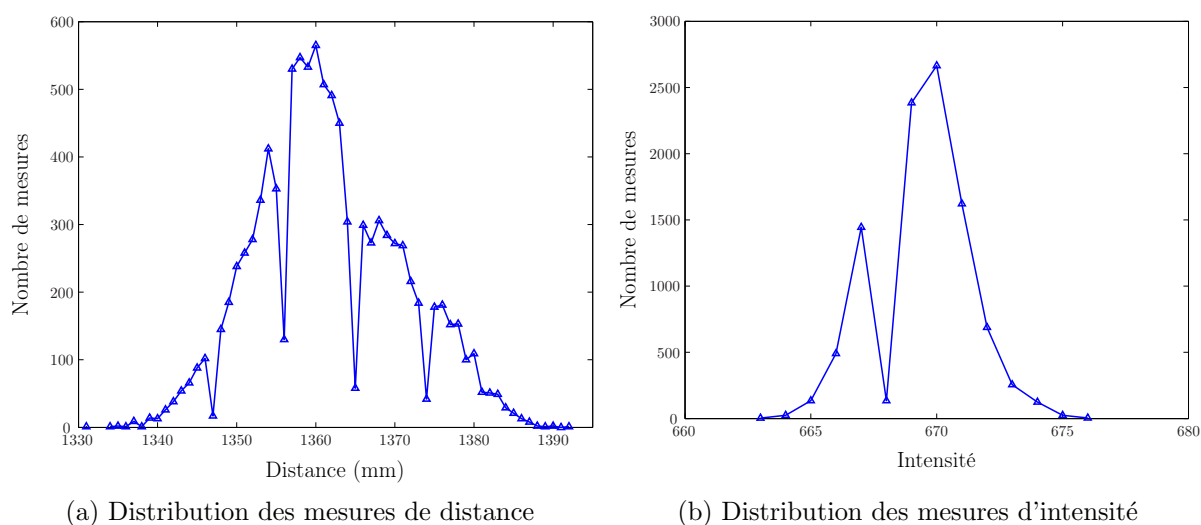


Figure 4.13 Distributions particulières des mesures pour certaines plages de distances

4.1.7 Effet de l'angle d'incidence

Cette expérience vise à étudier l'effet de l'angle d'incidence, formé par le rayon émis par le télémètre laser sur la surface-cible, sur les mesures de distance et d'intensité. Pour ce faire, la cible fut tout d'abord positionnée à une distance fixe de 5,615m par rapport à l'appareil de mesure. Le moteur intelligent permet ensuite d'effectuer la rotation de la cible de manière très précise. L'angle d'incidence pu varier ainsi sur une plage de 0° à 70° ⁶ par incréments de 1° . À chacun des angles, le programme informatique développé se chargeait de soustraire 10 000 mesures de distance et 10 000 mesures d'intensité. Les résultats de cette expérience sont illustrés à la figure 4.14.

À la lumière de ces résultats, l'angle d'incidence crée un effet non-négligeable au niveau des mesures de distance. Ce dernier se traduit par un écart maximal de 13,15mm sur l'ensemble de la plage d'angles étudiée. D'ailleurs, cette variation est semblable au résultat obtenu par Ye et Borenstein (2002), qui ont observé un écart maximal de 16,3mm sur une plage d'angles d'incidence de 0° à 60° pour un lidar SICK LMS200. Également, Park *et al.* (2010) obtiennent une variation maximale de l'ordre de 20mm sur une plage de 0° à 60° en utilisant un lidar Hokuyo UBG-04LX-F01, sauf que, dans ce dernier cas, les distances mesurées sont plus petites lorsque l'angle d'incidence est grand. Bien entendu, l'intensité diminue aussi en fonction de l'angle d'incidence. Son taux de variation semble être de plus en plus important au fur et à mesure que l'angle d'incidence augmente. Ceci est aussi observé par Kaasalainen *et al.* (2011).

6. Au delà de 70° , l'aire transversale du rayon laser émis par le télémètre n'était pas entièrement contenu par la cible, générant des données non valides pour cette expérience.

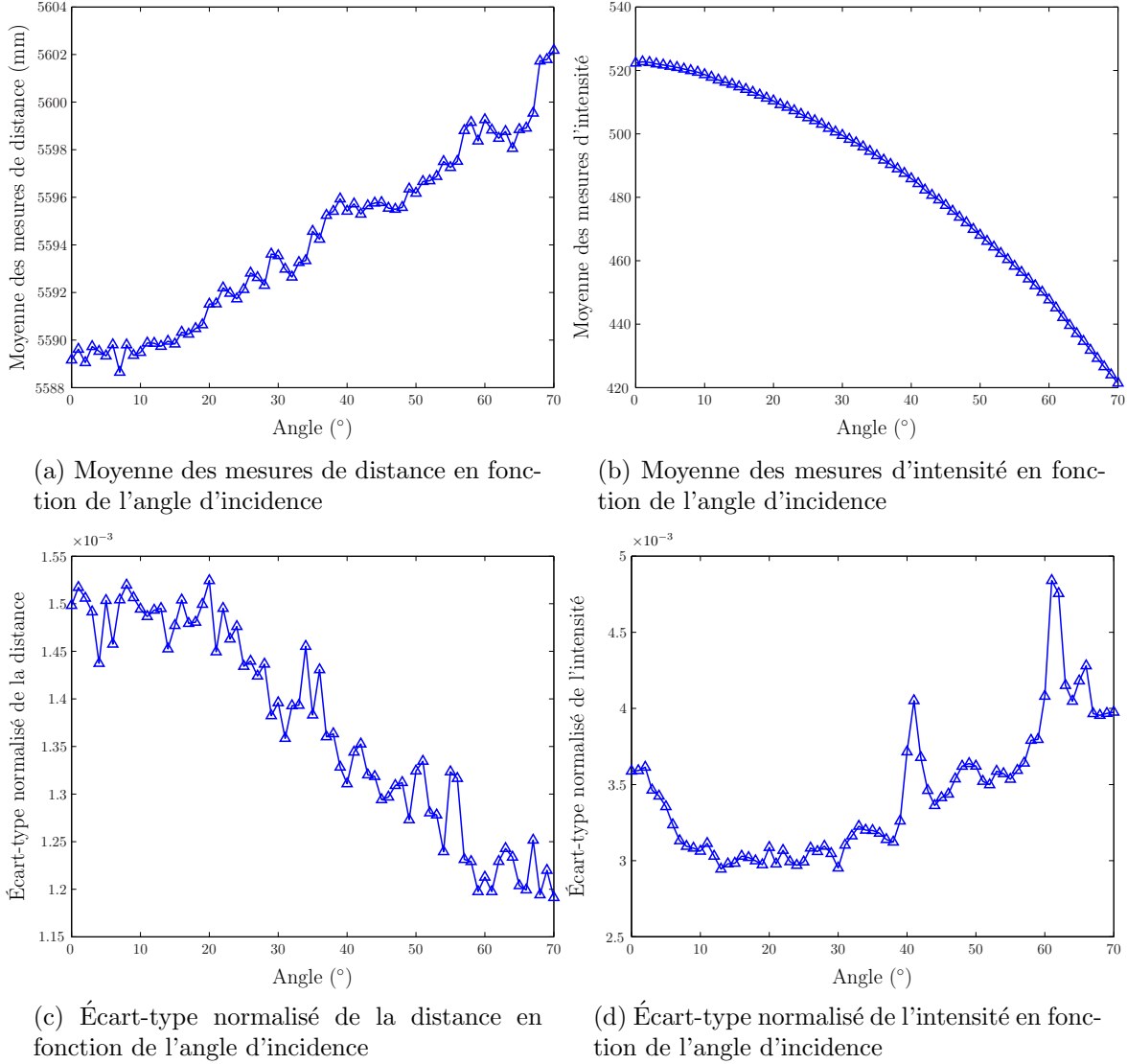
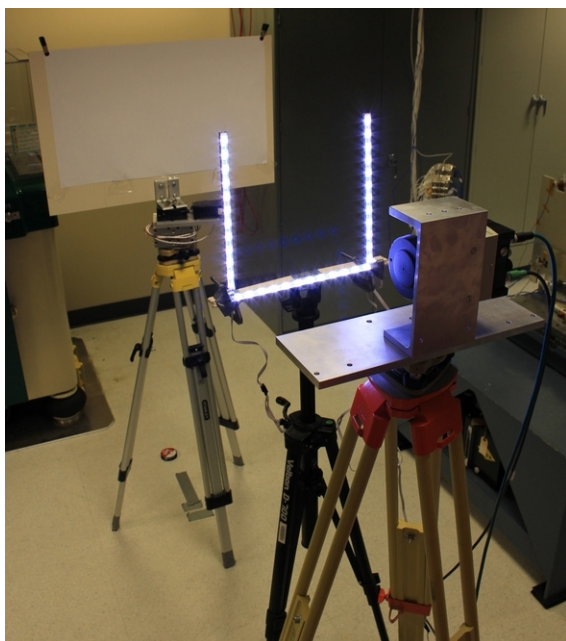


Figure 4.14 Moyenne et écart-type des mesures pour différents angles d'incidence

4.1.8 Effet des conditions d'éclairage

Cette expérience consiste à éclairer la scène de l'expérience de différentes façons afin d'observer l'impact des conditions d'éclairage sur les mesures du lidar. L'expérience s'est déroulée dans un local obscur ne possédant a priori aucune source de lumière directe. Des DELs de différentes couleurs disposées sur un support en « U » furent orientées vers le lidar et servirent pour tester différents types d'éclairage. Le lidar et la cible furent positionnés de sorte que le rayon laser passe par le centre géométrique du « U ». Une distance fixe de 1,374m était utilisée tout au long de l'expérience. Comme lors des expériences précédentes, 10 000 mesures de distance et autant de mesures d'intensité furent acquises pour chacune des conditions d'éclairage étudiée. La figure 4.15 illustre le montage expérimental.



(a) Montage expérimental



(b) Déroulement d'une expérience

Figure 4.15 Configuration de l'expérience sur les conditions d'éclairage

Plus de 16 couleurs différentes d'éclairage ambiant furent testées, en plus de divers types d'éclairage stroboscopique et de multiples niveaux d'intensité lumineuse. Malgré tout, aucune variation significative des distributions des mesures de distance ou d'intensité ne fut notée. Au niveau de la distance, la valeur moyenne mesurée est de 1 361,8mm et la différence maximale rapportée est seulement 1,40mm (entre le vert(+) et le blanc(-)). En ce qui concerne l'intensité, la valeur moyenne mesurée est de 669,5 et la différence maximale est de 0,4. Cette dernière survient entre le bleu(+) et le rouge(-), ce qui ne constitue pas une variation significative. Dans le cas de la distance tout comme dans le cas de l'intensité, l'écart-type est sensiblement le même d'une distribution à une autre. Par conséquent, il apparaît clairement que ces conditions d'éclairage artificiel n'influencent pas de manière importante les lectures de distance et d'intensité. Il reste toutefois possible qu'un éclairage constituée de lumière ayant un spectre différent (e.g. la lumière du Soleil) soit plus influent.

4.2 Étalonnage de *CORIAS*

Cette section présente les deux étapes de l'étalonnage du système de vision. La première, l'étalonnage intrinsèque, consiste à définir précisément la pose du capteur lidar exprimée dans le repère de référence de *CORIAS*. Par la suite, l'étalonnage extrinsèque vise à retrouver minutieusement la pose de ce dernier par rapport au repère de navigation d'un robot mobile.

4.2.1 Étalonnage intrinsèque

Modèle mathématique du système

Le développement du modèle mathématique de *CORIAS* repose sur les repères illustrés à la figure 4.17. C est le repère fixe de *CORIAS*. Ce dernier est immobile par rapport à la base du système de vision puisque son axe Z_C est colinéaire avec l'axe de rotation de la table tournante. La surface inférieure de la base est contenue dans le plan X_C - Y_C . Pour sa part, l'origine du repère L est superposée avec le centre optique du lidar. L tourne autour de l'axe Z_C lors d'un balayage. Lorsque le système est à 0° en azimuth, l'orientation du repère L est la même que celle du repère C . D_x , D_y et D_z sont les translations en X_C , Y_C et Z_C pour amener l'origine du repère C à l'origine du repère L . Leurs valeurs théoriques sont respectivement -31,19mm, 143,92mm et 141,55mm⁷. Lors d'un balayage, le lidar mesure les distances dans le plan X_L - Z_L et renvoie les points en coordonnées polaires (figure 4.16).

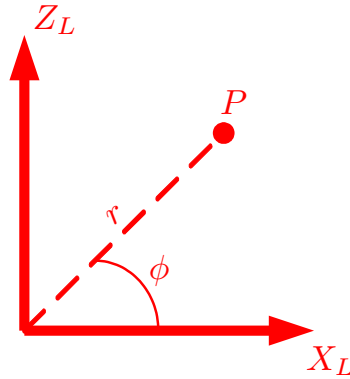
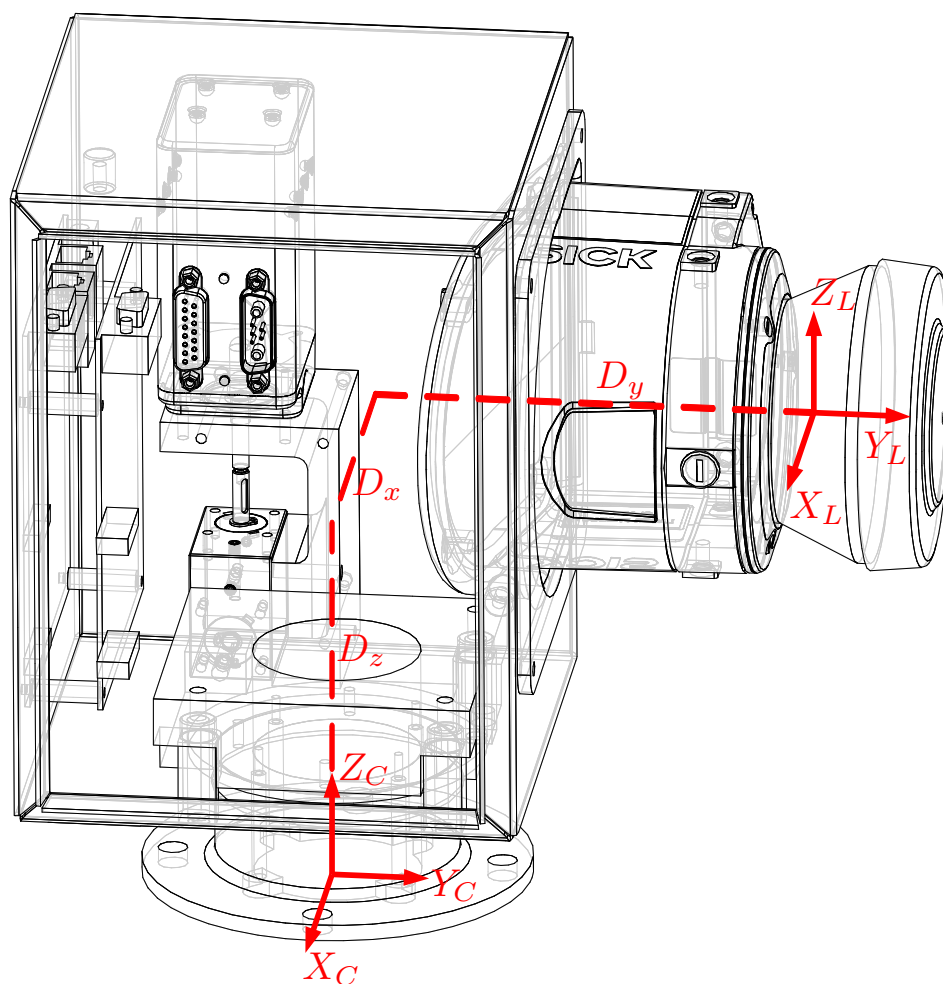


Figure 4.16 Représentation d'un point dans le repère du lidar

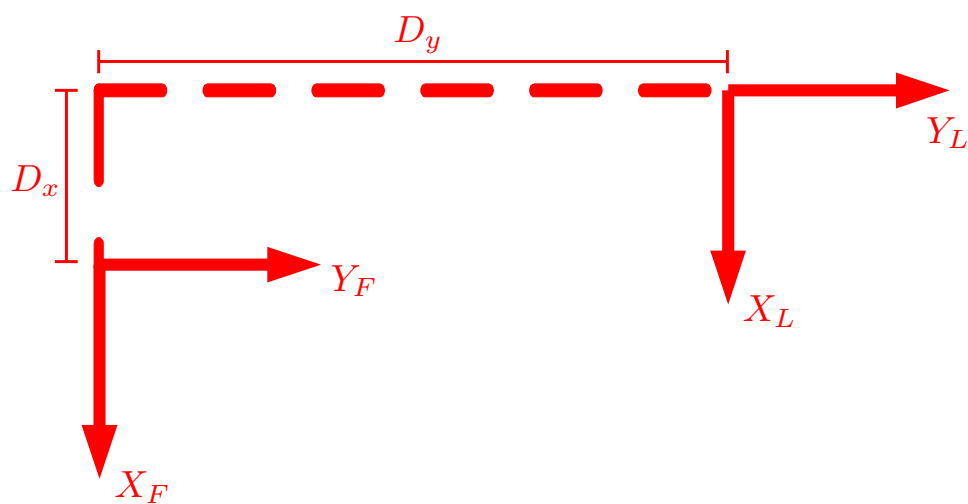
ϕ est l'angle d'élévation, r est la distance mesurée par le lidar et P est le point intercepté par le capteur. Les coordonnées homogènes du point dans le repère du lidar sont donc données par :

$${}^L P = \begin{bmatrix} r \cos(\phi) & 0 & r \sin(\phi) & 1 \end{bmatrix}^T \quad (4.1)$$

7. Ces valeurs furent définies par conception et déterminées à l'aide d'outils de CAO.



(a) Vue générale de la pose des repères



(b) Vue du dessus

Figure 4.17 Repère fixe de *CORIAS* (C) et repère du lidar (L)

Sachant que le repère L tourne autour de l'axe Z_C , il est possible d'obtenir les coordonnées des points mesurés exprimées dans le référentiel C en utilisant les matrices de transformation homogènes :

$${}^C P = {}^C T_L {}^L P \quad (4.2)$$

${}^C T_L$ est la matrice de transformation homogène du repère-lidar par rapport au repère de *CORIAS*. Donc, le modèle nominal du système de vision, sans considérer d'incertitudes, est donné par :

$${}^C P = ROT_z(\theta) Trans_{x,y,z}(D_x, D_y, D_z) {}^L P \quad (4.3)$$

θ est l'azimut du capteur. L'équation 4.3 suppose cependant que tous les paramètres de la transformation entre le repère C et L sont connus parfaitement. Or, en pratique, plusieurs sources d'erreur rendent ces paramètres inexacts et génèrent de l'incertitude sur les six degrés de liberté de la pose. Par conséquent, un modèle plus général et davantage exact est donné par :

$${}^C P = ROT_z(\theta + \delta_\theta) ROT_y(\delta_\psi) ROT_x(\delta_\gamma) Trans_{x,y,z}(D_x + \delta_x, D_y + \delta_y, D_z + \delta_z) {}^L P \quad (4.4)$$

δ_θ , δ_ψ , δ_γ , δ_x , δ_y et δ_z sont des paramètres inconnus qui influencent la pose du repère L par rapport au repère C .

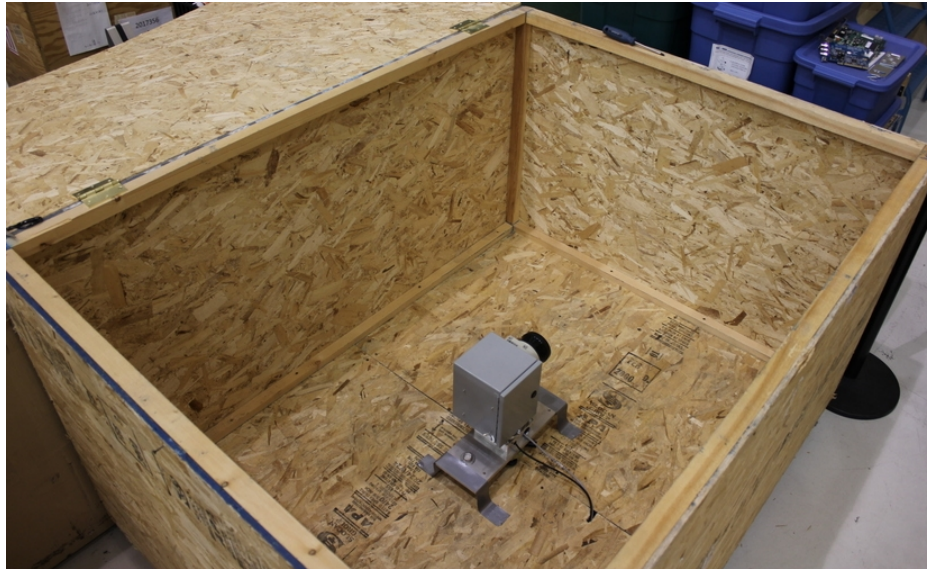
Réalisation de l'étalonnage intrinsèque

L'étalonnage intrinsèque consiste à identifier les six paramètres inconnus de l'équation 4.4 en réalisant une expérience appropriée. L'approche consiste à analyser les mesures du système lorsque ce dernier est placé à l'intérieur d'une boîte en bois de forme pré-déterminée, tel qu'illustré à la figure 4.18. La profondeur de cette boîte (P) est de 1,295m tandis que sa largeur (L) vaut 1,698m. Un objet d'étalonnage très semblable est utilisé dans les travaux d'Atanacio-Jimenez *et al.* (2011), qui présentent cependant une méthode différente de celle proposée ici.

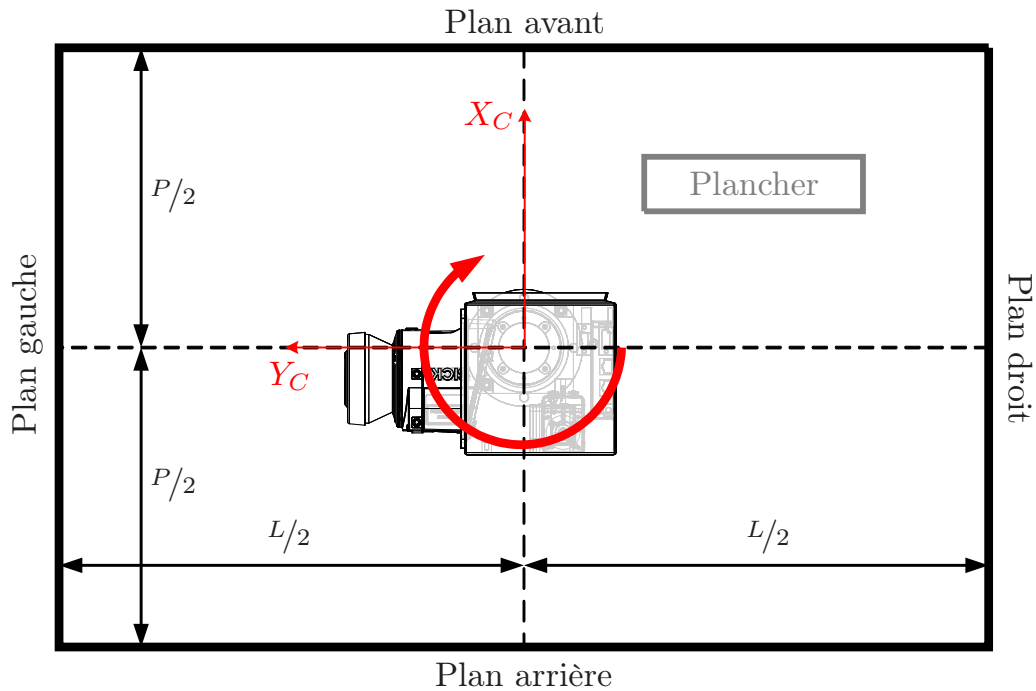
L'étalonnage intrinsèque fut réalisé en tenant compte des résultats de la caractérisation. Ainsi, le système de vision fut mis sous tension plus de 6 heures avant le début des opérations afin de limiter les effets du temps d'opération et le lidar fut configuré à une fréquence d'acquisition de 25Hz. Les expériences furent réalisées dans le même laboratoire que celui utilisé pour la caractérisation.

Les dimensions internes de la boîte furent d'abord mesurées à plusieurs points et à maintes reprises à l'aide d'un télémètre laser possédant une précision de $\pm 1,5\text{mm}$. Ceci permet de connaître précisément les dimensions et d'assurer que les côtés soient bien planaires⁸. La

8. Les légers défauts de planéité de certains côtés furent corrigés en ajustant certaines des vis de la charpente.



(a) Configuration de l'expérience d'étalonnage intrinsèque



(b) Principe du positionnement (vue du dessus)

Figure 4.18 Calibration intrinsèque de *CORIAS*

perpendicularité des plans fut vérifiée à l'aide d'une simple équerre. L'origine du repère C fut positionnée en plein centre de la boîte à l'aide du télémètre laser et orientée adéquatement au moyen d'une embase universelle à vis calantes (figure 4.1) afin que l'axe X_C soit normal au plan avant et l'axe Y_C soit normal au plan gauche. Un balayage séquentiel⁹ de 360° avec

9. Un balayage non-continu, avec un arrêt complet à chaque angle d'azimut.

une résolution fine de $0,1^\circ$ en azimuth fut alors exécuté par *CORIAS*. La figure 4.19 illustre les points CP , c'est-à-dire la boîte, constituée de plus d'un million de points mesurés, telle que perçue par le système avant la calibration.

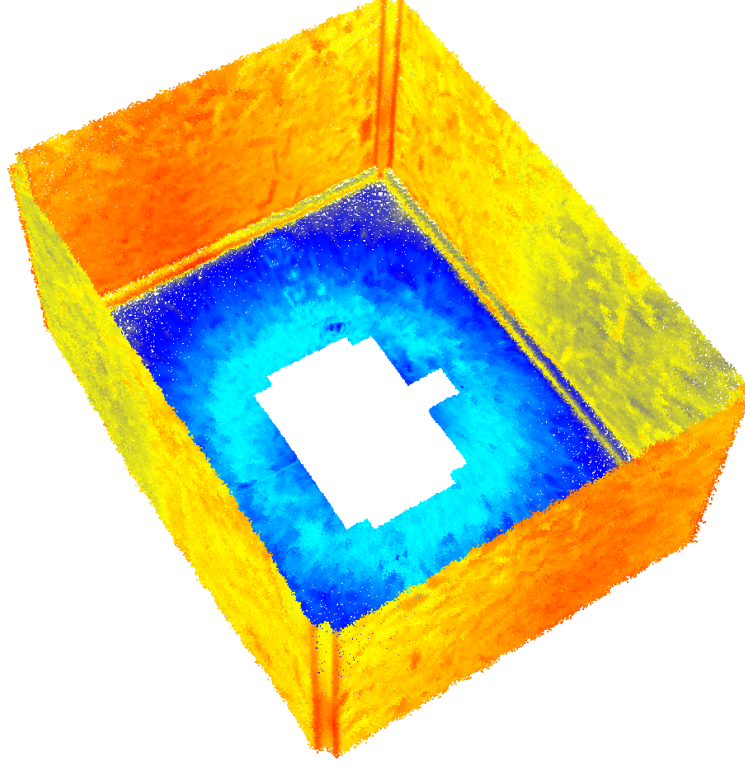


Figure 4.19 Représentation de la boîte par *CORIAS* avant la calibration intrinsèque

Les cinq plans composant la boîte furent ensuite segmentés afin de créer les ensembles de points $^CP_{GA}$, $^CP_{DR}$, $^CP_{AV}$, $^CP_{AR}$ et $^CP_{PL}$, respectivement les points du plan gauche, droit, avant, arrière et du plancher. En connaissant la représentation des plans faite par le système et la forme pré-déterminée de la boîte, il est ici possible d'identifier les paramètres inconnus en minimisant une fonction objectif appropriée. C'est aussi l'approche utilisée par James Underwood (2007); James P. Underwood et Scheduling (2010); Muhammad et Lacroix (2010). La fonction objectif, mise sur pied afin de calibrer le système, est donnée par :

$$\begin{aligned}
 f = & \frac{\sum_i^{N_{GA}} ({}^CP_{GA,y,i} - \frac{L}{2})^2}{N_{GA}} + \frac{\sum_i^{N_{DR}} ({}^CP_{DR,y,i} + \frac{L}{2})^2}{N_{DR}} + \frac{\sum_i^{N_{AV}} ({}^CP_{AV,x,i} - \frac{P}{2})^2}{N_{AV}} \\
 & + \frac{\sum_i^{N_{AR}} ({}^CP_{AR,x,i} + \frac{P}{2})^2}{N_{AR}} + \frac{\sum_i^{N_{PL}} ({}^CP_{PL,z,i} - \overline{P_{PL,z}})^2}{N_{PL}}
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Chaque terme de l'équation 4.5 quantifie la dispersion des points d'un ensemble autour d'une valeur de référence. Pour les ensembles P_{GA} , P_{DR} , P_{AV} et P_{AR} , cette valeur est la distance réelle entre l'origine du repère C et un plan de référence. Toutefois, le terme associé à l'ensemble P_{PL} est simplement la variance des points selon l'axe Z_C , étant donné que la distance verticale entre l'origine du repère C et le plancher ne put être mesurée précisément lors de l'expérimentation. Tel que discuté à la section 1.3, la fonction objectif doit répondre à certains critères afin que l'optimisation se déroule adéquatement. Pour la fonction 4.5, l'analyse et la validation de ces critères est faite à l'annexe C. Pour minimiser cette fonction à l'aide des paramètres inconnus, *fmincon* (MATLAB, 2010) fut utilisé. Les résultats de l'optimisation sont présentés au tableau 4.5.

Tableau 4.5 Valeurs des paramètres avant et après le processus d'optimisation

Paramètre	Valeur nominale	Valeur optimisée
δ_θ	0	0,2610°
δ_ψ	0	0,5066°
δ_γ	0	-0,5972°
δ_x	0	1,77mm
δ_y	0	-2,56mm
δ_z	0	-2,78mm
f	$3,6968 \times 10^{-4}$	$2,7196 \times 10^{-4}$

Afin de vérifier les résultats du tableau 4.5, une scène non utilisée pour l'étalonnage, composée de deux murs et d'un plancher planaires et perpendiculaires entre eux, fut balayée par le système. Les variances¹⁰ obtenues en utilisant le modèle nominal ($\sigma_{nominal}^2$) et le modèle étalonné ($\sigma_{étalonné}^2$) sont comparées au tableau 4.6. Ces résultats illustrent bien la valeur ajoutée de l'étalonnage intrinsèque.

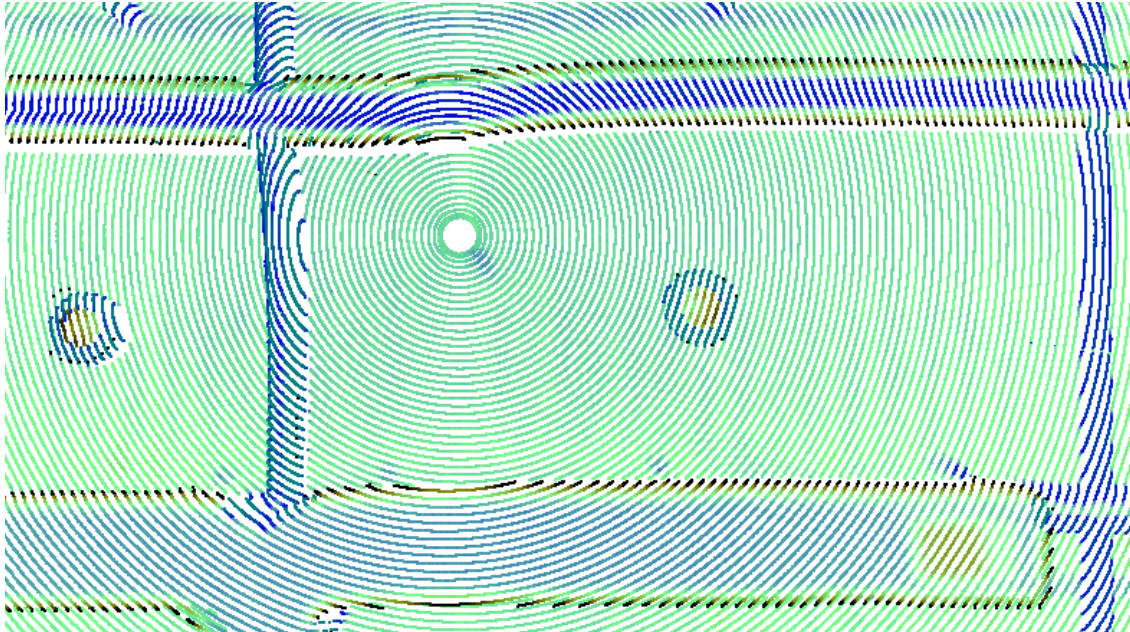
Tableau 4.6 Dispersion des données pour certaines régions planaires

Région	Nombre de points	$\sigma_{nominal}^2$	$\sigma_{étalonné}^2$
Mur #1	91 965	$5,8727 \times 10^{-5}$	$4,8961 \times 10^{-5}$
Mur #2	53 846	$5,3091 \times 10^{-5}$	$4,7966 \times 10^{-5}$
Plancher	155 031	$3,2544 \times 10^{-5}$	$2,7981 \times 10^{-5}$

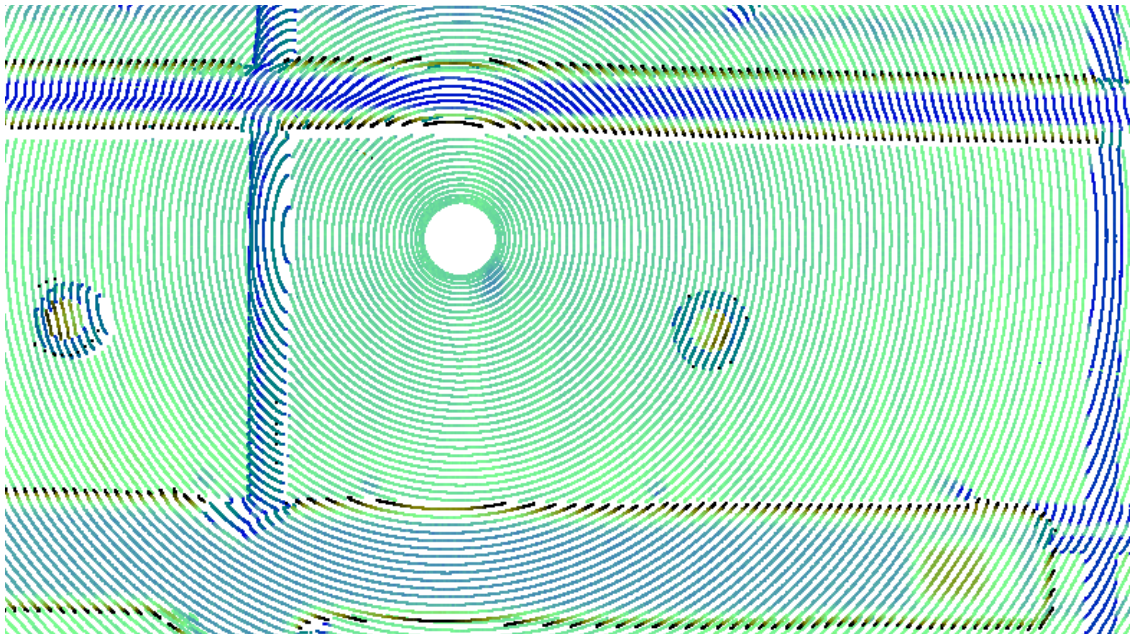
Il est aussi possible de constater visuellement la portée de l'étalonnage intrinsèque. Par exemple, la figure 4.20 compare la représentation de poutres droites (en bleu) situées au

10. Les variances sont mesurées selon l'axe normal au plan considéré.

plafond¹¹ d'un laboratoire, en se servant d'abord du modèle nominal, puis étalonné. Dans le cas du modèle nominal, les poutres semblent un peu déformées près de $X_C = 0$ et de $Y_C = 0$. Le modèle étalonné offre une représentation plus fidèle, les poutres étant plus linéaires.



(a) Représentation du plafond avec le modèle nominal



(b) Représentation du plafond avec le modèle étalonné

Figure 4.20 Comparaison entre le modèle nominal et le modèle étalonné

11. Le plafond est parallèle au plan X_C - Y_C .

4.2.2 Étalonnage extrinsèque

L'étalonnage extrinsèque est mis en oeuvre après l'étalonnage intrinsèque et consiste à déterminer précisément la matrice d'installation de *CORIAS*, c'est-à-dire la matrice de transformation homogène exprimant la pose du repère C par rapport au repère de navigation (N) du robot mobile.

Il est nécessaire de procéder à l'étalonnage extrinsèque chaque fois que la pose du système de vision est altérée. Une fois le système fixé au robot mobile, la pose du repère C est immobile par rapport au repère N . Il est alors important de bien connaître la matrice de transformation liant ces deux repères, puisqu'elle permet de situer le robot dans les représentations 3D générées par *CORIAS*. Il est possible de déterminer la matrice d'installation à l'aide d'outils usuels¹². Cependant, cela reste difficile et peu précis étant donné l'absence de points de mesure fiables permettant de quantifier les six degrés de liberté de la matrice. Pour remédier à cette situation, la procédure proposée utilise plutôt les mesures du système de vision.



Figure 4.21 *CORIAS* installé sur le robot *Juno*

12. Par exemple, à l'aide d'un inclinomètre et d'un ruban à mesurer.

Définition de la procédure d'étalonnage extrinsèque

Le système de vision installé sur le robot *Juno* de l'ASC est illustré à la figure 4.21. Étant donné l'emplacement du système, le robot mobile est toujours présent dans les images 3D produites par un balayage à couverture totale. La méthode proposée utilise cette caractéristique. Elle consiste à réaliser un balayage qui repère suffisamment de particularités géométriques du robot dans le nuage de points. Dans le cas de *Juno*, une particularité facile à identifier est le plateau horizontal situé à l'avant du robot. Ainsi, en déterminant l'équation du plan moyen représentant ce plateau, de même que l'équation des droites représentant certaines des arêtes, il est possible de déterminer la matrice d'installation. La figure 4.22 montre les repères sur lesquels reposent les principes de l'étalonnage extrinsèque.

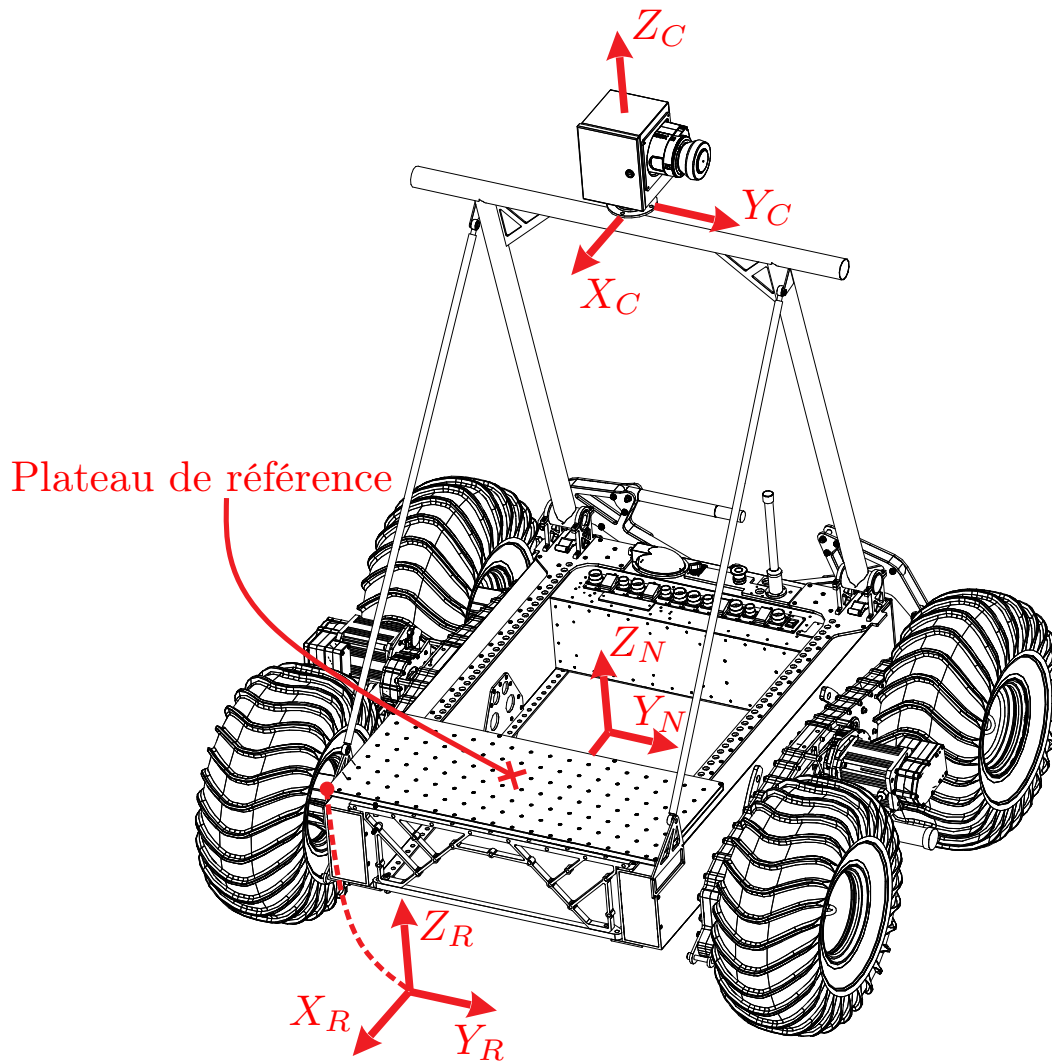


Figure 4.22 Représentation de *CORIAS* installé sur le robot *Juno*

Le référentiel C est le repère de *CORIAS* et N est le repère de navigation situé en plein centre du robot mobile. Dans le cas de *Juno*, X_N et Y_N sont contenus dans le plan des axes de rotation des roues et X_N pointe vers l'avant. Quant à lui, R est un repère de référence apposé arbitrairement à un endroit pratique pour la suite des démarches. Sur la figure 4.22, l'origine du référentiel R coïncide avec le coin avant gauche du plateau de référence et son orientation est la même que celle du repère N . De cette façon, l'arête gauche du plateau est colinéaire avec l'axe $-X_R$ et l'arête avant est colinéaire avec l'axe Y_R . Le principe de l'étalonnage extrinsèque est de résoudre l'équation suivante :

$${}^N T_C = {}^N T_R {}^R T_C \quad (4.6)$$

${}^N T_C$ est la matrice d'installation recherchée. Une hypothèse qu'implique cette méthode est qu'initialement, la matrice ${}^N T_R$ est connue. C'est une hypothèse plausible puisque, normalement, c'est une information qui peut être déterminée à l'aide des dimensions du robot, généralement connues avec une précision satisfaisante. La matrice ${}^R T_C$ décrit quant à elle les transformations permettant de faire coïncider le repère C avec le repère R . Celle-ci peut s'écrire sous forme plus explicite :

$${}^R T_C = ({}^C T_R)^{-1} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & d_x \\ n_y & o_y & a_y & d_y \\ n_z & o_z & a_z & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{n} & \mathbf{o} & \mathbf{a} & \mathbf{d} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \quad (4.7)$$

Les vecteurs colonnes \mathbf{n} , \mathbf{o} et \mathbf{a} sont respectivement les vecteurs unitaires X_R , Y_R et Z_R exprimés dans le repère C . Le vecteur colonne \mathbf{d} représente les translations nécessaires en X_C , Y_C et Z_C pour déplacer l'origine du repère C jusqu'à l'origine du repère R . Ces quatre vecteurs colonnes peuvent être identifiés directement à l'aide de la représentation que fait *CORIAS* du plateau de référence (figure 4.23). L'équation du plan minimisant l'erreur au carré doit d'abord être obtenue en utilisant, par exemple, *sftool* (MATLAB, 2010). Celle-ci est de la forme suivante :

$$f(x, y) = p_1 x + p_2 y + p_3 \quad (4.8)$$

Le plan défini par l'équation 4.8 est exprimé par rapport au repère C . Le vecteur \mathbf{a} est donc le vecteur unitaire normal à cette surface :

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} \frac{-p_1}{\sqrt{p_1^2 + p_2^2 + 1}} & \frac{-p_2}{\sqrt{p_1^2 + p_2^2 + 1}} & \frac{1}{\sqrt{p_1^2 + p_2^2 + 1}} \end{bmatrix}^T \quad (4.9)$$

Par la suite, l'origine du repère R est localisée manuellement sur le plan 4.8, à l'aide d'une représentation conjointe de ce dernier et du panneau de référence, tel qu'illustré à la figure 4.23.

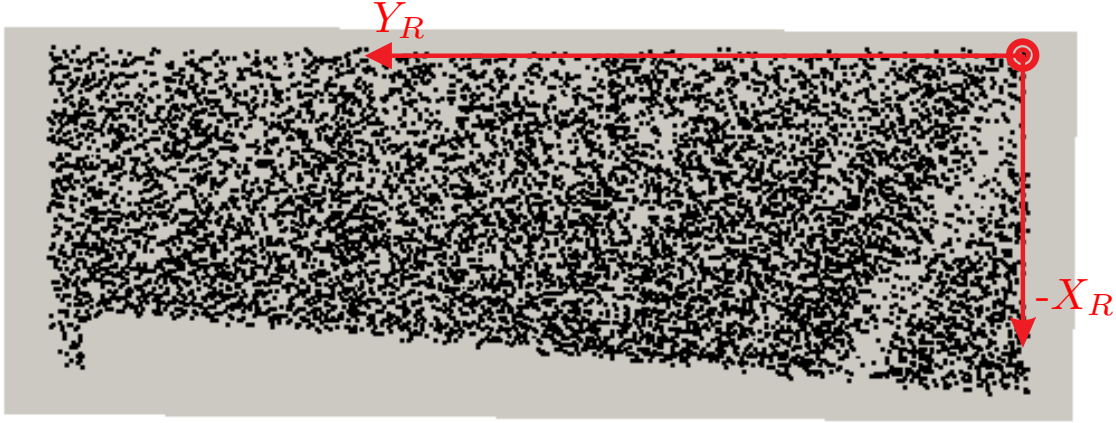


Figure 4.23 Représentation du panneau de référence et du plan moyen (vue du dessus)

Ainsi, les coordonnées de l'origine R sont les composants du vecteur \mathbf{d} . Le vecteur unitaire \mathbf{o} , colinéaire avec l'axe Y_R , est aussi déduit manuellement. Pour ce faire, il suffit de déterminer l'équation d'une droite du plan 4.8 qui passe par l'origine et qui semble être alignée avec l'arête avant du plateau de référence. Finalement, le vecteur unitaire \mathbf{n} est calculé automatiquement de manière à obtenir un référentiel « main droite » :

$$\mathbf{n} = \mathbf{o} \times \mathbf{a} \quad (4.10)$$

En résumé, lorsque *CORIAS* est installé sur le robot *Juno*, la procédure d'étalonnage extrinsèque consiste à :

- Déterminer la valeur de ${}^N T_R$ en utilisant les dimensions du robot ;
- Effectuer un balayage à couverture totale avec une résolution assez fine ;
- Segmenter, dans le nuage de points résultants, le panneau horizontal de référence situé à l'avant du robot ;
- Utiliser la représentation du panneau réalisée par *CORIAS* afin de déterminer $({}^C T_R)^{-1}$;
- Obtenir la matrice d'installation en résolvant successivement les équations 4.7 et 4.6.

CHAPITRE 5

TRAITEMENT DES DONNÉES

Afin de définir localement la trajectoire que doit suivre le robot mobile, la surface du terrain doit d'abord être reconstruite à partir du nuage de points. Ce chapitre aborde donc le traitement des données générées par le système de vision dans le contexte de la navigation autonome. Dans cette optique, un bref survol des principaux algorithmes utilisés pour traiter les données télémétriques de *CORIAS* est d'abord présenté. Par la suite, une attention particulière est accordée au traitement de l'intensité, notamment en ce qui a trait à sa normalisation en fonction de la distance et de l'angle d'incidence. Des conclusions sont finalement tirées sur l'utilisation de l'intensité pour l'identification d'obstacles et de régions particulières.

5.1 Traitement des mesures de distance

Un nuage de points brut possède plusieurs caractéristiques ne le rendant pas directement adapté à la reconstruction d'une surface navigable. Les algorithmes qui suivent visent à corriger certaines particularités problématiques du nuage de points. Ces algorithmes furent développés par l'ASC avant la réalisation du projet de recherche et la plupart d'entre eux sont utilisés tel quel pour traiter les données télémétriques de *CORIAS*. Ces données sont exprimées en coordonnées sphériques, c'est-à-dire par l'angle d'azimut, l'angle d'élévation et la distance (θ, ϕ, r) de chaque point mesuré. La démarche complète et la description plus détaillée de la majorité des algorithmes présentés sont disponibles notamment dans les travaux de Lamarche (2009); Gingras *et al.* (2010); Gingras (2010).

5.1.1 Suppression de l'empreinte du robot

Tel que discuté à la section 4.2.2, le robot est toujours présent dans les représentations 3D générées par le système de vision et ce, à chaque balayage à couverture totale. Les points liés au robot nuisent par contre aux algorithmes de reconstruction de surface. Il est donc nécessaire de les supprimer en utilisant une démarche appropriée. Par le passé, la méthode mise de l'avant était celle présentée par Lamarche (2009, section 4.2.1) et consistait à utiliser un tableau chargé en mémoire contenant les coordonnées en azimut et en élévation à partir desquelles les points devaient être rejetés.

Cette façon de faire fut remplacée par une nouvelle approche à l'été 2012. La nouvelle procédure consiste à déterminer, à partir des dimensions du robot, un ensemble de points définissant les sommets d'un volume l'englobant totalement. Les points mesurés par *CORIAS* se trouvant à l'intérieur de l'enveloppe convexe¹ de ces sommets sont ensuite supprimés.

5.1.2 Création du maillage en triangles irréguliers

La réalisation de la navigation autonome nécessite la modélisation de la surface du terrain à partir du nuage de points. Pour ce faire, la démarche consiste à représenter la surface à l'aide d'un maillage de triangles irréguliers. Ce type de représentation supporte la résolution variable inhérente aux nuages de points produits par *CORIAS*, en plus de permettre la reproduction des surfaces concaves (Dupuis *et al.*, 2005; Gingras *et al.*, 2010).

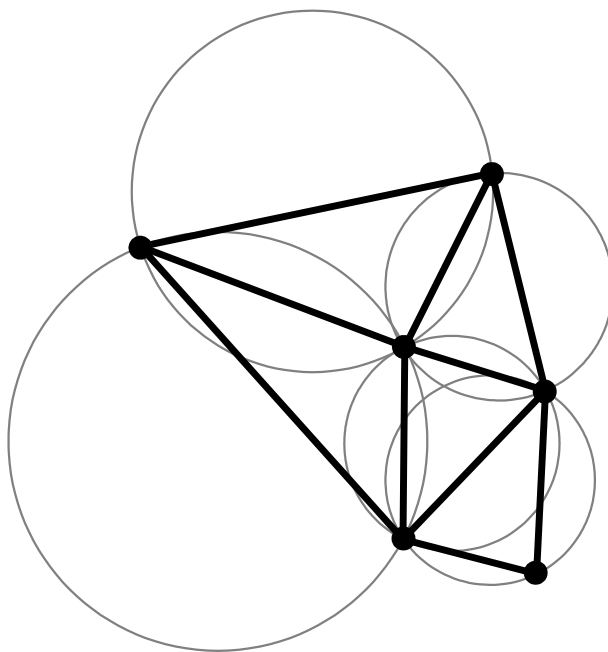


Figure 5.1 Principe de l'algorithme de Delaunay 2D

L'algorithme utilisé pour générer le maillage est la triangulation de Delaunay 2D, appliqué sur la projection des points dans un plan de maillage (Lamarche, 2009; Gingras *et al.*, 2010). Il fonctionne sous le principe illustré à la figure 5.1 : trois points du plan sont reliés par un triangle si et seulement si ils peuvent être inscrits sur un même cercle ne contenant aucun autre point. Afin de bien établir les relations de voisinage² entre les points, la triangulation

1. L'enveloppe convexe (*convex hull*) d'un ensemble de points est le plus petit polyèdre convexe contenant tous les points.

2. Des points sont dit voisins lorsqu'ils appartiennent à un même triangle.

de Delaunay 2D requiert que les points soient projetés dans un plan de maillage de manière cohérente. Par exemple, il serait possible d'appliquer l'algorithme sur les points projetés dans le plan $x-y$, mais certains points risqueraient d'être reliés ensemble de manière incohérente. Un exemple typique de cas problématique est une grotte. Pour ce type de géométrie, l'algorithme attribuerait des liens de voisinage entre des points de la paroi supérieure et des points de la paroi inférieure, définissant par le fait même des surfaces inexistantes en réalité.

En fait, pour que l'algorithme soit en mesure de bien déterminer les relations de voisinage, il est nécessaire que les points soient exprimés dans un système de coordonnées $2\frac{1}{2}$ D. Dans un tel système, deux coordonnées sont indépendantes, tandis que la troisième est dépendante des deux premières. Ceci permet donc de projeter les points dans un plan de façon cohérente.

Il se trouve qu'en coordonnées sphériques (θ, ϕ, r) , les données télémétriques produites par le système de vision sont bel et bien exprimées dans un système $2\frac{1}{2}$ D. En effet, pour chaque combinaison (θ, ϕ) , il n'existe qu'une seule valeur possible de distance r . Par conséquent, la stratégie adoptée pour générer le maillage est d'abord d'appliquer l'algorithme de triangulation de Delaunay 2D sur les coordonnées (θ, ϕ) des points, en ignorant dans un premier temps les distances r . Une fois les relations de voisinage établies dans ce système de coordonnées, les points peuvent alors être transformés en coordonnées cartésiennes, tout en préservant les liens de voisinage qui les unissent.

5.1.3 Suppression des triangles indésirables

Suite à la triangulation de Delaunay 2D, deux types de triangles indésirables peuvent se retrouver dans le maillage : les triangles d'ombre et les triangles de frontière.

Les triangles d'ombres sont dûs à des discontinuités de l'environnement observé à partir du point de vue du capteur. Lors du maillage, ces discontinuités sont couvertes par des triangles qui ne représentent pas nécessairement une surface réelle. Un exemple typique est illustré à la figure 5.2, où les triangles d'ombre couvrent la région située à l'arrière d'une roche.

Pour leur part, les triangles de frontière surviennent lorsque le plan de maillage (θ, ϕ) présente des régions concaves. Étant donné que l'algorithme de Delaunay 2D produit un maillage convexe, les régions concaves sont remplies par des triangles ne représentant pas de surfaces réelles. La figure 5.3 illustre l'apparition des triangles de frontière (en rouge) dans de tels cas. En convertissant le maillage en coordonnées cartésiennes, il arrive souvent que les triangles de frontière prennent de grandes dimensions.

Il importe de supprimer ces deux types de triangles indésirables afin que les algorithmes de navigation subséquents ne définissent pas de trajectoires sur des surfaces qui n'existent pas en réalité. Pour rejeter ces cellules particulières, les trois filtres proposés par Lamarche (2009, section 4.2.5) sont mis de l'avant.

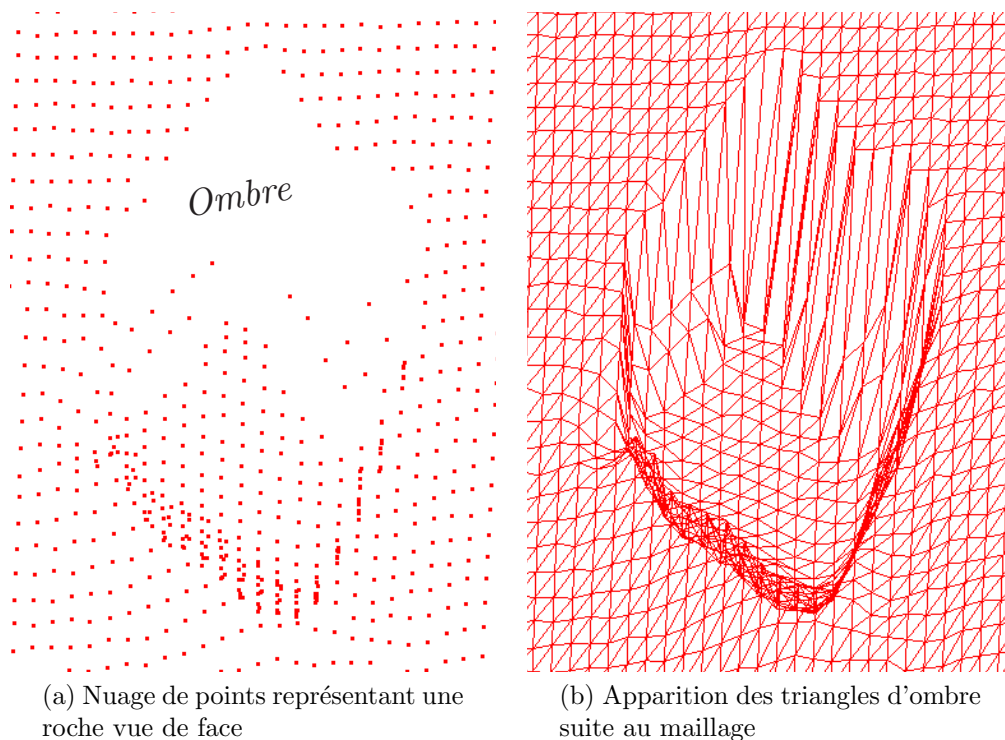


Figure 5.2 Triangles d'ombre

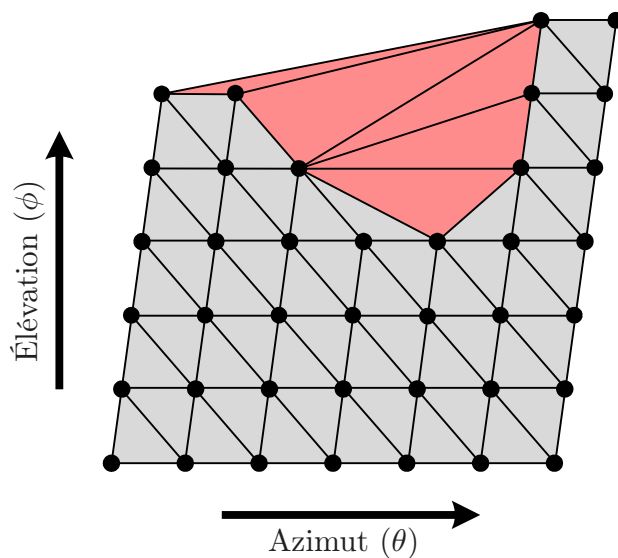


Figure 5.3 Principe de création des triangles de frontière

Le premier filtre rejette les triangles pour lesquels le rapport entre la distance du sommet le plus près et la distance du sommet le plus loin du capteur est en deçà d'un certain seuil. Ainsi, ce filtre vise surtout les triangles d'ombre, qui sont typiquement de forme allongée (figure 5.2b). Le deuxième filtre agit sur les coordonnées cartésiennes et rejette tous les triangles

qui possèdent un périmètre supérieur à un certain seuil. Cela permet de cibler les triangles de frontière. Finalement, le dernier filtre élimine les triangles dont la composante du vecteur normal pointant vers le capteur est inférieur à un certain seuil. Il s'attarde aux triangles d'ombre n'ayant pas été retirés par le premier filtre. En effet, il rejette les éléments de surface de très faible angle d'incidence par rapport au rayon émis par le capteur, caractéristique souvent associée aux triangles d'ombre.

5.1.4 Transformation en coordonnées cartésiennes

Pour transformer les coordonnées sphériques produites par le système de vision en coordonnées cartésiennes, le modèle étalonné représenté par l'équation 4.4 est utilisé. Toutefois, si les résultats de l'étalonnage intrinsèque ne sont pas disponibles, il est possible de se référer au modèle nominal (moins précis), exprimé par l'équation 4.3.

5.1.5 Autres traitements

Une fois la génération du maillage complétée, celui-ci est alors soumis aux algorithmes permettant d'extraire la surface navigable³ du robot et ultimement, la trajectoire à suivre. La démarche concernant l'extraction de la surface navigable et la définition de la trajectoire provient de Gingras (2010).

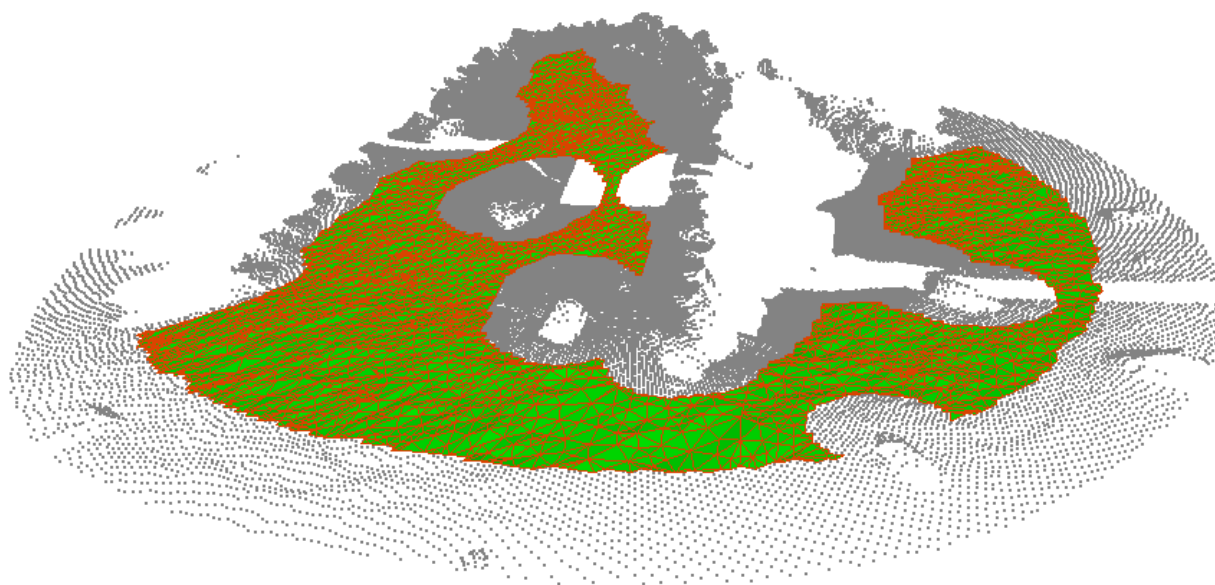
Celle-ci consiste d'abord à retirer les triangles représentant une surface de pente trop abrupte, dépendamment des limites physiques du robot mobile. Cette étape permet donc non seulement de retirer les pentes trop difficiles pour le robot, mais aussi les surfaces représentant les parois supérieures de régions concaves⁴, s'il y a lieu. Par la suite, les groupes de triangles non reliés à la surface principale qui supporte le robot sont retirés, étant donné que ces endroits ne pourront être parcourus. Les trous et les frontières du maillage résultant sont ensuite élargis d'une grandeur équivalente au rayon de braquage du robot. Cette dernière opération simplifie la définition de la trajectoire en permettant de représenter le robot mobile par un simple point. Finalement, la dernière étape consiste à définir la trajectoire à suivre sur la surface navigable extraite. Pour ce faire, la méthode mise de l'avant s'inspire des équations issues de la dynamique des fluides et vise à minimiser l'énergie requise par le déplacement du robot jusqu'à sa destination. Elle étudie ainsi les lignes de courant qu'un fluide créerait en s'écoulant de la position initiale à la destination. La figure 5.4b est une reproduction de l'environnement de la figure 5.4a et montre la surface navigable superposée sur le nuage de points dont elle est extraite.

3. La surface navigable est celle qui permet au robot de circuler sans danger pour se rendre à destination.

4. Par exemple, la paroi supérieure d'une grotte.



(a) Le robot *Juno* sur une colline



(b) Points représentant l'environnement accompagnés de la surface navigable

Figure 5.4 Extraction de la surface navigable

5.2 Traitement de l'intensité

Différencier de façon automatique les objets d'un nuage de points représentant un environnement non structuré n'est pas simple. Il s'agit d'un sujet d'intérêt, entre autres dans le contexte de l'exploration planétaire. Il serait par exemple intéressant de pouvoir distinguer des roches et des portions de terrains possédant des caractéristiques spéciales, ou de classer

des obstacles autrement qu'en se basant uniquement sur la géométrie. Dans cette optique, cette section étudie le potentiel offert par les mesures d'intensité pour identifier les éléments particuliers d'un nuage de points.

Pour ce faire, les données sont d'abord traitées afin de normaliser l'intensité en fonction de la distance et de l'angle d'incidence. Pour accomplir cette tâche, les résultats des expériences de caractérisation 4.1.6 et 4.1.7 sont mis à profit puisqu'ils permettent de définir un modèle mathématique liant la distance et l'angle d'incidence à l'intensité. Ce modèle permettra ensuite la normalisation des valeurs brutes.

Toutefois, la cible utilisée lors des expériences 4.1.6 et 4.1.7 était une feuille de carton blanc possédant des caractéristiques de réflexion qui lui sont propres. Par exemple, il est évident que le carton ne réfléchit pas la lumière de la même façon que le fait le sable. À son tour, le sable réfléchit la lumière différemment d'une roche ou d'un autre type de matériau. En pratique, il est rare qu'une cible soit parfaitement lambertienne. Ainsi, la réflexion peut être diffuse ou spéculaire et l'angle solide du cône de la réflexion varie d'un élément à l'autre. Les caractéristiques de la réflexion sont définies non seulement par la matière constituant l'objet, mais aussi par ses propriétés de surface. Par conséquent, puisque l'environnement dans lequel le robot mobile évolue est surtout constitué de sable, il est fort probable qu'une normalisation plus précise puisse être obtenue en utilisant des résultats d'expériences effectuées en se servant de ce matériau⁵.

5.2.1 Normalisation en fonction de la distance

En regard des données expérimentales de la section 4.1.6 reproduites à la figure 5.5, il est clair que la relation entre la distance et l'intensité ne correspond pas au modèle de l'équation-lidar 1.8. L'analyse démontre que cette dernière peut au mieux représenter l'intensité pour les distances supérieures à environ 14m. Par ailleurs, la forme des données expérimentales de même que les conclusions tirées sur l'inefficacité de l'équation-lidar sont quasi identiques à celles présentées par Kaasalainen *et al.* (2011) qui étudient plusieurs modèles de lidar, dont un SICK LMS151.

L'inefficacité de ce modèle est fort probablement due à l'effet prononcée de l'instrument de mesure sur la relation distance-intensité. En effet, il est possible que l'instrument influence les valeurs nominales de l'intensité en raison de caractéristiques mécaniques, électriques et logicielles. Par exemple, Kaasalainen *et al.* (2008) discutent de la présence d'un amplificateur

5. Les expériences utilisant le sable à titre de cible sont généralement plus complexes à mettre en oeuvre du point de vue logistique, étant donné le manque de consistance associée à ce type de matériau. Par exemple, Kaasalainen *et al.* (2011) étudient l'effet de l'angle d'incidence sur l'intensité alors que la cible est un récipient rempli de sable placé sur un goniomètre et obtiennent des résultats valables seulement que pour des angles variant de 0° à 40°.

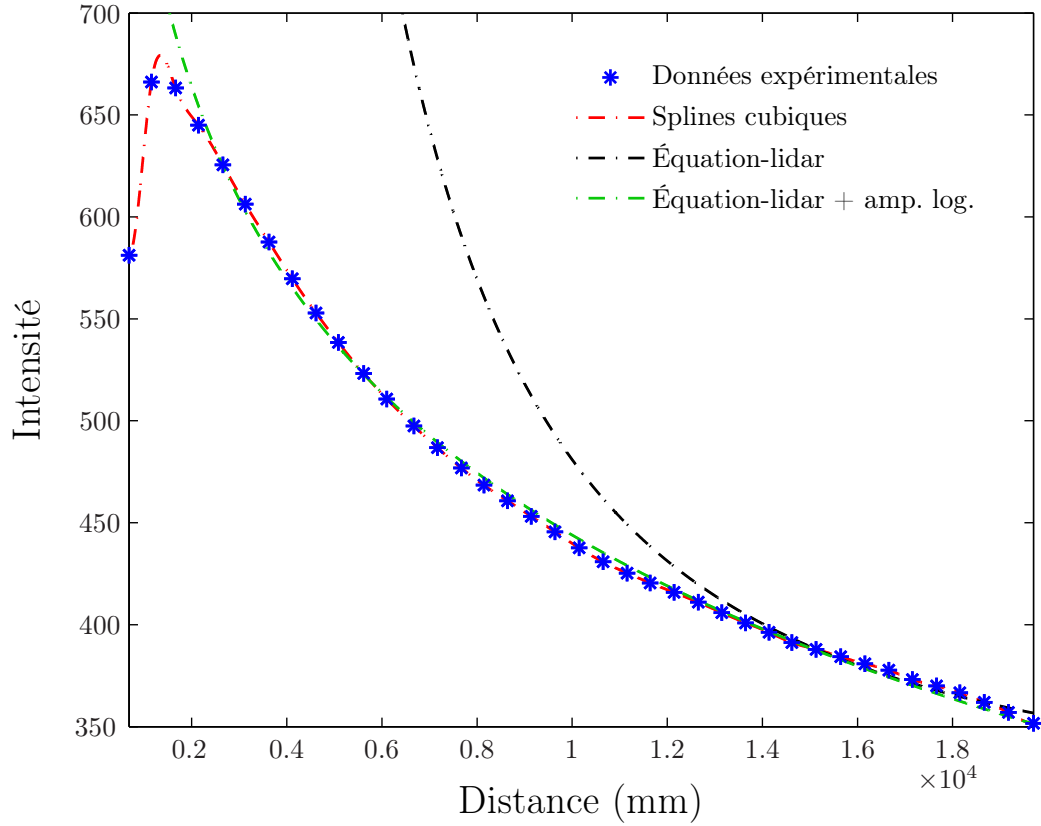


Figure 5.5 Interpolation des données expérimentales de l'expérience 4.1.6

logarithmique visant à accroître les faibles mesures d'intensité⁶. Dans la même veine, Kaasalainen *et al.* (2011) corrigent des données obtenues par un LMS151, afin d'enrayer l'influence de l'amplification, en réalisant une expérience mettant à contribution des étalons de réflectivité connue. Un amplificateur logarithmique transforme les données brutes selon la relation 5.1 :

$$I_T = a \log_{10}(I_B) + b \quad (5.1)$$

I_B est l'intensité brute, I_T est l'intensité transmise par le capteur et $\{a, b\}$ sont des paramètres propres à l'amplificateur. En admettant la présence d'un tel élément, il est possible d'utiliser une approche par données⁷ et de bâtir un modèle plus flexible pour représenter les données expérimentales. Celui-ci tient compte de la présence d'un amplificateur logarithmique et de l'équation-lidar lorsque seul la distance varie :

$$I_T = a \log_{10} \left(\frac{K}{R^2} \right) + b \quad (5.2)$$

6. Ceci permet généralement d'obtenir une image d'une intensité permettant une meilleure visualisation.

7. Tel que discuté à la section 1.4.1.

Pour identifier les paramètres inconnus $\{a, b, K\}$ qui représentent le mieux les données expérimentales, *cftool* (MATLAB, 2010) permet de trouver les valeurs qui minimisent la somme de l'erreur au carré. Le meilleur résultat est obtenu lorsque $a = 157,3$, $b = 1\,320,0$ et $K = 270,2$, tel qu'illustré à la figure 5.5. Il est à noter que les paramètres $\{a, b, K\}$ compensent fort probablement d'autres effets de l'instrument. Bien que l'interpolation semble être d'une bonne qualité, la courbe générée permet seulement de reproduire partiellement les données expérimentales, soit environ de 3m à 20m.

Face à des données expérimentales similaires, Kaasalainen *et al.* (2011) concluent qu'il est préférable de normaliser l'intensité en fonction de la distance en se servant d'une table de référence. La méthode adoptée ici s'inspire de cette idée et consiste à interpoler les données expérimentales à l'aide d'une spline cubique (figure 5.5). Il s'agit d'une fonction définie par morceaux :

$$S(d) = \begin{cases} P_1(d), & d_1 \leq d < d_2 \\ P_2(d), & d_2 \leq d < d_3 \\ \vdots & \\ P_{n-1}(d), & d_{n-1} \leq d \leq d_n \end{cases} \quad (5.3)$$

n est le nombre de données expérimentales, d est la distance et chaque fonction P_i est un polynôme d'ordre trois. Ceci permet d'interpoler parfaitement chacun des points et d'assurer une continuité de la dérivée première et seconde. Enfin, c'est grâce à cette spline que l'intensité d'un point k ($I_{T,k}$) est normalisée en fonction de sa distance :

$$I_{DistNorm,k} = \frac{I_{T,k}}{S(d_k)} \quad (5.4)$$

5.2.2 Normalisation en fonction de l'angle d'incidence

Pour normaliser l'intensité en fonction de l'angle d'incidence, il s'agit premièrement de trouver un modèle adéquat permettant d'interpoler les données expérimentales de l'expérience 4.1.7. Tel que discuté à la section 1.4.1, pour une cible parfaitement Lambertienne, la loi de Lambert s'applique lorsque l'angle d'incidence varie (équations 1.17 et 1.18). Elle permet de décrire, de manière simpliste, la réflexion observée lorsque la cible possède un albédo⁸ important (Hapke, 2005). Cette dernière stipule que l'intensité perçue par le capteur varie selon le cosinus de l'angle d'incidence. Or, d'après la figure 5.6, il apparaît clairement que ce modèle ne permet pas de bien représenter les données. Ceci peut impliquer, entre autres, que les hypothèses simplificatrices soutenues par la loi de Lambert ne sont pas respectées.

8. L'albédo est la fraction de l'énergie incidente qui est réfléchiée ou diffusée par un corps (Larousse, 2013).

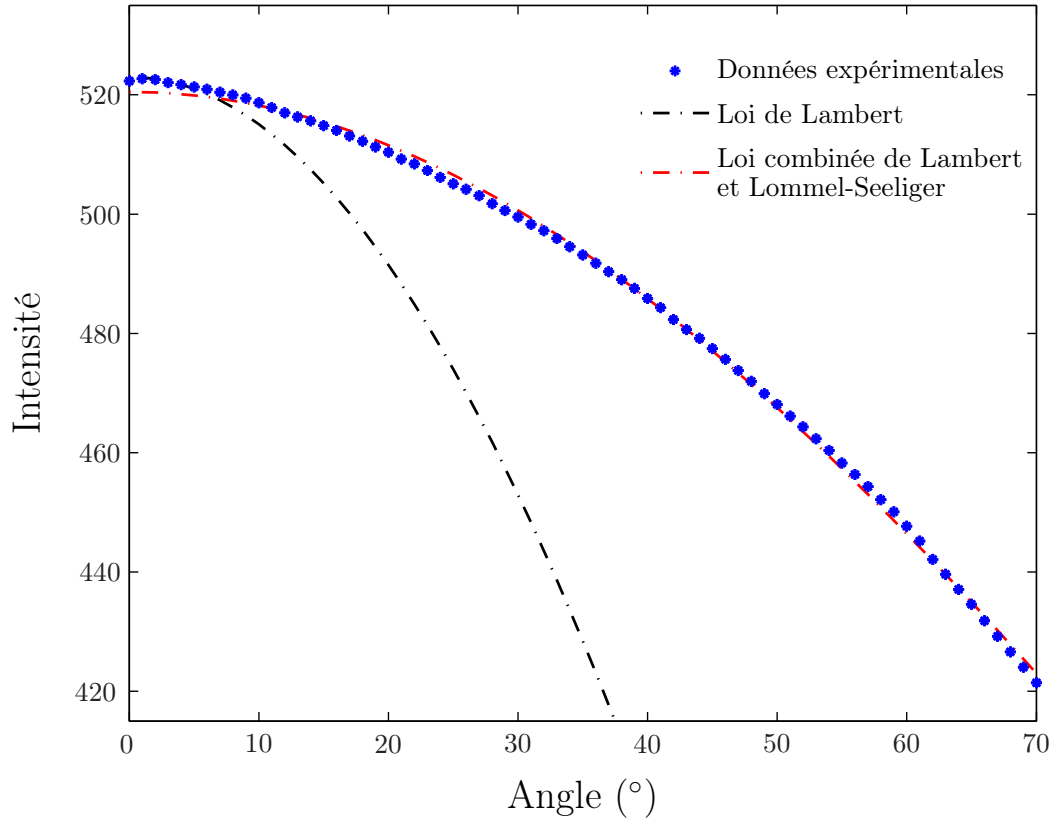


Figure 5.6 Interpolation des données expérimentales de l'expérience 4.1.7

Ainsi, une piste de solution consiste à se tourner vers un modèle d'intensité mieux adapté, qui ne considère pas que la cible est parfaitement Lambertienne. La loi de *Schoenberg-Lommel-Seeliger* (voir Pearse, 1963, Annexe A.4) est un modèle de réflectivité plus complexe qui tient compte non seulement de l'angle d'incidence, mais également de l'angle d'émergence, c'est-à-dire l'angle à partir duquel l'observation se produit :

$$I_{SLs}(\theta_i, \theta_e, \alpha) = f(\alpha) \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_i + \cos \theta_e} \quad (5.5)$$

θ_i est l'angle d'incidence, θ_e est l'angle d'émergence et α est l'angle de phase, c'est-à-dire le plus petit angle entre le vecteur associé au rayon incident et le vecteur associé au rayon émergent. La figure 5.7 illustre chacun de ces angles. Lorsque la fonction $f(\alpha)$ de l'équation 5.5 est constante, la loi se nomme alors simplement la loi de *Lommel-Seeliger* (Wöhler, 2013). Contrairement à la loi de Lambert, cette dernière est plus appropriée pour décrire des réflexions s'effectuant sur des corps de faibles albédos. Étant donné cette réalité, une com-

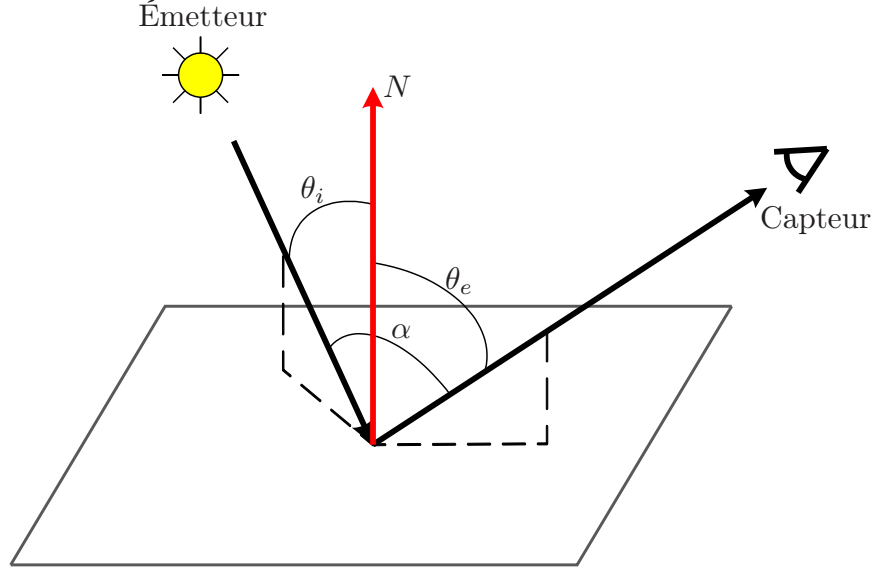


Figure 5.7 Représentation de l'angle incident θ_i , émergent θ_e et de phase α

binaison des deux lois, la loi de *Lambert-Lommel-Seeliger* (Wöhler, 2013), est fréquemment utilisée :

$$I_{LLS}(\theta_i, \theta_e, \alpha) = K \left(2f(\alpha) \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_i + \cos \theta_e} + (1 - f(\alpha)) \cos \theta_i \right) \quad (5.6)$$

K est une constante de proportionnalité dont la valeur dépend entre autres de la réflectivité de la cible. Dans le cas du LMS111, les angles d'incidence et d'émergence seront toujours égaux, soit $\theta_i = \theta_e$, $\alpha = 0$ et $f(\alpha) = cte$. En effet, pour une même impulsion laser, l'émission et la réception se font toujours selon un seul axe passant par le centre optique du lidar. L'équation 5.6 peut alors se simplifier :

$$I_{LLS}(\theta_i) = Kf + K(1 - f) \cos(\theta_i) \quad (5.7)$$

Cette équation, lorsque $K = 520,5$ et $f = 0,7154$, permet de bien représenter les données expérimentales (figure 5.6). L'intensité normalisée en fonction de l'angle d'incidence d'un point k est donc donnée par :

$$I_{AngleNorm,k} = \frac{I_T(\theta_{i,k})}{I_{LLS}(\theta_{i,k})} \quad (5.8)$$

Toutefois, l'intensité est normalisée seulement pour les points dont l'angle d'incidence peut être déterminé, c'est-à-dire les points appartenant localement à un plan. Afin de vérifier ce

critère, un test de planéité est effectué sur l'ensemble des points situés à l'intérieur d'une sphère centrée sur le point à tester. La matrice de covariance est d'abord calculée :

$$C = \begin{bmatrix} \tilde{m}_{200} & \tilde{m}_{110} & \tilde{m}_{101} \\ \tilde{m}_{110} & \tilde{m}_{020} & \tilde{m}_{011} \\ \tilde{m}_{101} & \tilde{m}_{011} & \tilde{m}_{002} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

$\tilde{m}_{i,j,k}$ est le moment central normalisé d'ordre $i + j + k$:

$$\tilde{m}_{i,j,k} = \frac{\sum_{l=1}^N (x_l - \bar{x})^i (y_l - \bar{y})^j (z_l - \bar{z})^k}{R^{i+j+k} N} \quad (5.10)$$

R est le rayon de la sphère et N est le nombre de points situés à l'intérieur de celle-ci. Les valeurs propres de C possèdent des propriétés particulières. Par exemple, elles permettent le calcul du tenseur de structure de planéité, qui mesure le niveau de planéité des points (West *et al.*, 2004; Gross et Thoennessen, 2006) :

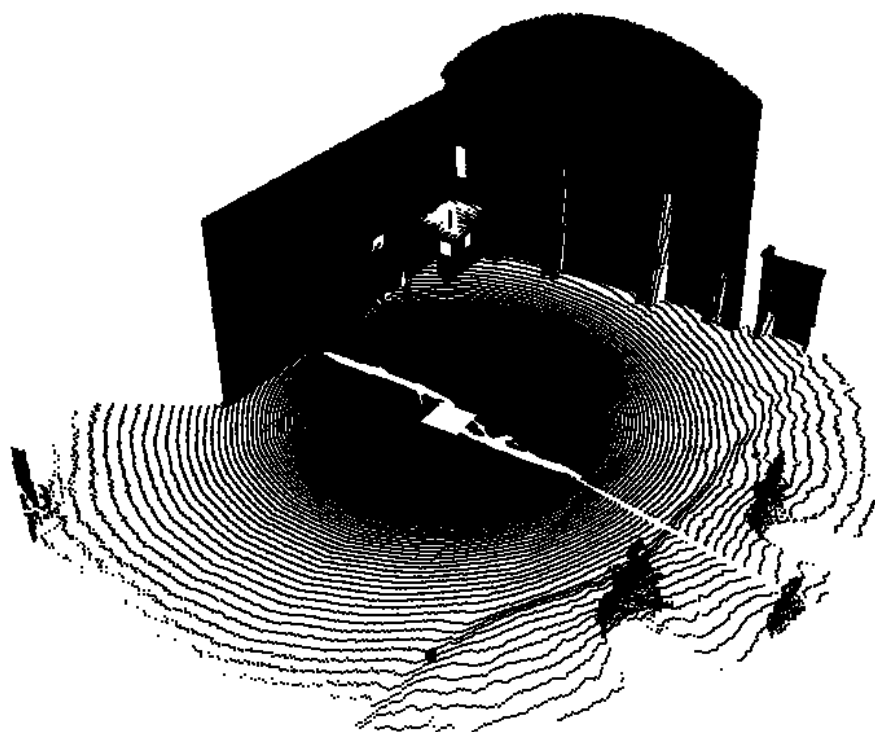
$$T_P = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_1} \quad (5.11)$$

$\lambda_{1,2,3}$ sont les valeurs propres de C triées en ordre décroissant. Ainsi, seule l'intensité des points dont l'indice de planéité se situe au dessus d'un certain seuil est normalisée.

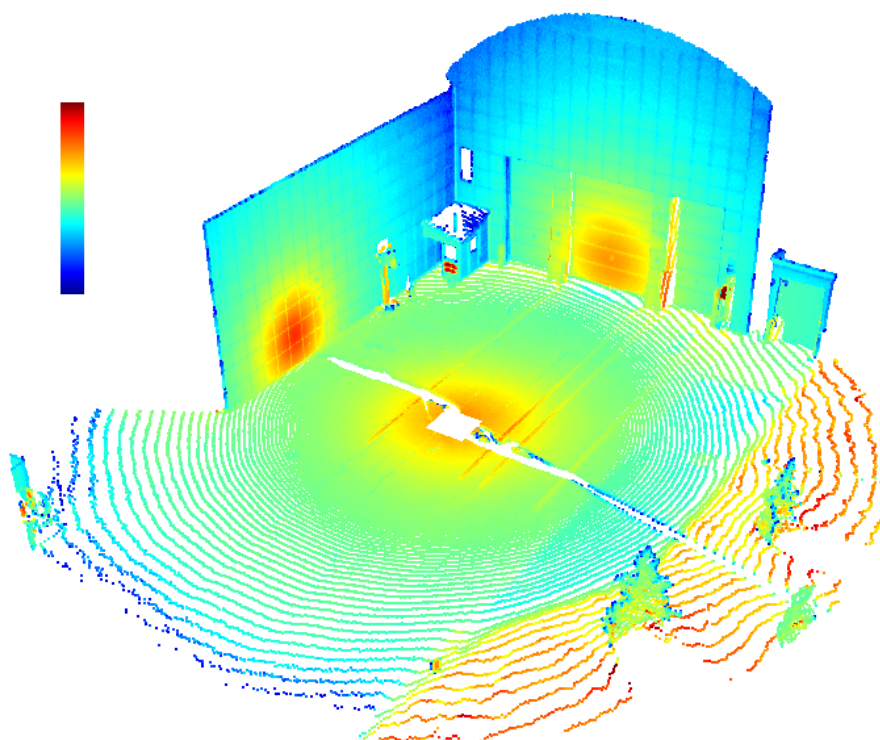
5.2.3 Effet de la normalisation

La figure 5.7 illustre trois représentations différentes d'un nuage de points qui fut acquis sur le quai de réception extérieur de l'ASC. Cette scène illustre bien, d'une part, la valeur ajoutée de l'intensité pour la visualisation et, d'autre part, l'effet de la normalisation en fonction de la distance et de l'angle d'incidence.

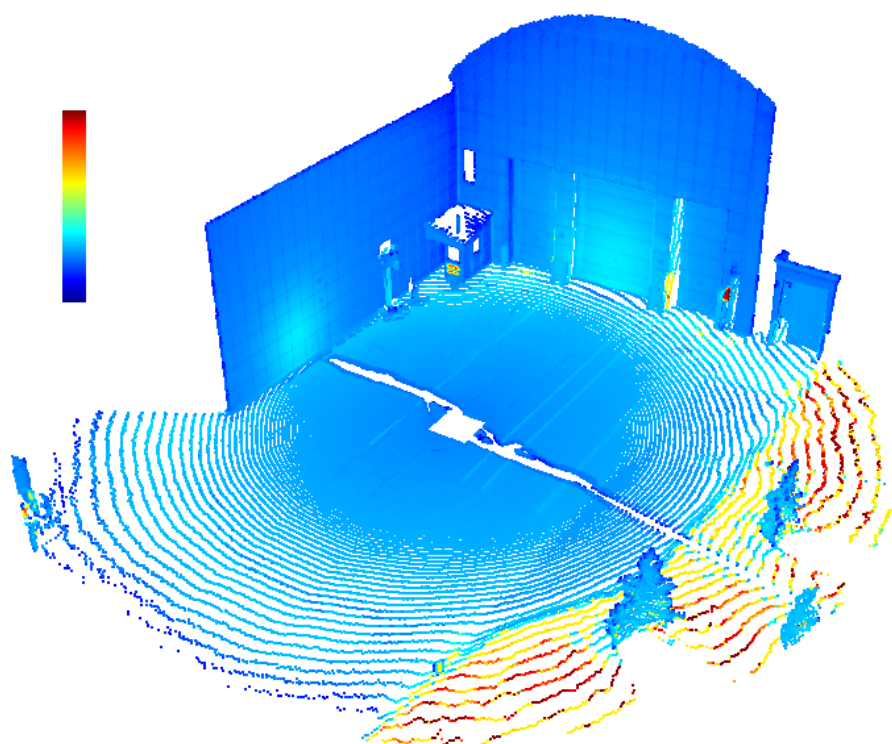
Grâce à l'intensité, des détails tels que le revêtement carrelé des bâtiments et les lignes de stationnement peintes sur l'asphalte sont visibles. Quant à la normalisation, elle permet l'obtention d'une carte d'intensité nettement plus uniforme. À l'aide de cette dernière, il est notamment possible de différencier plus clairement les sapins (coin inférieur droit) du sol, et le sol de l'asphalte. La figure 5.7c affiche deux régions d'intensité légèrement plus élevée apparaissant sur le bâtiment dont les parois sont pourtant constituées du même matériau. Ceci est une limitation de la démarche utilisée pour normaliser les données. Par ailleurs, la précision de la normalisation variera toujours en fonction du milieu.



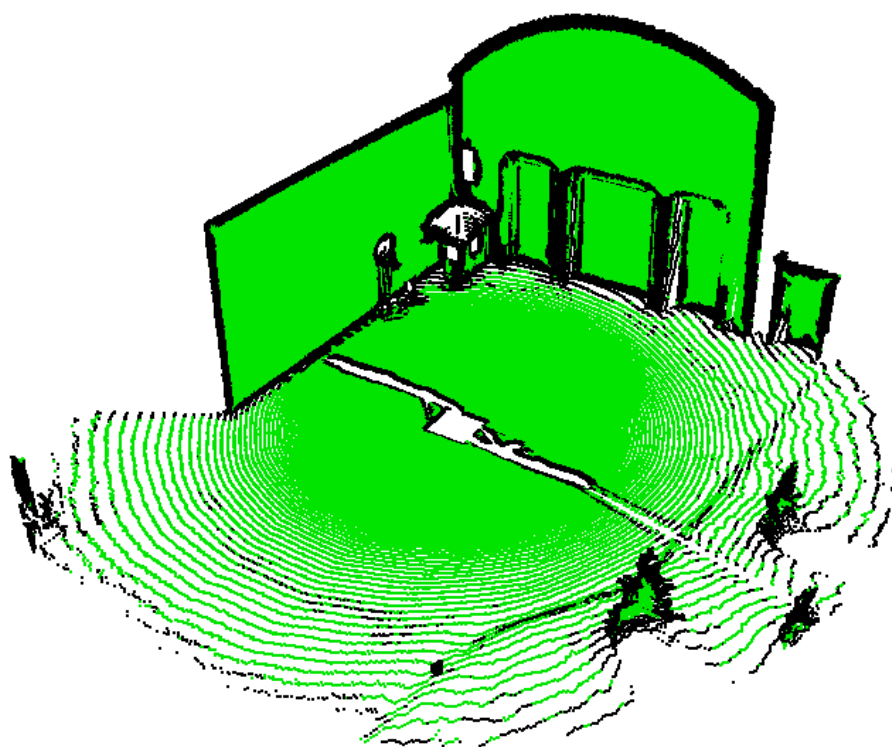
(a) Nuage de points sans intensité



(b) Nuage de points avec intensité non traitée



(c) Nuage de points avec intensité normalisée



(d) Points respectant le critère de planéité (en vert)

Figure 5.7 Impact de l'intensité sur la visualisation d'une scène

L'image 5.7d illustre en vert les points dont l'intensité fut normalisée en fonction de la distance et de l'angle d'incidence. Ce sont les points dont l'indice de planéité (équation 5.11) est supérieur à un certain seuil⁹. Les points noirs sont ceux dont l'intensité fut seulement normalisée en fonction de la distance.

Le nuage de points à intensité normalisée de la figure 5.8 fut obtenu suite à un balayage effectué sur le TÉM. Le niveau d'intensité permet à lui seul de distinguer plusieurs éléments constituant l'environnement immédiat et offre donc de l'information pertinente au contexte de la navigation autonome. Toutefois, étant donné que les algorithmes de normalisation utilisés requièrent de 20 à 40 minutes environ¹⁰ pour traiter les données, il est impensable que ces derniers soient mis à contribution dans leur forme actuelle pour la navigation autonome en temps réel.

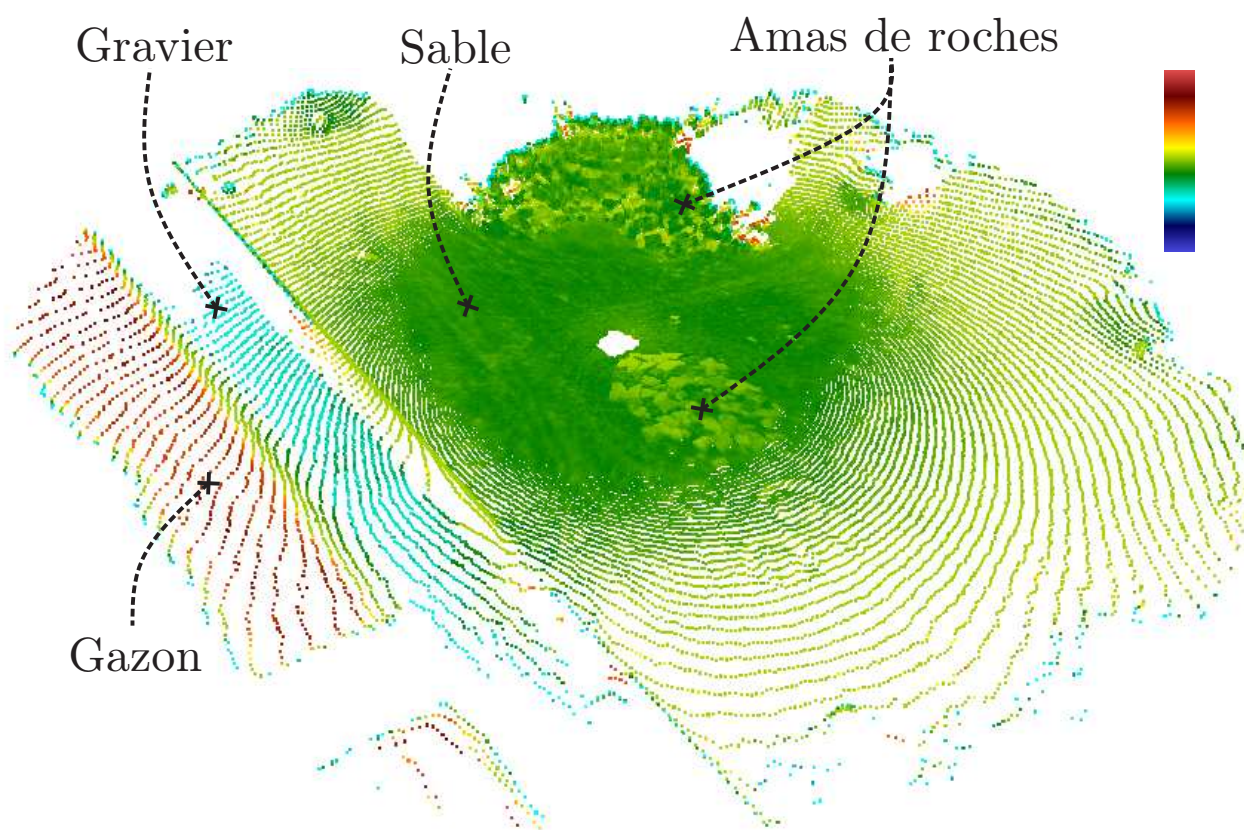


Figure 5.8 Nuage de points à intensité normalisée acquis sur le TÉM

9. Le seuil utilisé pour générer ces images était 0,68.

10. La durée requise varie en fonction du nombre de points et donc de l'environnement.

CHAPITRE 6

RÉSULTATS ET ANALYSES

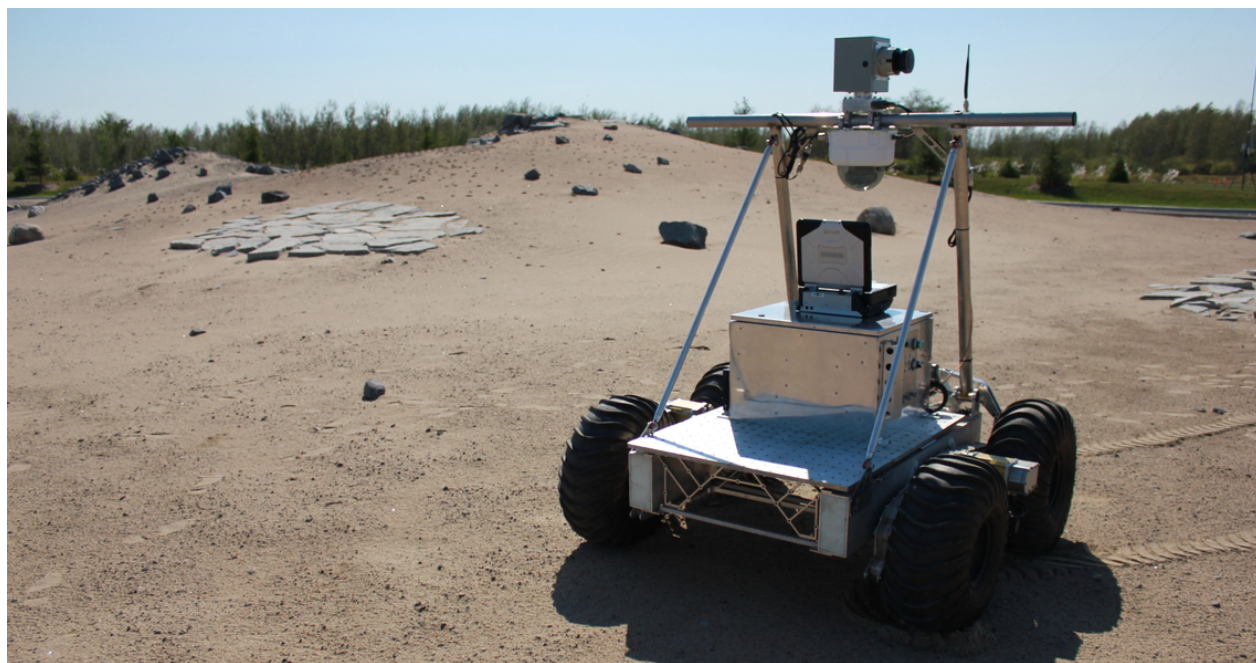


Figure 6.1 *CORIAS* intégré sur le robot *Juno*

Ce chapitre présente les résultats du projet de recherche dans le cadre des objectifs énoncés au chapitre 2. Les caractéristiques du système de vision conçu sont d'abord présentées, permettant ainsi l'identification des avantages et des inconvénients qui s'y rattachent. La démarche adoptée pour valider le produit final est ensuite exposée. Une fois le système validé rigoureusement, il est intégré sur le robot *Juno* de l'ASC (figure 6.1). Dans cette optique, quelques-unes des expériences de navigation effectuées à l'aide de *CORIAS* sont aussi présentées. Finalement, les avantages et les limitations du système, de même que les problèmes rencontrés au cours de la recherche sont analysés.

6.1 Caractéristiques du produit final

6.1.1 Masse et niveau de protection

Lors de la conception, une partie du travail visait à minimiser la masse du système et à favoriser un bon niveau de protection contre les conditions environnementales hostiles. Le système conçu a une masse d'environ 5,6 kg, ce qui est en deçà du 7,3 kg de l'ancien système de vision en service sur *Red*. Bien que cela constitue en soi l'atteinte d'un objectif de recherche, il importe de noter la possibilité de minimiser davantage la masse en utilisant un cabinet fabriqué sur mesure ou fait d'un matériau plus léger tel que l'aluminium. Le tableau 6.1 expose la répartition de la masse en fonction des composants du système.

Tableau 6.1 Masse des composants du système

Composant	Masse (kg)
Cabinet électrique EJ866 (usiné)	2,4
Lidar LMS111 ¹	1,0
Ensemble des pièces usinées	0,8
Moteur intelligent SM1720D85D	0,55
Table tournante RTHM-190	0,35
Microcontrôleur NGW100	0,1
Boîte d'engrenages BLH20-1	0,1
Autres ²	0,3
Total	5,6

En ce qui a trait au niveau de protection face à l'environnement, le cabinet électrique permet de protéger de façon acceptable les composants sensibles contre la pluie fine et le niveau de poussière existant sur le TÉM. Il serait toutefois possible d'améliorer ce niveau de protection en ajoutant des joints d'étanchéité pour sceller les ouvertures du cabinet, ainsi qu'un feutre pour sceller l'interstice créé entre le cabinet et le support global³. Le système peut également être opéré sur une plage de température variant de -20 à 50°C. Cette grande plage de température admissible est due à une sélection rigoureuse des pièces électroniques ainsi qu'au circuit de chauffage intégré du LMS111. Le cabinet électrique contribue également à isoler le système et conserve une bonne partie la chaleur générée par les composants.

1. Il s'agit du lidar sans la partie arrière qui n'est pas utilisée dans l'assemblage de *CORIAS*.

2. Ceci comprend entre autres la carte électronique, le câblage, la quincaillerie, etc...

3. Un feutre est suggéré étant donné la rotation du support global par rapport au cabinet lors d'un balayage.

6.1.2 Coûts

Un avantage notable de *CORIAS* par rapport aux lidars 3D disponibles sur le marché est son faible coût, s'élevant à environ 11 460\$. Le tableau 6.2 en présente les détails. Le prix de certaines pièces achetées lors de la conception, mais inutilisées pour le produit final, n'est pas inclus dans ce tableau. De plus, le montant total ne comprend pas les frais associés aux salaires, ni la valeur des pièces mécaniques usinées par l'atelier mécanique de l'ASC.

Tableau 6.2 Coût des composants du système

Composant	Coûts (\$ CAD)
Cabinet électrique EJ866	80
Lidar LMS111	7 700
Moteur intelligent SM1720D85D	1 300
Table tournante RTHM-190	2 000
Microcontrôleur NGW100	200
Boîte d'engrenages BLH20-1	180
Autres ⁴	360
Total	11 460

6.1.3 Consommation électrique

La puissance consommée par le système varie en fonction des opérations en cours. La puissance nominale mesurée lorsque le système est en attente de commandes est d'environ 15 Watts, i.e. 625 milliampères à 24 volts DC. Si le convertisseur DC-DC régulant la tension d'entrée est aussi en fonction⁵, la puissance mesurée tourne alors autour de 18 Watts. Lors d'un balayage, la puissance moyenne maximale est atteinte quand la fréquence du LMS111 est réglée à 50 Hertz. Celle-ci s'élève alors à environ 20 Watts. Lorsque *CORIAS* est utilisé par température froide et que le LMS111 détecte une température inférieure à 0°C, son système de chauffage intégré se met alors en marche et la puissance consommée fait un bond important. Bien qu'aucune mesure n'ait été effectué dans cette situation, SICK (2012) indique que 40 Watts supplémentaires sont alors employés.

4. L'ensemble des pièces électroniques et deux joints d'accouplement.

5. La raison d'être de ce convertisseur est expliquée à la section 3.2.2.

6.1.4 Temps et vitesse d'acquisition

Le système de vision génère ses données à raison d'une vitesse moyenne maximale de 27 050 points par seconde⁶. Cette dernière se calcule par l'équation suivante :

$$V_{Aq} = f_{Lidar} \left(\frac{C_{Ver}}{R_{Ver}} + 1 \right) = 100 C_{Ver} + f_{Lidar} \quad (6.1)$$

V_{Aq} est la vitesse moyenne d'acquisition en points par seconde, f_{Lidar} est la fréquence du LMS111 en Hertz, R_{Ver} est la résolution pour l'élévation en degrés et C_{Ver} est le champ de vision vertical. Ainsi, la vitesse d'acquisition du système est limitée par la vitesse de rotation interne du miroir pivotant du LMS111. Le lidar constitue donc le goulot d'étranglement pour la vitesse ainsi que pour le temps d'acquisition. Ceci indique que le système est optimisé sur le plan de la rapidité. L'équation 6.1 s'applique autant pour la première configuration d'assemblage que pour la seconde⁷. Pour sa part, le temps requis par l'acquisition des données d'un balayage dépend de plusieurs paramètres, dont la configuration d'assemblage. Celui-ci se calcule à l'aide de l'une des deux équations suivantes :

$$T_{Aq1} = \frac{1}{f_{Lidar}} \left(\frac{C_{Hor}}{R_{Hor}} + 1 \right) \quad T_{Aq2} = \frac{1}{f_{Lidar}} \left(\frac{C_{Hor}}{2R_{Hor}} + 1 \right) \quad (6.2)$$

T_{Aqi} est le temps d'acquisition en seconde associé à la configuration d'assemblage i , C_{Hor} et R_{Hor} sont donnés en degré et correspondent respectivement au champ de vision et à la résolution horizontaux. Le temps d'acquisition ne tient pas compte du délai requis pour faire pivoter le système jusqu'à sa position d'amorce, ni de la durée liée à l'accélération. Il s'agit du temps écoulé entre le début et la fin de la transmission des données. Enfin, le nombre de points générés lors d'un balayage est donné par :

$$N_{Points\ i} = V_{Aq} T_{Aqi} \quad (6.3)$$

$N_{Points\ i}$ est le nombre de points générés par un balayage dans la configuration i à raison d'une vitesse de $V_{Aq} \frac{pts}{sec}$ pour T_{Aqi} sec. Le tableau 6.3 illustre les caractéristiques associées à certaines configurations typiques de balayage.

6. Lorsque le champ de vision vertical est de 270° et que la fréquence est de 50Hz.

7. Les deux configurations d'assemblage sont illustrées à la figure 3.14.

Tableau 6.3 Caractéristiques de certaines configurations typiques de balayage

Configuration				Caractéristiques			
$C_{Hor}(^{\circ})$	$C_{Ver}(^{\circ})$	$R_{Hor}(^{\circ})$	$R_{Ver}(^{\circ})$	$V_{Aq}(\frac{pts}{sec})$	$T_{Aq1}(sec)$	$T_{Aq2}(sec)$	$N_{Points1}$
360	270	0,25	0,25	27 025	57,64	28,84	1 557 721
360	180	0,25	0,25	18 025	57,64	28,84	1 038 961
360	180	0,25	0,50	18 050	28,82	14,42	520 201
360	180	0,50	0,25	18 025	28,84	14,44	519 841
360	180	0,50	0,50	18 050	14,42	7,22	260 281
360	100	0,50	0,50	10 050	14,42	7,22	144 921

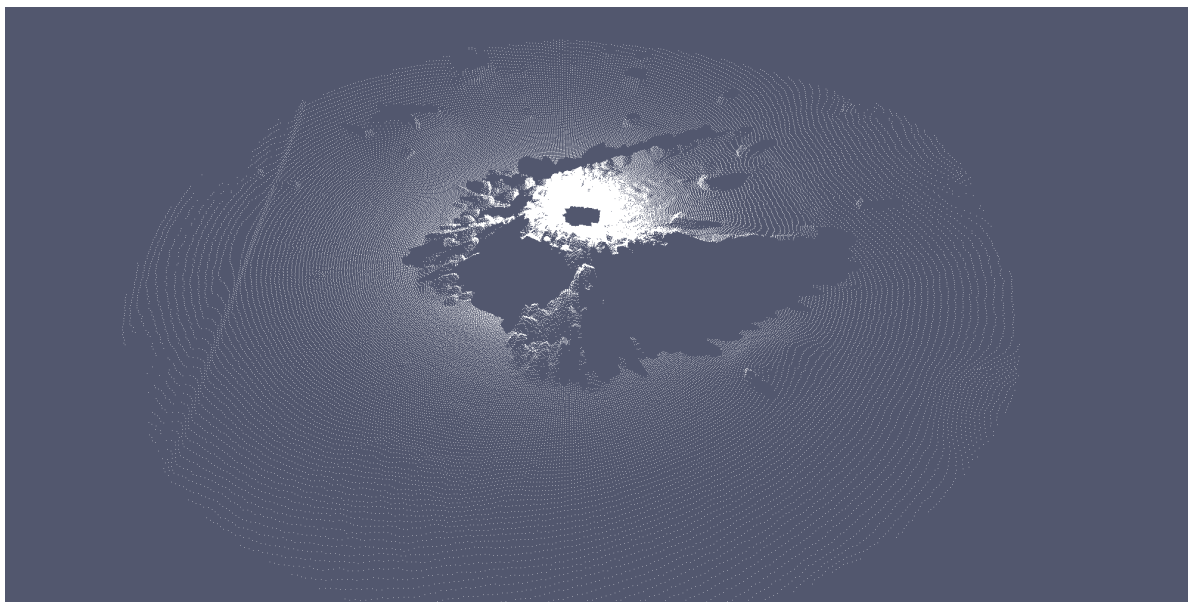
6.1.5 Les configurations d'assemblage

Tel que discuté à la section 3.1.8, l'assemblage peut se faire selon deux configurations différentes, chacune d'entre elles ayant ses avantages et ses inconvénients. La figure 6.2 compare deux nuages de points acquis par chacune des deux méthodes.

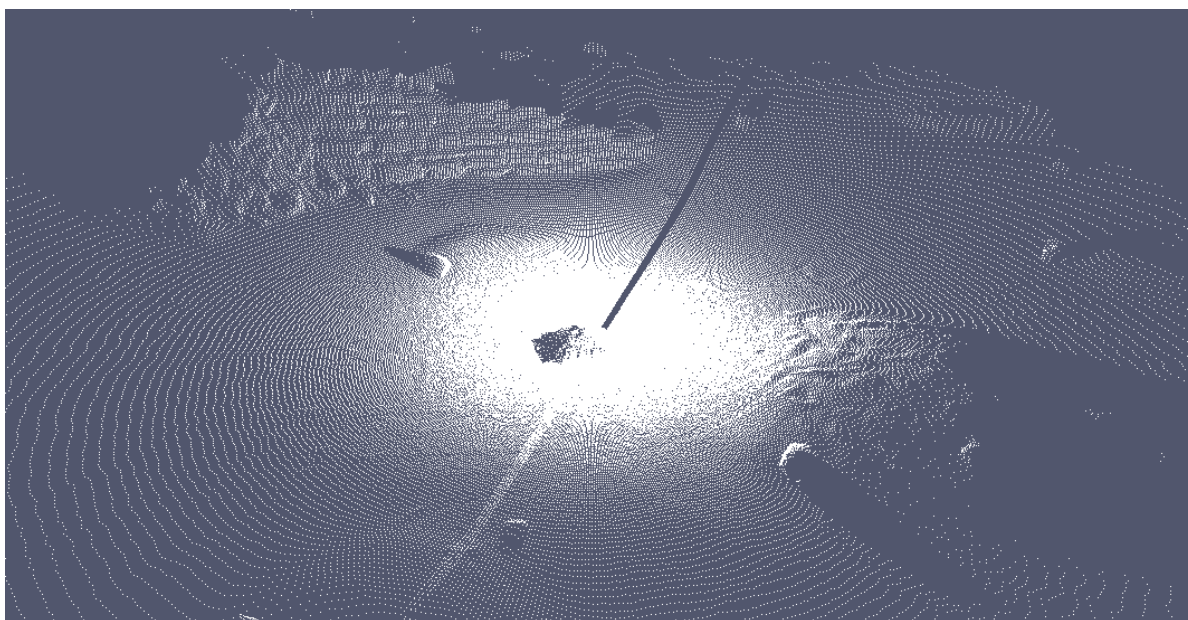
Lorsque la première configuration est utilisée, un balayage à couverture totale peut être réalisé en réglant le champ de vision du lidar à 180° et en le faisant pivoter sur 360° en azimuth. De cette façon, l'environnement est presque parfaitement couvert, seul un cylindre défini par le rayon de rotation du lidar n'étant pas balayé. En se servant de la deuxième configuration, il est possible d'obtenir une excellente représentation de l'environnement en utilisant le plein champ de vision du lidar (270°) et en faisant pivoter le système sur seulement 180° . En procédant ainsi, le temps d'acquisition est presque réduit de moitié. Bien que cette façon de faire soit nettement plus rapide (voir à cet effet le tableau 6.3), certains désavantages la rendent moins intéressante. Par exemple, l'environnement n'est que reproduit partiellement puisqu'aucun point ne sera acquis pour des angles supérieurs à 45° par rapport au plan horizontal de *CORIAS*⁸. Ceci est souvent acceptable, quoiqu'il peut arriver que cette caractéristique devienne problématique pour certains types de terrain ou lorsque le robot est fortement incliné. D'ailleurs, cette limitation perdure peu importe la grandeur de la rotation en azimuth. Il est à noter que le cylindre défini par le rayon de rotation du lidar n'est pas non plus couvert grâce à cette configuration. La figure 6.2b montre également un autre désavantage lié à cet assemblage : une bande de points est manquante à l'arrière du système, tandis qu'une autre bande est redondante à l'avant. C'est effectivement une conséquence de la deuxième configuration lorsque le lidar pivote seulement sur un demi tour. La présence de ces bandes est attribuable à l'écart existant entre le centre optique du lidar et l'axe de rotation de la table tournante⁹. Finalement, si un client souhaite obtenir un balayage seulement pour

8. Le plan horizontal est le plan X_C-Y_C .

9. La largeur des bandes de points est donnée par $L = 2 \left(\sqrt{d_x^2 + d_y^2} \right)$.



(a) Nuage de points obtenu par la première configuration ($360^\circ Az \times 180^\circ El$)



(b) Nuage de points obtenu par la deuxième configuration ($180^\circ Az \times 270^\circ El$)

Figure 6.2 Nuage de points obtenus par les deux configurations d'assemblage

une sous-région de l'environnement située à l'avant du robot, la deuxième configuration devra pivoter du même angle en azimut que celui demandé par la première configuration, annulant ainsi son avantage au niveau du temps. Pour toutes ces raisons, la majorité des expériences de navigation autonome utilise le système de vision assemblé selon la première configuration.

6.2 Validation du système

Afin de valider le système de vision, une campagne de tests fut réalisée sur trois jours. L'objectif était de confirmer le fonctionnement adéquat de *CORIAS* en générant un modèle numérique du T  M. Pour ce faire, le montage expérimental de la figure 6.3 fut mis à profit. Ce dernier est constitué du système de vision installé sur un mât vertical, d'une centrale inertielle, d'un cadre supportant quatre antennes GPS (absent sur la figure) et d'une boîte de contrôle (en bois) qui fournit l'alimentation électrique. Le système GPS utilise la technique de positionnement par « cinématique temps réel » (*RTK GPS*) et chaque antenne retourne ainsi des coordonnées avec une précision de l'ordre du centimètre. Les quatres antennes permettent de connaître précisément la position du système de vision par rapport au référentiel statique du T  M et déterminent également l'angle d'azimut (lacet). Les angles de roulis et de tangage sont, quant à eux, déterminés à l'aide des accéléromètres de la centrale inertielle. Connaissant ainsi la pose du système de vision par rapport au repère statique du T  M lors des balayages, les nuages de points acquis peuvent alors être assemblés afin de former un modèle numérique de terrain. Le modèle numérique du T  M ainsi produit est présenté aux figures 6.4 et 6.5.

Au terme de ces trois jours d'acquisition de données, 112 balayages à couverture totale furent réalisés. La figure 6.5 illustre l'exécution de neuf balayages additionnels le long du trajet situé entre l'ASC et le T  M. Ces expériences confirmèrent que *CORIAS* est fonctionnel et apte à être installé sur le robot *Juno*.

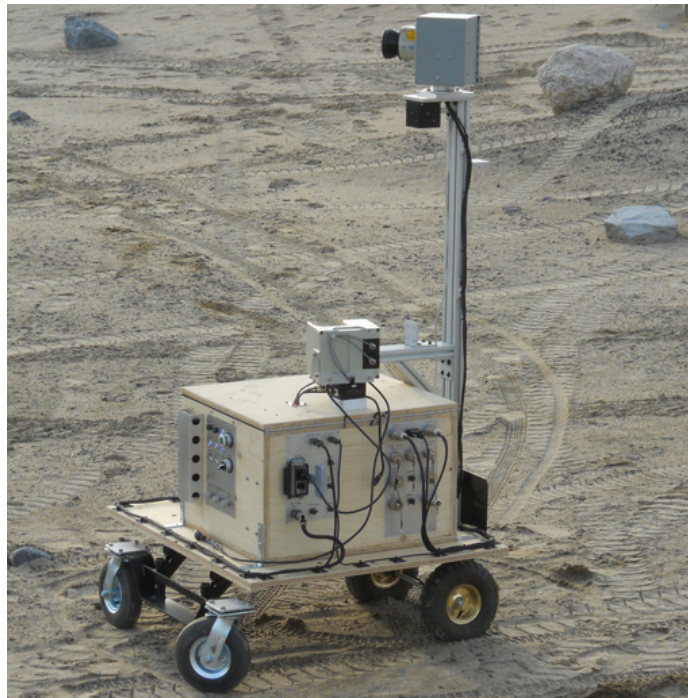


Figure 6.3 Montage expérimental utilisé pour valider le système de vision

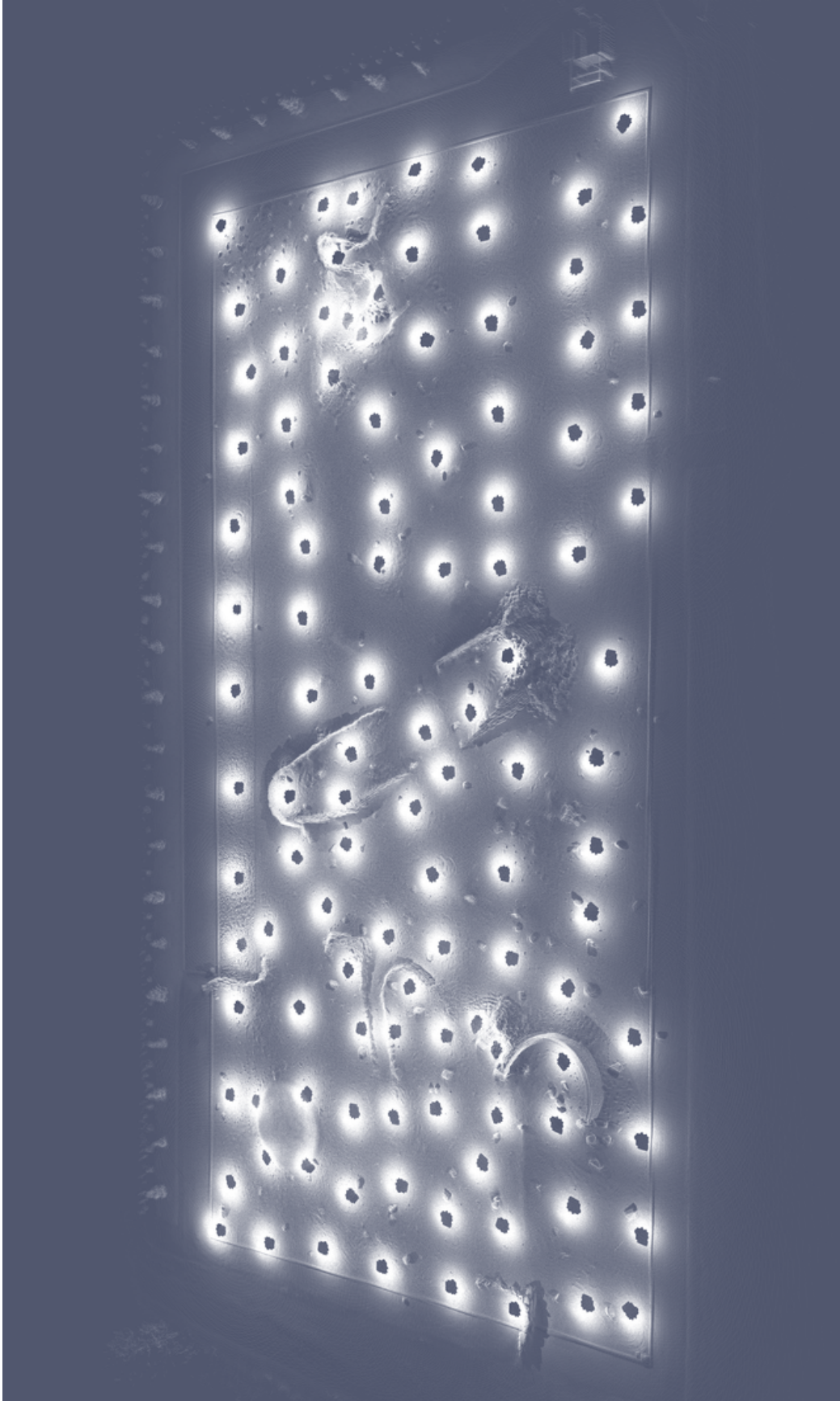


Figure 6.4 Modèle numérique du T  M produit par le système de vision (vue #1)

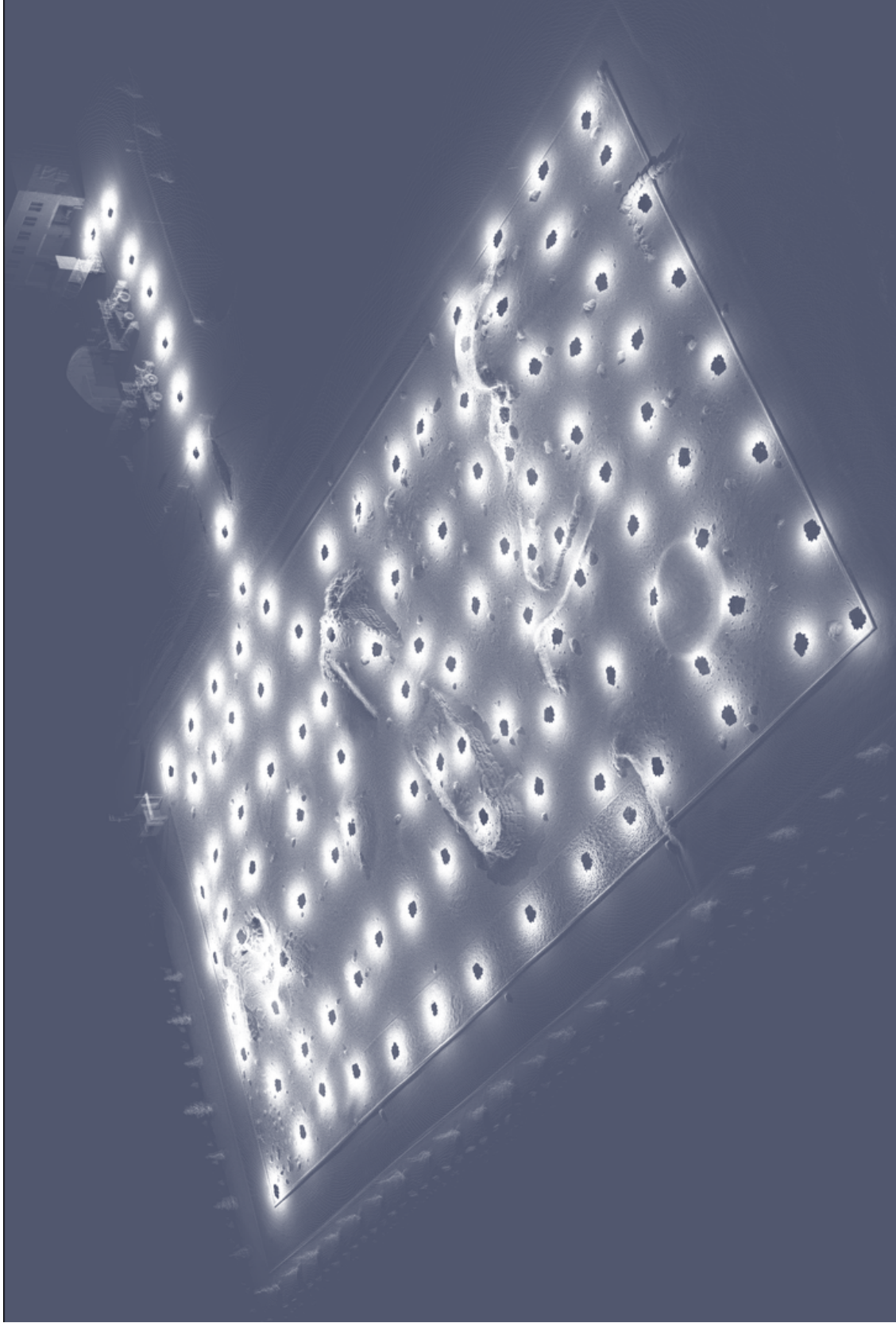


Figure 6.5 Modèle numérique du TÉM produit par le système de vision (vue #2)

6.3 Usage du système pour la navigation autonome

Dès le printemps 2012, le système de vision fut utilisé pour réaliser les expériences de navigation autonome de l'ASC. Ainsi, le robot *Juno* parcourut plusieurs kilomètres de façon autonome en se servant uniquement de *CORIAS* pour percevoir son environnement immédiat. La figure 6.6 illustre quelques trajectoires réalisées par le robot dans le cadre de certaines expériences ayant eu lieu sur le TÉM. Celles-ci représentent une distance totale d'un peu plus de 540m.

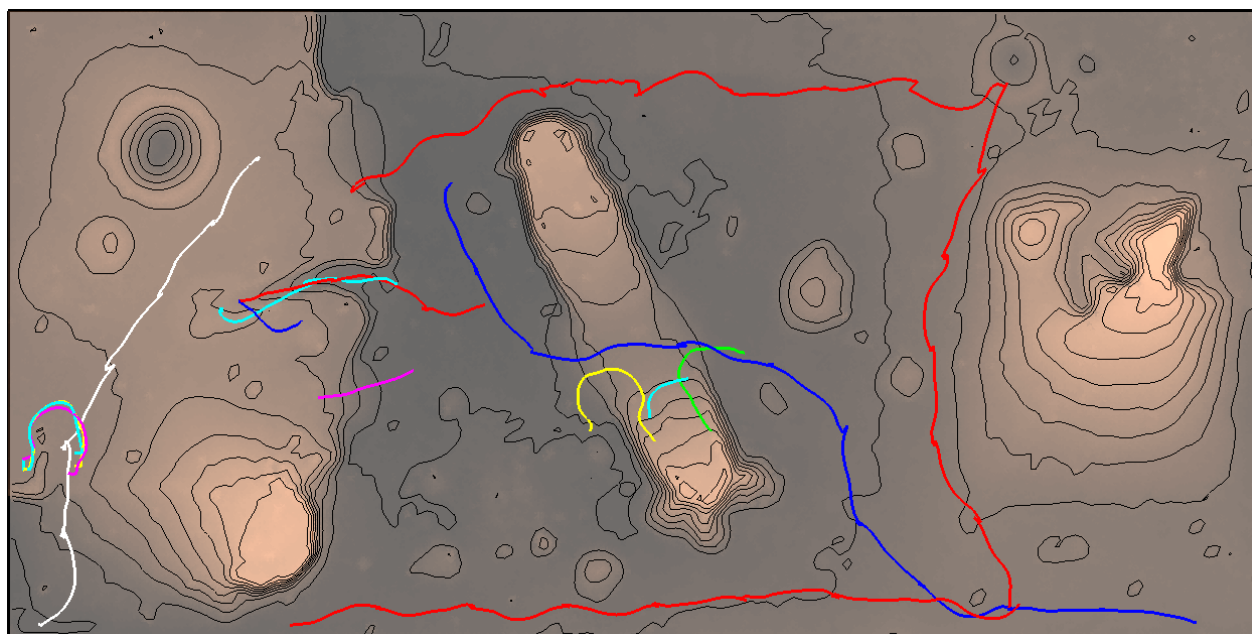


Figure 6.6 Trajectoires parcourues lors d'expériences de navigation autonome

La figure 6.7 illustre un exemple de trajectoire (en rouge) générée par les algorithmes de navigation sur un maillage (en vert), lui-même extrait d'un nuage de points à intensité normalisée. Dans ce cas particulier, une roche constituait un obstacle à éviter. La reproduction fidèle de cet élément dans le nuage de points fourni par *CORIAS* permet aux algorithmes de navigation d'identifier et de retirer les triangles situés à proximité de cet obstacle, tel que discuté à la section 5.1.5. C'est ce qui explique la présence d'un « trou » dans le maillage autour de l'obstacle. La région allongée exempte de points située au centre de l'image constitue quant à elle l'ombre du robot. En effet, le mât horizontal sur lequel est installé *CORIAS* obstrue partiellement la vue du capteur et crée cet effet. Une fois le chemin à suivre défini, les algorithmes de suivi de trajectoire discutés à la section 2.1.1 permettent au robot de continuer sa route et d'éviter l'obstacle.

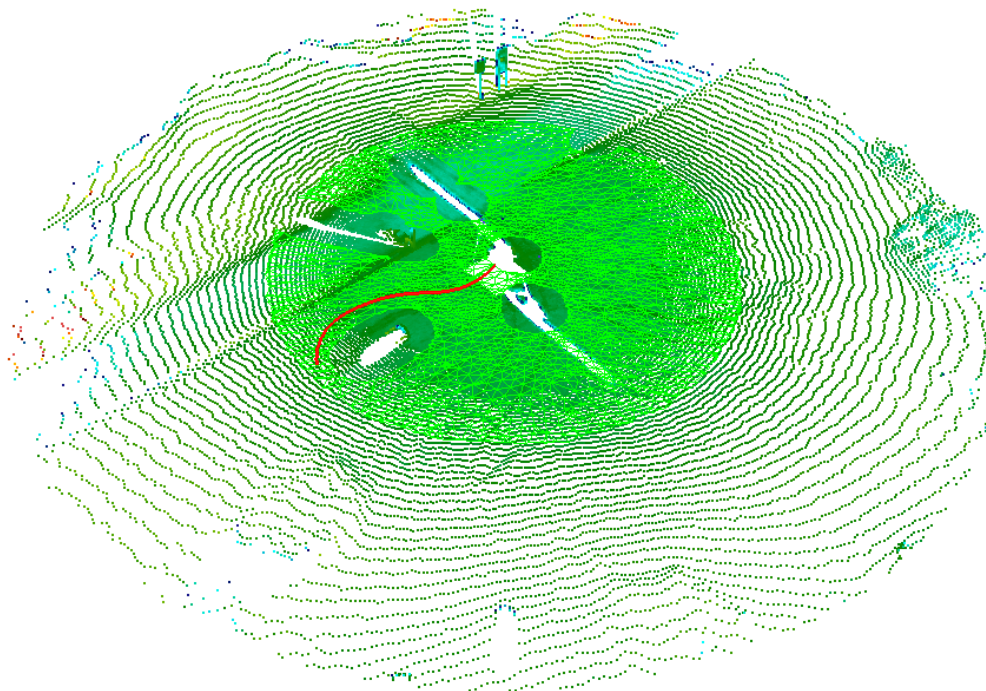


Figure 6.7 Manoeuvre de contournement d'obstacle

Un autre exemple plus complexe de navigation autonome est illustré à la figure 6.8. Il s'agit d'une situation où le robot se trouve sur une colline aux parois abruptes, et où la seule voie de passage possible est parsemée d'obstacles.



Figure 6.8 *Juno* sur une colline aux parois abruptes

La figure 6.9 illustre l'environnement recréé par le système de vision, la surface navigable et la trajectoire suivie par le robot. Cet exemple difficile illustre non seulement l'efficacité du système de vision à recréer l'environnement, mais aussi la puissance des algorithmes de navigation autonome qui déterminent la trajectoire.

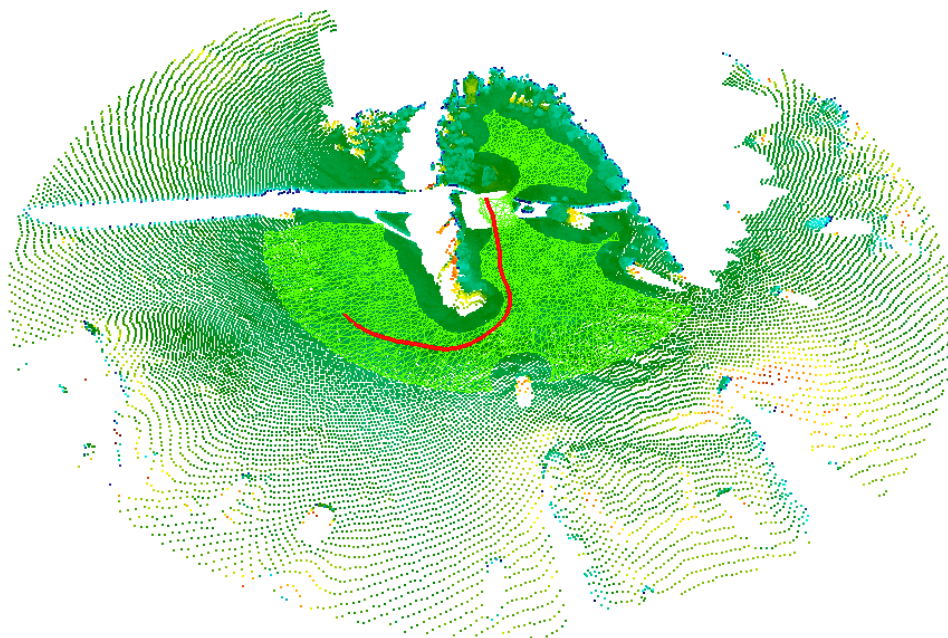


Figure 6.9 Descente d'une colline avec obstacles

Ces expériences, ainsi que toutes les autres réalisées depuis le printemps 2012, démontrèrent que *CORIAS* satisfait l'objectif principal de la recherche. En effet, il représente fidèlement l'environnement dans un rayon de 20m et permet bel et bien à un robot mobile de naviguer de façon autonome.

6.4 Discussion sur les avantages et les limitations

Du point de vue de la robotique mobile, le système de vision développé dans le cadre de cette recherche présente plusieurs avantages le rendant attrayant comme solution pour percevoir l'environnement.

Le coût représente certainement l'un de ses atouts les plus importants. L'appareil conçu est en effet une solution économique lorsque comparé aux autres systèmes lidars 3D commerciaux, dont le prix atteint souvent plusieurs dizaines de milliers de dollars. La masse du système constitue un autre avantage en regard des appareils similaires disponibles sur le marché. Par exemple, POB (2006) effectue le recensement de 18 systèmes de vision 3D populaires utilisant

le laser comme médium de mesure. La masse de ces appareils varient de 8,1 à 19,5 kg avec une masse moyenne tournant autour de 12,9 kg. Afin d’actualiser ces informations, une revue des produits offerts par les compagnies mentionnées dans cette étude fut réalisée. Au terme de cet exercice, il apparaît que la masse moyenne demeure bien au-dessus de la masse de *CORIAS*, bien que quelques rares produits affichent une masse inférieure. Par exemple, le FARO Focus^{3D} a une masse de seulement 5 kg (FARO, 2013). Le Velodyne HDL-32E, qui n’est pas mentionné dans l’étude de POB (2006) étant donné son apparition sur le marché en 2010, a pour sa part une masse de 2 kg (Velodyne, 2010a). Ce dernier n’offre cependant qu’un champ de vision vertical de 40°. Dans des conditions de température supérieure à 0°C, la puissance consommée par l’appareil conçu est inférieure à celle de la majorité des systèmes commerciaux qui affichent une consommation variant généralement de 40 à 80 Watts.

En ce qui concerne la vitesse d’acquisition maximale, celle de *CORIAS* est supérieure à la majorité des systèmes de vision présentés par POB (2006), et de 30 à 45 fois supérieure à celle du système de vision qui était en service sur *Red* (Lamarche, 2009). Néanmoins, plusieurs capteurs disponibles sur le marché montrent une vitesse nettement supérieure. Par exemple, le Velodyne HDL-64E peut générer des données à raison de 1,3 million de points par seconde (Velodyne, 2010b), le FARO Focus^{3D} peut produire jusqu’à 976 000 points par seconde (FARO, 2013) et le Velodyne HDL-32E jusqu’à 700 000 points par seconde (Velodyne, 2010a). Il faut toutefois noter qu’étant donné leur grande vitesse d’acquisition, les capteurs Velodyne utilisent le protocole UDP pour communiquer. Bien que ce protocole soit plus rapide, il reste moins robuste que le protocole TCP. Par exemple, si des données sont perdues, ou si elles arrivent dans le désordre, le protocole UDP ne permet pas de détecter et de corriger directement ces problèmes (Himpe, 2006). Le FARO Focus^{3D} enregistre quant à lui les données localement sur une carte SD dont le contenu peut ensuite être téléchargé par le client. Donc, même si ces systèmes sont ultra rapides, ils comportent aussi quelques contraintes.

Les interfaces mécaniques et électriques du système conçu facilitent grandement son installation. Sur le plan électrique, seuls une alimentation de 24 volts DC et un câble Ethernet sont nécessaires. Sur le plan mécanique, le système de vision se fixe simplement à l’aide de quatre vis M8. Ces interfaces sont conformes aux standards définis par l’Agence spatiale canadienne (2010). De plus, grâce à sa faible consommation d’énergie, sa légèreté et puisque toutes ses composantes sont rassemblées à l’intérieur d’un même cabinet, *CORIAS* peut être intégré aisément sur plusieurs types de plates-formes. Ses deux configurations d’assemblage ont aussi l’avantage d’offrir plus de flexibilité, en permettant d’assembler le système d’après le genre de nuage de points souhaité et selon le type d’environnement. La flexibilité est aussi présente au niveau logiciel. En effet, le système d’exploitation *Linux* procure un environnement facilitant l’interaction avec les composants du système et offre plusieurs services permettant

de déverminer et de créer aisément de nouvelles applications. Un modèle EMF codé en Java fut aussi développé pour permettre aux clients d'interagir avec *CORIAS* de façon efficace, tout en augmentant la portabilité du système.

Ces avantages sont toutefois accompagnés de certaines limitations fonctionnelles. Entre autres, la distance maximale de 20m pouvant être mesurée par le capteur est bien en deçà de la capacité de la majorité des systèmes disponibles sur le marché. De plus, il s'agit d'une régression par rapport au système précédent qui permettait de représenter l'environnement dans un rayon de 32m (Lamarche, 2009). Du point de vue surélevé du capteur, une distance accrue pourrait être bénéfique. Toutefois, les algorithmes de navigation autonome, dans leur forme actuelle, visent à mouvoir le robot à l'intérieur d'un rayon maximal de 10m suite au balayage à couverture totale. Donc, pour le moment, cette limitation n'affecte pas la performance du robot. Une autre limitation concerne la résolution verticale qui ne peut prendre que deux valeurs : $0,25^\circ$ ou $0,50^\circ$. En effet, bien qu'il soit possible d'ajuster la résolution horizontale de façon presque arbitraire au millième de degré près, la résolution verticale offre peu de choix. Puisque cette dernière détermine en grande partie la vitesse d'acquisition et la durée d'un balayage, il serait préférable de pouvoir l'ajuster plus finement. Tout de même, les expériences réalisées sur le TÉM démontrent que des résolutions de $0,5^\circ$ en azimut par $0,5^\circ$ en élévation sont amplement suffisantes pour détecter des obstacles d'une dimension assez importante pour être nuisibles au robot *Juno*.

Le niveau de protection contre les conditions environnementales mériterait aussi d'être rehaussé par l'installation de joints d'étanchéité. Bien qu'après de nombreuses expériences de navigation aucune trace de poussière n'ait été observée à l'intérieur du cabinet, il n'en demeure pas moins qu'il serait préférable d'agir ainsi à titre préventif.

6.5 Problèmes rencontrés

Un problème rencontré lors de la phase de conception trouve son origine dans le transfert du couple généré par le moteur jusqu'à la table tournante. Cette dernière possède une vis d'ajustement permettant de régler la distance entre la vis sans fin et l'engrenage principal. Plus cette distance est courte, plus le jeu mécanique (*backlash*) est petit. Ceci assure une précision accrue, mais génère plus de friction, ce qui exige un couple d'entraînement plus important. Un couple trop élevé peut créer des dommages au niveau du joint d'accouplement flexible reliant la table tournante à la boîte d'engrenages. Ce joint d'accouplement permet non seulement de transmettre le couple, mais aussi d'absorber certaines imprécisions d'assemblage, notamment le désalignement de l'axe de sortie de la boîte d'engrenages par rapport à l'axe d'entrée de la table tournante. Or, il est difficile de trouver un tel type d'accouplement

assez court pour s'intégrer à l'assemblage tout en supportant un couple important. Lors de la conception du système, quelques-uns de ces joints furent ainsi brisés. Il fut donc nécessaire de trouver manuellement le meilleur compromis entre la grandeur du couple et le jeu mécanique.

Un autre problème concerne les pixels mixtes¹⁰ générés par le LMS111 qui contaminent la plupart des nuages de points. Ceci nuit à la visualisation de la scène et peut potentiellement porter atteinte aux algorithmes de navigation. En effet, il arrive que des pixels mixtes soient générés à des endroits problématiques, par exemple à l'arrière d'un obstacle, et que les algorithmes de navigation les utilisent ensuite pour la génération du maillage. Dans ces cas, la trajectoire du robot risque d'être définie sur des surfaces inexistantes, compromettant ainsi sa sécurité. Heureusement, étant donné la position surélevée du système de vision, les pixels mixtes représentent rarement des points problématiques à l'intérieur de la zone franchissable par le robot. De plus, les filtres visant à enrayer les triangles indésirables semblent être assez efficaces pour retirer les points problématiques quand ils surviennent. Pour assurer une élimination plus rigoureuse, une approche telle que celle proposée par Ye (2008) pourrait néanmoins être mise de l'avant. Cette dernière consiste à se servir des valeurs d'intensité pour identifier les pixels mixtes d'un nuage de points.

Finalement, bien que ce soit très rare, il arrive que des points aberrants (*outliers*) apparaissent dans certaines des trames renvoyées par le système de vision lors d'un balayage. Ces points sont problématiques car ils ont une valeur de distance variant aléatoirement entre 0 et 20m. Lors de la campagne de tests ayant servi pour la validation, de tels points aberrants furent observés en moyenne pour moins d'une trame sur 20 000. Bien que la provenance exacte de ce phénomène reste indéterminée, ces points demeurent généralement faciles à éliminer grâce aux filtres expliqués à la section 5.1.3. En outre, il fut observé que les points aberrants sont toujours accompagnés d'une valeur d'intensité nulle, rendant ainsi leur identification encore plus aisée.

10. Le phénomène des pixels mixtes est discuté à la section 1.1.2 et illustré à la figure 1.5.

CONCLUSION

Afin de naviguer de façon autonome en terrain inconnu, un robot mobile doit faire appel à un système de vision pour percevoir l'environnement. Dans le contexte de l'exploration planétaire, la caméra stéréoscopique est à ce jour la seule technologie utilisée pour guider les robots mobiles déployés sur Mars par la NASA. Bien que ce moyen de perception présente plusieurs qualités, il montre aussi quelques désavantages importants, dont une forte sensibilité aux conditions d'éclairage. Conséquemment, ces systèmes sont inutiles pour la navigation nocturne et leur efficacité est compromise dans des conditions d'intensité lumineuse élevée. À l'opposé, les capteurs lidars restent insensibles aux conditions de luminosité et possèdent de nombreux avantages comparatifs. C'est entre autres pour ces raisons que l'ASC préconise depuis plusieurs années l'utilisation de systèmes de vision actif de type lidar pour ses activités de recherche en exploration planétaire. Or, les lidars 3D actuellement disponibles sur le marché demeurent peu adaptés aux activités de recherche menées par l'ASC.

C'est dans ce contexte que ce mémoire a proposé la conception, l'intégration et l'étude de *CORIAS*, un système de vision 3D basé sur la technologie lidar et conçu pour permettre la navigation autonome d'un robot mobile en terrain inconnu. L'appareil développé a une masse d'à peine 5,6 kg, le coût de ses pièces ne s'élève qu'à environ 11 460\$ et il consomme peu d'énergie. *CORIAS* permet aussi d'obtenir une représentation tridimensionnelle de l'environnement à l'intérieur d'un rayon de 20m et il mesure jusqu'à 27 050 points par seconde. En utilisant des résolutions typiques ($0,5^\circ Az \times 0,25^\circ El$), il peut fournir une représentation 3D complète en un peu moins de 29 secondes. Tous les composants de l'appareil sont contenus à l'intérieur d'un cabinet offrant un niveau raisonnable de protection contre les conditions environnementales hostiles. La plupart des pièces sont disponibles commercialement, mais quelques unes furent tout de même modifiées ou fabriquées sur mesure. L'appareil possède une interface mécanique simple et ne nécessite qu'une alimentation de 24 volts DC ainsi qu'un lien Ethernet pour être opéré, ce qui permet une intégration facile sur une multitude de plates-formes mobiles. Sur le plan informatique, il opère sous *Linux* et communique en utilisant le protocole TCP-IP.

Lors des travaux de recherche, la caractérisation du capteur lidar utilisé par *CORIAS* permit de quantifier l'influence de certains paramètres sur les mesures de distance et d'intensité. Cette étude démontra un effet non-négligeable du temps d'opération, de même que de la distance des cibles, de leur angle d'incidence et de certaines de leur propriétés de surface. D'autre part, l'effet des couleurs fut surtout noté au niveau de l'intensité alors que celui de la fréquence d'acquisition fut davantage observé au niveau de la distance.

Quant à l'étalonnage du système de vision, la méthode élaborée se divise en deux étapes. L'étalonnage intrinsèque se sert de plans de référence pour identifier la pose du lidar par rapport au repère de référence du système de vision. Il permet d'augmenter la précision des points exprimés dans le repère de *CORIAS*. L'étalonnage extrinsèque, quant à lui, s'exécute une fois le système installé sur la plate-forme mobile. Il utilise une particularité connue du robot afin d'identifier la pose du repère de référence de *CORIAS* par rapport au repère de navigation du robot. Il ne nécessite aucun montage expérimental et satisfait à l'objectif d'être simple à exécuter.

Pour traiter les données générées par le système, une grande partie des algorithmes utilisés furent développés antérieurement par l'ASC. Toutefois, la normalisation des valeurs d'intensité en fonction de la distance et de l'angle d'incidence fut un nouveau sujet abordé lors de cette recherche. Celle-ci met à contribution les résultats de certaines expériences issues de la caractérisation. La nouvelle carte d'intensité permet alors non seulement de différencier plus facilement les composants de l'environnement, mais elle améliore également la visualisation des nuages de points. Il faut cependant noter que le robot de l'ASC évolue dans un environnement principalement constitué de sable. Il serait donc fort probable qu'une normalisation plus précise puisse être réalisée en se basant sur des résultats issus d'expériences effectuées sur ce type de matériau.

Bien que le système de vision satisfasse aux objectifs visés par la recherche, il présente néanmoins quelques limitations. Par exemple, la distance maximale pouvant être mesurée par le système n'est que de 20m, ce qui est en deçà de la distance maximale de la plupart des capteurs lidars 3D commerciaux. De plus, le niveau de protection face aux conditions environnementales hostiles est lui aussi limité. Il mériterait d'être rehaussé en ajoutant des joints d'étanchéité au niveau des ouvertures du cabinet. D'autre part, la fabrication d'un cabinet sur mesure permettrait de réduire davantage la masse du système. Une autre limitation du système, celle-ci imposée par le LMS111, est son manque de flexibilité au niveau de la résolution verticale (élévation). Il est en effet contraignant de devoir se contenter de deux valeurs possibles, $0,25^\circ$ ou $0,50^\circ$, alors que la résolution horizontale peut être réglée de façon quasi arbitraire au millième de degré près.

Plusieurs autres travaux reliés au système de vision pourraient être envisagés dans le futur afin d'améliorer les activités de navigation autonome. Il serait entre autres possible de considérer le transfert d'une partie du traitement des données, actuellement effectué en totalité par l'ordinateur de bord du robot, au microcontrôleur du système de vision. Bien que ce dernier soit considérablement sollicité lors d'un balayage à couverture totale, il n'est jamais utilisé à pleine capacité et pourrait donc effectuer quelques opérations supplémentaires. Ainsi, la normalisation de l'intensité en fonction de la distance constitue un bon exemple de

traitement pouvant aisément être effectué par le microcontrôleur. En effet, ce dernier obtient directement l'information nécessaire à un tel traitement grâce aux coordonnées sphériques transmises par le lidar. Une autre possibilité d'amélioration future serait d'utiliser les résultats de la caractérisation afin de construire un modèle de correction des données. Des auteurs tels que Reina et Gonzales (1997); Ye et Borenstein (2002); Luo et Zhang (2004); Okubo *et al.* (2009); Park *et al.* (2010) utilisent une telle approche pour augmenter la précision de leur système. En se servant des résultats de la caractérisation, ils utilisent les paramètres connus d'une scène pour corriger les mesures de distance. En adoptant cette méthode, il serait donc envisageable de corriger les mesures de distance du LMS111 en fonction de la distance et de l'angle d'incidence. Enfin, une étude pourrait être réalisée quant à l'utilisation des valeurs d'intensité pour améliorer la précision des algorithmes de localisation visuelle. Ces derniers corrigent l'odométrie du robot après chaque balayage à couverture totale. Ils reposent sur l'algorithme ICP qui vise à faire correspondre géométriquement le dernier nuage de points acquis avec le nuage de points précédent. Il est probable que la précision de cet algorithme soit améliorée significativement en utilisant non seulement les propriétés géométriques des nuages de points, mais aussi leurs valeurs d'intensité normalisées.

RÉFÉRENCES

- AGENCE SPATIALE CANADIENNE (2010). Rover to payload interface requirements document (ird). Document no : CSA-ESM-RD-0001. Document interne de l'Agence spatiale canadienne.
- AL-TEMEEMY, A. (2011). Three dimensional ladar imaging system using ar-4000lv laser rangefinder. *Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS), 2011*. 263–266.
- ALWAN, M., WAGNER, M., WASSON, G. et SHETH, P. (2005). Characterization of infrared range-finder pbs-03jn for 2-d mapping. *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 3936 – 3941.
- AMZAJERDIAN, F., VANEK, M., PETWAY, L., PIERROTTET, D., BUSCH, G. et BULYSHEV, A. (2010). Utilization of 3d imaging flash lidar technology for autonomous safe landing on planetary bodies. SPIE, vol. 7608, 760828.
- ANTONE, M. et FRIEDMAN, Y. (2007). Fully automated laser range calibration. *In Proceedings of British Machine Vision Conference (BMVC)*.
- ASTOLFI, A. (1999). Exponential stabilization of a wheeled mobile robot via discontinuous control. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 121, 121–126.
- ATANACIO-JIMENEZ, G., GONZALEZ-BARBOSA, J.-J., HURTADO-RAMOS, J. B., ORNELAS-RODRIGUEZ, F. J., JIMENEZ-HERNANDEZ, H., GARCIA-RAMIREZ, T. et GONZALES-BARBOSA, R. (2011). Lidar velodyne hdl-64e calibration using pattern planes. *International Journal of Advanced Robotic Systems*.
- BADINO, H., HUBER, D. et KANADE, T. (2011). Integrating lidar into stereo for fast and improved disparity computation. *2011 International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission (3DIMPVT)*,. 405 –412.
- BAKAMBU, J., GEMME, S. et DUPUIS, E. (2006). Rover localization through 3d terrain registration in natural environments. *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 4121–4126.
- BAKER , C. R., MORRIS, A. C., FERGUSON, D., THAYER, S., WHITTAKER, C., OMOHUNDRO, Z., REVERTE, C., WHITTAKER, W. R. L., HAEHNEL, D. et THRUN, S. (2004). A campaign in autonomous mine mapping. *Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. vol. 2, 2004 – 2009.
- BASACA, L., RODRIGUEZ, J., SERGIYENKO, O., TYRSA, V., HERNANDEZ, W., HIPOLITO, J. et STAROSTENKO, O. (2010). 3d laser scanning vision system for autonomous

robot navigation. *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. 1773 –1778.

BELL, J. F., SQUYRES, S. W., HERKENHOFF, K. E., MAKI, J. N., ARNESON, H. M., BROWN, D., COLLINS, S. A., DINGIZIAN, A., ELLIOT, S. T., HAGEROTT, E. C., HAYES, A. G., JOHNSON, M. J., JOHNSON, J. R., JOSEPH, J., KINCH, K., LEMMON, M. T., MORRIS, R. V., SCHERR, L., SCHWOCHERT, M., SHEPARD, M. K., SMITH, G. H., SOHL-DICKSTEIN, J. N., SULLIVAN, R. J., SULLIVAN, W. T. et WADSWORTH, M. (2003). Mars exploration rover athena panoramic camera (pancam) investigation. *Journal of Geophysical Research*.

BRENNEKE, C., WULF, O. et WAGNER, B. (2003). Using 3d laser range data for slam in outdoor environments. *2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003). Proceedings*. vol. 1, 188–193.

BROTEN, G. et COLLIER, J. (2006). Continuous motion, outdoor, 2 1/2d grid map generation using an inexpensive nodding 2-d laser rangefinder. *2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 4240 –4245.

CHENG, Y., MAIMONE, M. et MATTHIES, L. (2005). Visual odometry on the mars exploration rovers. *2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. vol. 1, 903–910.

CHOI, J., AHN, S. et CHUNG, W. K. (2005). Robust sonar feature detection for the slam of mobile robot. *International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005. (IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ*. 3415 – 3420.

CHOUDHURI, A. (2007). *Target Design For Lidar-Based ICP Pose Estimation For Space Vision Tasks*. Mémoire de maîtrise, Ryerson University.

DAUKANTAS, P. (2009). Lidar in space : From apollo to the 21st century. *Optics and Photonics News*, 20, 30–35.

DUPUIS, E., ALLARD, P., BAKAMBU, J., LAMARCHE, T., ZHU, W.-H. et REKLEITIS, I. (2005). Toward autonomous long range navigation. *Proceedings of the 8th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (iSAIRAS)*.

DUPUIS, E., REKLEITIS, I., BEDWANI, J.-L., GINGRAS, D., ALLARD, P., LAMARCHE, T. et ZHU, W.-H. (2008). Autonomous Over-The-Horizon Rover Navigation. *ASTRA 2008 Workshop*. .

FARO (2013). Faro focus 3d - features, benefits and technical specifications.

FONG, T., ALLAN, M., BOUYSSOUNOUSE, X., BUALAT, M. G., DEANS, M. C., EDWARDS, L., FLÜCKIGER, L., KEELY, L., LEE, S. Y., LEES, D., TO, V. et UTZ, H.

- (2008). Robotic site survey at haughton crater. *9th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, and Automation in Space (iSAIRAS)*.
- FURGALE, P. et BARFOOT, T. D. (2010). Visual teach and repeat for long-range rover autonomy. *Journal of Field Robotics*, 27, 534–560.
- GAO, C. et SPLETZER, J. R. (2010). On-line calibration of multiple lidars on a mobile vehicle platform. *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 279–284.
- GHOLAMHOSSEIN, M. et KHALOOZADEH, H. (2008). Automotive radar data filtering approach for adaptive cruise control systems. *3rd International Conference on Sensing Technology (ICST)*. 10 –14.
- GINGRAS, D. (2010). *Planification de chemins pour un robot mobile explorateur de planète*. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke.
- GINGRAS, D., LAMARCHE, T., BEDWANI, J.-L. et DUPUIS, E. (2010). Rough Terrain Reconstruction for Rover Motion Planning. *The seventh Canadian Conference on Computer and Robot Vision (CRV)*. Ottawa, Canada.
- GROSS, H. et THOENNESSEN, U. (2006). Extraction of lines from laser point clouds. *Symposium of ISPRS Commission III Photogrammetric Computer Vision*. vol. 36, 86–91.
- GUIZZO, E. (2011). How google’s self-driving car works. *IEEE Spectrum*, Issue : October 2011.
- HAHNEL, D., BURGARD, W. et THRUN, S. (2004). Learning compact 3d models of indoor and outdoor environments with a mobile robot. *Elsevier Science Special Issue Eurobot ’01*. 1–16.
- HAPKE, B. (2005). *Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy*. Topics in Remote Sensing. Cambridge University Press.
- HEBERT, M. (2000). Active and passive range sensing for robotics. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA ’00*. vol. 1, 102–110.
- HIMPE, V. (2006). *Visual Basic for Electronics Engineering Applications*. Centraal Boekhuis.
- HOFLE, B. et PFEIFER, N. (2007). Correction of laser scanning intensity data : Data and model-driven approaches. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62, 415 – 433.
- HOKUYO (2009). Scanning laser range finder utm-30lx/ln specification.

- JAMES P. UNDERWOOD, ANDREW HILL, T. P. et SCHEDING, S. J. (2010). Error modeling and calibration of exteroceptive sensors for accurate mapping applications. *Journal of Field Robotics*.
- JAMES UNDERWOOD, ANDREW HILL, D. S. S. (2007). Calibration of range sensor pose on mobile platforms. *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
- JELALIAN, A. (1992). *Laser Radar Systems*. Artech House.
- JUTZI, B. et GROSS, H. (2008). Normalization of lidar intensity data based on range and surface incidence angle. *Laserscanning 2009. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 213–218.
- KAASALAINEN, S., JAAKKOLA, A., KAASALAINEN, M., KROOKS, A. et KUKKO, A. (2011). Analysis of incidence angle and distance effects on terrestrial laser scanner intensity : Search for correction methods. *Remote Sensing*. 2207–2221.
- KAASALAINEN, S., KUKKO, A., LINDROOS, T., LITKEY, P., KAARTINEN, H., HYYPPA, J. et AHOKAS, E. (2008). Brightness measurements and calibration with airborne and terrestrial laser scanners. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46, 528–534.
- KOCESKI, S., KOCESKA, N., ZOBEL, P. et DURANTE, F. (2009). Characterization and modeling of a 3d scanner for mobile robot navigation. *MED '09. 17th Mediterranean Conference on Control and Automation, 2009*. 79–84.
- KWEON, I. S., HOFFMAN, R. et KROTKOV, E. (1991). Experimental characterization of the perceptron laser rangefinder. Rapport technique CMU-RI-TR-91-01, Carnegie Mellon Robotics Institute, Pittsburgh, PA.
- LAMARCHE, T. (2009). *Conception et prototypage d'un capteur Lidar tridimensionnel pour la robotique mobile*. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal.
- LAMON, P., KOLSKI, S., TRIEBEL, R., BURGARD, W. et MACEK, K. (2006). The smartter for elrob 2006 : A vehicle for fully autonomous navigation and mapping in outdoor environments. *Autonomous Systems Lab of École Polytechnique fédérale de Lausanne, Switzerland & Autonomous Intelligent Systems, Albert-Ludwigs University of Freiburg, Germany*. Rapport Technique.
- LAROUSSE (2013). Larousse en ligne : Définition de *albédo*. <http://www.larousse.fr/encyclopedie/nom-commun-nom/alb%C3%A9do/19692>. Visité : 01/03/2013.
- LITVAK, T., SINHA, A., HAHN, J. F. et MUKHERJEE, A. (2012). 2011 technology assessment of key technologies for space exploration : Vision systems and lidar/laser-based technologies. AUG Signals document made for CSA (non-public).

- LUO, X. et ZHANG, H. (2004). Characterization of acuity laser range finder. *Control, Automation, Robotics and Vision Conference, 2004. ICARCV 2004 8th.* vol. 3, 2100–2104 Vol. 3.
- LUZUM, B., M., S. et SLATTON, K. (2004). Normalizing alsm intensities. *Geosensing Engineering and Mapping (GEM) Center Report No. Rep 2004-07-001.*
- MAIMONE, M. W., LEGER, P. C. et BIESIADECKI, J. J. (2007). Overview of the mars exploration rovers autonomous mobility and vision capabilities. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).*
- MAKI, J., THIESSEN, D., POURANGI, A., KOBZEFF, P., LITWIN, T., SCHERR, L., ELLIOTT, S., DINGIZIAN, A. et MAIMONE, M. (2012). The mars science laboratory engineering cameras. *Space Science Reviews*, 1–17.
- MAKI, J. N., BELL, J. F., HERKENHOFF, K. E., SQUYRES, S. W., KIELY, A., KLIMESH, M., SCHWOCHERT, M., LITWIN, T., WILLSON, R., JOHNSON, A., MAIMONE, M., BAUMGARTNER, E., COLLINS, A., WADSWORTH, M., ELLIOT, S. T., DINGIZIAN, A., BROWN, D., HAGEROTT, E. C., SCHERR, L., DEEN, R., ALEXANDER, D. et LORRE, J. (2003). Mars exploration rover engineering cameras. *Journal of Geophysical Research.*
- MARK SHEEHAN, A. H. et NEWMAN, P. (2012). Self-calibration for a 3d laser. *The International Journal of Robotics Research.*
- MATLAB (2010). *version 7.9.0.529 (R2009b).* The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts.
- MAURELLI, F., DROESCHEL, D., WISSPEINTNER, T., MAY, S. et SURMANN, H. (2009). A 3d laser scanner system for autonomous vehicle navigation. *International Conference on Advanced Robotics, 2009. ICAR 2009.* 1–6.
- MCMANUS, C., FURGALE, P. T. et BARFOOT, T. D. (2011). Towards appearance-based methods for lidar sensors. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).* IEEE, 1930–1935.
- MISHKIN, A., MORRISON, J., NGUYEN, T., STONE, H., COOPER, B. et WILCOX, B. (1998). Experiences with operations and autonomy of the mars pathfinder microrover. *1998 IEEE Aerospace Conference.* vol. 2, 337–351.
- MORALES, J., MARTINEZ, J., MANDOW, A., PEQUENO-BOTER, A. et GARCIA-CEREZO, A. (2011). Design and development of a fast and precise low-cost 3d laser rangefinder. *2011 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM).* 621–626.
- MUHAMMAD, N. et LACROIX, S. (2010). Calibration of a rotating multi-beam lidar. *The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.*

- MULLER, M., SURMANN, H., PERVOLZ, K. et MAY, S. (2006). The accuracy of 6d slam using the ais 3d laser scanner. *2006 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*. 389–394.
- NASA (2009). Space shuttle mission sts-127 - a porch in space. http://www.nasa.gov/mission_pages/shuttle/shuttlemissions/sts127/overview.html. Visité : 15/12/2011.
- NASA (2013a). Nasa - mars exploration program : Historical log. <http://mars.jpl.nasa.gov/programmissions/missions/log/>. Visité : 14/03/2013.
- NASA (2013b). Nasa - mars exploration rover mission : The mission. http://marsrover.nasa.gov/mission/tl_surface_nav.html. Visité : 14/03/2013.
- NASA (2013c). Nasa - mars exploration rover mission : Where are the rovers now ? http://marsrover.nasa.gov/mission/traverse_maps.html. Visité : 17/04/2013.
- NASA (2013d). Nasa - why we explore. http://www.nasa.gov/exploration/whyweexplore/why_we_explore_main.html. Visité : 14/03/2013.
- NATALE, D., TUTWILER, R., BARAN, M. et DURKIN, J. (2010). Using full motion 3d flash lidar video for target detection, segmentation, and tracking. *2010 IEEE Southwest Symposium on Image Analysis Interpretation (SSIAI)*. 21 –24.
- NEPTEC DESIGN GROUP (2013). Juno rover. <http://www.neptec.com/technology/space/juno.php>. Visité : 15/01/2013.
- NG, T. C., GUZMAN, J. et TAN, J. C. (2004). Development of a 3d ladar system for autonomous navigation. *2004 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*. vol. 2, 792–797.
- OKUBO, Y., YE, C. et BORENSTEIN, J. (2009). Characterization of the hokuyo urg-04lx laser rangefinder for mobile robot obstacle negotiation. *Unmanned Systems Technology XI, The International Society for Optics and Photonics (SPIE)*.
- PARK, C.-S., KIM, D., YOU, B.-J. et OH, S.-R. (2010). Characterization of the hokuyo ubg-04lx-f01 2d laser rangefinder. *2010 IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication. (RO-MAN)*. 385–390.
- PEARSE, C. A. (1963). Photometry and polarimetry of the moon and their relationship to physical properties of lunar surface. *Nasa Technical Documents*.
- PFEIFER, N., DORNINGER, P., HARING, A. et FAN, H. (2007). Investigating terrestrial laser scanning intensity data quality and functional relations. *8th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques*. 328–337.
- PFEIFER, N., HOFLE, B., BRIESE, C., RUTZINGER, M. et HARING, A. (2008). Analysis of the backscattered energy in terrestrial laser scanning data. *International Archives of*

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. vol. XXXVII, 1045–1051.

PITO, R. (1995). Characterization, calibration, and use of the perceptron laser range finder in a controlled environment. Rapport technique.

POB (2006). Point of begininng (pob) : Product survey - 2006 3d laser scanner hardware survey. http://www.pobonline.com/POB/Protected/Files/PDF/POB0506_LaserScanningSurvey.pdf. Visité : 05/03/2013.

REINA, A. et GONZALES, J. (1997). Characterization of a radial laser scanner for mobile robot navigation. *International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1997. IROS '97., Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ*. vol. 2, 579–585 vol.2.

REKLEITIS, I., BEDWANI, J.-L. et DUPUIS, E. (2007a). Over-the-horizon, autonomous navigation for planetary exploration. *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (IROS)*. 2248–2255.

REKLEITIS, I., BEDWANI, J.-L. et DUPUIS, E. (2009a). Autonomous planetary exploration using lidar data. *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 3025–3030.

REKLEITIS, I., BEDWANI, J.-L., DUPUIS, E. et ALLARD, P. (2008). Path planning for planetary exploration. *2008 Canadian Conference on Computer and Robot Vision (CRV)*. 61–68.

REKLEITIS, I., BEDWANI, J.-L., GEMME, S., LAMARCHE, T. et DUPUIS, E. (2007b). Terrain modelling for planetary exploration. *2007 Fourth Canadian Conference on Computer and Robot Vision (CRV)*. 243–249.

REKLEITIS, I., BEDWANI, J.-L., GINGRAS, D. et DUPUIS, E. (2009b). Experimental results for over-the-horizon planetary exploration using a lidar sensor. O. Khatib, V. Kumar et G. Pappas, éditeurs, *Experimental Robotics*, Springer Berlin / Heidelberg, vol. 54 de *Springer Tracts in Advanced Robotics*. 65–77.

RONNHOLM, P., HONKAVAARA, E., LITKEY, P., HYYPPA, H. et HYYPPA, J. (2007). Integration of laser scanning and photogrammetry. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*.

RUEL, S. et LUU, T. (2010). Sts-128 on-orbit demonstration of the tridar targetless rendezvous and docking sensor. *2010 IEEE Aerospace Conference*. 1–7.

RYDE, J. et HU, H. (2008). 3d laser range scanner with hemispherical field of view for robot navigation. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2008. AIM 2008*. 891–896.

- SCHLEMPER, J., KUHNERT, L., AX, M. et KUHNERT, K.-D. (2011). Development of a high speed 3d laser measurement system for outdoor robotics. *Research and Education in Robotics - EUROBOT 2011*, Springer Berlin Heidelberg, vol. 161 de *Communications in Computer and Information Science*. 277–287.
- SHEEHAN, M., HARRISON, A. et NEWMAN, P. (2010). Automatic self-calibration of a full field-of-view 3d n-laser scanner. *In Proceedings of the International Symposium on Experimental Robotics (ISER2010)*.
- SICK (2012). Operating instructions : Laser measurement sensor of the lms1xx product family.
- SPACEX (2009). SpaceX’s dragoneye navigation sensor successfully demonstrated on space shuttle. <http://www.spacex.com/press.php?page=20090925>. Visité : 25/08/2012.
- STIPES, J., COLE, J. et HUMPHREYS, J. (2008). 4d scan registration with the sr-3000 lidar. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008*. 2988–2993.
- STONE, H. (1996). Mars pathfinder microrover a small, low-cost, low-power spacecraft. *in Proceedings of the 1996 AIAA Forum on Advanced Developments in Space Robotics*.
- SURMANN, H., NÜCHTER, A. et HERTZBERG, J. (2003). An autonomous mobile robot with a 3d laser range finder for 3d exploration and digitalization of indoor environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 45, 181–198.
- THRUN, S., HAHNEL, D., FERGUSON, D., MONTEMERLO, M., TRIEBEL, R., BURGARD, W., BAKER, C., OMOHUNDRO, Z., THAYER, S. et WHITTAKER, W. (2003). A system for volumetric robotic mapping of abandoned mines. *In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 4270–4275.
- THRUN, S., MONTEMERLO, M., DAHLKAMP, H., STAVENS, D., ARON, A., DIEBEL, J., FONG, P., GALE, J., HALPENNY, M., HOFFMANN, G., LAU, K., OAKLEY, C., PALATUCCI, M., PRATT, V., STANG, P., STROHBAND, S., DUPONT, C., JENDROSSEK, L.-E., KOELEN, C., MARKEY, C., RUMMEL, C., VAN NIEKERK, J., JENSEN, E., ALESSANDRINI, P., BRADSKI, G., DAVIES, B., ETTINGER, S., KAEHLER, A., NEFIAN, A. et MAHONEY, P. (2006). Winning the darpa grand challenge. *Journal of Field Robotics*. Accepted for publication.
- TONG, C. H. et BARFOOT, T. (2011). Batch heterogeneous outlier rejection for feature-poor slam. *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2630–2637.
- TRIPP, J. W., ULITSKY, A., PASHIN, S., MAK, N. et HAHN, J. F. (2003). Development of a compact high-resolution 3d laser range imaging system. *SPIE*, vol. 5088, 112–122.

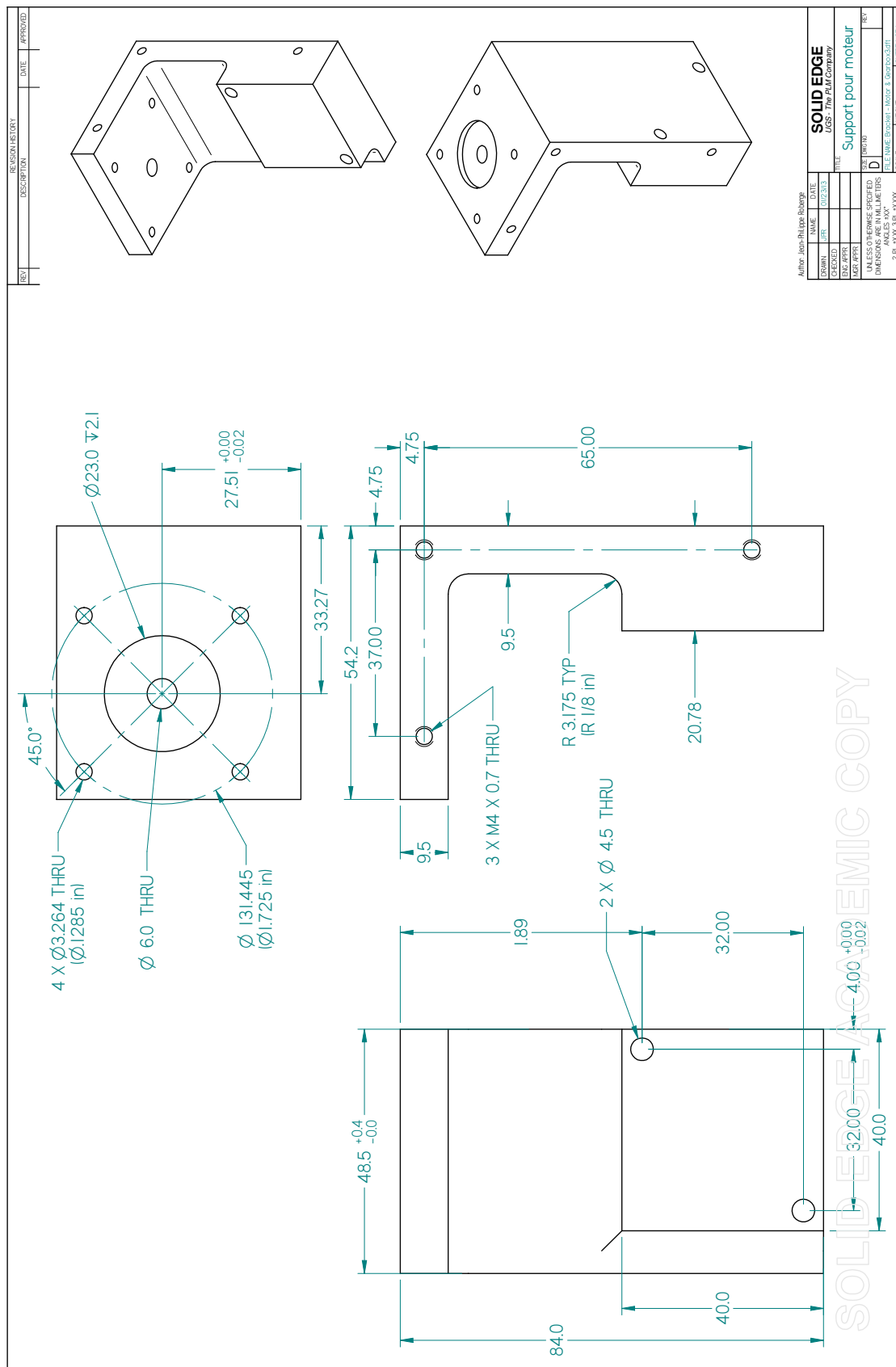
- TSENG, K.-C., YIN, M.-T. et LIAN, F.-L. (2010). Range sensing, localization, and error elimination of two-wheeled mobile robots. *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 1494–1499.
- URMSON, C., ANHALT, J., BARTZ, D., CLARK, M., GALATALI, T., GUTIERREZ, A., HARBAUGH, S., JOHNSTON, J., KATO, H., KOON, P. L., MESSNER, W., MILLER, N., MOSHER, A., PETERSON, K., RAGUSA, C., RAY, D., SMITH, B. K., SNIDER, J. M., SPIKER, S., STRUBLE, J. C., ZIGLAR, J. et WHITTAKER, W. R. L. (2006). A robust approach to high-speed navigation for unrehearsed desert terrain. *Journal of Field Robotics*, 23, 467–508.
- VELODYNE (2010a). Hdl-32e datasheet.
- VELODYNE (2010b). Hdl-64e datasheet.
- WAERDEN, B. L. V. D. et HUBER, P. (1973). *Science Awakening II*. Science Awakening. Noordhoff International Pub.
- WAGNER, W., ULLRICH, A., DUCIC, V., MELZER, T. et STUDNICKA, N. (2006). Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60, 100–112.
- WEST, K. F., WEBB, B. N., LERSCH, J. R., POTHIER, S., TRISCARI, J. M. et IVERSON, A. E. (2004). Context-driven automated target detection in 3D data. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. vol. 5426, 133–143.
- WÖHLER, C. (2013). *3D Computer Vision*. Springer London.
- WULF, L. et WAGNER, B. (2003). Fast 3D Scanning Methods for Laser Measurement Systems. *Proceedings of the International Conference on Control Systems and Computer Science*. Bucharest, Romania, vol. 1, 312–317.
- WULF, O., ARRAS, K., CHRISTENSEN, H. et WAGNER, B. (2004). 2d mapping of cluttered indoor environments by means of 3d perception. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2004. Proceedings*. vol. 4, 4204–4209.
- XIANG, Z. et WU, E. (2006). Design and calibration of a fast 3d scanning lidar. *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. 211–215.
- YANG, G., ZHENGCHUN, D. et ZHENQIANG, Y. (2011). Calibration method of three dimensional (3d) laser measurement system based on projective transformation. *Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*.
- YE, C. (2008). Mixed pixels removal of a laser rangefinder for mobile robot 3-d terrain mapping. *2008 International Conference on Information and Automation (ICIA)*. 1153–1158.

YE, C. et BORENSTEIN, J. (2002). Characterization of a 2d laser scanner for mobile robot obstacle negotiation. *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. vol. 3, 2512–2518.

YONG-GUO, Z., WEI, C. et GUANG-LIANG, L. (2012). The navigation of mobile robot based on stereo vision. *2012 Fifth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA)*. 670–673.

ANNEXE A

Schémas de fabrication mécanique



SOLID EDGE ACADEMIC COPY

The drawing shows a mechanical part with the following dimensions and features:

- Front View:** A square base with a side length of 11.00 (+0.00 / -0.02). The top edge is rounded with a radius of R 6.0. The top surface is a circle with a diameter of 6.6 THRU. The bottom edge is rounded with a radius of R 6.0.
- Top View:** A square with a side length of 5.5. The top edge is rounded with a radius of R 6.0. The bottom edge is rounded with a radius of R 6.0.
- Side View:** A rectangle with a height of 26.00 and a width of 5.5. The top edge is rounded with a radius of R 6.0.

REVISION HISTORY

REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED

Author: Jean-Philippe Robitaille

DESIGN	NAME	DATE
DESIGNED	P	01/22/10
CHECKED		
DATE PAPER		
DATE PAPER		

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
ANGLES IN DEGREES

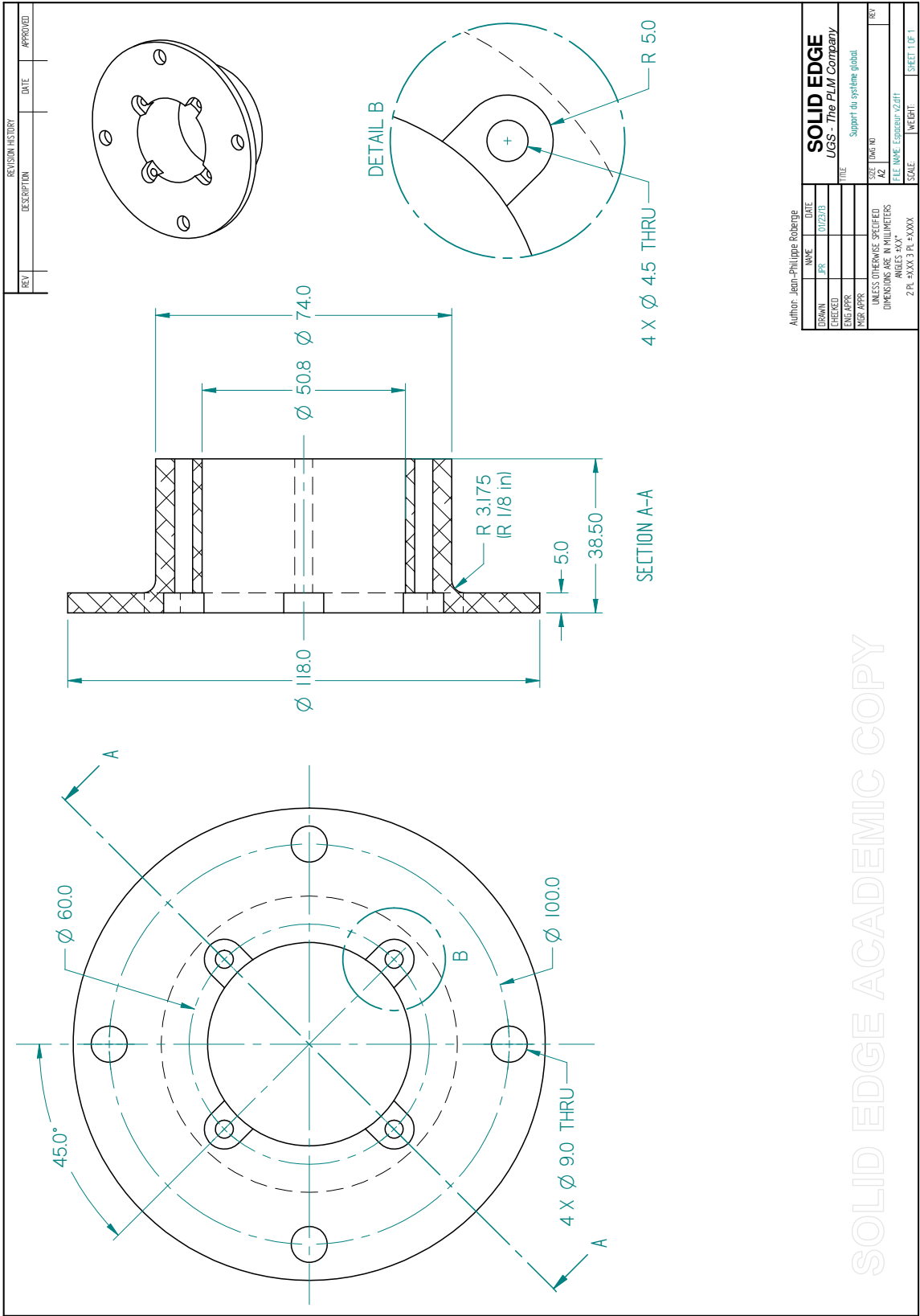
2 PL - 30XX 3 PL - 30XXX
SCALE: 1:1
W/F: 11/11/10

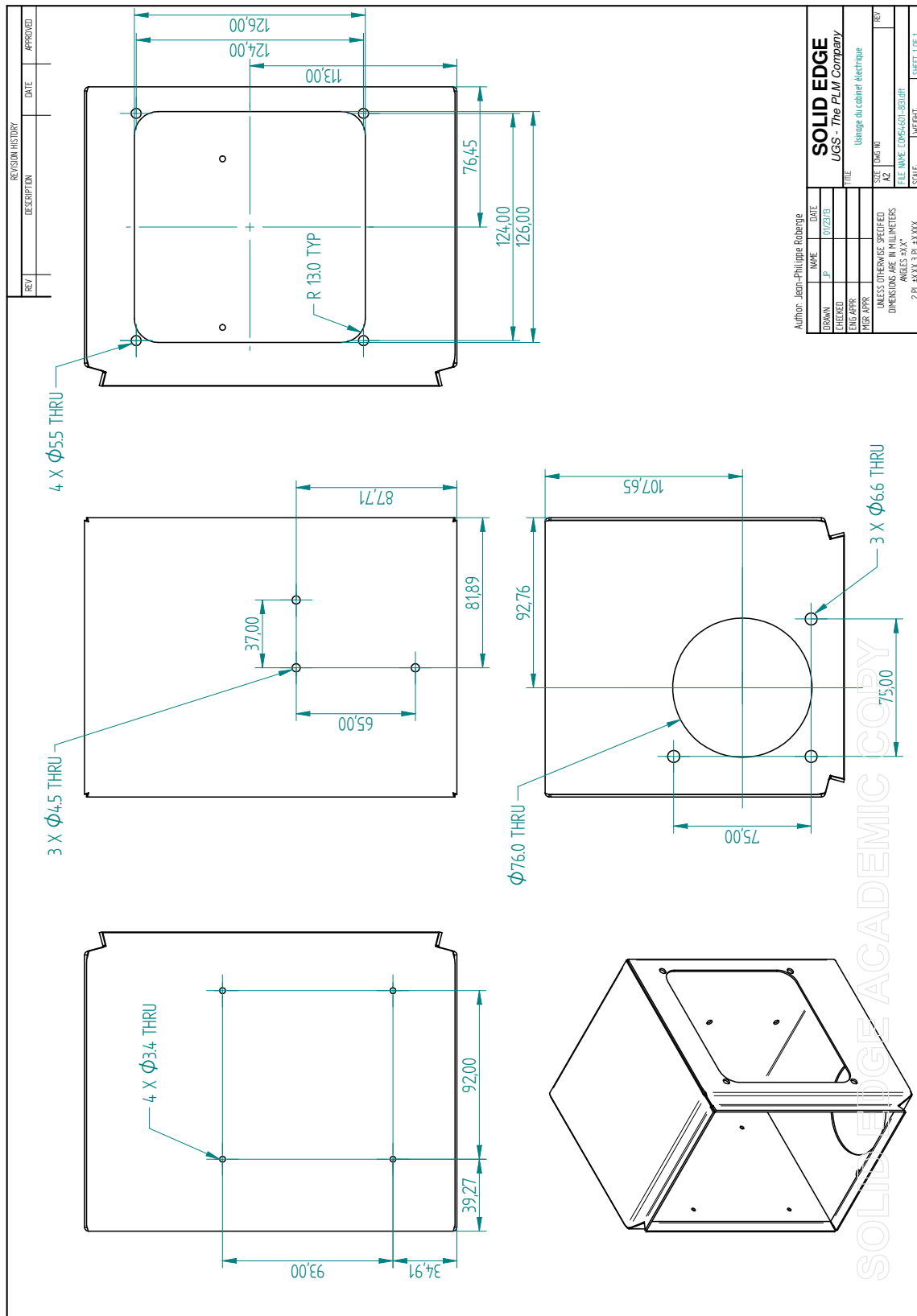
SOLID EDGE
UGS - The PLM Company

Support de la table tournante

REV: 1
FILE NAME: 30XX3 PL 30XXX
SCALE: 1:1
W/F: 11/11/10

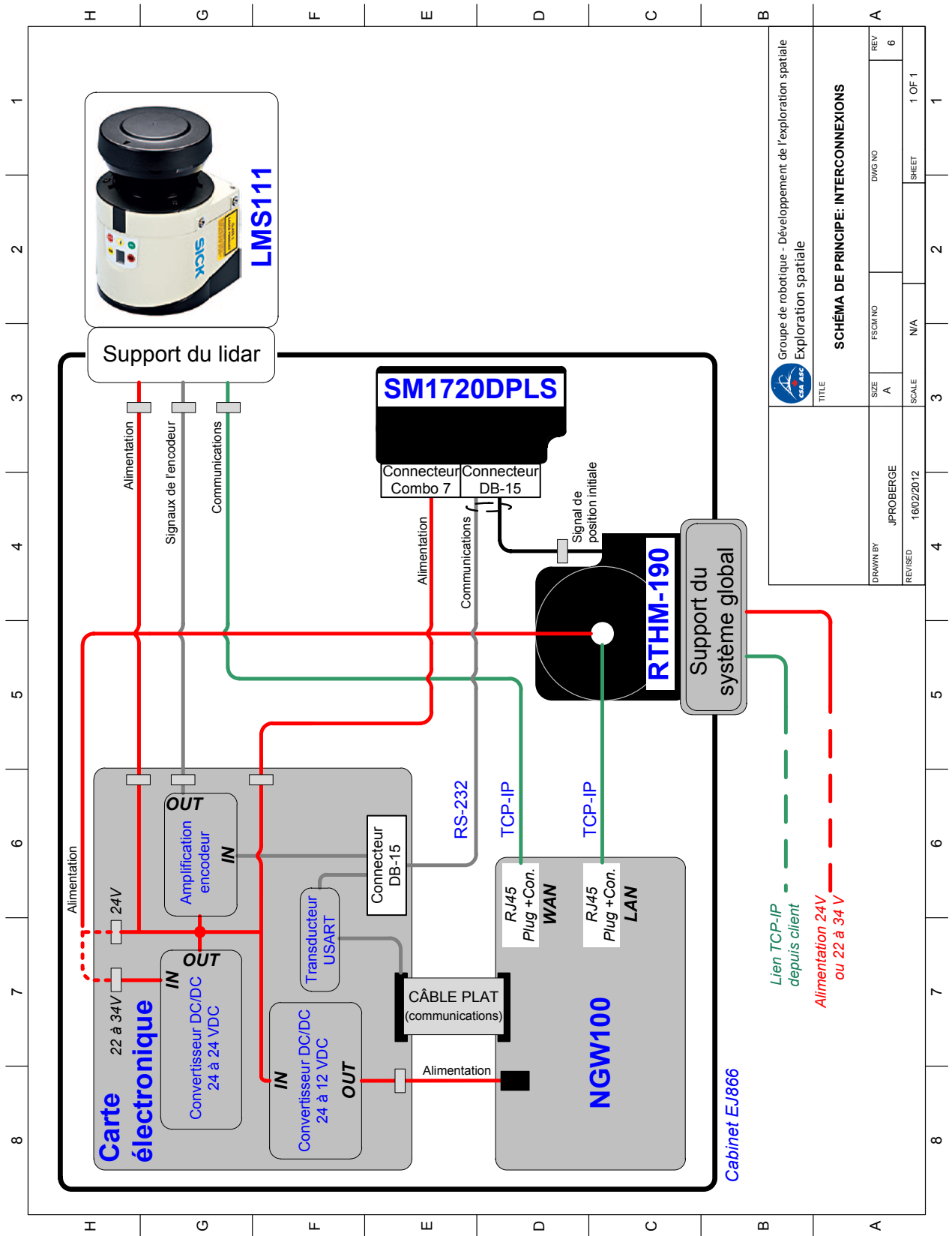
[illegible]





ANNEXE B

Schéma de principe : interconnexions



ANNEXE C

Analyse de sensibilité et validation de la fonction objectif

En utilisant le modèle 4.4, les coordonnées des points dans le repère C sont données par :

$${}^C P = [{}^C P_X, {}^C P_Y, {}^C P_Z]$$

$$\begin{aligned} {}^C P_X &= (Dz + \delta_z)(\sin(\delta_\theta + \theta) \sin(\delta_\gamma) + \cos(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\gamma) \sin(\delta_\psi)) \\ &\quad - (Dy + \delta_y)(\sin(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\gamma) - \cos(\delta_\theta + \theta) \sin(\delta_\gamma) \sin(\delta_\psi)) \\ &\quad + r \sin(\phi)(\sin(\delta_\theta + \theta) \sin(\delta_\gamma) + \cos(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\gamma) \sin(\delta_\psi)) \\ &\quad + \cos(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\psi)(Dx + \delta_x) + r \cos(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\psi) \cos(\phi) \\ {}^C P_Y &= (Dy + \delta_y)(\cos(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\gamma) + \sin(\delta_\theta + \theta) \sin(\delta_\gamma) \sin(\delta_\psi)) \\ &\quad - (Dz + \delta_z)(\cos(\delta_\theta + \theta) \sin(\delta_\gamma) - \sin(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\gamma) \sin(\delta_\psi)) \\ &\quad - r \sin(\phi)(\cos(\delta_\theta + \theta) \sin(\delta_\gamma) - \sin(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\gamma) \sin(\delta_\psi)) \\ &\quad + \sin(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\psi)(Dx + \delta_x) + r \sin(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\psi) \cos(\phi) \\ {}^C P_Z &= \cos(\delta_\psi) \sin(\delta_\gamma)(Dy + \delta_y) - \sin(\delta_\psi)(Dx + \delta_x) - r \cos(\phi) \sin(\delta_\psi) \\ &\quad + \cos(\delta_\gamma) \cos(\delta_\psi)(Dz + \delta_z) + r \cos(\delta_\gamma) \cos(\delta_\psi) \sin(\phi) \end{aligned} \quad (C.1)$$

Pour que l'identification des paramètres inconnus se déroule bien, il faut que les dérivées partielles de ${}^C P$ par rapport aux paramètres d'intérêt ne soient pas triviales ni constantes pour tout angle θ et ϕ . Plus particulièrement :

$$\frac{\partial {}^C P}{\partial \rho} \neq 0 \quad \exists \theta, \exists \phi, \forall \rho \in \{\delta_x, \delta_y, \delta_z, \delta_\theta, \delta_\psi, \delta_\gamma\} \quad (C.2)$$

$$\frac{\partial^2 {}^C P}{\partial \rho \partial \zeta} \neq 0 \quad \exists \zeta \in \{\theta, \phi\}, \forall \rho \in \{\delta_x, \delta_y, \delta_z, \delta_\theta, \delta_\psi, \delta_\gamma\} \quad (C.3)$$

L'équation C.2 est un critère stipulant qu'il doit exister des angles θ et ϕ pour lesquels un paramètre influence la position des points dans l'espace. L'équation C.3 est un critère qui vise à assurer une bonne mesure de la dispersion des points. Ce dernier stipule qu'un

paramètre ne doit pas influencer tous les points de la même façon, car cela ne changerait en rien la dispersion. Les dérivées partielles en fonction des trois premiers paramètres (δ_x , δ_y et δ_z) sont données par :

$$\begin{aligned}
\frac{\partial {}^C P_X}{\partial \delta_x} &= \cos(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\psi) \\
\frac{\partial {}^C P_Y}{\partial \delta_x} &= \sin(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\psi) \\
\frac{\partial {}^C P_Z}{\partial \delta_x} &= -\sin(\delta_\psi) \\
\\
\frac{\partial {}^C P_X}{\partial \delta_y} &= \cos(\delta_\theta + \theta) \sin(\delta_\gamma) \sin(\delta_\psi) - \sin(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\gamma) \\
\frac{\partial {}^C P_Y}{\partial \delta_y} &= \cos(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\gamma) + \sin(\delta_\theta + \theta) \sin(\delta_\gamma) \sin(\delta_\psi) \\
\frac{\partial {}^C P_Z}{\partial \delta_y} &= \cos(\delta_\psi) \sin(\delta_\gamma) \\
\\
\frac{\partial {}^C P_X}{\partial \delta_z} &= \cos(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\gamma) \sin(\delta_\psi) + \sin(\delta_\theta + \theta) \sin(\delta_\gamma) \\
\frac{\partial {}^C P_Y}{\partial \delta_z} &= \sin(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\gamma) \sin(\delta_\psi) - \cos(\delta_\theta + \theta) \sin(\delta_\gamma) \\
\frac{\partial {}^C P_Z}{\partial \delta_z} &= \cos(\delta_\gamma) \cos(\delta_\psi)
\end{aligned} \tag{C.4}$$

En pratique, les angles incertains δ_θ , δ_ψ et δ_γ sont différents de zéro et leur valeur absolue n'est pas supérieure à quelques degrés. Donc, les dérivées partielles de ${}^C P_X$ et ${}^C P_Y$ en fonction du paramètre δ_x respectent le critère C.2 seulement lorsque $\theta \neq 0 \pm 90^\circ$. En revanche, les dérivées partielles de ${}^C P_Z$ en fonction des paramètres δ_x , δ_y et δ_z ne respectent pas le critère C.3. Cela signifie qu'il est impossible d'utiliser la variance selon l'axe Z_C pour identifier les paramètres δ_x , δ_y et δ_z . Les autres dérivées partielles respectent les critères C.2 et C.3. Les dérivées partielles des trois derniers paramètres (δ_θ , δ_ψ et δ_γ) sont données par :

$$\begin{aligned}
\frac{\partial {}^C P_X}{\partial \delta_\theta} &= (Dz + \delta_z)(\cos(\delta_\theta + \theta) \sin(\delta_\gamma) - \sin(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\gamma) \sin(\delta_\psi)) \\
&\quad - (Dy + \delta_y)(\cos(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\gamma) + \sin(\delta_\theta + \theta) \sin(\delta_\gamma) \sin(\delta_\psi)) \\
&\quad - (Dx + \delta_x) \sin(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\psi) - r \sin(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\psi) \cos(\phi) \\
&\quad + r \sin(\phi)(\cos(\delta_\theta + \theta) \sin(\delta_\gamma) - \sin(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\gamma) \sin(\delta_\psi))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial {}^C P_Y}{\partial \delta_\theta} &= (Dz + \delta_z)(\sin(\delta_\theta + \theta) \sin(\delta_\gamma) + \cos(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\gamma) \sin(\delta_\psi)) \\
&\quad - (Dy + \delta_y)(\sin(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\gamma) - \cos(\delta_\theta + \theta) \sin(\delta_\gamma) \sin(\delta_\psi)) \\
&\quad + (Dx + \delta_x) \cos(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\psi) + r \cos(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\psi) \cos(\phi) \\
&\quad + r \sin(\phi)(\sin(\delta_\theta + \theta) \sin(\delta_\gamma) + \cos(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\gamma) \sin(\delta_\psi)) \\
\frac{\partial {}^C P_Z}{\partial \delta_\theta} &= 0 \\
\\
\frac{\partial {}^C P_X}{\partial \delta_\psi} &= \cos(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\gamma) \cos(\delta_\psi)(Dz + \delta_z) \\
&\quad - r \cos(\delta_\theta + \theta) \cos(\phi) \sin(\delta_\psi) - \cos(\delta_\theta + \theta) \sin(\delta_\psi)(Dx + \delta_x) \\
&\quad + \cos(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\psi) \sin(\delta_\gamma)(Dy + \delta_y) + r \cos(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\gamma) \cos(\delta_\psi) \sin(\phi) \\
\frac{\partial {}^C P_Y}{\partial \delta_\psi} &= \sin(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\gamma) \cos(\delta_\psi)(Dz + \delta_z) \\
&\quad - r \sin(\delta_\theta + \theta) \cos(\phi) \sin(\delta_\psi) - \sin(\delta_\theta + \theta) \sin(\delta_\psi)(Dx + \delta_x) \\
&\quad + \sin(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\psi) \sin(\delta_\gamma)(Dy + \delta_y) + r \sin(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\gamma) \cos(\delta_\psi) \sin(\phi) \\
\frac{\partial {}^C P_Z}{\partial \delta_\psi} &= -\cos(\delta_\psi)(Dx + \delta_x) - \cos(\delta_\gamma) \sin(\delta_\psi)(Dz + \delta_z) \\
&\quad - \sin(\delta_\gamma) \sin(\delta_\psi)(Dy + \delta_y) - r \cos(\delta_\psi) \cos(\phi) - r \cos(\delta_\gamma) \sin(\delta_\psi) \sin(\phi) \\
\\
\frac{\partial {}^C P_X}{\partial \delta_\gamma} &= (Dy + \delta_y)(\sin(\delta_\theta + \theta) \sin(\delta_\gamma) + \cos(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\gamma) \sin(\delta_\psi)) \\
&\quad + (Dz + \delta_z)(\sin(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\gamma) - \cos(\delta_\theta + \theta) \sin(\delta_\gamma) \sin(\delta_\psi)) \\
&\quad + r \sin(\phi)(\sin(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\gamma) - \cos(\delta_\theta + \theta) \sin(\delta_\gamma) \sin(\delta_\psi)) \\
\frac{\partial {}^C P_Y}{\partial \delta_\gamma} &= -(Dy + \delta_y)(\cos(\delta_\theta + \theta) \sin(\delta_\gamma) - \sin(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\gamma) \sin(\delta_\psi)) \\
&\quad - (Dz + \delta_z)(\cos(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\gamma) + \sin(\delta_\theta + \theta) \sin(\delta_\gamma) \sin(\delta_\psi)) \\
&\quad - r \sin(\phi)(\cos(\delta_\theta + \theta) \cos(\delta_\gamma) + \sin(\delta_\theta + \theta) \sin(\delta_\gamma) \sin(\delta_\psi)) \\
\frac{\partial {}^C P_Z}{\partial \delta_\gamma} &= \cos(\delta_\gamma) \cos(\delta_\psi)(Dy + \delta_y) - \cos(\delta_\psi) \sin(\delta_\gamma)(Dz + \delta_z) \\
&\quad - r \cos(\delta_\psi) \sin(\delta_\gamma) \sin(\phi)
\end{aligned} \tag{C.5}$$

La dérivée $\frac{\partial {}^C P_Z}{\partial \delta_\theta} = 0$ ne respecte pas les critères C.2 et C.3. Ce résultat indique que le paramètre δ_θ n'a aucun effet sur la coordonnée Z_C des points, donc qu'il est impossible d'utiliser cette coordonnée pour identifier δ_θ . C'est un effet attendu puisque ce paramètre

représente une rotation pure selon l'axe Z_C . En ce qui a trait aux autres dérivées partielles, celles-ci respectent bel et bien les critères C.2 et C.3.

En regard de cette analyse de sensibilité, l'optimisation de la fonction objectif 4.5 permet effectivement d'identifier les paramètres inconnus lorsque θ et ϕ varient. Dans cette optique, les quatre premiers termes de l'équation contribuent à identifier tous les paramètres inconnus. Le dernier terme est la variance des points selon l'axe Z_C et aide seulement à identifier les paramètres δ_ψ et δ_γ .