

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

RECALAGE AUTOMATIQUE DE GÉOMÉTRIES DE MAILLAGES
SURFACIQUES DANS UN ENVIRONNEMENT SPATIAL RÉEL

SÉBASTIEN GEMME
DÉPARTEMENT DE GÉNIE INFORMATIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

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

AVRIL 2006



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-17943-7

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-17943-7

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

RECALAGE AUTOMATIQUE DE GÉOMÉTRIES DE MAILLAGES
SURFACIQUES DANS UN ENVIRONNEMENT SPATIAL RÉEL

présenté par: GEMME Sébastien

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

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

M. GRANGER Louis, M.Sc., président

Mme CHERIET Farida, Ph.D., membre et directrice de recherche

M. DUPUIS Érick, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. GUIBAUT François, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Je veux remercier tous ceux qui m'ont aidé tout au cours de ce mémoire. Ioannis Rekleitis, de l'Agence spatiale canadienne qui m'a appris les rudiments du fonctionnement du monde de la recherche. Joseph Nsasi Bakambu, de l'Agence spatiale canadienne, ayant complété son doctorat à l'École polytechnique, qui m'a été d'une aide indispensable en m'assistant dans mes travaux. Farida Cheriet, ma directrice, qui a toujours eu le bon mot pour me donner de bonnes idées et Érick Dupuis, gestionnaire du groupe de robotique de l'Agence spatiale et co-directeur, qui a effectué un travail remarquable dans son rôle de co-directeur.

Tous les gens de la technologie de l'information de l'Agence spatiale, spécialement, Linda Holmes, Daniel Marion et Robert Dominique qui m'ont permis de réaliser cette maîtrise.

Finalement, je remercie ma copine, Julie, qui a passé de longues soirées seule dans le salon pendant que je travaillais dans mon bureau.

RÉSUMÉ

Les missions spatiales requièrent de plus en plus d'autonomie à cause de la nature de certaines de ces missions qui les rendent impossibles à exécuter par des humains. La mise au point de capteurs lasers 3D qui sont performants, fiables et étant qualifiés pour l'espace, ouvre la voie vers la réalisation de telles missions. Deux types de missions : la capture autonome d'un satellite en mouvement situé dans l'espace ainsi que l'exploration planétaire, plus précisément la localisation, ont été identifiés dans le cadre de ce projet.

Dans le cas du sauvetage d'un satellite, il est nécessaire de déterminer où se trouve le satellite dans l'environnement afin de pouvoir le capturer. En effectuant une lecture à l'aide du capteur laser 3D et en trouvant la transformation rigide entre cette lecture et un modèle du satellite, cette information peut être déterminée.

Dans le cas de l'exploration planétaire, lors de l'atterrissage, le centre de contrôle situé au sol connaît la zone dans laquelle le robot d'exploration s'est posé. Or, la position exacte du robot dans cette zone reste inconnue mais, de l'information sur cette région est connue, notamment une carte d'élévation, de basse résolution est disponible. Une lecture provenant du capteur laser 3D situé sur le robot peut-être effectuée. Ensuite, la position du robot peut être connue en déterminant la transformation rigide permettant d'aligner correctement cette lecture, avec la carte d'élévation de la région où il se trouve.

Ces deux applications présentent des problèmes de recalage 3D, un recalage 3D étant dans les deux cas la transformation rigide entre ces deux maillages surfaciques. Les données, provenant d'environnements que l'on retrouve dans les missions d'exploration et les missions de sauvetage de satellite présentent des caractéristiques particulières qui font en sorte que la détermination du recalage s'en trouve plus complexe. Du fait que certains objets bloquent le champs de vision du capteur, par exemple une roche dans le cas d'une mission d'exploration, des occlusions peuvent

être présentes. La résolution des lectures provenant du capteur est non constante à cause de l'angle du capteur par rapport aux différents objets présents dans l'environnement. Il existe une différence de résolution entre les deux maillages surfaciques qui doivent être recalés. Cette propriété est surtout présente dans le cas de l'exploration planétaire. Finalement il y a une possible présence de bruit, spécialement dans le cas d'une mission de sauvetage d'un satellite, où le satellite est recouvert d'une couverture thermique présentant une propriété de spécularité, ce qui produit beaucoup de bruit dans les données provenant du capteur laser 3D.

Une méthode de recalage 3D automatique de maillages surfaciques sera présentée. Elle consiste en cinq étapes :

1. Effectuer une triangulation du nuage de points.
2. Procéder à une sélection des points d'intérêt, ces points sont des endroits sur la surface où un changement marqué dans la courbure est détecté.
3. Effectuer une mise en correspondance locale. Cette mise en correspondance utilise l'information située autour des points d'intérêt identifiés dans les deux maillages afin d'effectuer une mise en correspondance. L'information de l'étape précédente est très importante car, effectuer cette mise en correspondance locale sur tous les points des deux maillages serait une opération très lourde.
4. Effectuer une mise en correspondance globale. En se servant de l'information obtenue par la mise en correspondance locale, un critère de consistance géométrique global est appliqué. Ceci a pour effet d'éliminer l'impact des possibles faux correspondants provenant de la mise en correspondance locale. Encore une fois, l'information de l'étape précédente est très importante. La mise en correspondance locale fournit une hypothèse sur de possibles correspondances entre les deux surfaces. Effectuer une mise en correspondance globale en supposant que, chaque point du premier maillage peut correspondre à n'importe quel point du deuxième maillage, aurait pour conséquence de

rendre le recalage très lourd.

5. Effectuer un raffinement du recalage.

Le fait de combiner une mise en correspondance locale avec une mise en correspondance globale améliore grandement les résultats en présence de données présentant les caractéristiques énumérées précédemment.

Les résultats expérimentaux ont été validés à l'aide d'installations situées à l'Agence spatiale canadienne (ASC). Dans le cas de la capture d'un satellite, un banc d'essai robotique a été utilisé pour maintenir une maquette d'un satellite en place. Le capteur laser de la compagnie Neptec, le LCS a été utilisé pour l'acquisition des données. Dans le cas de l'exploration planétaire, un terrain présentant des caractéristiques typiques de la planète Mars, aménagé à l'ASC a été utilisé. Le capteur laser utilisé pour l'acquisition des données dans ce cas est un LIDAR de la compagnie Optech.

Les résultats obtenus sont prometteurs et ouvrent la voie à plusieurs autres applications telles que la reconstruction d'environnements et la reconnaissance de formes.

ABSTRACT

Space missions require more and more autonomy due to the nature of certain mission that make them impossible to be performed by humans. With the recent availability and performance of reliable space qualified 3D laser sensors, the path toward the realization of such mission is opened.

Two types of missions have been identified : autonomous satellite capture and planetary exploration, more precisely localization.

In the case of satellite capture, it is necessary to determine the location of the satellite in the environment in order to capture it. Thus, by performing a scan with the 3D laser sensor and by finding the rigid body transformation between the scan and a model of that satellite, that information can be retrieved.

In the case of planetary exploration, at the time of landing, the control center knows the area where the robot has landed. However, the position of the robot in that area remains unknown. On the other hand, information about that zone is available : a low resolution elevation map of the area is available. By finding the rigid body transformation, that aligns a scan taken from the robot using the 3D laser sensor, with that elevation map, the exact position of the robot can be determined.

These two problems are 3D registration problems. A 3D registration being the rigid body transformation between two surface meshes.

The data coming from environments found in satellite capture and planetary exploration present specific characteristics that make registration more difficult. For instance, objects may be blocking the field of view of the sensor, creating occlusions (*i.e.* a rock in the case of planetary exploration mission). The resolution of the scans coming from the sensor is not constant because of the shallow grazing angle at which the scans are taken. There may also be a significant difference between the two surfaces that need to be registered. This property is mostly present

in the case of planetary exploration. Finally, there is the possible presence of noise, especially in the case of satellite capture missions. The noise is primarily caused by the specular nature of the thermal blanket covering the surface of the satellite.

A 3D automatic registration method will be presented. It consists of five steps :

1. Perform a triangulation of the point cloud.
2. Proceed with a selection of points of interest. These points are locations where the surface presents a significant curvature change.
3. Perform a local matching step. This local matching uses the information surrounding the interest points in order to complete the matching. The information coming from the previous step is very important. For instance, applying the local matching on every point of every surface would be computationally expensive.
4. Perform a global matching step. Using the information obtained from local matching, a geometric consistency criteria is applied. This has the effect of eliminating the impact of possible outliers coming from the local matching. Once again, the information provided by the previous step is very important. The local matching step provides assumptions on possible matching points in the two surfaces. Performing global matching while assuming that all the points from the first mesh can match any point in the second mesh will also lead to intensive calculations.
5. Perform a refinement of the solution.

Combining a local matching step with a global matching step greatly improves the results when treating previously enumerated data.

Experimental results have been validated using facilities located at the Canadian Space Agency (CSA). In the case of satellite capture, a robotic testbed has been used to hold a mockup of a satellite. A LCS laser sensor, from Neptec, has been used to acquire the data. In the case of planetary exploration, a terrain presenting

different Mars landscapes, located at CSA, has been used. A LIDAR from Optech has been used to acquire the data.

The results are promising and are opening the way to many other applications such as environment reconstruction and shape recognition.

CHAPITRE 2	OBJECTIFS DE RECHERCHE	41
2.1	Objectif global	41
2.2	Objectifs spécifiques	41
CHAPITRE 3	MÉTHODOLOGIE	43
3.1	Définition des scénarios d'opération	43
3.1.1	Capture d'un satellite	43
3.1.1.1	Environnement expérimental	44
3.1.1.2	Étapes de la méthodologie	45
3.1.2	Environnement Martien	45
3.1.2.1	Environnement expérimental	47
3.1.2.2	Étapes de la méthodologie	51
3.2	Critère d'évaluation du recalage	52
3.3	Génération du maillage	52
3.4	Méthode de recalage 3D automatique	54
3.4.1	Évaluation des points d'intérêt	54
3.4.1.1	Paramètres	59
3.4.2	Mise en correspondance locale	59
3.4.2.1	Ré-échantillonnage des courbes	61
3.4.2.2	Paramètres	65
3.4.3	Mise en correspondance globale	66
3.4.3.1	Sélection des points	68
3.4.3.2	Détermination du nombre de points correctement recalés : N_{T_c}	69
3.4.3.3	Paramètres	70
3.4.4	Raffinement	71
3.4.4.1	Paramètres	71

CHAPITRE 4	RÉSULTATS ET DISCUSSION	72
4.1	Valeur des paramètres	72
4.1.1	Évaluation des points d'intérêt	73
4.1.2	Mise en correspondance locale	74
4.1.3	Mise en correspondance globale	75
4.1.4	Raffinement	76
4.2	Sauvetage d'un satellite	76
4.2.1	Discussion	80
4.2.2	Limites de la méthode	80
4.3	Exploration planétaire	81
4.3.1	Lecture 1 avec des modèles de résolution de 20, 50 et 100cm	81
4.3.2	Lecture 2 avec des modèles de résolution de 20, 50 et 100cm	85
4.3.3	Lecture 3 avec des modèles de résolution de 20, 50 et 100cm	89
4.3.4	Discussion	93
4.3.5	Limites de la méthode	94
4.4	Discussion reliée aux deux applications	98
CHAPITRE 5	CONCLUSION ET TRAVAUX FUTURS	100
RÉFÉRENCES		103
ANNEXES		110

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Le <i>Special Purpose Dexterous Manipulator</i> (SPDM)	2
Figure 2	Le SPDM au bout du SSRMS.	2
Figure 3	Le <i>Mobile Base System</i> (MBS) sur lequel est attaché le <i>Space Station Remote Manipulator System</i> (SSRMS).	3
Figure 4	Le SSRMS	3
Figure 5	<i>Satellite servicing</i>	4
Figure 6	Solution proposée : déterminer de manière automatique la transformation initiale.	6
Figure 7	Phénomène de résolution variable	7
Figure 8	Illustration du phénomène de l'occlusion. La zone marquée en rouge est la zone d'occlusion.	8
Figure 1.1	Distance euclidienne	16
Figure 1.2	Distance géodésique	17
Figure 1.3	Les deux cas de mise à jour de la distance géodésique (Sun and Abidi, 2001)	18
Figure 1.4	La représentation en éclaboussure (« splash »)	21
Figure 1.5	(Zhang, 1999) Exemple de découpage de morceaux de surface et son image de forme harmonique associée.	21
Figure 1.6	Rayons géodésiques autour d'un point	25
Figure 1.7	Normale à un triangle	26
Figure 1.8	La normale de la surface à un point p , notée $\hat{n}$, est la moyenne arithmétique des normales $\vec{n}_i$ de ses triangles voisins.	26
Figure 1.9	Définition du plan tangent et projection d'un point sur ce plan.	27
Figure 1.10	Une représentation par empreinte.	28
Figure 1.11	Recalage par la méthode du <i>RANSAC based DARCES</i>	32
Figure 3.1	Capture de satellite	44

Figure 3.2	Matériel expérimental utilisé : un banc d'essai robotique (3.2(a)) et une maquette d'un satellite (3.2(b))	44
Figure 3.3	<i>Laser Camera System</i> (LCS) de Neptec	45
Figure 3.4	Étapes de méthodologie pour la capture d'un satellite. . . .	46
Figure 3.5	Terrain de Mars situé à l'Agence spatiale canadienne dans l'arrondissement Saint-Hubert de la ville de Longueuil. . . .	48
Figure 3.6	Lecture 3.6(a) devant être positionnée dans le modèle 3.6(b)	49
Figure 3.7	Le robot d'exploration utilisé : un robot <i>Pioneer P2AT</i> . . .	49
Figure 3.8	LIDAR ILRIS 3D de Optech	50
Figure 3.9	Étapes de méthodologie pour l'environnement martien. . . .	51
Figure 3.10	Triangulation de <i>Delaunay</i>	53
Figure 3.11	Mesure de l'angle d'un point pour l'ordonnancement des points d'une représentation par empreinte.	63
Figure 3.12	La valeur des paramètres u_i doit être estimée, pour chacun des points, afin de calculer la courbe.	63
Figure 4.1	Recalage réussi d'un satellite sur un modèle.	78
Figure 4.2	Recalage échoué d'un satellite sur un modèle.	79
Figure 4.3	Lecture 1 avec une résolution du modèle de 20cm	82
Figure 4.4	Lecture 1 avec une résolution du modèle de 50cm.	83
Figure 4.5	Lecture 1 avec une résolution du modèle de 100cm.	84
Figure 4.6	Lecture 2 avec une résolution du modèle de 20cm	86
Figure 4.7	Lecture 2 avec une résolution du modèle de 50cm	87
Figure 4.8	Lecture 2 avec une résolution du modèle de 100cm	88
Figure 4.9	Lecture 3 avec une résolution du modèle de 20cm	90
Figure 4.10	Lecture 3 avec une résolution du modèle de 50cm	91
Figure 4.11	Lecture 3 avec une résolution du modèle de 100cm	92
Figure 4.12	Recalage échoué dans le modèle du terrain de Mars.	95
Figure 4.13	Occlusion dans une scène vue sous deux angles différents. . .	96

Figure 4.14	Zone où s'insère la figure 4.13.	97
Figure 4.15	Une scène qui présente très peu de points d'intérêt.	98
Figure III.1	Recalage provenant d'un visage pris sous deux angles différents : première prise de vue : 108° et deuxième prise de vue : 144°	115
Figure III.2	Recalage provenant d'un visage pris sous deux angles différents : première prise de vue : 108° et deuxième prise de vue : 180°	116
Figure III.3	Recalage provenant d'un visage pris sous deux angles différents : première prise de vue : 108° et deuxième prise de vue : 216°	117
Figure III.4	Recalage provenant d'un visage pris sous deux angles différents : première prise de vue : 108° et deuxième prise de vue : 252°	118
Figure III.5	Recalage provenant d'un visage pris sous deux angles différents : première prise de vue : 108° et deuxième prise de vue : 288°	119
Figure III.6	Visages provenant de deux individus différents pris sous deux angles similaires.	120
Figure III.7	Visages provenant de deux individus différents pris sous deux angles présentant une différence significative (environ 35° de différence).	121

LISTE DES ALGORITHMES

Algorithme 1.1	Calcul de la distance géodésique	18
Algorithme 1.2	<i>DARCES</i>	33
Algorithme 1.3	Mise en correspondance globale	35
Algorithme 1.4	<i>Iterative Closest Point</i> (ICP)	37
Algorithme 3.1	Sélection des points d'intérêt	58
Algorithme 3.2	Mise en correspondance globale	67
Algorithme I.1	Calcul de la résolution d'un maillage	110

LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES

ASC :	Agence spatiale canadienne.
DARCES :	Data Aligned Rigidity Constrained Exhaustive Search.
EVA :	Extra-Vehicula Activity.
HSI :	Harmonic Shape Image.
ICP :	Iterative closest point.
LCS :	Laser Camera System.
MBS :	Mobile Base System.
MSS :	Mobile Servicing System.
RANSAC :	RANdom SAMpling Consensus.
SAI :	Spherical Attribute Image.
SPDM :	Special Purpose dexterous Manipulator.
SSI :	Station spatiale internationale.
SSRMS :	Space Station Remote Manipulator System.
α	Rayon du voisinage pour le calcul du changement de courbure.
ϵ	La valeur minimale du changement de courbure à un point pour qu'il soit considéré comme un point d'intérêt.
m	Le nombre maximal d'essais pour trouver trois points, lors de la mise en correspondance globale.
n	Le nombre de points d'intérêt à sélectionner.
δ	L'étendue maximale en x , y et z du maillage.
ϑ	Constante établie expérimentalement.
β	Constante établie expérimentalement.
χ	Valeur maximale du rayon géodésique.

ϕ	Valeur de corrélation seuil au-delà de laquelle deux représentations par empreinte ne sont plus considérés « semblables ».
M	Le nombre de rayons géodésiques utilisés.
K	Le nombre de points par cercle du plan tangent de la représentation par empreinte.
ν	Un multiplicateur de la valeur de corrélation ϕ .
η	Taille minimale de l'arête d'une triangle, lors de la mise en correspondance globale.
Ω	Le seuil de tolérance pour la sélection des points lors de la mise en correspondance globale.
N_{T_c}	Nombre de points correctement recalés.
ρ	Chevauchement entre deux primitives géométriques à recaler.
ζ	Résolution du maillage.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Paramètres utilisés pour la sélection de points d'intérêt . . .	59
Tableau 3.2	Paramètres utilisés pour la mise en correspondance locale .	65
Tableau 3.3	Paramètres utilisés pour la mise en correspondance globale .	70
Tableau 3.4	Paramètres utilisés lors du raffinement.	71
Tableau 4.1	Valeur des paramètres utilisés pour la sélection de points d'intérêts	73
Tableau 4.2	Valeur des paramètres utilisés pour la mise en correspon- dance locale	74
Tableau 4.3	Valeur des paramètres utilisés pour la mise en correspon- dance globale	75
Tableau 4.4	Valeur des paramètres utilisés lors du raffinement.	76
Tableau 4.5	Variation de la qualité et de la performance du recalage en fonction de la résolution, par rapport à la résolution étalon de 20cm.	94

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I	CALCUL DE LA RÉOLUTION D'UN MAILLAGE . . .	110
ANNEXE II	ENVIRONNEMENT DE DÉVELOPPEMENT	112
ANNEXE III	AUTRES CAS	113

INTRODUCTION

L'ère spatiale a débuté officiellement en 1957 avec le lancement du satellite soviétique Spoutnik 1.

Le Canada est entré dans l'ère spatiale en 1962 avec le satellite Alouette-I. Avec cette réalisation, le Canada s'inscrivait comme la première nation, après les super puissances soviétiques et américaines, à concevoir et à fabriquer son propre satellite artificiel. Ce satellite a été lancé dans le cadre du programme d'observation de la Terre Alouette/ISIS.

Une autre réalisation majeure du Canada est la mise au point du *Canadarm*, mieux connu sous le nom de *Bras canadien*. Ce dernier fût lancé en 1981 pour la première fois à bord de la navette *Columbia*. Ce bras robotisé d'une longueur de 15 mètres est utilisé depuis sur les navettes américaines. La nouvelle version : *Canadarm2*, livrée en 2001, est utilisée sur la station spatiale internationale (SSI).

Avec le lancement du projet de la station spatiale internationale (SSI), le Canada a eu l'occasion d'apporter une contribution clé : le *Mobile Servicing System* (MSS). Ce système joue un rôle qui pourrait être qualifié de « cheval de trait » dans la phase d'assemblage de la SSI. Le MSS est constitué du *Mobile Base System* (MBS) (figure 3). Le MBS est installé sur un système de rails sur la SSI, ce qui lui permet de se déplacer. Un bras robotisé, d'une longueur de 17,6 mètres comportant sept degrés de liberté : le *Canadarm2* aussi connu sous le nom de *Space Station Remote Manipulator System* (SSRMS) (figure 4), peut être ancré sur le MBS. Ce bras est utilisé pour diverses tâches : l'assemblage des différentes composantes de la station, tel que les modules et les panneaux solaires. Il est aussi utilisé lors des sorties extra véhiculaires (*extra-vehicular activity* (EVA)) des astronautes. Lors d'un EVA, l'astronaute est fixé au bout du SSRMS, qui peut ainsi être utilisé pour

le déplacer.

Finalement, le *Special Purpose Dexterous Manipulator* (SPDM) (figure 1), sera lancé dans une prochaine mission. Il sera fixé au bout du SSRMS, tel qu'illustré à la figure 2. Le rôle du SPDM est essentiellement de remplacer l'astronaute.

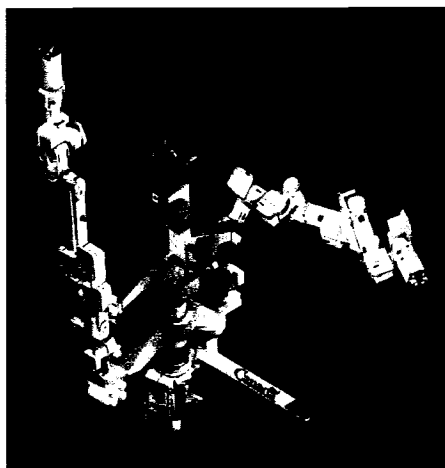


Figure 1 Le *Special Purpose Dexterous Manipulator* (SPDM)

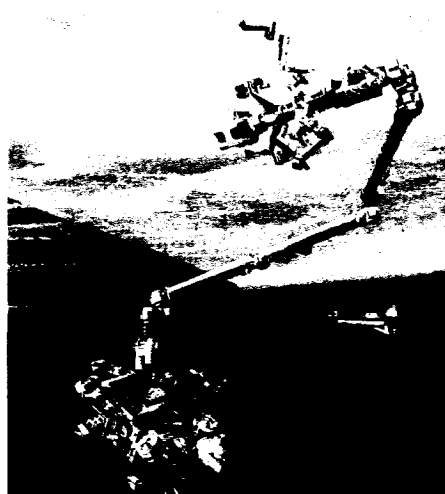


Figure 2 Le SPDM au bout du SSRMS.

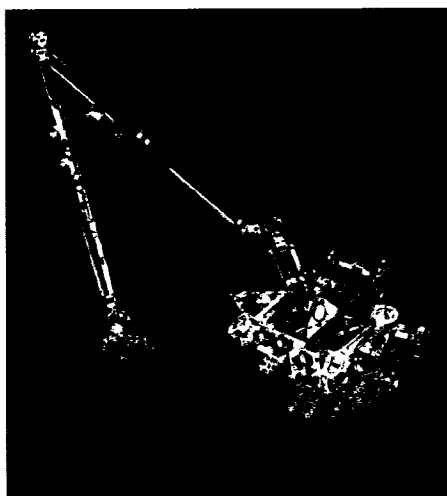
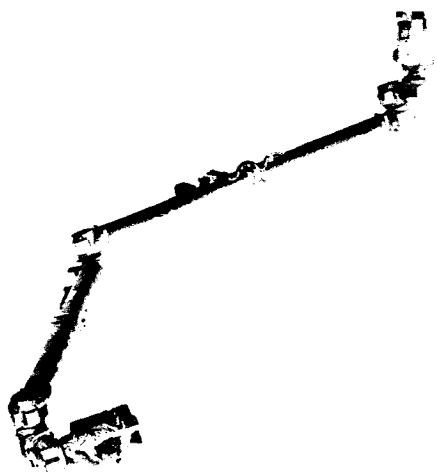


Figure 3 Le *Mobile Base System* (MBS) sur lequel est attaché le *Space Station Remote Manipulator System* (SSRMS).



(a) Le SSRMS



(b) Prise de vue du SSRMS attaché au module *US lab* de la SSI.

Figure 4 Le SSRMS

Les prochaines étapes logiques dans le développement de la robotique spatiale au Canada sont l'entretien de satellites en orbite et l'exploration planétaire.

Dans les deux cas, la capacité de modéliser et de reconnaître l'environnement du robot sera requise. En effet, une des étapes critiques pour une mission d'entretien de

satellite en orbite (*satellite servicing*) (Leinz and Chen, 2002), (Ruel et al., 2005), est la capture de ce dernier. Celui-ci peut être un satellite artificiel, une navette spatiale, ou même une capsule. Le besoin d'autonomie est motivé par la présence d'un délai de communication qui empêche l'interaction en direct avec le robot.

Ce processus implique deux domaines d'expertise : une information de perception (la vision) et le contrôle robotique. Le contrôle robotique utilise l'information fournie par le capteur perceptuel afin de générer une trajectoire permettant de capturer l'objet.

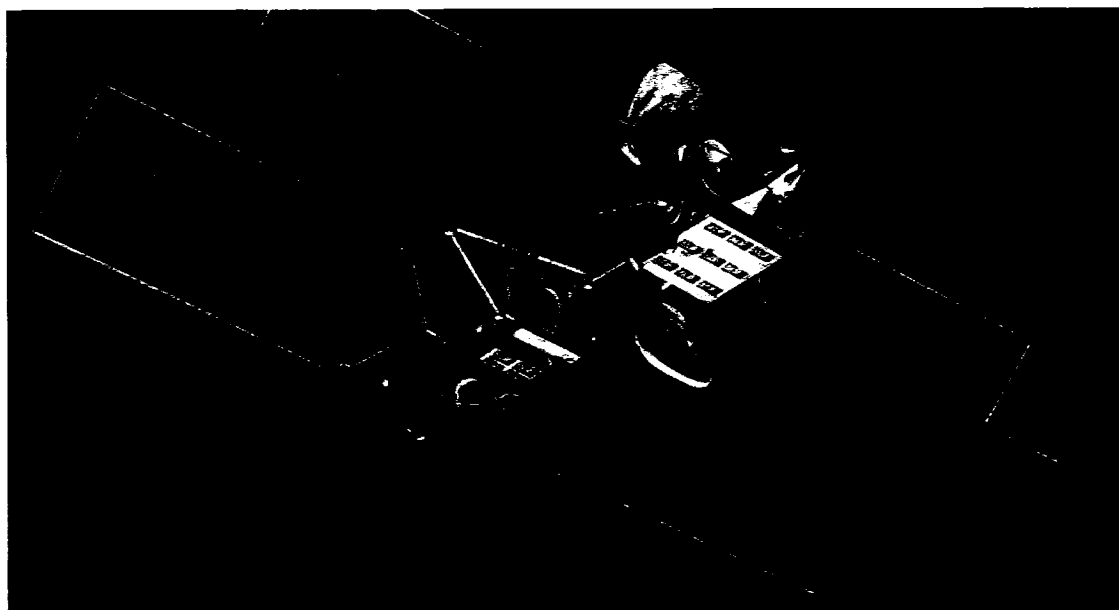


Figure 5 *Satellite servicing*

Le capteur doit estimer continuellement la pose de l'objet afin de fournir cette information au système de contrôle.

Le problème est en fait un problème de recalage en trois dimensions. Nous disposons du modèle de l'objet à capturer et nous devons reconnaître cet objet dans les données provenant du capteur 3D, sous la forme d'un nuage de points.

La seconde catégorie de missions demandant de modéliser l'environnement du robot est l'exploration planétaire. Dans ce cas, une des principales difficultés est la présence de délais importants. Ces délais peuvent varier de quelques secondes à plusieurs minutes. Prenons l'exemple d'une pièce d'équipement qui serait située sur Mars, soit à une distance de la Terre variant entre 78 et 378 millions de kilomètres. Le délai de transmission, à la vitesse de la lumière se situe entre 8 minutes 40 secondes et 40 minutes pour l'aller-retour du signal entre la Terre et Mars. La navigation d'un robot mobile à la surface de Mars demande de réagir aux obstacles présents dans l'environnement. Or les délais de communication empêchent la télé-opération directe du robot par un opérateur situé sur Terre. Le robot doit donc être en mesure de naviguer de manière autonome dans son environnement. Une des étapes critiques lors de la navigation est la localisation. Le robot doit, en effet, pouvoir déterminer sa position avant de pouvoir planifier son déplacement ou assembler différentes cartes, obtenues de points de vue différents. Dans ce cas, la carte d'élévation, une carte contenant des données en trois dimensions fournissant de l'information sur le terrain est requise.

Le problème de localisation consiste à effectuer une lecture au sol, à l'aide du capteur actif situé sur le robot. Ensuite, la lecture, constituée de points 3D, est positionnée correctement dans la carte globale. Ainsi, comme la transformation rigide permettant de positionner la lecture effectuée, par le robot, dans la carte est connue, la position du robot dans cette carte est par le fait même connue. Le problème qui se pose dans ce cas est la qualité de la carte globale. La carte globale est générée à l'aide de données provenant d'un satellite en orbite autour de la planète. Comme le satellite est situé à une altitude de quelques centaines de kilomètres de la surface de la planète, la résolution de la carte sera relativement basse. Donc, plusieurs caractéristiques géométriques présentes dans la lecture effectuée au sol ne sont pas présentes dans la carte globale.

Il est aussi intéressant de mettre à jour la carte globale avec un niveau de détail plus élevé en y rajoutant les données des mesures locales à haute résolution. La même méthode pourrait être utilisée pour effectuer cette reconstruction.

L'objectif de la recherche décrite dans ce mémoire est de fournir une méthode permettant à la fois, d'obtenir l'estimé de la pose initiale pour une mission d'entretien de satellites en orbite, ainsi que d'accomplir la localisation d'un robot mobile pour des applications d'exploration planétaire.

La solution proposée pourra servir dans les deux problèmes énumérés. En effet, dans les deux cas, nous cherchons à déterminer le recalage entre une scène et un modèle. Dans le premier cas, le modèle est un modèle 3D du satellite tandis que dans le second, la localisation, le modèle est celui de la région dans laquelle se trouve le robot. La solution proposée consiste à estimer de manière automatique la transformation rigide nécessaire à la convergence de l'algorithme *Iterative Closest Point* (ICP). Cet estimé est généré sans aucune hypothèse. Il est très important d'insister sur le fait que cette estimation soit effectuée sans aucune connaissance *a priori*, car c'est exactement le cas dans les deux problèmes traités.

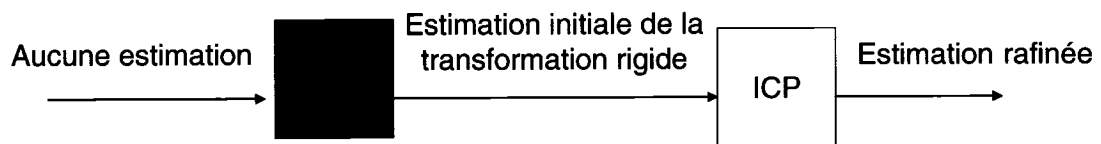


Figure 6 Solution proposée : déterminer de manière automatique la transformation initiale.

Les environnements dans lesquels les deux scénarios se déroulent sont des environnements que nous qualifierons de « naturels ».

Ces environnements ont les caractéristiques suivantes :

- Il y a possibilité d'occlusion causée par des objets situés dans le champs de vision du capteur (figure 8).

- Il y a présence de bruit causé principalement par la nature spéculaire de la surface lue par le capteur.
- Il existe une différence de résolution entre la scène et le modèle. Cette caractéristique se retrouve dans le cas de l'exploration planétaire. En effet, le modèle présente une résolution plus basse de par le fait que la lecture provient possiblement d'un satellite situé en orbite autour de la planète.
- La lecture provenant de la scène présente une résolution non constante. La figure 7(a) démontre la cause de ce phénomène. En effet, le capteur balaie l'environnement avec un angle d'incidence faible. Chaque ligne de balayage est incrémentée verticalement. Or, comme l'angle entre la direction de la ligne de balayage et la normale du terrain à ce point varie, la résolution varie du même coup (figure 7(b)).

Cette description convient aux environnements spatiaux et aux environnements rencontrés lors d'exploration planétaire.

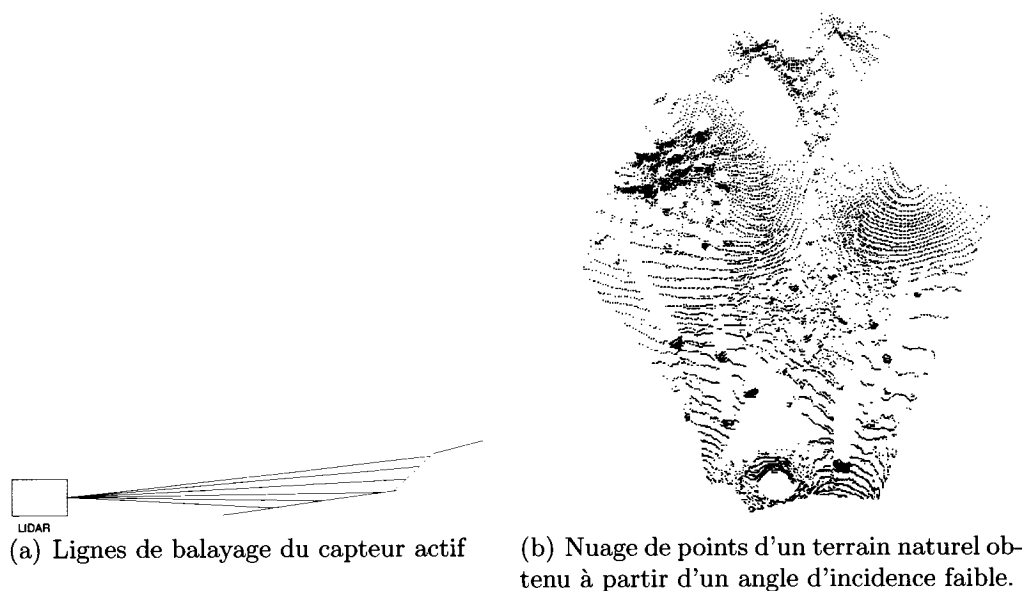


Figure 7 Phénomène de résolution variable

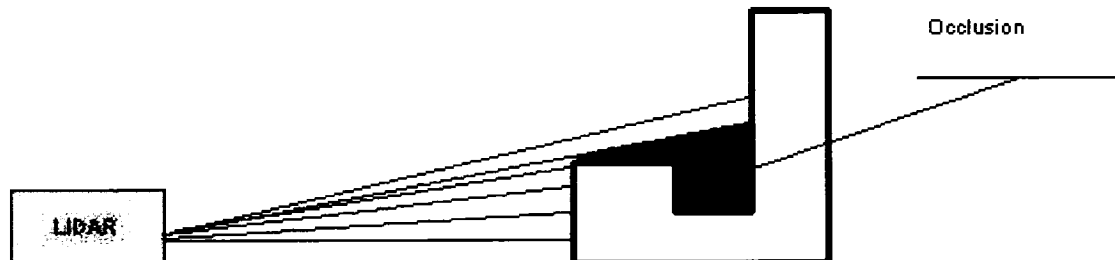


Figure 8 Illustration du phénomène de l'occlusion. La zone marquée en rouge est la zone d'occlusion.

Le mémoire est organisé de la manière suivante. Dans le premier chapitre, une revue de littérature sera effectuée. Cette revue présentera l'état de l'art tout en couvrant plus en détail les concepts nécessaires à la réalisation du projet. L'objectif principal ainsi que les objectifs spécifiques sont énumérés lors du chapitre 2. Dans le chapitre trois, la méthodologie permettant d'atteindre les objectifs est élaborée. Le chapitre quatre présente les résultats et les discute. Finalement, le chapitre cinq présente la conclusion suivie d'une discussion sur les travaux futurs.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Le sauvetage autonome d'un satellite est une discipline récente dans le domaine spatial. C'est d'ailleurs une tâche qui, à ce jour, n'a été réalisée qu'avec succès partiel. Beaucoup d'espoirs demeurent fondés sur cette discipline. Tel que mentionné lors de l'introduction, le sauvetage d'un satellite implique sa capture. Afin d'effectuer la capture, la pose de l'objet doit continuellement être estimée.

L'approche utilisée en ce moment (Leinz and Chen, 2002), (Ruel et al., 2005) consiste à estimer continuellement la pose de l'objet afin de fournir cette information au système de contrôle. La pose peut être estimée à l'aide d'un processus itératif, tel que l'algorithme *Iterative Closest Point* (ICP) (Besl and McKay, 1992), (Zhang, 1992), qui consiste à corriger l'erreur globale de la pose à partir d'une estimation initiale de la pose. Dans le cas présent, l'objet doit être suivi à une certaine fréquence de manière à connaître sa pose à un instant donné. Afin d'accomplir cette tâche, la procédure ICP utilise la dernière information sur la pose disponible afin de trouver la nouvelle pose. Ce problème peut être considéré comme résolu, la procédure ICP peut fonctionner à une fréquence assez élevée pour pouvoir effectuer le suivi d'un objet se déplaçant à une vitesse raisonnable.

Par contre, la procédure ICP nécessite un estimé assez précis de la pose initiale afin de converger à la bonne solution. L'algorithme a besoin de cet estimé car c'est un algorithme d'optimisation qui converge vers un minimum local. Alors, si l'estimé de la pose initiale n'est pas assez précis, l'algorithme restera coincé à un minimum local qui n'est pas la solution désirée.

Cette information sur la pose initiale n'est de toute évidence pas disponible lors de la première lecture, au démarrage du système. Il faut donc avoir recours à différentes méthodes afin de fournir cette première pose.

Une autre application est la localisation dans le cadre d'une mission d'exploration planétaire. L'information sur la position globale, sur la planète s'avère une information très utile. Or, cette information n'est pas disponible. Lors de missions d'exploration planétaire, par exemple une mission d'exploration de Mars, la région dans laquelle le robot mobile atterrira est disponible. Par contre, l'endroit exact où se trouvera le robot dans cette région est inconnue. Nous disposons aussi d'une carte d'élévation, de basse résolution, de cette région. Cette carte provient d'une lecture effectuée par un satellite qui a survolé cette région.

Nous allons proposer une solution à ce problème de localisation globale en utilisant l'information de cette carte et d'une lecture prise au sol par le robot. En déterminant la transformation rigide, c'est-à-dire la translation et la rotation, entre la lecture prise au sol par le capteur laser situé sur le robot, et la carte d'élévation de cette région, la position globale du robot est alors déterminée.

Dans les deux cas, une solution impliquant un recalage 3D automatique est proposée.

Le processus de recalage se définit comme étant l'action d'aligner correctement deux primitives géométriques. Ces primitives peuvent être des points, des lignes ou des maillages. Le recalage minimise la distance entre les primitives géométriques. Dans le cas présent, nous désirons minimiser la distance point à point en trois (3) dimensions.

Le résultat d'un recalage est une transformation rigide devant être appliquée à la première primitive pour qu'elle soit correctement alignée avec la deuxième.

Une transformation rigide en trois dimensions contient six degrés de liberté : la translation selon les axes principaux $(x, y, z) : (t_x, t_y, t_z)$ ainsi que la rotation selon les axes principaux $(x, y, z) : (\theta_x, \theta_y, \theta_z)$.

Ce recalage doit se faire en deux étapes :

1. La première étape estime la transformation rigide entre les deux primitives.
2. La seconde minimise la distance entre ces deux primitives.

L'algorithme de raffinement, l'*Iterative Closest Point* (ICP) (Besl and McKay, 1992), s'attaque au deuxième problème. Il a besoin d'un estimé de la transformation rigide afin de produire un résultat. Tel que mentionné précédemment, l'ICP a besoin de cette estimation car c'est un algorithme d'optimisation qui converge vers un minimum. Ce minimum n'est pas nécessairement le minimum global recherché. Ainsi, si on démarre l'ICP dans des conditions trop éloignées de la solution, il convergera vers un des minimum locaux qui ne représentent pas la solution recherchée.

L'étape de l'estimation est très importante afin de permettre une convergence acceptable de l'ICP¹ lors de l'étape de la minimisation.

On peut obtenir l'estimation de plusieurs manières. Par exemple, un utilisateur peut sélectionner, dans la scène, trois points, ensuite, dans le modèle, l'utilisateur sélectionne les trois points correspondant à ceux identifiés dans la scène, sélectionnant ainsi six (6) points. Ces trois correspondances servent ensuite à calculer la transformation rigide, en trois dimensions, permettant de passer de la scène au modèle. Un minimum de trois points non-colinéaires doivent être sélectionnés afin de fournir une solution unique à la transformation rigide, en trois dimensions. L'estimation peut aussi s'obtenir à l'aide d'un système de capteur. Par exemple, si

¹Une convergence vers le minimum global, ce point sera couvert lors de la prochaine section.

le capteur est installé sur un robot mobile, la télémétrie provenant des différents capteurs tel que : l'odométrie des roues, les informations provenant des sonars, du gyroscope, de la boussole peuvent faire office de très bons estimateurs de cette première transformation. En l'absence d'information *a priori*, une estimation totalement automatisée peut être réalisée, c'est le problème qui sera étudié. Comme nous le verrons dans les prochaines sections, beaucoup de travaux ont été réalisés dans ce domaine.

De manière à pouvoir répondre aux critères imposés par les données décrites lors de l'introduction ainsi que par les types d'application pour lesquels le recalage doit être effectué, une méthode doit être choisie en fonction des critères suivants :

- Elle doit être insensible à la résolution et aux variations dans l'uniformité du maillage.
- Elle doit offrir une bonne tolérance au phénomène d'occlusion.
- Du fait que les ordinateurs utilisés dans les engins spatiaux sont souvent limités en terme de mémoire et de vitesse de processeur, la méthode doit présenter une vitesse d'exécution acceptable et surtout une représentation mémoire compacte.
- Elle doit avoir la capacité de traiter les topologies arbitraires, c'est-à-dire des topologies dont aucune hypothèse, quant à leurs natures, ne peut être considérée.

1.1 Étapes du recalage automatique

Le recalage automatique de deux maillages surfaciques peut se diviser en différentes étapes. Ces étapes sont présentées dans (Planitz et al., 2005). Au terme de ces étapes, une transformation rigide initiale servant à l'ICP est produite. En segmentant ainsi le recalage, une combinaison des différentes méthodes peut être utilisée lors de chacune des étapes. Ainsi, une méthode *A*, de définition de régions peut

être combinée avec une méthode B , de mise en correspondance locale, toutes deux provenant de deux approches.

Définition des régions. Cette étape consiste à sélectionner des régions localisées sur la surface. Généralement, l'une des deux méthodes est employée :

1. La sélection de points d'intérêt s'effectue sur les deux surfaces, cette sélection est suivie, facultativement, d'une définition d'un voisinage autour de ces points.
2. Une région entière peut être prise pour point d'intérêt.

En l'absence de méthode de sélection des régions d'intérêt, il est possible de définir les régions comme étant tous les points de chacune des surfaces.

Extraction des primitives géométriques. Cette procédure extrait des primitives géométriques topologiquement distinctes. Les méthodes d'extraction peuvent être regroupées en deux familles :

1. L'information contenue dans la primitive géométrique est l'information contenue, dans un certain voisinage, autour d'un point d'intérêt.
2. Une autre approche consiste à utiliser toute l'information topologique nécessaire dans la surface afin de représenter la primitive géométrique. L'information topologique étant l'information géométrique fournie par les points, les arêtes et les facettes de la surface.

Dans le cas où aucun traitement n'est effectué, la totalité de la région est passée à l'étape suivante, sans qu'aucune primitive géométrique n'ait été extraite.

Représentation des primitives géométriques. Lors de cette étape, les primitives géométriques extraites des régions sont encodées de manière à être comparables entre elles. Cet encodage représente l'information topologique de la région. Une des deux méthodes suivantes est généralement utilisée :

1. La représentation consiste en un encodage de la primitive géométrique dans la région où elle se trouve. L'information contenue dans le voisinage, autour du point d'intérêt est utilisée afin de mettre au point la représentation de la primitive géométrique.
2. Une représentation globale de la surface peut aussi être générée. Cette représentation représente la surface dans sa totalité en y englobant toutes les primitives géométriques.

Comme les étapes précédentes, la représentation des primitives géométriques est optionnelle. Si aucun traitement n'est effectué, l'information sur les primitives géométriques, extraites à l'étape précédente, est passée à l'étape suivante.

Mise en correspondance locale. Les représentations des primitives géométriques, illustrant une région, sont comparées. Une première étape de rejet est effectuée à ce moment, ce rejet vise à éliminer les primitives géométriques pour lesquelles il n'y a aucune possibilité de correspondance. Une comparaison des représentations des primitives géométriques des deux surfaces est effectuée afin de déterminer les meilleures correspondances. Une étape supplémentaire de suppression des éléments indésirables peut aussi être appliquée. Encore une fois, cette étape est optionnelle. Si aucun traitement n'est effectué à cette étape, on suppose plutôt que toute correspondance entre les représentations des primitives géométriques contenues dans les deux surfaces est possible.

Mise en correspondance globale. C'est à cette étape que l'estimation initiale de la transformation rigide entre les deux surfaces est déterminée. L'une des trois méthodes suivantes est généralement utilisée :

1. Des groupes de correspondances locales, cohérents géométriquement, sont identifiés dans les deux surfaces. La transformation rigide entre les deux surfaces est calculée à l'aide de ces groupes. Le groupe produisant

la meilleure transformation devient alors le groupe des correspondances entre les deux surfaces. Le critère pour déterminer la meilleure transformation peut être, par exemple, le nombre de points correctement recalés.

2. On peut aussi choisir une structure géométrique dans la première surface, tenter de retrouver cette structure dans la deuxième surface en utilisant des critères de cohérence géométrique.
3. Il est aussi possible de tenter de déterminer la transformation rigide, en utilisant une mise en correspondance d'une représentation globale des deux surfaces.

Il est possible de ne rien accomplir lors de cette étape, supposant que l'étape précédente a fourni suffisamment d'information, permettant ainsi de calculer la transformation rigide entre les deux surfaces.

Toutes ces étapes visent à diminuer tour à tour la taille des données traitées. Par exemple, une mise en correspondance locale pour tous les points représente une tâche très lourde tandis qu'effectuer cette mise en correspondance sur un sous-ensemble s'effectue en un temps raisonnable. Le même raisonnement s'applique pour la mise en correspondance globale.

Dans le cadre de ce mémoire, seulement la mise en correspondance locale, la mise en correspondance globale ainsi que le raffinement seront couverts.

1.2 Mise en correspondance locale

Les méthodes de mise en correspondance sont ainsi désignées car elles utilisent une méthode de représentation locale de la surface, par opposition à une méthode de représentation globale.

L'approche des méthodes de représentation locale consiste à identifier un ensemble de points communs aux deux vues.

La caractérisation des points s'effectue par un encodage de l'information contenue, dans un voisinage autour de ceux-ci. L'analyse est effectuée sur les maillages des deux vues. Par la suite, ces représentations sont comparées et une mesure de similarité en est extraite.

1.2.1 Définition de la mesure de distance

Toutes les méthodes locales utilisent l'information des points dans un certain voisinage pour construire leur représentation. Cette information est construite à l'aide des points dans un certain rayon du point examiné. La mesure de distance entre les points peut être de deux types : euclidienne ou géodésique.

La distance euclidienne se réfère au chemin le plus court entre deux points. Elle est calculée en utilisant un algorithme comme celui de *Dijkstra* (Shaffer, 1997). Le chemin le plus court suit les arêtes des facettes reliant les deux points. La distance est donc la somme des longueurs de ces arêtes.

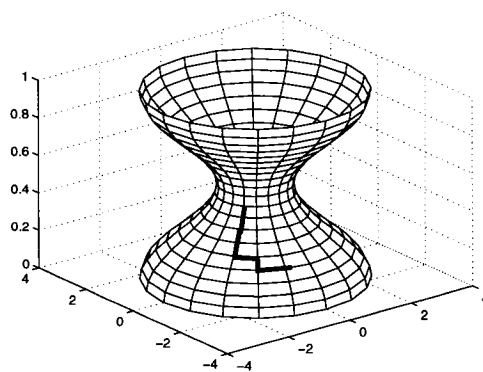


Figure 1.1 Distance euclidienne

Cette distance a pour désavantage d'être dépendante de la résolution du maillage et de la disposition des facettes dans le maillage.

La distance géodésique résout ce problème. Au lieu de se baser sur la distance en passant par les arêtes des facettes, c'est la distance minimale qui suit les facettes, mais sans nécessairement suivre leurs arêtes, entre les deux points. Ceci revient à la distance parcourue en marchant en ligne droite sur la surface, d'un point à un autre.

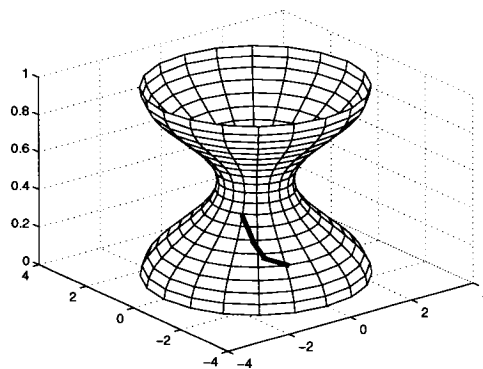


Figure 1.2 Distance géodésique

Dans la figure 1.2, la ligne noire représente la distance géodésique.

Cette mesure est donc moins sensible à la résolution du maillage et à la régularité du maillage.

Le calcul de la distance géodésique s'effectue de manière itérative, voici la méthode telle que décrite dans (Kimmel and Sethian, 1998), cette méthode est appelée *Fast Marching Method*.

L'étape de mise à jour, à la ligne 8 de l'algorithme 1.1, est l'endroit où s'effectue la partie principale du calcul de la distance géodésique. Différentes méthodes ont été proposées, (Kimmel and Sethian, 1998). La manière présentée dans (Sun and

Algorithme 1.1 Calcul de la distance géodésique

- 1: Le point du centre de l'empreinte, le point pour lequel on veut générer l'empreinte, est étiqueté *actif*.
 - 2: Tous ses voisins immédiats étant connectés par des arêtes sont étiquetés *proche*.
 - 3: Tous les autres points sont étiquetés *loin*.
 - 4: La distance géodésique du centre est notée ρ .
 - 5: **tant que** $\rho <$ que la valeur maximale du rayon géodésique **faire**
 - 6: Changer l'étiquette du point marqué *proche* ayant la valeur ρ que plus petite par *actif*.
 - 7: Changer l'identification de tous les voisins de ce point, à l'exception de ceux qui sont déjà marqués *actif*, à *proche*.
 - 8: Recalculer la valeur ρ de ses voisins en utilisant seulement les valeurs des points ayant l'étiquette *actif*. La valeur est mise à jour seulement si elle est inférieure.
 - 9: **fin tant que**
-

Abidi, 2001) est suffisante dans le cas de la représentation par empreinte. De plus, elle est beaucoup plus simple à implanter.

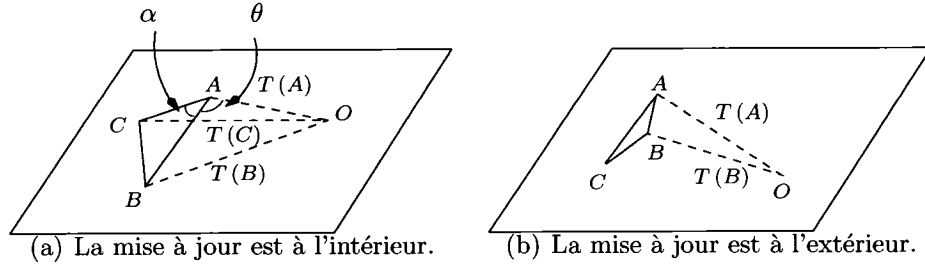


Figure 1.3 Les deux cas de mise à jour de la distance géodésique (Sun and Abidi, 2001)

Dans les figures 1.3(a) et 1.3(b), les $T(\cdot)$ représentent la distance géodésique. Il est à noter qu'initialement, la distance ρ entre les voisins immédiats du point central est la distance euclidienne entre le point voisin et le point central.

Afin de calculer la distance géodésique $T(C)$, un triangle virtuel OAB , ayant deux arêtes de longueurs $T(A)$ et $T(B)$, est créé, tel que présenté à la figure 1.3(a). Le

point O est le centre virtuel du triangle dans le plan du triangle ABC .

La figure 1.3(a) présente le cas où la mise à jour de $T(C)$ est à l'intérieur. Dans ce cas, la valeur de $T(C)$ est la norme du segment OC qui est :

$$T(C) = \sqrt{|AC|^2 + T^2(A) - 2|AC|T(A)\cos(\alpha + \theta)} \quad (1.1)$$

où

$$\alpha = \arccos\left(\frac{|AB|^2 + |AC|^2 - |BC|^2}{2|AC||AB|}\right) \quad (1.2)$$

et

$$\theta = \arccos\left(\frac{T^2(A) + |AB|^2 - T^2(B)}{2|AB|T(A)}\right) \quad (1.3)$$

Dans le cas où la mise à jour est à l'extérieur, tel qu'illustré à la figure 1.3(b), $T(C)$ est calculé comme suit :

$$T(C) = T(B) + |BC| \quad (1.4)$$

Une mise à jour située à l'extérieur survient aux frontières d'une surface.

Cette méthode a pour effet de « déplier » la surface pour l'amener dans le plan du triangle ABC .

1.2.2 Méthodes de mise en correspondances locales

La représentation en éclaboussure (« Splash ») (Stein and Medioni, 1992) est une représentation souvent citée comme étant la première représentation locale d'une primitive géométrique. Elle est ainsi nommée car elle s'apparente à une goutte tombant dans le lait (figure 1.4(a) et 1.4(b)). Cette approche consiste à créer une carte locale autour d'une primitive géométrique. Un cercle géodésique de rayon ρ est défini. Ensuite, les normales n_θ prises à un interval constant $\Delta\theta$ (figure 1.4(b)) sur le cercle géodésique sont calculées. Le choix de la valeur de ρ dépend vraiment de l'application. À la limite, ρ pourrait prendre une valeur assez grande pour permettre à la représentation de contenir toute l'information de la surface. La valeur de $\Delta\theta$ est typiquement située entre 1° et 15° . L'encodage des informations est la différence entre la normale n_θ et n , qui est la normale de la surface à la primitive géométrique, en fonction de θ . Cette représentation a été mise au point principalement pour représenter des régions continues, par exemple, sphériques. Par contre, dans le cas de topologies arbitraires, comme dans le cas d'environnements naturels, cette méthode aurait de la difficulté à encapsuler toute l'information d'une région. De par le fait que seulement un cercle géodésique soit utilisé, ceci a pour problème potentiel de ne pas encoder l'information topologique située entre le centre et le rayon ρ .

Plusieurs autres méthodes sont venues par la suite : par exemple, (Zhang and Herbert, 1999) et (Zhang, 1999) ont proposé la méthode d'image de forme harmonique (« Harmonic Shape Image »(HSI)) (figure 1.5). Cette représentation utilise les variations de courbure à l'intérieur d'un disque représentant un rayon géodésique sur la surface (section 1.2.1). Une des faiblesses de cette méthode est sa sensibilité au bruit. La courbure requiert une dérivée seconde et, par conséquent, est plus sensible au bruit (Stein and Medioni, 1992). De plus, comme l'indique l'auteur de cette

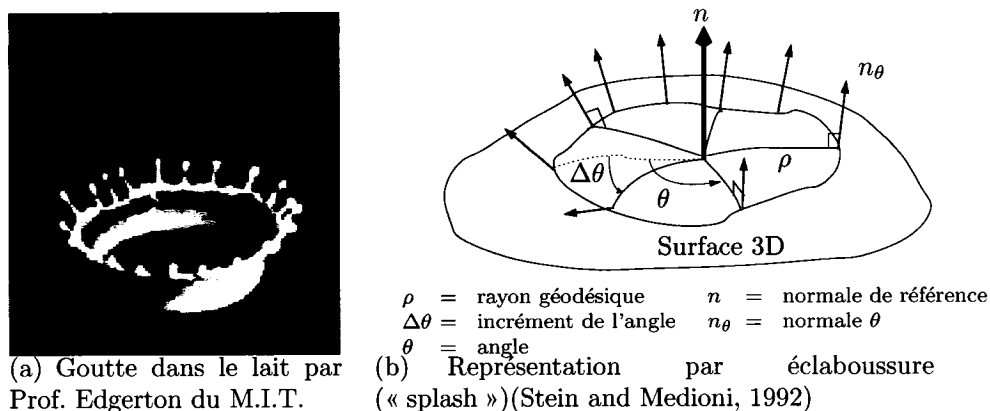


Figure 1.4 La représentation en éclaboussure (« splash »)

méthode dans (Zhang, 1999), cette méthode ne se comporte pas de manière satisfaisante en présence d'occlusions, du fait que cette méthode requiert une régularité dans le maillage.

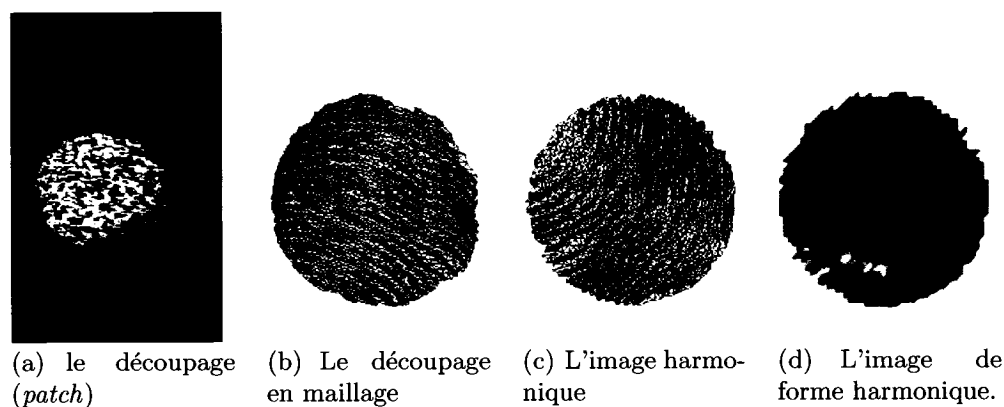


Figure 1.5 (Zhang, 1999) Exemple de découpage de morceaux de surface et son image de forme harmonique associée.

La méthode d'image de rotation (« Spin Image ») de (Johnson, 1997) et (Johnson and Hebert, 1997) est une représentation qui connaît une grande popularité. Elle consiste elle aussi à représenter une région autour d'un point p . La normale n de la surface au point p est calculée. Ensuite, pour tous les points x contenus dans une

certaine région autour du point central p , deux valeurs sont calculées. La valeur α étant la distance perpendiculaire de x par rapport à la ligne passant par n . La valeur β étant définie comme la distance signée, perpendiculaire au plan tangent à la surface au point p . L'équation 1.5 définit ces valeurs.

$$(\alpha, \beta) = \left(\sqrt{\|x - p\|^2 - (n \cdot (x - p))^2}, n \cdot (x - p) \right) \quad (1.5)$$

Ensuite l'image de rotation est définie à l'aide des valeurs des α et β obtenues. Ensuite, pour tous les points du modèle, une image de rotation est générée. La mise en correspondance s'effectue en choisissant au hasard des points dans la scène, en générant leur image de rotation et en comparant celle-ci avec toutes celles provenant du modèle. La taille typique d'une image de rotation est de 20×20 à 60×60 pixels. La comparaison entre les images de rotation s'effectue par une corrélation. Un grand nombre d'images de rotation est généré, par exemple, si le modèle contient 10000 points, autant d'images de rotation devront être générées. Ensuite, plusieurs images de rotation provenant de la scène devront être générées. Ceci permet de prévoir que :

- Le temps de comparaison entre les images de rotation sera très long. Ce temps sera très long du fait que les images ont une certaine taille et la corrélation de deux images est une opération coûteuse. De plus, il y a une quantité importante d'images de rotation à comparer.
 - La consommation mémoire requise pour autant d'images de rotation sera élevée.
- La méthode de représentation par empreinte (« fingerprint ») (Sun et al., 2003), (Sun and Abidi, 2001) est une méthode qui présente des caractéristiques intéressantes. Les détails sur cette représentation seront présentés dans la section suivante (section 1.2.2.1). En voici une brève description.

Au départ, un point central de l'empreinte est défini, ce point est situé sur une pri-

mitive géométrique présentant une caractéristique précise tel qu'un changement de courbure marqué. Le nombre de points d'intérêts identifiés dans chacune des surfaces à recaler est typiquement de 150. Ensuite, plusieurs cercles géodésiques sont générés, ce nombre est habituellement entre 5 et 10. Les points situés sur ces cercles géodésiques sont ensuite projetés sur le plan tangent à la surface au point central de l'empreinte. On détermine ensuite si ce point présente un intérêt en calculant, pour chacun des cercles, le ratio du rayon maximal sur le rayon minimal. La valeur maximale de ce ratio est conservée. Une valeur élevée signifie que la région représentée par l'empreinte contient des changements de courbure importants. Si tel est le cas, le point central est alors considéré comme étant un point d'intérêt. Finalement, si ce point est considéré comme un point d'intérêt, un ré-échantillonnage constant de chacun des cercles géodésiques projetés est effectué, le nombre de points par cercle est habituellement fixé à 30 et l'angle d'échantillonnage est constant pour chacun des rayons. Une fois le ré-échantillonnage effectué, on obtient une représentation ressemblant à une empreinte digitale. La comparaison des représentations par empreinte s'effectue en comparant les valeurs des rayons de chacun des cercles de l'empreinte à chacun des points. Ceci offre les avantages suivants :

- Comme seulement les rayons sont utilisés pour la corrélation, nous avons une représentation à une seule dimension, ce qui améliore grandement la vitesse de comparaison entre les empreintes.
- Comme les empreintes ne contiennent pas beaucoup d'information, ceci contribue aussi à leur rapidité de comparaison.
- La taille mémoire des empreintes est réduite, elle contient seulement les valeurs des rayons pour chacun des points.
- Comme la comparaison s'effectue seulement sur des points d'intérêt formant un ensemble de taille réduite, environ 150 points par maillage surfacique, le temps nécessaire à la mise en correspondance des deux surfaces s'en trouve grandement amélioré.

- La distance géodésique est utilisée, cette distance offre une certaine invariance aux différences de résolution et de configuration du maillage.
 - Sa résistance au bruit est elle aussi assez bonne. En effet, si on génère deux représentations par empreinte pour deux points d’une même surface : l’une contenant du bruit et l’autre n’en contenant pas, les deux représentations seront similaires.
 - Du fait que plusieurs cercles géodésiques sont générés, cette représentation englobe très bien l’information topologique contenue dans la totalité de la région.
- Plusieurs autres méthodes sont aussi présentées dans (Campbell and Flynn, 2001) et (Planitz et al., 2005).

1.2.2.1 Méthode de représentation par empreinte (« fingerprint »)

La méthode de représentation par empreinte effectue un encodage de l’information topologique contenue dans le voisinage d’un point : ceci en fait une méthode de représentation locale. Pour construire la représentation autour d’un point, on spécifie des rayons. La distance exprimée par ces rayons est la distance géodésique, présentée à la section 1.2.1. Pour chacun des rayons, les points correspondants au rayon sont générés autour du point central de l’empreinte. Les points représentant ce rayon, même s’ils se retrouvent sur la surface, ne se trouvent pas nécessairement sur le maillage. Pour les calculer, il faut d’abord calculer la distance géodésique des points se trouvant sur le maillage. Les points pour lesquels la distance est calculées sont ceux qui se trouvent à une distance géodésique inférieure ou égale au plus grand des rayons à calculer. Ensuite, la position des points se trouvant sur les rayons est calculée par une interpolation linéaire. Cette approximation est produite à partir des points du maillage pour lesquels la distance géodésique est calculée. Le nombre de points générés est égal au nombre de points situés dans un rayon géodésique ρ autour du point central. Le résultat de ce processus est présenté à la

figure 1.6.

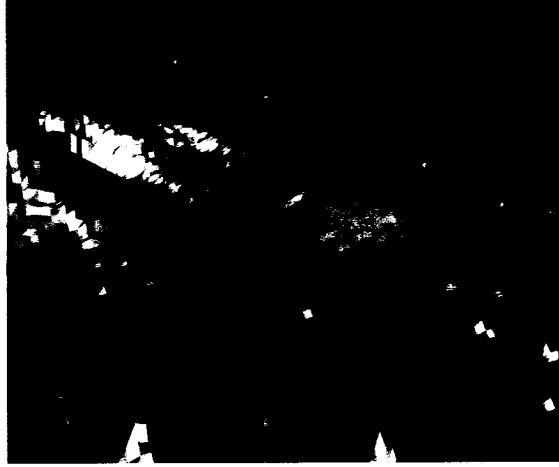


Figure 1.6 Rayons géodésiques autour d'un point

Une fois cette étape complétée, un plan géométrique est défini. Ce plan est tangent à la surface, au point central de l'empreinte (figure 1.9). Un plan géométrique est défini par une normale unitaire $\hat{n}$ et par deux vecteurs perpendiculaires : v_x et v_y contenus dans le plan.

Dans le cas d'un maillage triangulaire, la normale d'un sommet est définie comme étant la normale moyenne, en ne tenant pas compte du signe, des triangles voisins. La normale d'un triangle (figure 1.7) ABC est le produit scalaire des vecteurs $\vec{AB}$ et $\vec{AC}$ porté à une norme unitaire :

$$\frac{(\vec{AB} \times \vec{AC})}{\|\vec{AB} \times \vec{AC}\|} \quad (1.6)$$

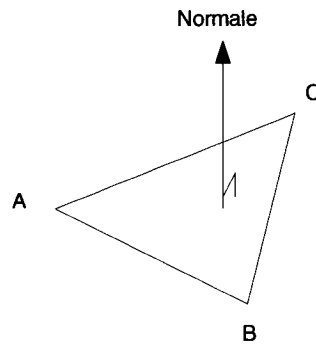


Figure 1.7 Normale à un triangle

La normale de la surface à un point p , notée $\hat{n}$, est la moyenne arithmétique des normales des triangles voisins au point p , tel qu'illustré à la figure 1.8.

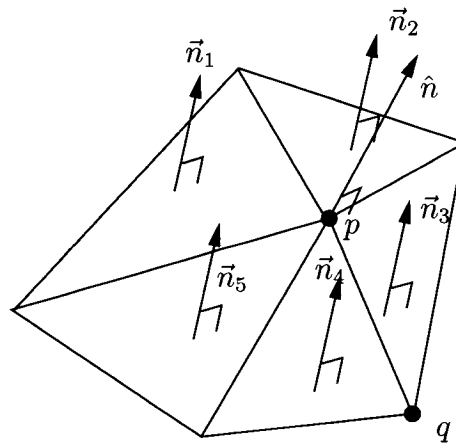


Figure 1.8 La normale de la surface à un point p , notée $\hat{n}$, est la moyenne arithmétique des normales $\vec{n}_i$ de ses triangles voisins.

Le premier vecteur défini est v_y . Pour l'obtenir, il faut définir un premier vecteur ayant pour origine le point central p et un sommet d'un triangle voisin de p : q . Le vecteur v_y est alors défini comme suit :

$$v_y = \hat{n} \times \frac{\vec{pq}}{\|\vec{pq}\|} \quad (1.7)$$

et le vecteur v_x

$$v_x = v_y \times \hat{n} \quad (1.8)$$

La représentation par empreinte est obtenue en projetant chacun des points des rayons géodésiques sur ce plan. La projection d'un point m est obtenue comme suit (figure 1.9) :

$$x = ((\hat{n} \times p\vec{m}) \times \hat{n}) \cdot v_x \quad (1.9)$$

$$y = ((\hat{n} \times p\vec{m}) \times \hat{n}) \cdot v_y \quad (1.10)$$

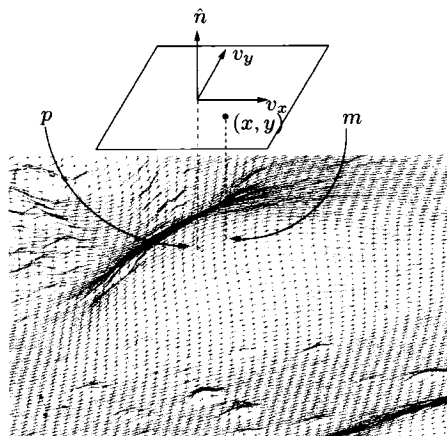


Figure 1.9 Définition du plan tangent et projection d'un point sur ce plan.

La figure 1.10 est le résultat de la projection des cercles géodésiques présentés à la

figure 1.6.

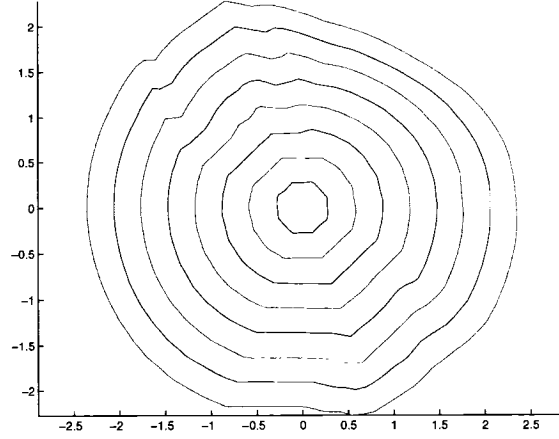


Figure 1.10 Une représentation par empreinte.

Une fois ces empreintes générées pour chacune des deux vues, les empreintes de la première vue sont comparées avec celles de la deuxième vue. La comparaison entre deux empreintes s'effectue à l'aide d'une corrélation. La corrélation requiert avant tout que la taille des deux ensembles à corréler soit identique, un ré-échantillonnage constant des empreintes est donc nécessaire avant de procéder à la corrélation.

Cette corrélation s'effectue de la manière décrite par l'équation 1.11.

$$R_{i,j} = \min_{l=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \left(n_{1,i,m,k} \cdot n'_{1,i} - n_{2,j,m,k+l} \cdot n'_{2,j} \right)^2 \quad (1.11)$$

La corrélation présentée à l'équation 1.11 compare l'empreinte i de la première vue avec l'empreinte j de la deuxième vue. La corrélation détermine le minimum de la variation des valeurs des normales sur les cercles géodésiques. Elle compare les K points de chacun des M cercles géodésiques avec un décalage de l , $1 \leq l \leq M$, sur les points des cercles de la deuxième vue.

Cette comparaison s'effectue en comparant les deux primitives suivantes :

Sur la première vue : la différence entre la normale associée au point k du cercle géodésique m de l’empreinte i et la normale du point central de cette même empreinte. $n_{1,i}$.

Sur la deuxième vue : la différence entre la normale associée au point $k + l$ du cercle géodésique m de l’empreinte j et la normale du point central de l’empreinte j , $n_{2,j}$. Ce décalage de l a pour effet d’effectuer la rotation de l’empreinte j .

La normale à un point est calculée selon la procédure décrite à la figure 1.8.

Ce même processus peut être appliqué en utilisant les rayons des empreintes (figure 1.10) ou tout autre mesure, par exemple : la courbure, une combinaison de courbure et de normale, *etc.*

1.3 Mise en correspondance globale

Les méthodes globales sont ainsi nommées car elles tentent d’effectuer un recalage en utilisant les primitives globales de la surface. Ces primitives sont la plupart du temps des points.

Différentes approches existent pour résoudre ce problème. La plupart du temps, elles sont stochastiques (Chen et al., 1999), évolutionnaires (algorithmes génétiques) (Chow et al., 2004) ou encore utilisent la totalité de l’information contenue dans la surface pour générer une représentation, qui peut par la suite être comparée. La raison pour laquelle le hasard est utilisé est parce qu’un grand nombre de combinaisons existe et peut donc être visité avant de trouver une transformation rigide satisfaisante.

Un algorithme génétique est présenté par (Chow et al., 2004). En utilisant les

concepts des algorithmes génétiques, c'est-à-dire le concept de génération, de sélection, de croisement, de mutation et de fonction d'adaptation (« fitness »), l'algorithme tend à évoluer vers une solution globale. Quelques auteurs se sont intéressés à l'approche génétique au problème de recalage. Ce problème revient en fait à un problème d'optimisation pour trouver la transformation minimisant la distance entre les deux nuages de points. L'approche génétique, quoi que très intéressante, a été écarté car, les algorithmes ne convergent pas nécessairement vers une solution acceptable.

La totalité de la surface peut aussi être encodée. Ces représentations peuvent ensuite être comparées. La représentation d'image sphérique (Delingette et al., 1993), (Higuchi et al., 1994) (« Spherical Attribute Image »(SAI)) est un exemple d'une telle représentation qui est souvent cité. Cette méthode consiste à représenter un maillage quasi-régulier M dans une sphère unitaire S . Le nombre de points présents dans S est le même que dans M . Il y a donc une correspondance un pour un entre les points de M et de S . De plus, S est une maillage quasi-régulier. Ensuite, pour chaque point p de M , son point correspondant dans S se voit assigné la valeur de courbure de la surface M au point p . Cet encodage, nommé image d'attribut sphérique, a la particularité de générer une représentation de la surface qui est invariante à la rotation, à la translation ainsi qu'à l'échelle. Par contre, une telle représentation pose problème en présence de données présentant les propriétés énumérées précédemment et ne répond pas aux exigences fixées.

- La représentation est sensible à la résolution du maillage. Pour que deux objets aient une image d'attribut sphérique comparable, il faut qu'ils aient une résolution semblable. Dans notre cas, la résolution de la scène et du modèle peuvent présenter une différence de résolution importante.
- La représentation requiert une quasi-régularité du maillage ainsi que des propriétés particulières tel qu'un nombre de voisin constant pour chacun des points

du maillage. Dans le cas présent, les données présentent plusieurs irrégularités et des occlusions.

De plus, tel que mentionné dans (Zhang, 1999), les représentations globales ont de la difficulté à représenter des topologies dites « arbitraires » ou en d'autres termes : « non structurées ». Il mentionne en particulier que la représentation d'image d'attribut sphérique est limitée à représenter des objets sphériques.

Comme les données traitées dans les deux types d'application identifiés lors de l'introduction présentent ces propriétés, les méthodes basées sur une représentation globale n'ont pas été considérées. De plus, la plupart des méthodes récentes, c'est-à-dire plus récentes que l'an 2000 n'utilisent pas de représentation globale de la surface.

Une autre approche consiste à estimer une transformation rigide entre deux nuages de points (Chen et al., 1999) en utilisant une approche *RANdom SAMpling CONsensus* (RANSAC) (Fischler and Bolles, 1981) qui utilise des éléments aléatoires pour déterminer la solution optimale. Cette transformation rigide doit avoir pour caractéristique, de regrouper, après une transformation rigide du premier nuage de points, le plus grand nombre de points du premier nuage correspondant à des points du deuxième nuage. La transformation rigide qui découle de cette procédure constitue un bon estimé pour l'ICP qui, ensuite, raffine la solution.

La méthode proposée par (Chen et al., 1999), est le *RANSAC based DARCES*². Elle est semblable à la méthode proposée par (Cheng and Don, 1991), l'alignement de graphes. Elle consiste à créer un graphe représentant la surface X . Chaque point de ce graphe représente un point dans X . Ensuite, chaque point dans Y , la surface sur laquelle le recalage de X est exercé, est considéré comme étant un point d'intérêt. Un graphe similaire provenant de X est ensuite recherché dans Y . Ce graphe donne

²*Data Aligned Rigidity Constrained Exhaustive Search*

finally the alignment between X and Y .

In the method proposed by (Chen et al., 1999), a geometric form coming from the first set of points (X) is searched in the second set of points (Y).

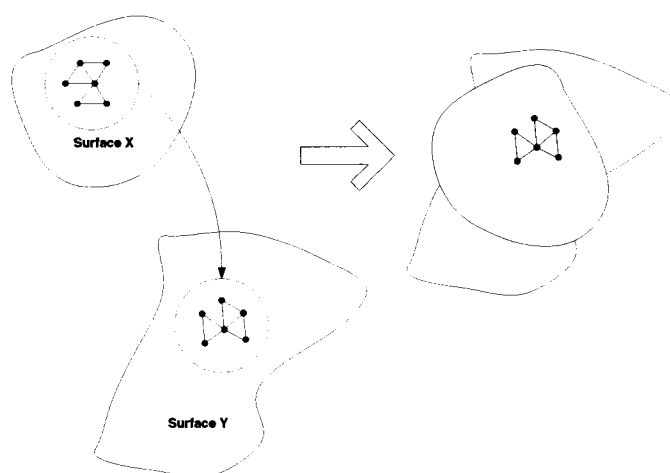


Figure 1.11 Recalage par la méthode du *RANSAC based DARCES*

The method of *DARCES* based on the *RANSAC* is divided into two parts. The part *DARCES* proposes a solution, which is not necessarily satisfactory. The method of *DARCES* is repeated from random data until the obtaining of a satisfactory solution, that's the part *RANSAC*.

The method of *DARCES* correctly aligns the points of a scene, noted S on a model noted M . At the start, a sub-set of S is selected. This sub-set can be generated by different methods. One of them is to uniformly resample the set S or simply use all the points contained in S . From this sub-set, a certain number of points are selected, this number must be superior to three, these points are called the control points. These points must be far enough from each other so that the result is more resistant to noise. Then, these points are searched in M .

Une fois les points identifiés, la transformation rigide est calculée, un test est ensuite effectué afin de déterminer la qualité de cette transformation.

Voici l'algorithme qui décrit de manière plus explicite cette méthode.

Algorithme 1.2 *DARCES*

Sélectionner un sous-ensemble de S . Ce sous-ensemble est nommé *points de référence*.

Sélectionner k ($k \geq 3$) points de contrôle dans les points de référence.

pour Toutes les transformations rigides gardant tous les points de contrôle sur la surface du modèle **faire**

 Transformer tous les points de référence en utilisant la transformation rigide courante.

 Compter le nombre de points correctement alignés. Ce nombre est noté n_o .

fin pour

Retourner la transformation rigide ayant le n_o le plus élevé.

Il est facile de constater que cette méthode devient très lourde lorsque le nombre de points augmente.

Un examen rapide de la complexité de l'algorithme permettra de quantifier cette complexité.

Examinons la boucle :

- Transformer tous les points s'effectue en $O(n_s)$ où n_s est le nombre de points contenus dans l'ensemble des points de référence. Ces points doivent être éloignés d'une distance suffisamment grande afin que le résultat soit plus résistant au bruit.
- Compter le nombre de points correctement alignés implique la recherche, pour tous les points transformés, du point le plus près dans M . Si cette recherche s'effectue à l'aide d'un arbre de type *k-d tree* (Bentley, 1975), chaque recherche s'effectue en $O(\log n_m)$, où n_m est le nombre de points contenus dans M . Comme cette étape est répétée pour tous les points transformés, un temps de $O(n_s \cdot \log n_m)$

est requis.

Cette boucle est reprise dans le pire des cas, n_s/k fois. Donc, la complexité est de $O(n_s^2 \log n_m)$. Ce qui est une complexité qui peut être qualifiée de grande.

Tel que mentionné antérieurement, le but de la mise en correspondance locale est de diminuer l'espace de recherche.

Donc, en utilisant les informations recueillies à l'aide d'une mise en correspondance locale, nous pouvons grandement améliorer la performance de l'algorithme.

Ci-après (algorithme 1.3), une version améliorée, utilisant l'information provenant de la mise en correspondance locale, proposée par (Planitz et al., 2005) est décrite.

Algorithme 1.3 Mise en correspondance globale

Les points de la scène sont S .
 Les points du modèle sont M .
 Les points sélectionnés de la scène sont X .
 Les points sélectionnés du modèle sont Y .
 Identifier les trois points de contrôle : x_p, x_s et x_a .
pour $y_p \leftarrow$ tous les points de Y correspondant à x_p selon la mise en correspondance locale **faire**
 pour $y_s \leftarrow$ tous les points de Y pouvant correspondre à x_s dans Y **faire**
 pour $y_a \leftarrow$ tous les points de Y pouvant correspondre à x_a dans Y **faire**
 Calculer la transformation rigide permettant de passer de $\{x_p, x_s, x_a\}$ à $\{y_p, y_s, y_a\} : T_c$.
 pour $S_r \leftarrow$ tous les points de S **faire**
 Calculer $M_r = T_c S_r$
 si la distance de M_r et le modèle est inférieure à un certain seuil **alors**
 Marquer ce point comme étant recalé.
 fin si
 $N_{T_c} \leftarrow$ le nombre de points recalés conformément à T_c .
 fin pour
 fin pour
 fin pour
fin pour

On choisit la mise en correspondance pour laquelle N_{T_c} est maximum.

Les avantages de (Chen et al., 1999), selon (Planitz et al., 2005), sont les suivants :

- Il n'est pas nécessaire de représenter la surface selon un maillage spécifique.
- Aucune topologie significative n'est requise.

Ces deux primitives sont présentes dans les données recueillies dans les scénarios énumérés lors de l'introduction.

Par contre, (Planitz et al., 2005) mentionnent que, cette méthode requiert une résolution assez fine pour effectuer un recalage précis. Nous pouvons étendre cette conclusion à toutes les méthodes qui utilisent comme seule information la position des points : une pré-condition importante doit être respectée ; celle d'avoir une résolution constante et élevée. L'ajout du critère de constance est important car,

comme seuls les points sont utilisés comme source d'information, la résolution et l'échantillonnage doivent demeurer les plus similaires (constants) possibles entre les deux vues. Par contre, une nuance doit être apportée. Une telle condition n'est requise que lorsqu'un recalage précis doit être effectué. Dans le cas présent, seulement une estimation de la transformation rigide doit être déterminée. Les contraintes sur la constance et la finesse de la résolution peuvent alors être légèrement relaxées.

1.4 Raffinement

L'étape de raffinement, l'étape finale du processus de recalage, sert à raffiner la solution trouvée à l'étape de la mise en correspondance globale.

Ce processus de minimisation fut introduit pour la première fois par (Besl and McKay, 1992), (Chen and Medioni, 1992) et (Zhang, 1992). Ce processus est réalisé par un algorithme nommé *Iterative Closest Point* (ICP). Cet algorithme est très largement utilisé. La nécessité d'une bonne estimation initiale vient du fait que cet algorithme converge en tout temps vers un minimum, mais il existe plusieurs minimum locaux. Donc, rien ne garantit une convergence vers le minimum global qui est le minimum recherché, celui qui minimisera le plus possible la distance point à point entre les deux primitives. Il est hors de question d'utiliser une méthode de type « force brute » car un nombre énorme de possibilités existe. Nous devons résoudre un problème comportant six degrés de liberté : la translation et la rotation selon les axes principaux x, y, z .

Voici l'algorithme tel que décrit dans (Besl and McKay, 1992). La description traite du problème de recalage d'une forme sur un modèle, où tous les points de la forme sont présents dans le modèle.

Algorithme 1.4 *Iterative Closest Point*(ICP)

- P est l'ensemble des points $\{\vec{p}_i\}$ de la forme, sa taille est N_p .
- Le modèle est noté X avec N_x points.
- La première transformation est initialisée par $P_0 = P, \vec{q}_0 = [1, 0, 0, 0, 0, 0]^t$ et $k = 0$. $\vec{q}$ dénote le vecteur de recalage, cet aspect sera couvert ultérieurement. Les étapes qui suivent sont répétées jusqu'à ce que le changement de la distance moyenne, point à point au carré, entre deux itérations, passe en dessous d'une certaine tolérance τ .
- k exprime l'itération, au départ, $k \leftarrow 0$.

répéter

Calculer l'ensemble Y_k , les distances minimales de chacun des points de P_k par rapport à X : $Y_k = C(P_k, X)$ (coût : $O(N_p N_x)$ dans le pire cas, $O(N_p \log N_x)$ en moyenne).

Calculer le recalage $(\vec{q}_k, d_k) = Q(P_0, Y_k)$ (coût : $O(N_p)$).

Appliquer le recalage : $P_{k+1} = \vec{q}_k(P_0)$ (coût : $O(N_p)$).

jusqu'à ce que le changement dans l'erreur des moindres carrées passe sous la barre d'une valeur τ ($\tau > 0$) : $d_k - d_{k+1} < \tau$. Où d désigne l'erreur.

La mesure de distance est définie comme suit :

$$d(\vec{p}, X) = \min_{\vec{x} \in X} \|\vec{x} - \vec{p}\| \quad (1.12)$$

Le recalage est défini à l'aide d'un vecteur de recalage qui contient deux parties : la rotation et la translation. La rotation est décrite en utilisant un algorithme basé sur le quaternion.

Un quaternion unitaire est défini comme $\vec{q}_R = [q_0, q_1, q_2, q_3]^t$ où $q_0 \geq 0$ et $q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$. Une matrice de rotation de taille 3×3 peut être définie à partir de ce quaternion :

$$R = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & q_0^2 + q_2^2 - q_1^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) & q_0^2 + q_3^2 - q_1^2 - q_2^2 \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

Un vecteur de translation $\vec{q}_T = [q_4, q_5, q_6]^t$ est aussi défini. Le vecteur de recalage est donc $\vec{q} = [\vec{q}_R | \vec{q}_T]^t$.

L'objectif est de minimiser, au sens de moindres carrés, l'équation suivante :

$$f(\vec{q}) = \frac{1}{N_P} \sum_{i=1}^{N_p} \|\vec{x}_i - R(\vec{q}_R) \vec{p}_i - \vec{q}_T\|^2 \quad (1.14)$$

Dans l'équation 1.14, le point $\vec{x}_i$ est le point du modèle correspondant au point $\vec{p}_i$ de la forme. Cette correspondance est la plupart du temps déterminée par la distance euclidienne. Ainsi, le point correspondant à $\vec{p}_i$ est le point le plus près de celui-ci dans l'ensemble X , en terme de distance euclidienne.

Afin de déterminer $\vec{q}_R$ et $\vec{q}_T$, quelques étapes sont nécessaires.

Les centres de masse des deux ensembles P et X : $\vec{\mu}_p$ et $\vec{\mu}_x$, doivent être calculés. Leurs centres de masse sont donnés par les équations suivantes :

$$\vec{\mu}_p = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \vec{p}_i \quad (1.15)$$

et

$$\vec{\mu}_x = \frac{1}{N_x} \sum_{i=1}^{N_x} \vec{x}_i \quad (1.16)$$

Une matrice de covariance croisée Σ_{px} entre P et X est définie comme suit

$$\Sigma_{px} = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} [(\vec{p}_i - \vec{\mu}_p)(\vec{x}_i - \vec{\mu}_x)^t] = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} [\vec{p}_i \vec{x}_i^t] - \vec{\mu}_p \vec{\mu}_x^t \quad (1.17)$$

Une matrice Δ est définie à partir des parties cycliques de la matrice anti-symétrique

$$A_{ij} = (\Sigma_{px} - \Sigma_{px}^T), \quad (1.18)$$

$$\Delta = [A_{23} \ A_{31} \ A_{12}]^t. \quad (1.19)$$

La matrice Δ est utilisée pour définir une matrice symétrique 4×4 $Q(\Sigma_{px})$:

$$Q(\Sigma_{px}) = \begin{bmatrix} tr(\Sigma_{px}) & \Delta^T \\ \Delta & \Sigma_{px} + \Sigma_{px}^T - tr(\Sigma_{px}) I_3 \end{bmatrix} \quad (1.20)$$

le quaternion de rotation q_R correspond au vecteur propre qui correspond à la valeur propre maximale de $Q(\Sigma_{px})$. Cette rotation est optimale.

Il reste maintenant à déterminer la translation optimale. Cette translation est définie par

$$\vec{q}_T = \vec{\mu}_x - R(\vec{q}_R)\vec{\mu}_p \quad (1.21)$$

où $R(\vec{q}_R)$ est la matrice de rotation définie à l'équation 1.13.

L'ICP est à la base conçu pour aligner deux nuages de points identiques. Lorsque seulement une zone de chevauchement existe entre les deux nuages de points, la méthode tend à trouver différentes fausses correspondances. Ceci est particulièrement vrai dans le cas présent. En effet, la scène représente une certain partie

du modèle, donc il y a seulement un chevauchement partiel entre la scène et le modèle.

Une solution intéressante au problème de chevauchement partiel des deux maillages est proposée par (Chetverikov et al., 2002). Ils proposent d'appliquer l'ICP sur une portion de chevauchement. Pour effectuer la minimisation, un seul paramètre doit être connu : le ratio de points communs aux deux primitives, noté ρ . Lors de l'étape de mesure de la distance moyenne, tel que décrit par l'équation 1.12, les distances moyennes sont triées en ordre croissant, de cet ensemble, seulement les $\rho \cdot N_p$ premières valeurs sont utilisées pour calculer la distance moyenne entre les deux primitives. Ces valeurs correspondent au chevauchement.

Une observation intéressante est faite par (Nishino and Ikeuchi, 2002) qui traite du projet de numérisation du Grand Bouddha. Lors de la prise de plusieurs vues consécutives effectuées à l'aide d'un capteur 3D, s'il existe une différence assez minime entre deux nuages, cette différence satisfait l'ICP quant à l'estimation de la pose initiale, donc l'algorithme converge. Par contre, ceci implique une grande redondance dans les données.

Plusieurs autres variations ont été proposées à l'ICP. Une couverture intéressante des variations est décrite dans (Rusinkiewicz and Levoy, 2001) et dans (Pulli, 1999).

L'algorithme ICP reste encore à ce jour, l'algorithme de référence lorsque vient le temps de raffiner la transformation entre deux objets. Il a fait ses preuves lors de projets très importants comme celui de la numérisation du David de Michelange (Levoy et al., 2000) où il fût utilisé sur des données de taille très imposante, dans l'ordre du milliard de points.

CHAPITRE 2

OBJECTIFS DE RECHERCHE

Dans ce chapitre, l'objectif global et les objectifs spécifiques de recherche seront présentés. Ces objectifs servent à déterminer les limites du système à développer. Ils serviront aussi à valider la méthodologie utilisée.

2.1 Objectif global

L'objectif global doit répondre à un besoin pratique : celui d'étudier l'estimation automatique du recalage provenant d'environnements qui sont dits « naturels ». Les deux applications étudiées sont : le sauvetage d'un satellite ainsi que la localisation d'un robot d'exploration lors d'une mission d'exploration planétaire. L'estimation du recalage sera ensuite passée à un algorithme de type ICP.

2.2 Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques nécessaires à la réalisation de l'objectif global sont les suivants :

1. Réaliser une triangulation de Delaunay du nuage de points 3D acquis du capteur laser.
2. Extraire les primitives géométriques présentant un intérêt.
3. Réaliser une mise en correspondance locale sur ces primitives.

4. Réaliser une mise en correspondance globale à partir de l'information générée par la mise en correspondance locale.
5. Procéder à un raffinement de la solution à l'aide d'un algorithme de type ICP.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

3.1 Définition des scénarios d'opération

Afin de réaliser les objectifs déterminés, deux scénarios d'opération ont été mis au point.

3.1.1 Capture d'un satellite

Le premier scénario vise à satisfaire le premier objectif spécifique soit un recalage d'une scène sur un modèle : une scène étant définie comme une lecture provenant du capteur 3D et un modèle comme une lecture d'un simulateur de ce capteur 3D.

Ce scénario consiste à capturer un satellite dans l'espace, tel qu'illustré à la figure 3.1. Cette capture est effectuée à l'aide d'un bras robotisé et d'un système de vision : un système de type LCS fabriqué par la compagnie Neptec.

Le rôle du système de vision dans un tel scénario est de fournir la pose de l'objet à capturer. Cette pose est utilisée par le bras robotisé.

L'estimation de la pose est réalisée par un algorithme de type ICP. La pose initiale utilisée par l'ICP est celle déterminée lors de la dernière lecture. Or, afin de démarrer le suivi, une pose initiale doit être fournie. Cette pose initiale est un problème de recalage. Le recalage se fait de la scène sur le modèle. Le modèle est un modèle 3D du satellite. Aucune connaissance de la pose relative entre la scène et le modèle n'est disponible.



Figure 3.1 Capture de satellite

3.1.1.1 Environnement expérimental

La capture du satellite a été effectuée avec l'aide du *CSA's Automation and Robotics Tesbed* (CART). Le système CART est un banc d'essai robotique constitué de deux bras de 7 degrés de liberté. Un premier bras est utilisé pour la capture tandis que le deuxième bras tient un satellite et déplace ce dernier de façon à simuler un mouvement d'oscillation dans l'espace (figure 3.2).



(a) *CSA's Automation and Robotics Tesbed* (CART)



(b) La maquette du satellite *quicksat*

Figure 3.2 Matériel expérimental utilisé : un banc d'essai robotique (3.2(a)) et une maquette d'un satellite (3.2(b))

L'acquisition des données 3D se fait à l'aide d'un capteur nommé *Laser Camera System* (LCS), développé par la compagnie Neptec (figure 3.3). Les données retournées par le capteur sont des points non ordonnés, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas pris sur une grille régulière. Ces points comportent quatre (4) composantes : la position du point en 3D : (x, y, z) , ainsi qu'une valeur d'intensité α . Ce capteur fonctionne par triangulation. L'avantage des capteurs fonctionnant par triangulation, par opposition à la mesure du temps de vol, est qu'ils sont particulièrement précis à courte distance, entre zéro et dix mètres.

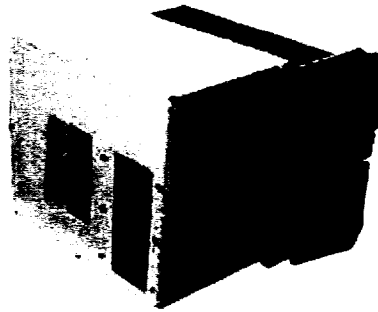


Figure 3.3 *Laser Camera System* (LCS) de Neptec

3.1.1.2 Étapes de la méthodologie

3.1.2 Environnement Martien

Le second scénario vise à satisfaire le deuxième objectif : soit le recalage 3D automatique en vue de localiser un robot. Au moment de l'atterrissage, la zone dans laquelle le robot s'est posé est connue. Par contre, une analyse du terrain avoisinant est nécessaire afin de savoir l'endroit exact où se trouve le robot dans cette zone.

Nous supposons que le robot dispose d'une carte globale, à basse résolution, de la zone dans laquelle il se trouve. Une ou plusieurs lectures du capteur actif (3D) du robot sont effectuées. La transformation rigide permettant de replacer cette lecture

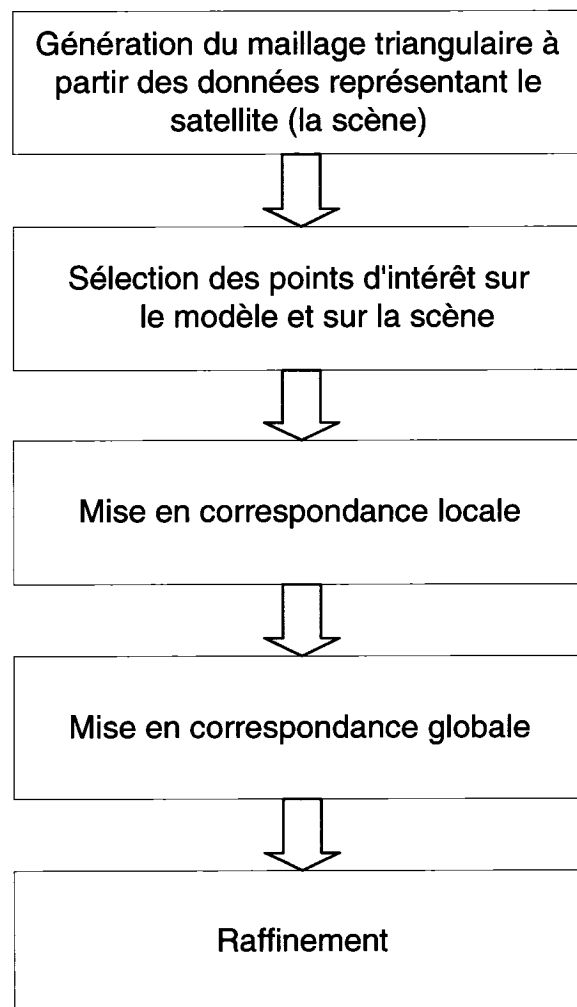


Figure 3.4 Étapes de méthodologie pour la capture d'un satellite.

dans la carte globale est estimée, dans le but de connaître la position du robot dans l'environnement.

De plus, au fur et à mesure que le robot se déplace, il effectue des mesures supplémentaires qu'il peut assembler, dans la carte globale, fournissant ainsi une reconstruction de l'environnement. Le robot effectue donc deux tâches simultanément : la localisation et la cartographie. Cette solution pourrait mener à répondre à un problème bien connu et qui porte le nom de *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM) (Leonard and Durrant-Whyte, 1991). Comme son nom l'indique, le SLAM permet une localisation et une cartographie simultanées de l'environnement. En étant capable de placer une lecture de la scène correctement dans le modèle à plus grande échelle de la scène, la position du robot est automatiquement connue. Le SLAM est un sujet qui connaît un niveau d'activité très important depuis quelques années, plusieurs travaux ont été réalisés dans ce sens, (Smith and Cheeseman, 1986), (Smith et al., 1990), (Lisien et al., 2005), (Dissanayake et al., 2001). Dans le SLAM, on effectue une cartographie pour se localiser. Quand une autre portion de la cartographie est ajoutée, on se sert des informations précédemment recueillies pour effectuer la localisation. C'est sur ce point que la méthode proposée ne peut être considérée comme étant du SLAM. En effet, nous proposons de faire une cartographie mais, lors de l'ajout de nouveaux morceaux à la cartographie, nous n'utilisons pas l'information précédemment recueillie pour effectuer la localisation.

3.1.2.1 Environnement expérimental

L'environnement expérimental utilisé est le terrain Martien disponible à l'ASC (figure 3.5). Ce terrain présente des reliefs typiques qui sont présents sur la planète Mars. Sa taille est de 30 par 60 mètres. Une cartographie de ce terrain a été réalisée, la figure 3.6(b) présente le résultat. Cette carte est utilisée en guise de

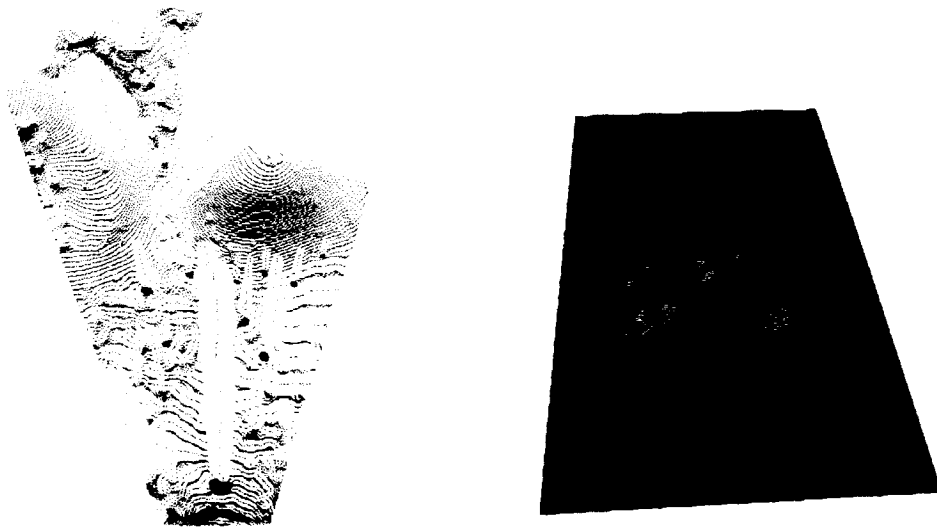
modèle global. Ce modèle a été ré-échantillonné sur une grille régulière à différentes résolutions.



Figure 3.5 Terrain de Mars situé à l'Agence spatiale canadienne dans l'arrondissement Saint-Hubert de la ville de Longueuil.

Dans le cas d'une mission martienne réelle, il est envisageable de disposer d'une telle représentation globale. En effet, un satellite en orbite autour de la planète pourrait préalablement avoir effectué cette cartographie pour ensuite la transmettre au robot au sol.

Le robot d'exploration utilisé est un robot de type *Pioneer P2AT* (figure 3.7). Un châssis disposé sur le dessus du robot permet d'y déposer le capteur laser : un LIDAR de la compagnie Optech (figure 3.8).



(a) Une lecture du capteur actif (b) La carte globale à une résolution de 1 mètre

Figure 3.6 Lecture 3.6(a) devant être positionnée dans le modèle 3.6(b)



Figure 3.7 Le robot d'exploration utilisé : un robot *Pioneer P2AT*

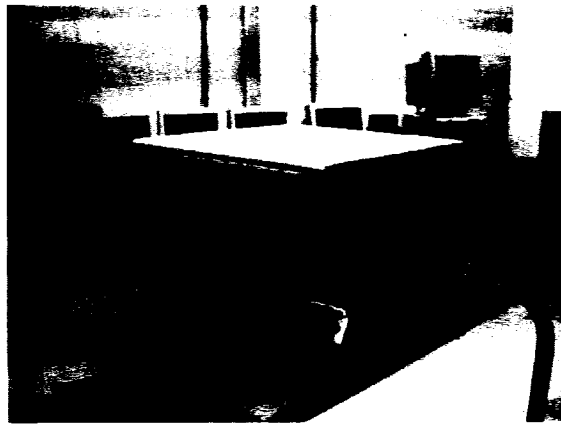


Figure 3.8 LIDAR ILRIS 3D de Optech

Un capteur laser actif : le LIDAR ILRIS 3D (figure 3.8) développé par la compagnie Optech est utilisé pour l'acquisition. Ce capteur calcule le « temps de vol » des rayons laser projetés. Ce temps de vol est le temps écoulé entre le moment où le capteur émet le rayon laser et le temps où celui-ci revient heurter le capteur. Ce type de technologie a la particularité d'avoir une précision constante sur toute la plage de distance (entre cinq (5) mètres et un (1) kilomètre).

3.1.2.2 Étapes de la méthodologie

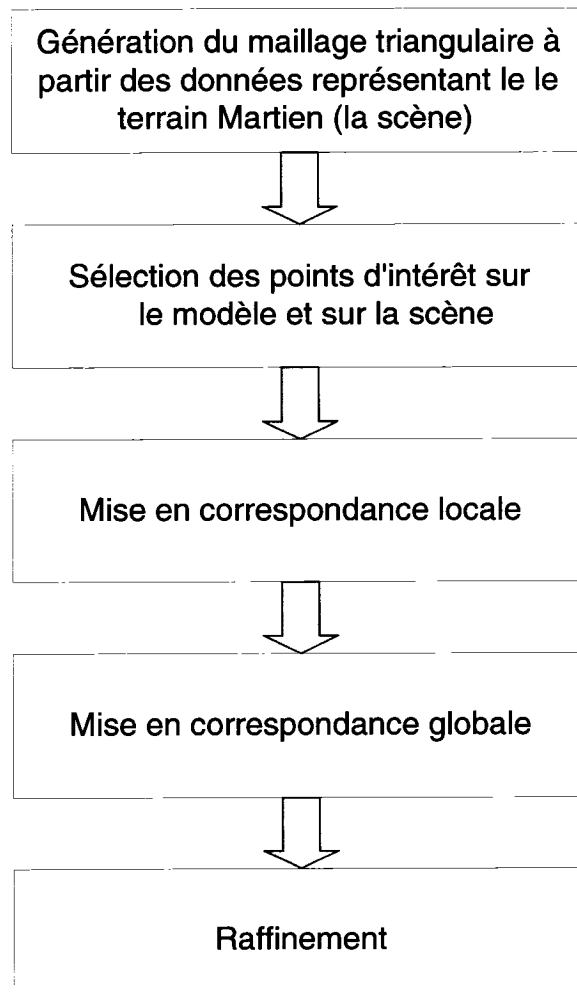


Figure 3.9 Étapes de méthodologie pour l'environnement martien.

3.2 Critère d'évaluation du recalage

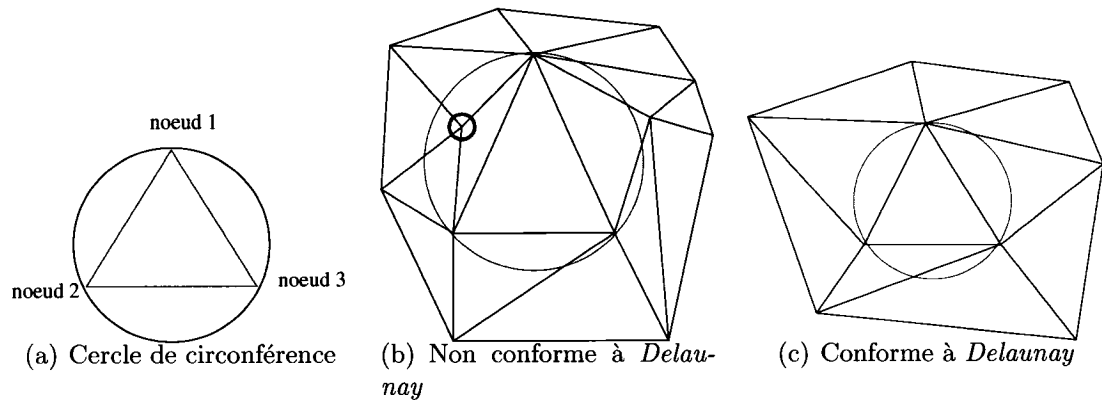
Le critère pour déterminer la qualité du recalage est visuel. En effet, l'information sur la transformation rigide réelle entre les lectures n'est pas disponible. Par contre, une évaluation visuelle permet de déterminer si le recalage est réussi. La précision requise dans ces types d'application n'est pas très grande, le critère visuel est ainsi une manière acceptable de valider la qualité du recalage.

3.3 Génération du maillage

Une interrogation qui revient parfois lors d'application de traitement de points 3D est la génération du maillage. La génération d'un maillage à partir de la seule information contenue dans les points 3D n'est pas un problème simple. Une quantité importante de travaux ont été réalisés sur ce sujet : (Hoppe, 1994), (Hoppe et al., 1992), (Gopi et al., 2000), (Amenta et al., 2002a), (Amenta et al., 2002b), (Carr et al., 2001) et (Carr et al., 2003) en sont quelques-uns. Une revue de littérature très complète est aussi présentée par (Campbell and Flynn, 2001).

La méthode retenue a été une simple triangulation de *Delaunay*. Une triangulation d'un ensemble de points S , notée $T(S)$, est dite *Delaunay* ($D(S)$) si : pour tous les triangles, le cercle unique passant par les trois points du triangle (voir figure 3.10(a)), ne contient aucun autre point que les trois points du triangle. La figure 3.10(c) présente un cas où la triangulation est conforme à *Delaunay* tandis que la figure 3.10(b) présente un cas contraire.

Dans un domaine à trois dimensions, la triangulation devient une tétraédrisation. Le problème est analogue à la triangulation à l'exception qu'il n'est plus question de cercle et de triangle mais plutôt de sphère et de tétraèdre.

Figure 3.10 Triangulation de *Delaunay*

La triangulation de *Delaunay* fonctionne dans le cas présent car les données, bien qu'elles contiennent trois dimensions sont en fait représentées en 2,5 dimensions. C'est-à-dire que pour chaque coordonnée z , il existe une paire de coordonnées (x, y) unique, x étant l'azimut et y , l'élévation dans le référentiel du capteur. C'est le cas des données provenant de capteurs 3D comme des balayeurs laser ou les caméras stéréos.

La méthode de génération de maillage utilisée consiste à effectuer une triangulation de *Delaunay* sur les coordonnées (x, y) seulement. Une fois la triangulation effectuée, la coordonnée z est de nouveau prise en compte. Cette méthode a pour avantage d'être très rapide $O(n \log n)$ et en plus, elle passe par tous les points du nuage. Finalement, cette méthode se comporte très bien avec des nuages de grande taille ($> 100\,000$ points).

Le filtre `vtkDelaunay2D` de la librairie VTK est spécialement conçu pour effectuer cette tâche.

3.4 Méthode de recalage 3D automatique

Le recalage 3D automatique est inspiré des étapes de recalage automatique présentée dans la section 1.1, à la page 12. La méthode s'effectue en trois étapes tel que décrit ci-dessous.

1. **La sélection des points d'intérêt** : la première étape consiste à sélectionner des points distinctifs sur les surfaces à recaler. Cette sélection constitue la *définition des régions*. Ces régions sont des zones où un changement de courbure marqué est observé. Cette étape effectue la tâche de l'*extraction des primitives géométriques*. Les primitives géométriques étant les points centraux de ces régions. Finalement, cette étape génère la *représentation des primitives géométriques*, à l'aide de la méthode de représentation par empreintes (Sun et al., 2003).
2. **La mise en correspondance locale** : une fois la sélection effectuée, une mise en correspondance locale, c'est-à-dire, point à point, est effectuée. La méthode de représentation par empreinte (Sun et al., 2003) assume cette étape.
3. **La mise en correspondance globale** : l'information des correspondances locales identifiées à l'étape précédente est utilisée pour effectuer une mise en correspondance globale. Une méthode basée sur la méthode du DARCES basée sur le RANSAC (Chen et al., 1999) est utilisée.

3.4.1 Évaluation des points d'intérêt

L'évaluation des points d'intérêt consiste à retenir certains points qui se distinguent selon un ensemble de critères. Le but de cette sélection est d'identifier des caractéristiques qui pourront ensuite être mises en correspondance. Les points retenus sont

des points où un changement de courbure marqué a été identifié dans une certaine zone. Ce critère de sélection a été retenu car ces points sont plus faciles à mettre en correspondance. La courbure n'est pas spécifiquement calculée, c'est plutôt le changement d'orientation des facettes dans une région du maillage qui est calculée.

L'évaluation des points d'intérêt telle que proposée dans (Sun et al., 2003) est basée sur l'aspect des représentations par empreinte. Afin de déterminer si un point peut être considéré comme étant un point d'intérêt, une représentation par empreinte est générée. Pour chacun des cercles de la représentation par empreinte, le ratio du rayon maximal sur le rayon minimal est évalué. Le ratio maximal de tous les rayons de la représentation par empreinte est gardé comme qualificatif de l'intérêt de ce point. Cette procédure est répétée pour tous les points des deux surfaces.

Le problème avec cette méthode est son coût de calcul. Si une surface contient 10 000 points, un nombre égal de représentation par empreinte doit être généré. En supposant un temps de génération d'une représentation par empreinte d'environ 200ms, le temps de calcul serait dans l'ordre de quelques minutes pour la surface complète.

Le goulot d'étranglement se situe manifestement dans la génération des représentations par empreinte. Si le nombre de points à générer est réduit, le temps en sera lui aussi grandement amélioré. Une solution pourrait être de s'assurer de ne pas générer plusieurs représentations par empreinte dans un même voisinage. En effet, il n'est pas nécessaire de générer plusieurs points dans un voisinage rapproché car plusieurs de ces points illustrent le même changement de courbure. Or, même en imposant une telle contrainte, le nombre de représentations par empreinte à générer peut être assez imposant.

Pour accélérer le calcul, la méthode du changement de courbure (Bae and Lichti,

2004) a été choisie pour la sélection des points d'intérêt. Cette méthode calcule le changement de courbure à un certain point sur une surface. Pour un point p_i se trouvant sur la surface, le centroïde, c_i , de ses k plus proches voisins incluant le point p_i est calculé :

$$c_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k p_j.$$

Généralement, k se situe entre 10 et 40.

Ensuite, une matrice de covariance $COV(p_i)$ est créée :

$$COV(p_i) = \frac{1}{k} (p_i - c_i)^T (p_i - c_i) \quad (3.1)$$

Ensuite, les valeurs propres de la matrice $COV(p_i)$ sont calculées : $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ tel que $\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \lambda_3$.

La mesure de changement de courbure au point p_i est définie comme suit :

$$M_{cc}(p_i) = \frac{\lambda_1}{\sum_{i=1}^3 \lambda_i}. \quad (3.2)$$

Cette méthode a l'avantage d'être très rapide. En utilisant une structure de recherche spatiale comme un arbre *k-d tree* (Bentley, 1975) pour trouver les k plus proches voisins, le calcul du changement de courbure est très rapide.

Avec cette méthode, le calcul des points d'intérêt est dans l'ordre de quelques secondes, généralement inférieur à 10 secondes pour un nuage de points comportant 10 000 points.

Une fois le changement de courbure calculé pour tous les points appartenant aux deux surfaces devant être recalées, une sélection des points est effectuée. Une valeur d'acceptation seuil ϵ est calculée. Toutes les valeurs de changement de courbure supérieures à ϵ sont considérées comme étant des points d'intérêt. Ensuite, de ce sous-ensemble, un nombre limité de points, choisis au hasard, est sélectionné. Ce nombre se situe entre 150 et 300 dépendant de la taille des données.

La sélection de la valeur du paramètre ϵ est primordiale pour assurer le succès de la méthode. Avec la méthode décrite à l'équation 3.1, il a été déterminé que les changements de courbure sont dépendants de la résolution du maillage. En ayant une valeur de k fixe, la taille du voisinage varie selon la résolution du maillage. Ceci pose un problème pour établir la valeur de ϵ .

Pour contrer ce problème nous avons établi une solution :

- Faire varier la taille du voisinage autour de p_i . La taille de k est en fait variable. En prenant tous les points contenus dans un certain rayon, la taille de ce rayon exprimant la taille approximative d'une primitive géométrique, le résultat s'améliore.
- Au lieu d'utiliser une matrice de covariance telle que présentée à l'équation 3.1, utiliser une matrice de covariance croisée. Les points p_j sont les points contenus dans un voisinage $Vois(p_i)$ défini par un rayon α autour du point p_i , sur lequel le changement est évalué.

$$CCOV(p_i) = \sum_{p_j \in Vois(p_i)} (p_j - p_i)^T (p_j - p_i). \quad (3.3)$$

L'algorithme 3.1 décrit la sélection des points d'intérêt.

Algorithme 3.1 Sélection des points d'intérêt

Le nombre maximal de points d'intérêt dans X et Y sont n_X et n_Y .

Initialiser l'ensemble des changements de courbure de la surface de la scène X :

$CC_X \leftarrow \{\}$.

Initialiser l'ensemble des changements de courbure de la surface du modèle Y :

$CC_Y \leftarrow \{\}$.

pour la surface S prenant la valeur de la surface de la scène X et du modèle Y
faire

pour tous les points p_i de la surface S **faire**

 Calculer $CCOV(p_i)$ tel que décrit à l'équation 3.3.

 Calculer $M_{cc}(p_i)$ tel que décrit à l'équation 3.2.

$CC_S \leftarrow CC_S \cup \{M_{cc}(p_i)\}$

fin pour

fin pour

// Déterminer la valeur seuil de changement de courbure : ϵ

Calculer le maximum des changements de courbure contenus dans CC_X : max_X .

Calculer le maximum des changements de courbure contenus dans CC_Y : max_Y .

Calculer la minimum des changements de courbure contenus dans CC_X : min_X .

Calculer la minimum des changements de courbure contenus dans CC_Y : min_Y .

$\epsilon \leftarrow (\min(max_X, max_Y) + \max(min_X, min_Y)) / 2$

// Extraire les points d'intérêt

L'ensemble des points d'intérêt de X est alors P_X qui est constitué de

$\min(n_X, \dim(CC_X))$ points choisis aléatoirement dans $\{x_i | x_i \in CC_X, x_i \geq \epsilon\}$

L'ensemble des points d'intérêt de Y est alors P_Y qui est constitué de

$\min(n_Y, \dim(CC_Y))$ points choisis aléatoirement dans $\{y_i | y_i \in CC_Y, y_i \geq \epsilon\}$

Le nombre maximal de points d'intérêt, n , est d'environ 150 points pour un maillage comportant 10 000 points.

3.4.1.1 Paramètres

Voici un condensé des paramètres utilisés lors de cette étape, leur description ainsi que leur valeur typique.

Tableau 3.1 Paramètres utilisés pour la sélection de points d'intérêt

Symbole	Description
α	Rayon du voisinage pour le calcul du changement de courbure. Ce voisinage est la taille approximative d'une primitive géométrique.
ϵ	La valeur minimale du changement de courbure à un point pour qu'il soit considéré comme un point d'intérêt.
n	Le nombre de points d'intérêt à sélectionner.

3.4.2 Mise en correspondance locale

La mise en correspondance locale s'effectue avec la méthode de représentation par empreinte telle que décrite à la section 1.2.2.1. Une représentation par empreinte est générée pour chacun des points d'intérêt sélectionnés. Les représentations par empreinte contenues dans la scène sont comparées à celles contenues dans le modèle.

La mesure de corrélation s'effectue de la même manière que celle décrite dans l'équation 1.11, à l'exception de la comparaison qui s'effectue sur les rayons au lieu des normales. Ce choix a été fait car l'information sur les rayons est plus rapide et moins complexe à obtenir que celle des normales. Un rayon est la distance entre le centre de la représentation par empreinte et le point $2D$ situé sur un des cercles. Le centre est $(0,0)$, car le point central de la représentation par empreinte est défini comme étant le centre du plan tangent. La mesure du rayon revient au calcul suivant pour un point $p = (x, y)$, $r = x^2 + y^2$.

$$R_{i,j} = \min_{l=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K (r_{1,i,m,k} - r_{2,j,m,k+l})^2 \quad (3.4)$$

La corrélation présentée à l'équation 3.4 compare une représentation par empreinte i de la première vue avec une représentation par empreinte j de la deuxième vue. La corrélation détermine le minimum de la différence de rayon autour des cercles géodésiques. Elle compare les K points de chacun des M cercles de la représentation par empreinte i , de la scène, avec un décalage de l , $1 \leq l \leq M$, sur les points des cercles de la représentation par empreinte j provenant du modèle.

Cette comparaison s'effectue en comparant les deux composantes suivantes :

Dans la scène : le rayon associé au point k du cercle m de la représentation par empreinte i : $r_{1,i,m,k}$.

Dans le modèle : le rayon associé au point $k+l$ du cercle m de la représentation par empreinte j : $r_{2,j,m,k+l}$. Ce décalage de l a pour effet d'effectuer la rotation de la représentation par empreinte j .

L'implantation du calcul de la distance géodésique est effectuée telle que décrite dans (Hétu, 2004) à l'exception de la mise à jour de la distance calculée à la ligne 8 de l'algorithme 1.1, qui est calculée telle que décrite à la section 1.2.1.

La génération des cercles géodésiques implique le calcul de certains paramètres : χ , la valeur du rayon géodésique maximal. Ce rayon est calculé de manière automatique selon l'étendue des valeurs en x, y, z de la scène, notée δ_1 et du modèle, notée δ_2 .

Pour la scène, les valeurs maximales et minimales en x, y, z sont calculées : $min_1 = \{x_{min_1}, y_{min_1}, z_{min_1}\}$, $max_1 = \{x_{max_1}, y_{max_1}, z_{max_1}\}$. De même que pour le modèle : $min_2 = \{x_{min_2}, y_{min_2}, z_{min_2}\}$, $max_2 = \{x_{max_2}, y_{max_2}, z_{max_2}\}$.

À partir des valeurs min_1, min_2 , l'étendue maximale de min_1 et de min_2 est déterminée de la façon suivante :

$$E = \{x_{max} - x_{min}, y_{max} - y_{min}, z_{max} - z_{min}\} \quad (3.5)$$

$$\delta \leftarrow \max(E) \quad (3.6)$$

Alors, δ_1 est l'étendue maximale de la scène et δ_2 est l'étendue maximale du modèle.

Ensuite, la valeur de χ est alors $\frac{\max(\delta_1, \delta_2)}{\beta}$.

La constante β est une constante établie expérimentalement, plus de détails sur sa valeur sont présentés à la section 3.4.2.2.

Un autre problème qui se pose est la fixation de la valeur de corrélation seuil, au-delà de laquelle deux représentations par empreinte seront considérées comme « non-semblables ». Au lieu de fixer cette valeur manuellement, sa valeur est fixée selon la valeur de χ , de M , le nombre de rayons géodésiques, et ϑ , une autre constante déterminée expérimentalement. Cette valeur de corrélation limite, notée ϕ , prend la valeur $M \cdot \chi \cdot \vartheta$. Cette valeur ϕ , peut être multipliée par une valeur ν afin de relâcher le critère de reconnaissance. Ceci est utile dans le cas où une grande différence de résolution existe entre la scène et le modèle.

3.4.2.1 Ré-échantillonnage des courbes

Afin de pouvoir comparer les représentations par empreinte entre elles, il est nécessaire de procéder à un ré-échantillonnage constant de chacune des courbes constituant la représentation par empreinte. Au moment de la projection des points situés sur les

cercles géodésiques, sur le plan tangent du point central (section 1.2.2.1), les points projetés ne sont pas également espacés et leur nombre diffère d'un rayon à l'autre et d'une représentation par empreinte à une autre. Ceci est dû à la configuration du maillage.

L'interpolation de la courbe se fait à l'aide d'une courbe *B-Spline*, (Gordon and Riesenfeld, 1974), (Riesenfeld, 1973), (Piegl and Tiller, 1997a). Ce choix a été fait car les courbes *B-Spline* permettent une grande flexibilité de représentation.

Une excellente explication des courbes *B-Spline* est disponible, dans (Piegl and Tiller, 1997b) et (Piegl and Tiller, 1997c).

Une courbe *B-Spline* est définie comme suit :

$$C(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) P_i \quad a \leq u \leq b \quad (3.7)$$

Cette courbe est paramétrique par u qui varie de 0 à 1. Donc, une fois la *B-Spline* correctement définie, nous n'aurons qu'à évaluer la *spline* à intervalles constants pour obtenir un échantillonnage constant.

Au départ, l'ensemble des points P , de taille n , par lesquels doit passer la courbe, est constitué de points non-ordonnés. L'ordonnancement s'effectue en définissant un vecteur partant du centre du plan tangent c , ayant la valeur $(0, 0)$, et allant au point $p_0 : \vec{v}_{c,0}$. Ensuite, des vecteurs sont définis pour chacun des points p_i , incluant le point p_0 . Chacun de ces vecteurs va du centre du plan tangent au point $p_i : \vec{v}_{c,i}$. L'ordonnancement est selon l'angle que forment les vecteurs $\vec{v}_{c,0}$ et $\vec{v}_{c,i}$ (figure 3.11).

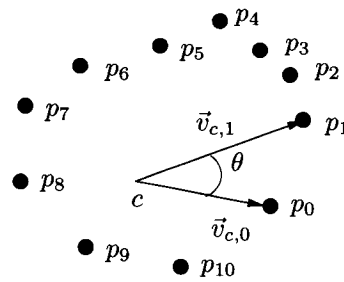


Figure 3.11 Mesure de l'angle d'un point pour l'ordonnancement des points d'une représentation par empreinte.

Une fois l'ordonnancement des points effectué, les paramètres u_i , le paramètre de la courbe présenté à l'équation 3.7, de chacun des points p_i doit être estimé (figure 3.12). La détermination des paramètres u_i indique la valeur du paramètre afin que la courbe soit au point p_i lorsque le paramètre est u_i dans l'équation 3.7.

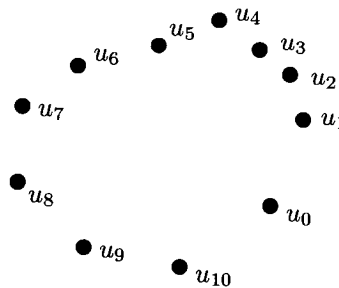


Figure 3.12 La valeur des paramètres u_i doit être estimée, pour chacun des points, afin de calculer la courbe.

Comme la courbe désirée doit avoir une continuité C_2 , c'est-à-dire une continuité au niveau de la courbure. Nous devons procéder à un « enroulement » de la courbe. Nous ajouterons trois points à l'ensemble P , une fois ordonné, pour rencontrer cette continuité. Ces trois points sont les points p_0, p_1, p_2 . Le nouvel ensemble des points P est donc :

$$P = P \cup \{p_0, p_1, p_2\}$$

Les valeurs des u_i doivent être maintenant évaluées pour chacun des points de P .

L'estimation des valeurs des u_i est effectuée par la méthode de la force centripète (Piegl and Tiller, 1997a). Dans un premier temps, la longueur totale du polygone formé par les points est calculée.

$$L = \sum_{i=1}^{n+2} \sqrt{|p_i - p_{i-1}|} \quad (3.8)$$

Ensuite, pour chacun des points p_i , sa valeur u_i associée est calculée de la manière suivante :

$$u_k = \begin{cases} 0 & \text{Si } k = 0 \\ \frac{\sum_{i=1}^k \sqrt{|p_i - p_{i-1}|}}{L} & \text{Si } 1 \leq k \leq n+1 \\ 1 & \text{Si } k = n+2 \end{cases} \quad (3.9)$$

Une fois ces valeurs calculées, la courbe *B-Spline* peut être évaluée. La librairie **vtk** offre une classe, **vtkSpline**, qui permet d'interpoler, pour une valeur de u , la valeur de la courbe.

Deux courbes *B-spline* de une dimension, car la classe **vtkSpline** modélise une courbe à une seule dimension, sont définies : une pour l'axe des x et l'autre pour l'axe des y . Pour chacune de ces courbes, la valeur qu'elle doit prendre pour la valeur de u_i est spécifiée. Une fois cette opération complétée, nous avons une courbe *B-spline*, de continuité C_2 , passant par tous les points projetés sur la plan tangent. Il reste maintenant à procéder à un ré-échantillonnage constant. Pour procéder à ce

ré-échantillonnage, il suffit de faire varier le paramètre u de manière constante dans l'intervalle $[0 \dots u_n]$ avec un pas de $\frac{u}{K}$, où K est le nombre de points contenus dans un cercle d'une représentation par empreinte. Nous évaluons la courbe jusqu'à u_n car le point p_n correspond au dernier point de la courbe, le point fermant celle-ci. Il est à noter que cette courbe ne sera pas tout à fait uniforme mais elle produit un ré-échantillonnage tout de même satisfaisant.

Ce ré-échantillonnage est appliqué pour chacune des projections des cercles géodésiques dans le plan tangent.

3.4.2.2 Paramètres

Voici un condensé des paramètres utilisés lors de cette étape.

Tableau 3.2 Paramètres utilisés pour la mise en correspondance locale

Symbole	Description
ϑ	Constante établie expérimentalement.
β	Constante établie expérimentalement.
χ	Valeur maximale du rayon géodésique.
ϕ	Valeur de corrélation seuil au-delà de laquelle deux représentations par empreinte ne sont plus considérées « semblables »
M	Le nombre de rayons géodésiques utilisés.
K	Le nombre de points par cercle dans le plan tangent de la représentation par empreinte.
ν	Un multiplicateur de la valeur de corrélation ϕ . Ce multiplicateur est utilisé quand il y a présence de bruit, de changement de résolution. Mettre une valeur de ν plus élevée signifie : « trouver tous les correspondants qui ressemblent vaguement au point examiné ».

3.4.3 Mise en correspondance globale

La mise en correspondance globale s'inspire de la méthode du *RANSAC based DARCES* (Chen et al., 1999). Son principe reste le même : choisir N points, formant une forme géométrique, de la scène et tenter de retrouver ces mêmes points dans le modèle.

Le principe de (Chen et al., 1999), tel qu'expliqué précédemment, est de définir une structure géométrique comportant 3 points ou plus, dans la scène. Cette structure est recherchée dans le modèle. La correspondance offrant la meilleure transformation rigide est choisie.

L'algorithme 1.3 présenté à la page 35 est répété jusqu'à ce que le nombre de points correctement recalés, N_{T_c} , atteigne un certain seuil p , tel que présenté dans l'algorithme 3.2. Le paramètre p est généralement le nombre de points inclus dans X multiplié par le chevauchement entre la scène et le modèle, ψ , une valeur entre 0 et 1.

Algorithme 3.2 Mise en correspondance globale

- 1: Les points de la scène sont S .
 - 2: Les points du modèle sont M .
 - 3: Les points d'intérêt de la scène sont X .
 - 4: Les points d'intérêt du modèle sont Y .
 - 5: **répéter**
 - 6: Identifier de manière aléatoire trois points x_p, x_s et x_a dans X .
 - 7: **pour** $y_p \leftarrow$ tous les points de Y correspondant à x_p selon la mise en correspondance locale **faire**
 - 8: **pour** $y_s \leftarrow$ tous les points de Y pouvant correspondre à x_s dans Y **faire**
 - 9: **pour** $y_a \leftarrow$ tous les points de Y pouvant correspondre à x_a dans Y **faire**
 - 10: Calculer la transformation rigide permettant de passer de $\{X_p, X_s, X_a\}$ à $\{Y_p, Y_s, Y_a\} : T_c$.
 - 11: **pour** $S_r \leftarrow$ tous les points de S **faire**
 - 12: Calculer $M_r = T_c S_r$
 - 13: **si** la distance de M_r et le modèle est inférieure à un certain seuil ω **alors**
 - 14: Marquer ce point comme étant recalé.
 - 15: **fin si**
 - 16: $N_{T_c} \leftarrow$ le nombre de points recalés conformément à T_c .
 - 17: **fin pour**
 - 18: **fin pour**
 - 19: **fin pour**
 - 20: **fin pour**
 - 21: **jusqu'à** $N_{T_c} \geq p$
-

3.4.3.1 Sélection des points

Tel que décrit dans l'algorithme, trois points appartenant aux points d'intérêt de la scène sont sélectionnés aléatoirement : $\{x_p, x_s, x_a\}$. La sélection est aussi limitée par un nombre maximal, m , d'essais. Ceci est pour contrer le cas où aucun ne satisfait au critère de consistance géométrique. Malgré que les points soient sélectionnés aléatoirement parmi les points d'intérêt, une distance minimale entre les points doit être respectée afin de réduire la sensibilité au bruit. Cette distance est notée η .

$$d(x_p, x_s) \geq \eta$$

$$d(x_p, x_a) \geq \eta$$

$$d(x_s, x_a) \geq \eta$$

Aucun test de colinéarité de ces points n'est effectué. Comme les points sont des points sur un changement de courbure marqué, cette possibilité est assez faible. De plus, advenant le cas où ces points seraient colinéaires, cette sélection de points produira une solution non satisfaisante et sera donc rejetée.

Ensuite, une sélection des points correspondant à $\{x_p, x_s, x_a\}$ dans le modèle : $\{y_p, y_s, y_a\}$, est effectuée. Lors de la description de la méthode employée, nous définirons l'ensemble d'un point x_i du modèle : $C(x_i)$. Cet ensemble inclut tous les correspondants potentiels de x_i identifiés lors de l'étape de mise en correspondance locale.

Les points candidats y_p pouvant correspondre à x_p , sont membres de $C(x_p)$. Une fois le point y_p choisi, les points y_s et y_a doivent être sélectionnés. Les points candidats y_s de x_s , sont tous les points de $C(x_s)$, dont la différence entre $d(y_s, y_p)$ et $d(x_s, x_p)$ est inférieure à un certain seuil Ω :

$$\{y_s | y_s \in C(x_s), |d(y_s, y_p) - d(x_s, x_p)| \leq \Omega\}$$

La sélection des candidats de x_a s'effectue de façon similaire :

$$\{y_a | y_a \in C(x_a), |d(y_a, y_p) - d(x_a, x_p)| \leq \Omega, |d(y_a, y_s) - d(x_a, x_s)| \leq \Omega\}$$

3.4.3.2 Détermination du nombre de points correctement recalés : N_{T_c}

Une fois les points $\{x_p, x_s, x_a\}$ et $\{y_p, y_s, y_a\}$ sélectionnés, la transformation rigide, T_c , permettant de passer des points de la scène aux points du modèle doit être définie. La transformation peut être déterminée par la méthode proposée par (Horn, 1987). Dans le cas présent, la classe `vtkLandmarkTransform`¹ effectue cette tâche.

Afin de vérifier le nombre de points correctement transformés, un sous ensemble de S , noté S' , de taille l est sélectionné aléatoirement. La transformation rigide T_c est alors appliquée sur S' , cet ensemble de points transformés est noté S'_{T_c} . Le nombre de points correctement recalés, N_{T_c} , est le nombre de points $s_i \in S'_{T_c}$ dont le plus proche voisin dans M , noté $V(s_i, M)$, est situé à une distance inférieure ou égale à un certain seuil ω .

$$N_{T_c} = \dim \left(\left\{ s_i | s_i \in S'_{T_c}, d(s_i, V(s_i, M)) \leq \omega \right\} \right)$$

¹Faisant partie de la librairie `vtk`

3.4.3.3 Paramètres

Tableau 3.3 Paramètres utilisés pour la mise en correspondance globale

Symbole	Description
ζ	Résolution du maillage.
η	Taille minimale de l'arête d'un triangle.
Ω	Le seuil de tolérance pour la sélection des points correspondant $\{x_p, x_s, x_a\}$ et $\{y_p, y_s, y_a\}$.
m	Nombre maximal de tentative pour rechercher aléatoirement les points x_s et x_a .
l	Nombre de points sélectionnés pour calculer N_{T_c} .
ω	Distance maximale d'un point $s_i \in S'_{T_c}$ et de son plus proche voisin dans M , $V(s_i, M)$, pour qu'il soit considéré comme étant « correctement recalé ».
ψ	L'estimation du chevauchement entre le modèle et la scène.
p	Le nombre de points correctement recalés, nécessaire afin de considérer le recalage comme étant réussi.

3.4.4 Raffinement

Le raffinement final s'effectue à l'aide de l'algorithme *Trimmed ICP* (Chetverikov et al., 2002), tel que décrit dans la section 1.4. Cet algorithme est une version de l'ICP, supportant un chevauchement partiel entre la scène et le modèle. Ce chevauchement est noté ρ . Cette valeur a simplement besoin d'être spécifiée de manière très approximative. Le choix de cet algorithme est motivé par le fait que dans certains cas, seulement une partie de la scène est présente dans le modèle. Le fait que l'algorithme de raffinement supporte un chevauchement partiel ouvre la voie à une nouvelle application : l'assemblage de vues. L'assemblage de vues consiste à recalculer différentes lectures d'une scène afin de reconstruire celle-ci. La problématique de l'assemblage de deux vues reste la même : trouver la transformation rigide entre la scène, qui dans ce cas est la première vue, et le modèle, qui est dans ce cas la deuxième vue.

3.4.4.1 Paramètres

Tableau 3.4 Paramètres utilisés lors du raffinement.

Symbole	Description
ρ	Le pourcentage de chevauchement entre la scène et le modèle, dans l'intervalle $[0 \dots 1]$.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats de la méthode mise au point seront présentés dans ce chapitre.

Dans un premier temps, les valeurs des paramètres énumérés dans la méthodologie (chapitre 3) seront présentées et discutées.

Ensuite, des résultats de recalage réussis et échoués seront présentés pour les deux applications : l'exploration planétaire et la capture d'un satellite.

Les données utilisées présentent les caractéristiques énumérées lors de l'introduction :

- Il y a possibilité d'occlusion.
- Il y a présence de bruit.
- Il existe une différence de résolution entre la scène et le modèle.
- La lecture provenant de la scène présente une résolution non constante.

D'autres cas présentant des lectures de visages humains sont présentés à l'annexe III.

4.1 Valeur des paramètres

Les valeurs des paramètres utilisés pour chacune des étapes du recalage seront présentées.

La valeur des paramètres a été fixée de manière empirique. Il est aussi à noter que

d'autres valeurs de ces paramètres pourraient aussi mener à un recalage réussi.

4.1.1 Évaluation des points d'intérêt

Tableau 4.1 Valeur des paramètres utilisés pour la sélection de points d'intérêts

Symbole	Description	Valeur typique
α	Rayon du voisinage pour le calcul du changement de courbure. Ce voisinage est la taille approximative d'une primitive géométrique.	Dans le cas de la capture d'un satellite : $18mm$. Dans le cas de l'exploration planétaire : $2.5m$
ϵ	La valeur minimale du changement de courbure à un point pour qu'il soit considéré comme un point d'intérêt.	$(\min(\max_X, \max_Y) + \max(\min_X, \min_Y))/2$ (voir algorithme 3.1).
n	Le nombre de points d'intérêt à sélectionner.	150.

4.1.2 Mise en correspondance locale

Tableau 4.2 Valeur des paramètres utilisés pour la mise en correspondance locale

Symbole	Description	Valeur typique
ϑ	Constante établie expérimentalement.	0.7
β	Constante établie expérimentalement.	7.5
χ	Valeur maximale du rayon géodésique.	$\frac{\max(\delta_1, \delta_2)}{\beta}$
ϕ	Valeur de corrélation seuil au-delà de laquelle deux représentations par empreinte ne sont plus considérées « semblables »	$M \cdot \chi \cdot \vartheta$
M	Le nombre de rayons géodésiques utilisés.	5
K	Le nombre de points par cercle du plan tangent de la représentation par empreinte.	30
ν	Un multiplicateur de la valeur de corrélation ϕ . Ce multiplicateur est utilisé quand il y a présence de bruit, de changement de résolution. Mettre une valeur de ν plus élevée signifie : « trouver tous les correspondants qui ressemblent vaguement au point examiné ».	[1.0 . . . 5.0]

4.1.3 Mise en correspondance globale

Tableau 4.3 Valeur des paramètres utilisés pour la mise en correspondance globale

Symbole	Description	Valeur typique
ζ	Résolution du maillage.	Valeur calculée tel que décrit à l'annexe I.
η	Taille minimale de l'arête d'un triangle.	L'étendue du maillage, tel que définie à l'équation 3.5. La valeur utilisée est $\frac{\min(\min(E_X), \min(E_Y))}{10}$.
Ω	Le seuil de tolérance pour la sélection des points correspondant $\{x_p, x_s, x_a\}$ et $\{y_p, y_s, y_a\}$.	$\approx \zeta$
m	Nombre maximal de tentative pour rechercher aléatoirement les points x_s et x_a .	100
l	Nombre de points sélectionnés pour calculer N_{T_c} .	$\max(100, 0.02 \cdot \dim(S))$
ω	Distance maximale d'un point $s_i \in S'_{T_c}$ et de son plus proche voisin dans M , $V(s_i, M)$, pour qu'il soit considéré comme étant « correctement recalé ».	$\approx \beta$
ψ	L'estimation du chevauchement entre le modèle et la scène.	Entre 0.8 et 1.0.
p	Le nombre de points correctement recalés, nécessaire afin de considérer le recalage comme étant réussi.	$\psi \cdot \dim(S')$

4.1.4 Raffinement

Tableau 4.4 Valeur des paramètres utilisés lors du raffinement.

Symbole	Description	Valeur typique
ρ	Le pourcentage de chevauchement entre la scène et le modèle, dans l'intervalle $[0 \dots 1]$.	Entre 0.8 et 1.0.

4.2 Sauvetage d'un satellite

Tel que mentionné lors de l'introduction, la capture autonome d'un satellite implique de pouvoir estimer la pose de ce dernier à tout moment. Lors du suivi, la pose est estimée à l'aide de l'ICP, l'estimation initiale nécessaire à la convergence de l'ICP est la dernière pose estimée. Un problème se pose lors du démarrage du suivi : aucune information sur la pose du satellite, nécessaire à la convergence de l'ICP, est disponible. Il faut alors estimer cette première pose.

Afin d'estimer le recalage initial, une base de données contenant des lectures de l'objet à capturer, sous différents angles, est utilisée.

Ces lectures sont prises à l'aide d'un simulateur de capteur laser qui prend en entrée un modèle CAD de l'objet. De telles lectures ne présentent aucune trace de bruit mais présentent encore des phénomènes d'occlusion.

Ensuite, une lecture est prise du capteur laser réel. Cette lecture est recalée sur chacune des vues, jusqu'à ce qu'un certain seuil de distance point-à-point soit atteint. Indiquant ainsi un recalage réussi. À l'aide de la pose associée avec l'objet dans la base de données, il est possible de retrouver la pose de la lecture.

Les données provenant du capteur laser présentent une forte quantité de bruit. Ce bruit est causé par le revêtement du satellite : la couverture thermique. Ce

revêtement est particulièrement réfléchissant, ce qui rend les lectures provenant du *Laser Camera System* (LCS) imprécises. Les panneaux solaires présentent aussi la même propriété réfléchissante. De plus, un phénomène d'occlusion est présent. Finalement, après analyse, le modèle 3D s'est avéré ne pas être tout à fait identique à la maquette (figure 3.2, page 44) utilisée pour effectuer les lectures avec le LCS. Ceci ajoute un degré de complexité au recalage.

Seulement deux cas sont présentés, ceci est dû au fait que le système était difficile à utiliser et difficile d'accès.

La première lecture a été réalisée à partir d'une position similaire à celle utilisée pour la prise de lecture avec le simulateur. Donc, la différence de pose entre la scène et le modèle n'est pas très grande. Dans le deuxième cas, qui, nous le verrons, n'a pas fonctionné, l'angle entre la scène et le modèle est d'environ 180° .

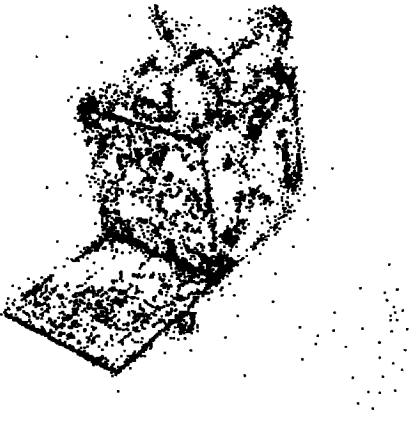
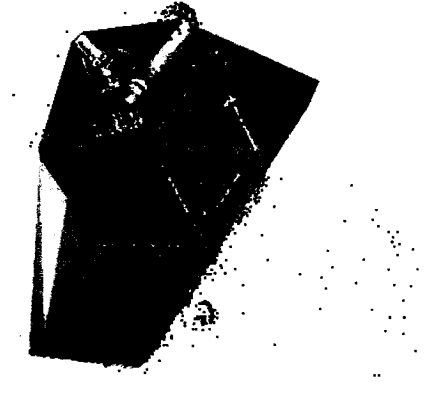
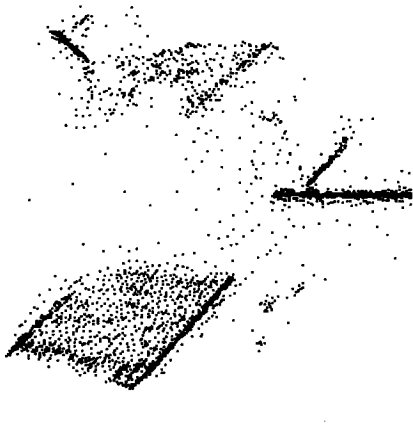
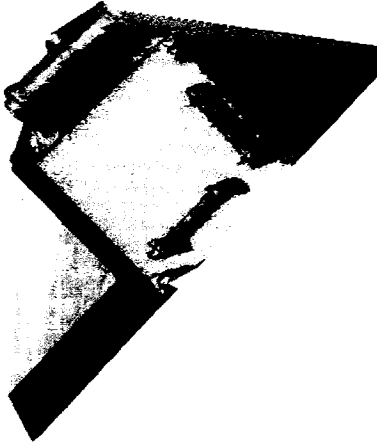
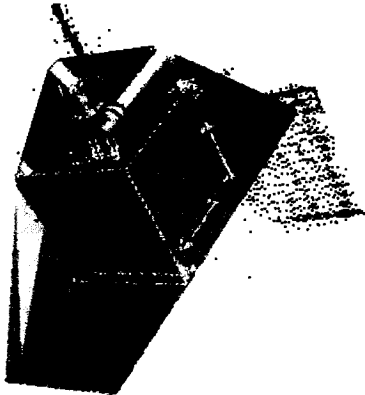
	
Scène 6 192 points, 12 358 triangles	Modèle 2 108 points, 4 170 triangles
	
Recalage	
Résolution de la scène (mm) :	
Résolution du modèle (mm) :	
Rotation ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) (en degré) :	
Translation (T_x, T_y, T_z) (mm) :	
Distance moyenne (mm) :	
Temps (s) :	

Figure 4.1 Recalage réussi d'un satellite sur un modèle.

	
Scène 2 560 points, 5 103 triangles	Modèle 22 107 points, 29 599 triangles
	
Recalage	

Résolution de la scène (mm) : 9.0045
Résolution du modèle (mm) : 5.4635
Rotation ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) (en degré) : (-13.864, -13.252, 78.266)
Translation (T_x, T_y, T_z) (mm) : (-502.63, -922.82, 240.89)
Distance moyenne (mm) : 5.7426
Temps (s) : 74.601

Figure 4.2 Recalage échoué d’un satellite sur un modèle.

4.2.1 Discussion

Les résultats obtenus dans le cas du sauvetage d'un satellite démontrent une tolérance de la méthode face une forte présence de bruit. Le bruit est une caractéristique importante de ces données, il est causé par la nature spéculaire du revêtement de la maquette du satellite. De plus, il y avait encore une fois une forte présence d'occlusion. Par contre, les résolutions de la scène et du modèle sont semblables.

Dans ce cas, si on se limite à une mise en correspondance locale, il est plus difficile d'obtenir un recalage avec succès. L'algorithme converge souvent vers un minimum local qu'on pourrait qualifier de « fausse correspondance ». Ces fausses correspondances sont dues au fait qu'il soit très probable qu'il y ait plusieurs régions du maillage qui aient une information topologique, au sens de la géométrie, semblable. De plus, comme la scène et le modèle se ressemblent vaguement, surtout dans le cas où la différence de résolution est marquée et où il y a une forte présence d'occlusion, il est beaucoup plus difficile d'établir avec certitude les correspondances.

4.2.2 Limites de la méthode

Dans le cas présenté à la figure 4.2, le recalage a échoué car il y a une grande différence d'orientation entre la scène et le modèle : environ 180° . De plus, une des caractéristiques géométriques les plus importantes : (la poignée située sur le dessus de la maquette) était absente des données.

4.3 Exploration planétaire

Dans le cas de l'exploration planétaire, la deuxième application qui a été identifiée, nous avons pris trois lectures d'un endroit du terrain riche en texture. Ces trois lectures ont été recalées sur le modèle à différentes résolutions : 20cm, 50cm et 100cm. Le cas où la résolution du modèle est de 100cm est particulièrement intéressant. C'est le cas qui se rapproche le plus des conditions que l'on pourrait rencontrer dans le cadre d'une mission martienne. À cette résolution, le terrain, qui a une dimension de 30m par 60m n'est représenté que par une grille de 30 points par 60 points, donc, une grande proportion de la texture initialement présente a disparu.

Les trois lectures présentent les deux phénomènes suivants : l'occlusion et la résolution non constante. Ces lectures sont recalées sur le modèle qui ne présente pas ces phénomènes, il a une résolution constante et aucune occlusion n'est présente.

4.3.1 Lecture 1 avec des modèles de résolution de 20, 50 et 100cm

Les figures 4.3, 4.4 et 4.5 présentent les résultats du recalage de la lecture 1 sur le modèle du terrain de Mars à une résolution de 20, 50 et 100cm. Le recalage a réussi dans tous ces cas.

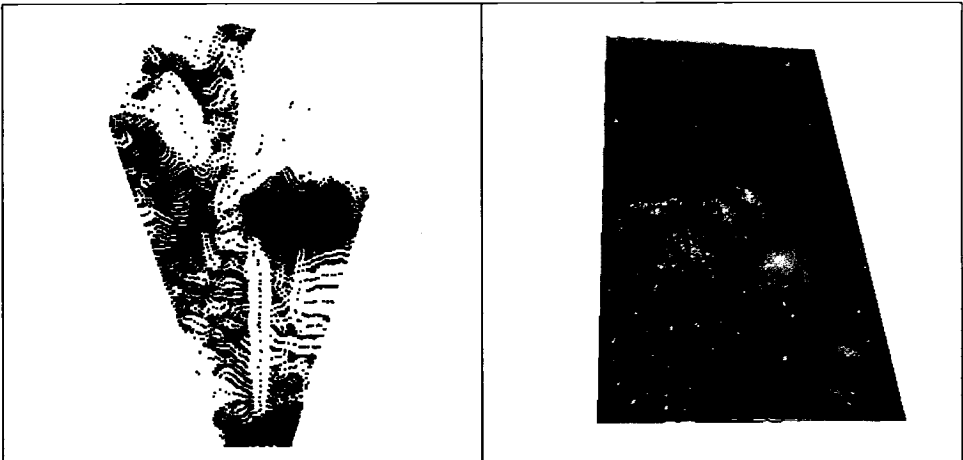
	
Scène 19 250 points, 38 384 triangles	Modèle 45 301 points, 89 700 triangles
	
Recalage	
Résolution de la scène (m) : 0.086836	
Résolution du modèle (m) : 0.20175	
Rotation ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) : (en degré) (-0.47373, -0.8162, -176.29)	
Translation (T_x, T_y, T_z) (m) : (59.387, 18.979, 0.3735)	
Distance moyenne (m) : 0.075801	
Temps (s) : 36.609	

Figure 4.3 Lecture 1 avec une résolution du modèle de 20cm

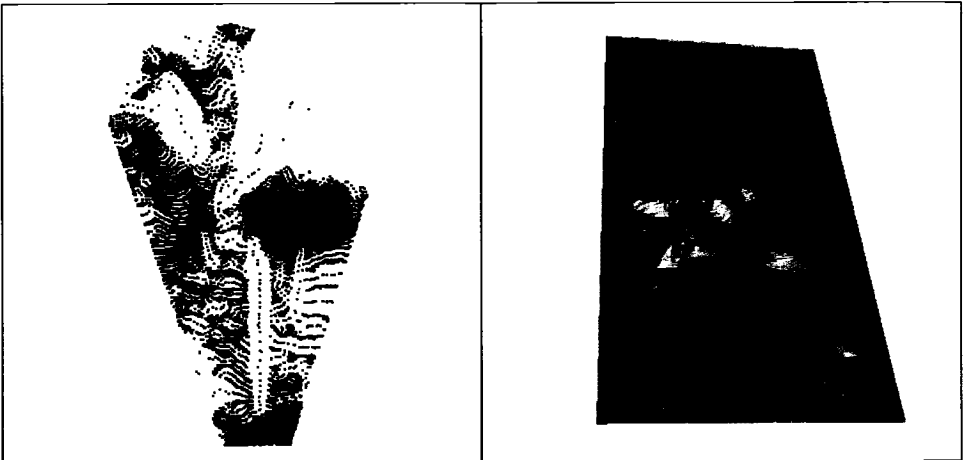
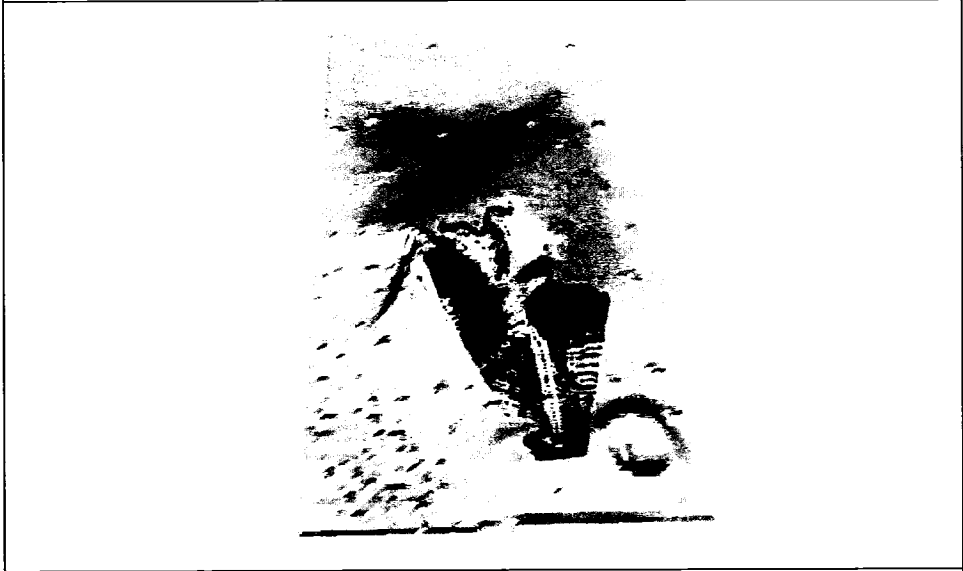
	
Scène 19 250 points, 38 384 triangles	Modèle 7 382 points, 14 400 triangles
	
Recalage	
Résolution de la scène :	0.086836
Résolution du modèle (m) :	0.50347
Rotation ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) : (en degré)	(-0.43141, -0.54375, -176.06)
Translation (T_x, T_y, T_z) (m) :	(59.629, 19.225, 0.39022)
Distance moyenne (m) :	0.072514
Temps (s) :	184.43

Figure 4.4 Lecture 1 avec une résolution du modèle de 50cm.

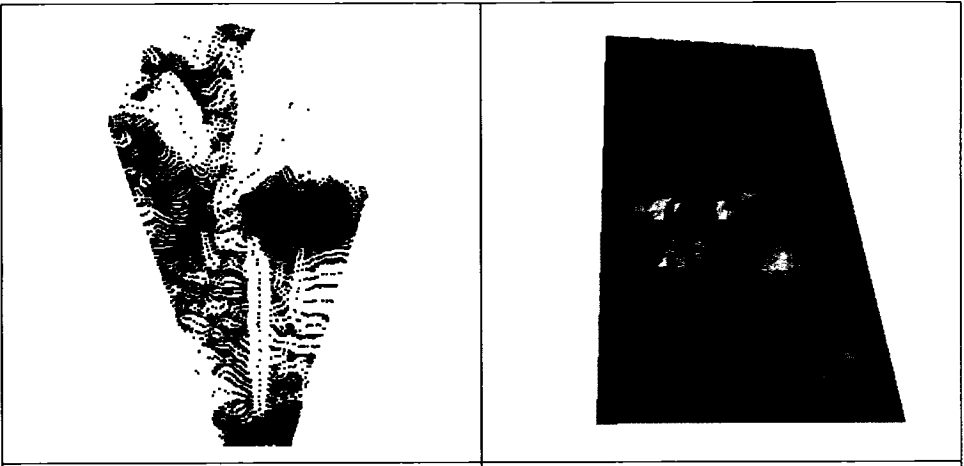
	
Scène 19 250 points, 38 384 triangles	Modèle 1 892 points, 3 600 triangles
	
Recalage	
Résolution de la scène (m) : 0.086836	
Résolution du modèle (m) : 1.0054	
Rotation ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) : (en degré) (-0.55911, -0.38666, -176.61)	
Translation (T_x, T_y, T_z) (m) : (59.416, 19.318, 0.4578)	
Distance moyenne (m) : 0.079721	
Temps (s) : 71.516	

Figure 4.5 Lecture 1 avec une résolution du modèle de 100cm.

4.3.2 Lecture 2 avec des modèles de résolution de 20, 50 et 100cm

Les figures 4.6, 4.7 et 4.8 présentent les résultats du recalage de la lecture 2 sur le modèle du terrain de Mars à une résolution de 20, 50 et 100cm. Le recalage a aussi réussi dans tous ces cas.

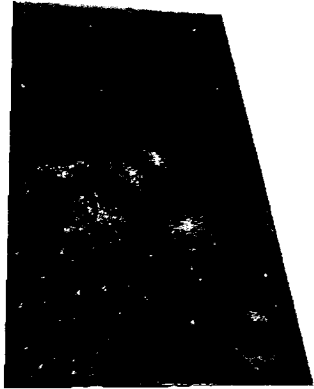
	
Scène 4 595 points, 9 133 triangles	Modèle 45 301 points, 89 700 triangles
	
Recalage	
Résolution de la scène (m) :	
Résolution du modèle (m) :	
Rotation ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) (en degré) :	
Translation (T_x, T_y, T_z) (m) :	
Distance moyenne (m) :	
Temps (s) :	
	0.18282
	0.20175
	(-0.65706, -0.8386, -154.58)
	(59.344, 19.413, 0.3717)
	0.1009
	18.909

Figure 4.6 Lecture 2 avec une résolution du modèle de 20cm

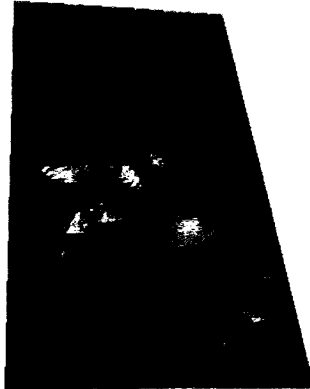
	
Scène 4 595 points, 9 133 triangles	Modèle 7 382 points, 14 400 triangles
	
Recalage	
Résolution de la scène (m) :	0.18282
Résolution du modèle (m) :	0.50347
Rotation ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) : (en degré)	(0.26206, -0.47102, -159.14)
Translation (T_x, T_y, T_z) (m) :	(60.287, 18.014, 0.39846)
Distance moyenne (m) :	0.10139
Temps (s) :	93.634

Figure 4.7 Lecture 2 avec une résolution du modèle de 50cm

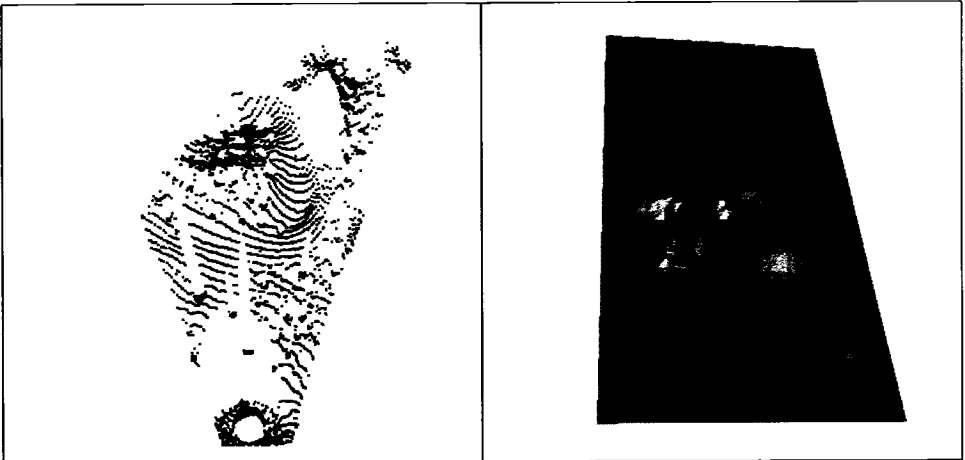
	
Scène 4 595 points, 9 133 triangles	Modèle 1 892 points, 3 600 triangles
	
Recalage	
Résolution de la scène (m) : 0.18282	
Résolution du modèle (m) : 1.0054	
Rotation ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) : (en degré) (0.00010592, -0.6873, -157.69)	
Translation (T_x, T_y, T_z) (m) : (59.838, 18.552, 0.39439)	
Distance moyenne (m) : 0.11717	
Temps (s) : 50.599	

Figure 4.8 Lecture 2 avec une résolution du modèle de 100cm

4.3.3 Lecture 3 avec des modèles de résolution de 20, 50 et 100cm

Les figures 4.9, 4.10 et 4.11 présentent les résultats du recalage de la lecture 3 sur le modèle du terrain de Mars à une résolution de 20, 50 et 100cm. Le recalage a aussi réussi dans tous ces cas. Par contre, le recalage avec le modèle à résolution de 100cm a une erreur en rotation selon l'axe des z d'environ 5 degrés. Ceci reste tout de même acceptable compte tenu de la basse résolution du modèle. Cette erreur dans le recalage est causée par la disparition de certaines caractéristiques, notamment les roches, au milieu du modèle.

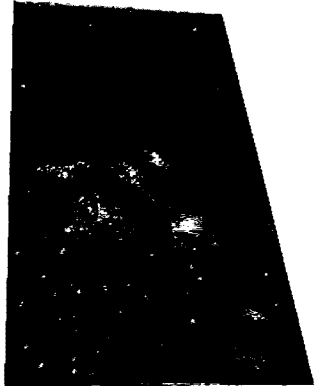
	
Scène 5 113 points, 10 165 triangles	Modèle 45 301 points, 89 700 triangles
	
Recalage	
Résolution de la scène (m) :	0.17149
Résolution du modèle (m) :	0.20175
Rotation ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) : (en degré)	(0.072742, 0.045996, -179.18)
Translation (T_x, T_y, T_z) (m) :	(59.608, 14.644, 0.33722)
Distance moyenne (m) :	0.082687
Temps (s) :	23.684

Figure 4.9 Lecture 3 avec une résolution du modèle de 20cm

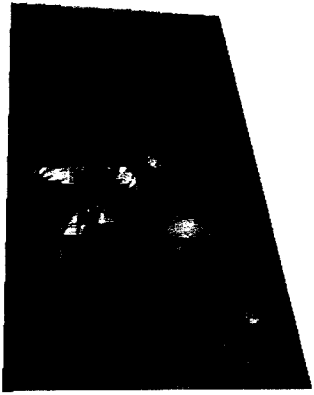
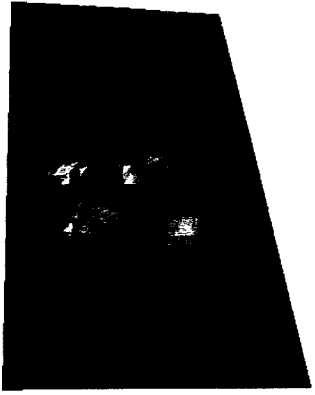
	
Scène 5 113 points, 10 165 triangles	Modèle 7 382 points, 14 400 triangles
	
Recalage	
Résolution de la scène (m) :	0.17149
Résolution du modèle (m) :	0.50347
Rotation ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) : (en degré)	(-0.66213, 0.14843, -177.17)
Translation (T_x, T_y, T_z) (m) :	(59.57, 15.42, 0.36709)
Distance moyenne (m) :	0.087354
Temps (s) :	44.286

Figure 4.10 Lecture 3 avec une résolution du modèle de 50cm

	
Scène 5 113 points, 10 165 triangles	Modèle 1 892 points, 3 600 triangles
	
Recalage	

Résolution de la scène (m) : 0.17149
Résolution du modèle (m) : 1.0054
Rotation $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$: (en degré) (0.64258, 0.1334, 178.81)
Translation (T_x, T_y, T_z) (m) : (59.819, 13.949, 0.32839)
Distance moyenne (m) : 0.093704
Temps (s) : 26.02

Figure 4.11 Lecture 3 avec une résolution du modèle de 100cm

4.3.4 Discussion

Les résultats obtenus dans le cas de la localisation démontrent une tolérance à différents phénomènes observés fréquemment dans les environnements naturels. Plus particulièrement, l'environnement Martien présente une présence marquée de ces phénomènes :

- Une présence d'occlusions causées par des objets dans le champs de vision du capteur.
- Une résolution non constante dûe à l'angle d'incidence du capteur avec l'environnement (figure 7(b) à la page 7).
- Une différence importante entre la résolution de la scène et du modèle. Le recalage a bien fonctionné avec un résolution de 20cm pour la scène et une résolution de 100cm pour le modèle.

Dans ce cas aussi, si on se limite à une mise en correspondance locale, il est plus difficile d'obtenir un recalage avec succès, pour les mêmes raisons que celles mentionnées dans la section 4.2.1

Le tableau 4.5 présente la variation de la qualité du recalage ainsi que la performance, en fonction de la résolution du modèle. La variation est basée sur les résultats obtenus pour une résolution du modèle de 20cm.

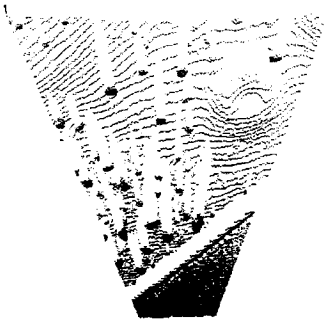
Ces résultats démontrent que la qualité du recalage, ainsi que le temps nécessaire à effectuer le recalage, ne varient pas de manière significative en fonction de la résolution du modèle.

Tableau 4.5 Variation de la qualité et de la performance du recalage en fonction de la résolution, par rapport à la résolution étalon de 20cm.

Lecture	Résolution du modèle(cm)	Δt_x (m)	Δt_y (m)	Δt_z (m)	$\Delta \theta_x$ (degrés)	$\Delta \theta_y$ (degrés)	$\Delta \theta_z$ (degrés)	$t_1 - t_0$ (s)
1	50	0.242	0.246	0.01672	0.04232	0.27245	0.23	147.821
2	50	0.679	1.195	0.0301	0.68221	0.38136	3.64	72.085
3	50	0.038	0.776	0.02987	0.734872	0.102434	2.01	20.602
1	100	0.029	0.339	0.0843	0.08538	0.42954	0.32	39.907
2	100	0.0	0.339	0.0843	0.420256	0.16508	2.19	29.05
3	100	0.029	0.339	0.0843	0.569838	0.087404	355.1	-10.589

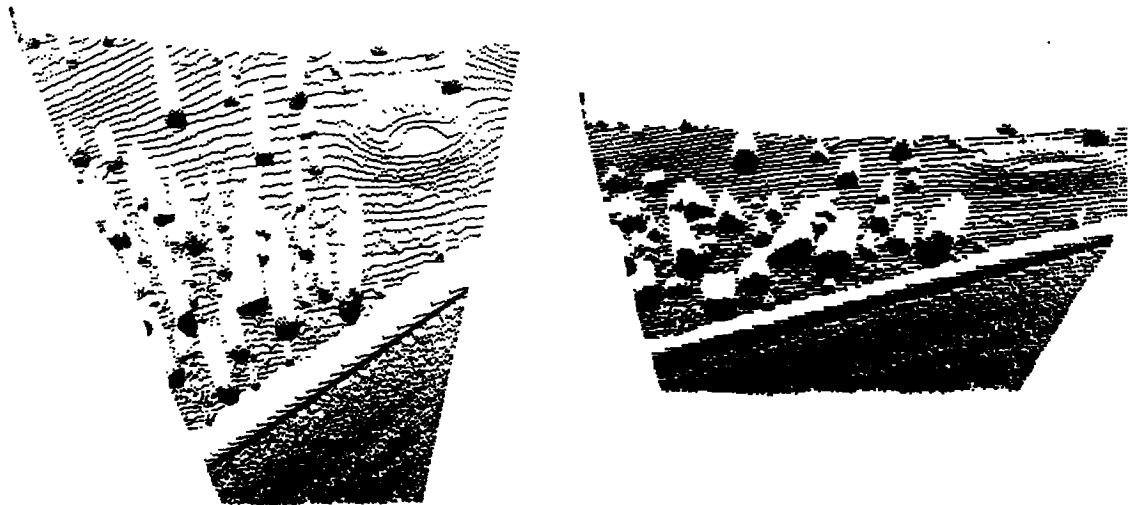
4.3.5 Limites de la méthode

Un exemple de cas n'ayant pas fonctionné est présenté dans le figure 4.12. Dans ce cas, le recalage a partiellement réussi car la lecture a été correctement localisée dans le modèle, par contre, une erreur sur la rotation s'est produite. Cette erreur est causée par la très forte présence d'occlusions, tel que présenté la figure 4.13, l'occlusion est causée par la présence de roches dans le champs de vision du capteur laser, la figure 4.13(b) démontre plus clairement la présence des roches qui bloquent la vue du capteur. Ces occlusions appauvrissent le nuage de points en y insérant des « trous » d'information (figure 4.13(a)).

	
Scène 16 804 points, 33 491 triangles	Modèle 45 301 points, 89 700 triangles
	
Recalage	

Résolution de la scène (m) : 0.06503
Résolution du modèle (m) : 0.20175
Rotation $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ (en degré) : $(-74.124, -176.65, 102.75)$
Translation (T_x, T_y, T_z) (m) : $(35.843, 3.2577, 2.0331)$
Distance moyenne (m) : 0.22114
Temps (s) : 1175.7

Figure 4.12 Recalage échoué dans le modèle du terrain de Mars.



(a) Première prise de vue.

(b) Deuxième prise de vue.

Figure 4.13 Occlusion dans une scène vue sous deux angles différents.

De plus, le cas présenté dans la figure 4.13 présente un motif de rochers quasi-régulier qui est difficile à localiser précisément sur le terrain. Plusieurs roches ont une taille similaire et une apparence similaire dans cette zone du modèle (figure 4.14). En fait, même à l'oeil nu, il est difficile de déterminer l'endroit où s'insère la scène dans le modèle.

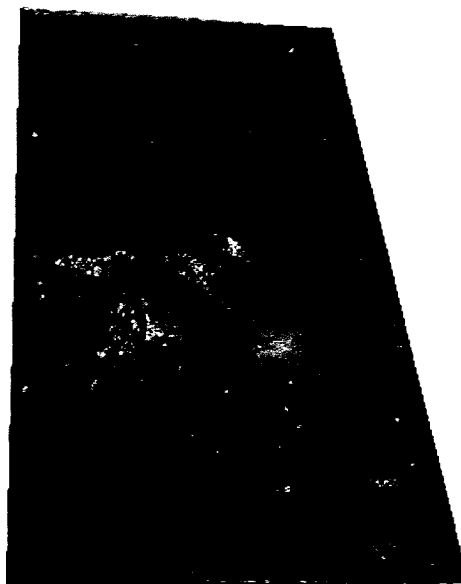


Figure 4.14 Zone où s'insère la figure 4.13.

Finalement, le recalage échoue lorsqu'il y a une carence de texture (figure 4.15). Dans ce cas, il existe plusieurs endroits dans le modèle où la lecture peut s'insérer, il est donc impossible de déterminer une solution de recalage unique. De plus, en présence de ce phénomène, il est aussi possible qu'aucun point ne sera identifié comme étant un point d'intérêt car il n'y a pas de points se situant sur une différence marquée de courbure. Comme il n'y a pas de points d'intérêt, la méthode ne peut poursuivre avec les étapes de mise en correspondance locale, globale et de raffinement.

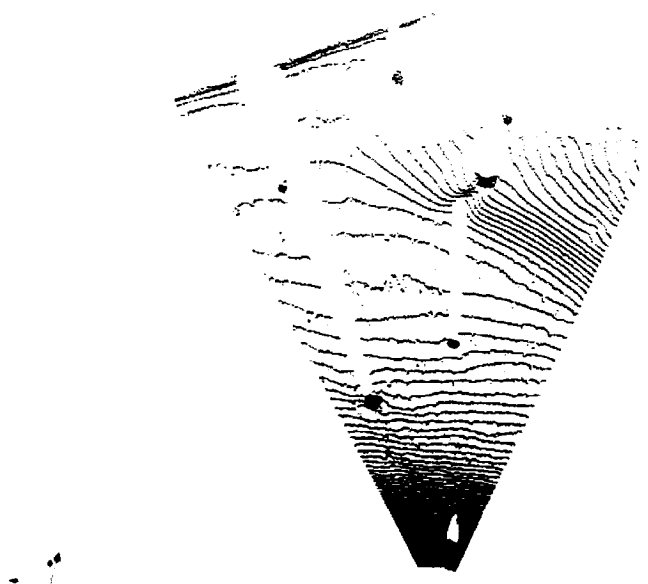


Figure 4.15 Une scène qui présente très peu de points d'intérêt.

4.4 Discussion reliée aux deux applications

Lorsqu'il existe une vague ressemblance entre les deux éléments à recaler, il est nécessaire d'avoir plusieurs fausses correspondances afin d'avoir plusieurs choix de correspondances possibles car, les points correspondants qui sont recherchés peuvent se ressembler vaguement. Dans ces cas, le paramètre ν (tableau 3.2, page 65) multipliant la valeur de corrélation, en dessous de laquelle deux empreintes sont considérées comme étant des correspondants, se voit assigner une valeur plus élevée, typiquement 3.5. Afin de filtrer ces faux correspondants, une mise en correspondance globale est alors nécessaire. Il est impossible avec la seule mise en correspondance locale, d'obtenir une bonne estimation de la transformation rigide

initiale. Cette vague ressemblance est présente dans les cas suivants :

- Dans le cas de l’exploration planétaire (section 4.3), à cause de la différence de résolution entre la scène et le modèle.
- Dans le cas du sauvetage de satellite (section 4.2), cette vague ressemblance est causée par une très forte présence de bruit dans la scène.

CHAPITRE 5

CONCLUSION ET TRAVAUX FUTURS

Le projet décrit dans ce mémoire a satisfait les objectifs fixés au départ (chapitre 2, page 41). La méthode a complété avec succès les objectifs spécifiques du projet.

La méthode développée réussit à bien traiter les environnements naturels qui présentent les caractéristiques suivantes : occlusion, résolution non-constante, différence de résolution entre la scène et le modèle et présence de bruit. Il a été démontré que le fait d'utiliser une combinaison de mise en correspondance locale et globale a grandement amélioré les résultats. Au départ, seulement une mise en correspondance locale en utilisant la représentation par empreinte était effectuée. Les résultats étaient décevants et, tel que mentionné dans (Hétu, 2004), dans certains cas, le fait que la mise en correspondance locale fournisse une solution correcte tenait presque du hasard.

C'est d'ailleurs la faiblesse des méthodes habituellement utilisées. La plupart du temps, une seule méthode de mise en correspondance locale est utilisée. Comme il a été souligné, ceci mène inévitablement à de fausses correspondances. De plus, dans bien des cas, les méthodes conventionnelles utilisent des données ne présentant pas les caractéristiques présentes dans des environnements réels. Elles utilisent plutôt des données qui présentent une résolution semblable et constante des données qui sont même parfois synthétiques.

Par contre, l'algorithme n'est pas parfait, il souffre de quelques lacunes lors de la présence de certaines conditions telles que : le manque de points d'intérêt, la présence de motifs récurrents dans la scène dans le modèle, et un chevauchement

trop faible entre la scène et le modèle.

La reconstruction d'environnements par l'assemblage de vues pour lesquelles aucune information sur la relation, c'est-à-dire la transformation rigide, entre les vues n'est connue, est une application très intéressante. Spécialement avec l'apparition de capteurs laser capables d'atteindre une très grande précision à des distances pouvant aller jusqu'à un kilomètre, comme c'est le cas pour le LIDAR de Optech. Ces capteurs permettent la reconstruction d'environnements de très grandes tailles comme des édifices, des portions d'une ville ou encore la reconstruction d'un site distant pour effectuer la télé-opération d'une pièce d'équipement.

Tel que discuté dans la section précédente, la méthode développée ne peut effectuer la reconstruction d'environnements. Elle ne peut le faire car ces environnements sont souvent très encombrés. Encombrés dans le sens où plusieurs objets distincts sont présents dans la scène. Ceci rend pratiquement impossible la génération d'un maillage qui conviendra à une mise en correspondance.

Une solution à ce problème serait d'effectuer une segmentation du nuage de points. Il faudrait étudier les méthodes de segmentation. Par exemple, un simple algorithme de remplissage pourrait être suffisant afin de déterminer les groupes de points formant des objets distincts.

Une fois cette segmentation effectuée, un maillage serait généré pour chacun des groupes de points. Le recalage pourrait s'effectuer entre chacun des objets présents dans les deux prises de vue. Ainsi, si l'algorithme réussit à déterminer la transformation rigide entre deux objets provenant de deux vues différentes, la transformation rigide entre ces deux vues est alors connue.

Finalement, une autre amélioration pourrait être apportée à la méthode développée. Une particularité des données utilisées est le fait que dans bien des cas, la résolution

du maillage représentant la scène est différente de celle du modèle. Afin de minimiser l'impact de cette caractéristique, une normalisation de la résolution pourrait être effectuée. La résolution du maillage présentant la résolution la plus faible pourrait être ramenée à une résolution similaire à celle du maillage présentant la plus haute résolution. Cette normalisation peut être effectuée à l'aide d'un ré-échantillonnage. Ceci aurait pour effet de pouvoir traiter des cas présentant des maillages ayant une plus grande différence de résolution. De plus, le recalage serait plus précis car la distance point-à-point est utilisée lors de l'ICP.

RÉFÉRENCES

- AMENTA, N., CHOI, S., DEY, T. K., and LEEKHA, N. (2002a). A simple algorithm for homeomorphic surface reconstruction. *International Journal of Computational Geometry and Applications*, **12**(1), 125–141.
- AMENTA, N., CHOI, S., DEY, T. K., and LEEKHA, N. (2002b). A simple algorithm for homeomorphic surface reconstruction. *ijcga*, **12**, 125–141.
- BAE, K.-H. and LICHTI, D. D. (2004). Automated registration of unorganised point clouds from terrestrial laser scanners. In *Proceedings of the XXth ISPRS Congress*, Istanbul, pages 222–227.
- BENTLEY, J. L. (1975). Multidimensional binary search trees used for associative searching. *Commun. ACM*, **18**(9), 509–517.
- BESL, P. J. and MCKAY, N. D. (1992). A method for registration of 3-d shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **14**(2), 239–256.
- CAMPBELL, R. J. and FLYNN, P. J. (2001). A survey of free-form object representation and recognition techniques. *Computer Vision and Image Understanding*, **81**(2), 166–210.
- CARR, J. C., BEATSON, R. K., CHERRIE, J. B., MITCHELL, T. J., FRIGHT, W. R., MCCALLUM, B. C., and EVANS, T. R. (2001). Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions. In *SIGGRAPH '01 : Pro of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*,

pages 67–76. ACM Press.

CARR, J. C., BEATSON, R. K., MCCALLUM, B. C., FRIGHT, W. R., McLennan, T. J., and Mitchell, T. J. (2003). Smooth surface reconstruction from noisy range data. In *GRAPHITE '03 : Proceedings of the 1st international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and South East Asia*, pages 119–ff. ACM Press.

CHEN, C.-S., HUNG, Y.-P., , and CHENG, J.-B. (1999). Ransac-based darces : A new approach to fast automatic registration of partially-overlapping range images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **11**, 1229–1234.

CHEN, Y. and MEDIONI, G. (1992). Object modeling by registration of multiple range images. *IVC*, **10**(3), 145–155.

CHENG, J. and DON, H. (1991). A graph matching approach to 3D point correspondences. *International Journal of Pattern Recognition*, **5**(3), 399–412.

CHETVERIKOV, D., SVIRKO, D., STEPANOV, D., and P.KRSEK (2002). The trimmed iterative closest point algorithm. In *Proceedings International Conference on Pattern Recognition, volume III*, pages 545–548. IEEE Comp. Soc.

CHOW, C. K., TSUI, H. T., and LEE, T. (2004). Surface registration using a dynamic genetic algorithm. *Pattern Recognition*, **37**(1), 105–117.

DELINGETTE, H., HEBERT, M., and IKEUCHI, K. (1993). A spherical representation for the recognition of curved objects. In *International Conference on Computer Vision*, pages 103–112.

DISSANAYAKE, M. W. M. G., NEWMAN, P., CLARK, S., DURRANT-WHYTE, H. F., and CSORBA, M. (2001). A solution to the simultaneous localization and map building (slam) problem. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **17**(3), 229–241.

FISCHLER, M. and BOLLES, R. (1981). RANdom SAMpling Consensus : a paradigm for model fitting with application to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, **24**(6), 381–395.

GOPI, M., KRISHNAN, S., and SILVA, C. T. (2000). Surface reconstruction based on lower dimensional localized delaunay triangulation. In Gross, M. and Hopgood, F. R. A., editors, *Computer Graphics Forum (Eurographics 2000)*, volume 19(3).

GORDON, W. and RIESENFELD, R. (1974). *Computer Aided Geometric Design*, chapter B-spline curves and surfaces. Academic Press, New York.

HÉTU, A. (2004). Reconstruction 3D de la surface externe du tronc humain pour le suivi non effractif des déformations scoliotiques. Master’s thesis, Institut de génie biomédical, École polytechnique de Montréal, Montréal, Canada.

HIGUCHI, K., HEBERT, M., and IKEUCHI, K. (1994). Building 3-d models from unregistered range images. In *Proceedings of IEEE Conference on Robotics*

and Automation (ICRS '94, volume 3, pages 2248–2253.

HOPPE, H. (1994). *Surface Reconstruction from Unorganized Points*. PhD thesis, University of Washington, Seattle, USA.

HOPPE, H., DEROSE, T., DUCHAMP, T., MCDONALD, J., and STUETZLE, W. (1992). Surface reconstruction from unorganized points. In *Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 71–78. ACM Press.

HORN, B. (1987). Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. *Journal of the Optical Society of America A*, 4(4), 629–642.

JOHNSON, A. (1997). *Spin-Images : A Representation for 3-D Surface Matching*. PhD thesis, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA.

JOHNSON, A. and HEBERT, M. (1997). Surface registration by matching oriented points. In *Proceedings of the International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling*, pages 121–128.

KIMMEL, R. and SETHIAN, J. A. (1998). Computing geodesic paths on manifolds. In *Proc. Nat. Acad. Sci.*, pages 8431–8435.

LEINZ, M. and CHEN, C. (2002). Autonomous rendezvous and capture sensor system (ARCSS). In *2002 Core Technologies for Space Systems Conference*.

LEONARD, J. J. and DURRANT-WHYTE, H. F. (1991). Mobile robot localization by tracking geometric beacons. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **7**(3), 376–382.

LEVOY, M., PULLI, K., CURLESS, B., RUSINKIEWICZ, S., KOLLER, D., PEREIRA, L., GINZTON, M., ANDERSON, S., DAVIS, J., GINSBERG, J., SHADE, J., and FULK, D. (2000). The digital michelangelo project : 3D scanning of large statues. In *SIGGRAPH '00 : Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 131–144. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.

LISIEN, B., MORALES, D., SILVER, D., KANTOR, G., REKLEITIS, I. M., and CHOSET, H. (2005). The hierarchical atlas. *IEEE Transactions on Robotics*, **21**(3), 473–481.

NISHINO, K. and IKEUCHI, K. (2002). Robust simultaneous registration of multiple range images. In *Proceedings of the Fifth Asian Conference on Computer Vision*, pages 454–461.

PIEGL, L. and TILLER, W. (1997a). *The NURBS Book*. Springer, 2nd edition.

PIEGL, L. and TILLER, W. (1997b). *The NURBS Book*, chapter B-Spline Basis Functions. Springer, 2nd edition.

PIEGL, L. and TILLER, W. (1997c). *The NURBS Book*, chapter B-Spline Curves and Surfaces. Springer, 2nd edition.

PLANITZ, B. M., MAEDER, A. J., and WILLIAMS, J. A. (2005). The correspondence framework for 3D surface matching algorithms. *Computer Vision and Image Understanding*, **97**, 347–384.

PULLI, K. (1999). Multiview registration for large data sets. In *Proc. 1999 Conf on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM '99)*, pages 160–168.

RIESENFELD, R. (1973). *Applications of B-spline Approximation to Geometric Problems of Computer-Aided Design*. PhD dissertation, Syracuse Univ.

RUEL, S., ENGLISH, C., and ANCTIL, M. (2005). 3DLASSO : Real-time pose estimation from 3D data for autonomous satellite servicing. In *iSAIRAS 2005*.

RUSINKIEWICZ, S. and LEVOY, M. (2001). Efficient variants of the icp algorithm. In *Third International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM)*.

SHAFFER, C. (1997). *A Practical Introduction to Data Structure and Algorithm Analysis*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Signal Analysis and Machine Perception Laboratory (2005). Signal analysis and machine perception laboratory database. <http://sampl.ece.ohio-state.edu/database.htm>.

SMITH, R. and CHEESEMAN, P. (1986). On the representation and estimation of spatial uncertainty. *International Journal of Robotics Research*, **5(4)**, 56–68.

SMITH, R., SELF, M., and CHEESEMAN, P. (1990). Estimating uncertain spatial relationships in robotics. In Cox, I. and Wilfong, G. T., editors, *Autonomous Robot Vehicles*, pages 167–193. Springer-Verlag.

STEIN, F. and MEDIONI, G. (1992). Structural indexing : Efficient 3-d object recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **14**(2), 125–145.

SUN, Y. and ABIDI, M. (2001). Surface matching by 3-d point’s fingerprint. In *Proc. IEEE Int. Conf. Computer Vision*, volume II, pages 263–269.

SUN, Y., PAIK, J., KOSCHAN, A., PAGE, D., and ABIDI, M. (2003). Point fingerprint : A new 3-d object representation scheme. *IEEE Transactions On Systems, Man and Cybernetics, Part B*, **33**(4), 712–717.

ZHANG, D. (1999). *Harmonic Shape Images : A 3D Free-form Surface Representation and Its Applications in Surface Matching*. PhD thesis, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA.

ZHANG, D. and HEBERT, M. (1999). Harmonic maps and their applications in surface matching. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, volume 2, pages 524–530.

ZHANG, Z. (1992). Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. *International Journal of Computer Vision*, **13**(2), 119–152.

ANNEXE I

CALCUL DE LA RÉOLUTION D'UN MAILLAGE

La résolution du maillage s'avère un outil très utile pour déterminer certains paramètres de l'application développée. L'algorithme utilise la distance médiane de la distance entre les points de chacune des arêtes du maillage. Une arête est A est constituée d'un point de départ a_0 et d'un point d'arrivée a_1 , ces points font tous deux partie de l'ensemble X des points contenus dans le maillage : $a_0, a_1 \in X$. Il est à noter que la mesure de distance $d(\cdot, \cdot)$ signifie la distance euclidienne.

Algorithme I.1

Algorithme I.1 Calcul de la résolution d'un maillage

Initialiser l'ensemble des distances : $D \leftarrow \{\}$
pour toutes les arêtes A du maillage M **faire**
 $D \leftarrow D \cup \{d(a_0, a_1)\}$
fin pour
 La résolution du maillage est $Medianne(D)$

Voici le code c++ utilisant la librairie *VTK*.

```
float vtkUtils::computeMeshResolution(vtkPolyData * mesh)
{
    // On extrait tous les 'edge' du maillage 'mesh'.
    vtkFeatureEdges * edgesExtractor = vtkFeatureEdges::New();

    edgesExtractor->SetInput(mesh);
    edgesExtractor->ColoringOff();
    edgesExtractor->BoundaryEdgesOn();
    edgesExtractor->ManifoldEdgesOn();
    edgesExtractor->NonManifoldEdgesOn();

    // On calcule la distance entre les points de chacun des edges.
    edgesExtractor->Update();

    // L'ensemble des edges.
    vtkPolyData * output = edgesExtractor->GetOutput();

    // L'ensemble des distances entres les points des edges.
    vector<float> * distances = new vector<float>();

    for ( int i = 0 ; i < output->GetNumberOfCells() ; i++ ) {
        vtkCell * cell = output->GetCell(i);
        float * p0 = output->GetPoint( cell->GetPointId(0) );
        float * p1 = output->GetPoint( cell->GetPointId(1) );
        distances->push_back(vtkMath::Distance2BetweenPoints(p0,p1));
    }

    sort(distances->begin(), distances->end());

    // On prend la mediane.
    float resolution = (*distances)[distances->size()/2];

    edgesExtractor->Delete();
    delete distances;

    return sqrtf(resolution);
}
```

ANNEXE II

ENVIRONNEMENT DE DÉVELOPPEMENT

L'environnement de développement utilisé est Java sous la plate forme de développement *Eclipse*¹. Une partie de la programmation s'est aussi déroulée en C++ afin de permettre de développer avec la librairie *Visualization Toolkit* (VTK)². Le code développé en C++ a été ensuite interfacé avec Java à l'aide du *Java Native Interface* (JNI).

¹<http://www.eclipse.org>

²<http://www.vtk.org>

ANNEXE III

AUTRES CAS

Après avoir constaté les résultats satisfaisants de la méthode dans les applications identifiées au départ, il a été pressenti que la méthode aurait de bonnes chances de fonctionner avec d'autres données.

Une application intéressante est la reconstruction d'un modèle 3D d'un objet. Cette reconstruction peut s'effectuer en assemblant différentes prises de vues d'un objet sous forme de nuages de points. L'ICP peut fonctionner dans le cas où la transformation permettant de passer d'une vue à l'autre est très petite (Nishino and Ikeuchi, 2002). Ceci exige beaucoup de redondance dans les données. Il serait bien plus intéressant de pouvoir assembler deux vues qui ont une différence de pose plus importante, par exemple avec une différence de plus de 10° selon un des axes. Cette différence, bien qu'elle paraisse petite, est environ la limite de tolérance de l'ICP, au delà de laquelle, la convergence est compromise.

Des données ont été prises de (Signal Analysis and Machine Perception Laboratory, 2005), une base de données contenant des lectures de balayeurs laser 3D. Des données provenant de visages humains ont été choisies. Ces données ont été recueillies en tournant la personne sur elle-même et en prenant une série de mesures.

Les tests sur le recalage ont été effectués avec une différence approximative de rotation selon l'axe des y variant entre 40° et 170° et des variations minimales des autres composantes de la transformation rigide. Ces résultats sont présentés à la section III.1. Au delà de la limite de 170° de différence entre les points de vue d'où ont été prises les données, le chevauchement est trop petit pour permettre un

recalage.

Après avoir accompli cette première tâche avec succès, il a été décidé pousser la technique encore plus loin. Dans le cas de l'exploration planétaire et celui du sauvetage de satellites, l'algorithme est capable de recalculer deux éléments ayant une vague ressemblance. Partant de cette idée, l'algorithme a été testé avec deux visages d'un point de vue similaire, mais sur deux personnes différentes. Ces résultats sont présentés à la section III.2. Le recalage de ces données est considéré « réussi » d'un point de vue moindre carrée car la distance point à point est minimisée. En effet, la solution est optimale dans le sens où la distance globale point à point a été minimisée.

La signification de ces résultats sera présentée plus en détail lors de la discussion.

III.1 Visages humains provenant du même individu

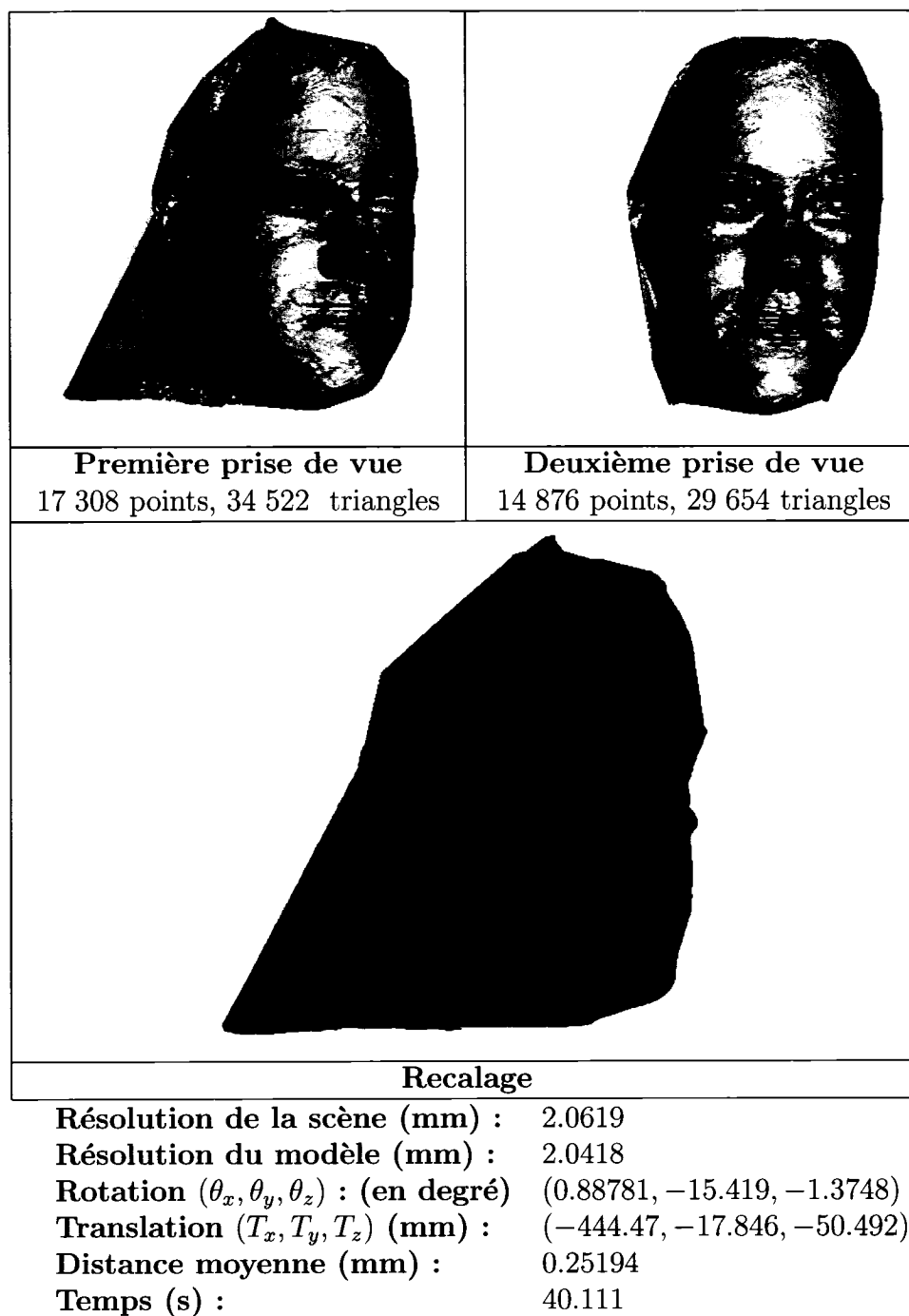


Figure III.1 Recalage provenant d'un visage pris sous deux angles différents : première prise de vue : 108° et deuxième prise de vue : 144° .

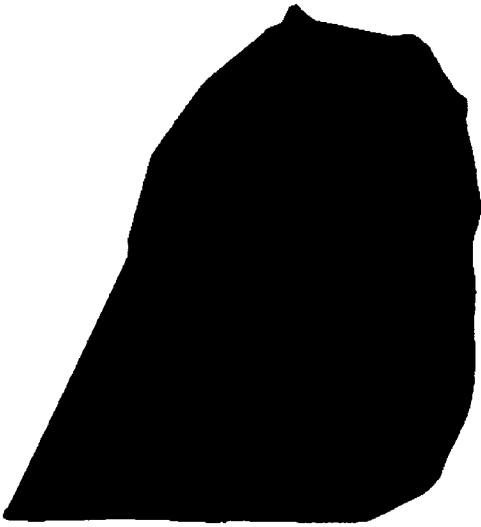
	
Première prise de vue 17 308 points, 34 522 triangles	Deuxième prise de vue 14 853 points, 29 606 triangles
	
Recalage	
Résolution de la scène (mm) : 2.0619	
Résolution du modèle (mm) : 2.0434	
Rotation ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) : (en degré) (−0.35539, −27.299, −2.0291)	
Translation (T_x, T_y, T_z) (mm) : (−775.84, 33.12, −185.35)	
Distance moyenne (mm) : 0.27219	
Temps (s) : 38.359	

Figure III.2 Recalage provenant d'un visage pris sous deux angles différents : première prise de vue : 108° et deuxième prise de vue : 180° .

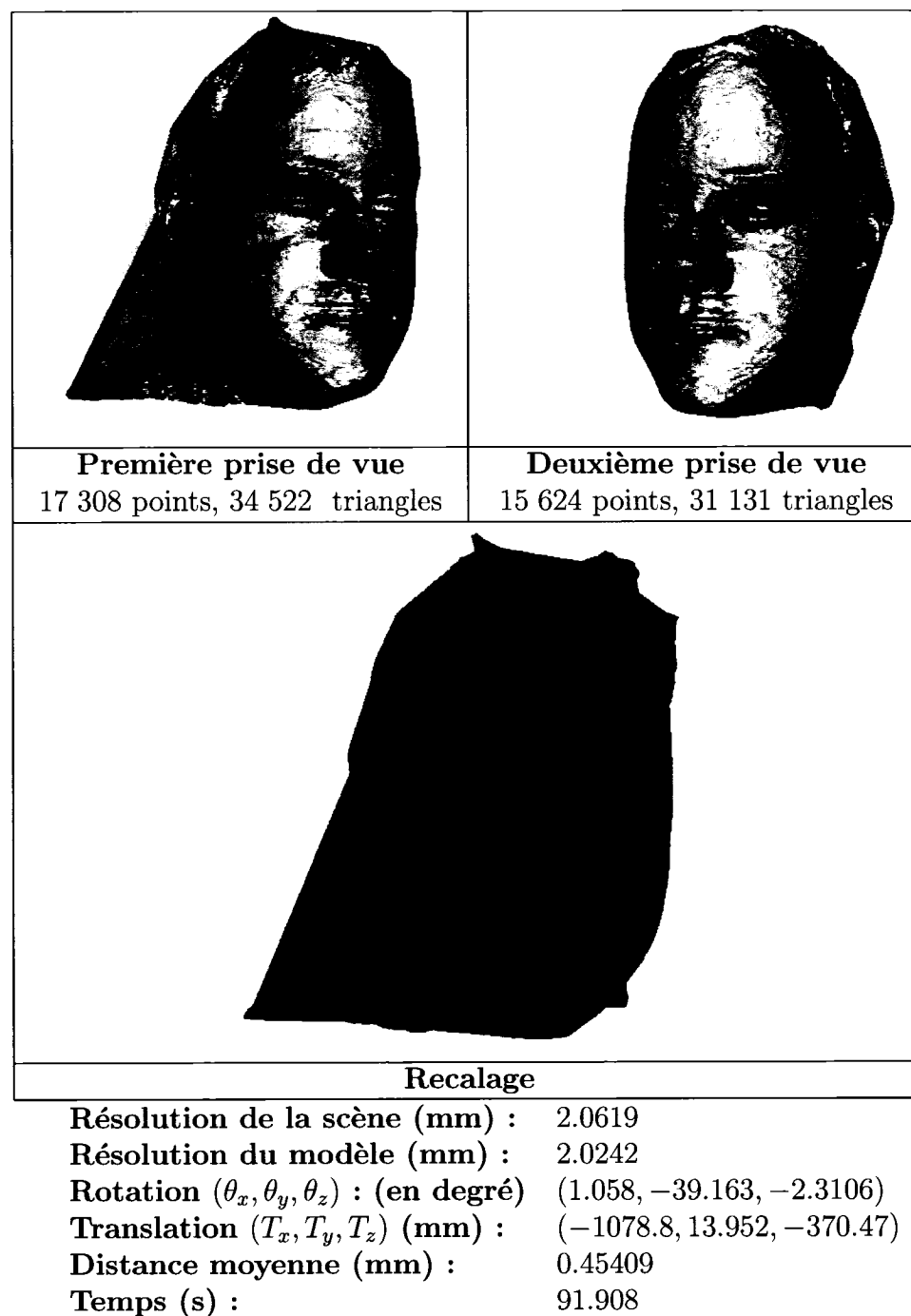


Figure III.3 Recalage provenant d'un visage pris sous deux angles différents : première prise de vue : 108° et deuxième prise de vue : 216° .

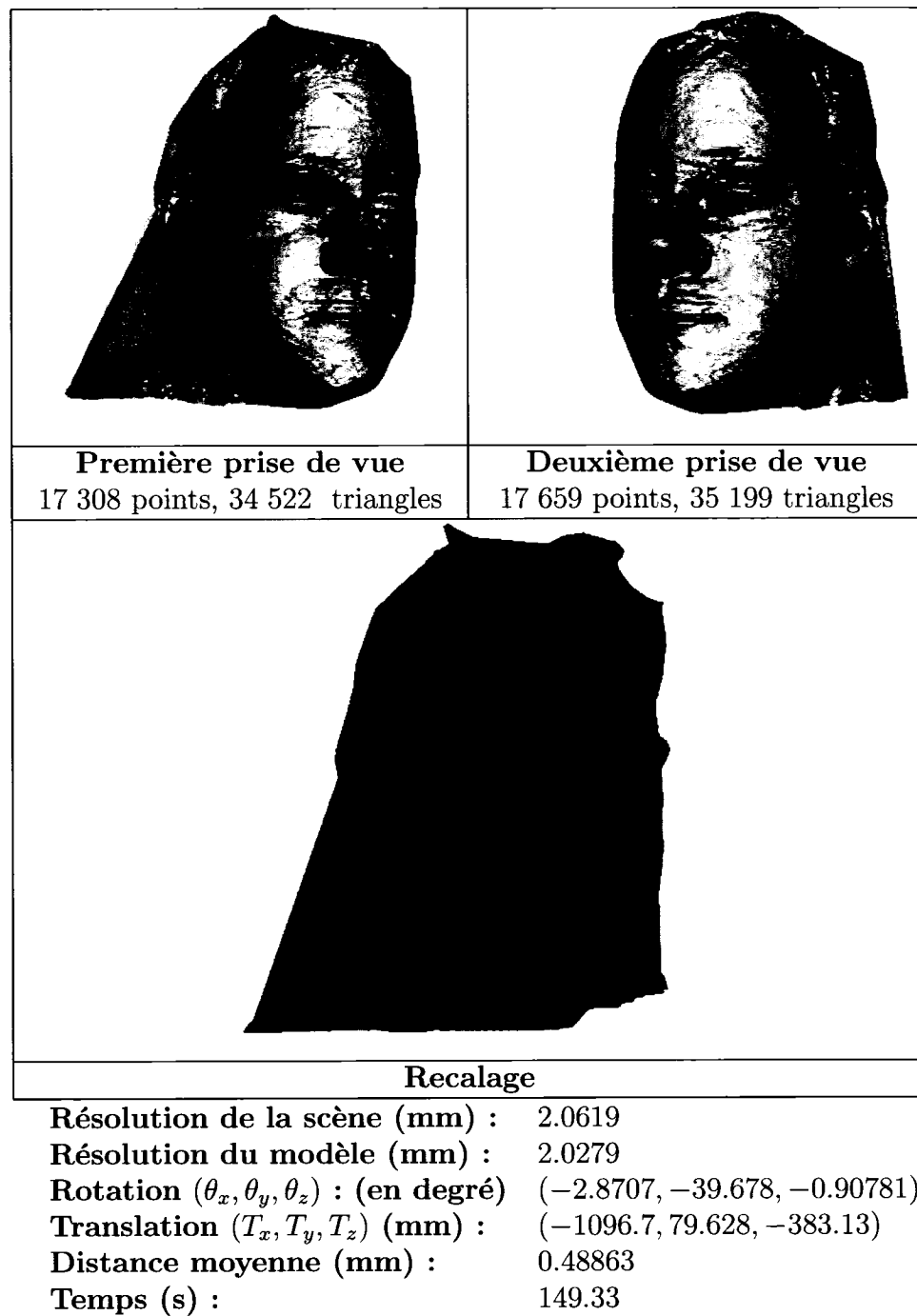


Figure III.4 Recalage provenant d'un visage pris sous deux angles différents : première prise de vue : 108° et deuxième prise de vue : 252° .

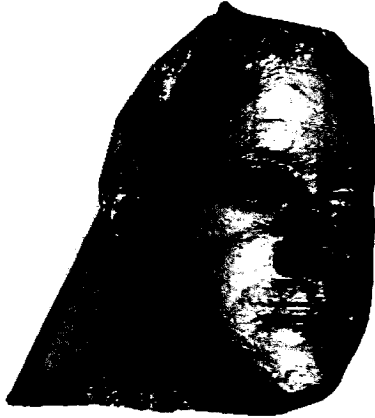
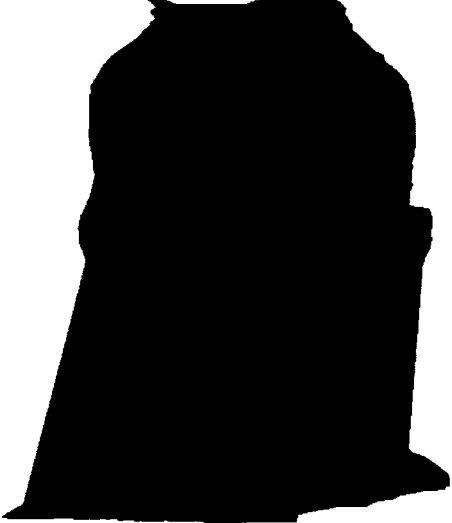
	
Scène 17 308 points, 34 522 triangles	Modèle 18 499 points, 36 871 triangles
	
Recalage	
Résolution de la scène (mm) : 2.0619	
Résolution du modèle (mm) : 1.9441	
Rotation ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) : (en degré) (−4.2287, −53.704, −2.5709)	
Translation (T_x, T_y, T_z) (mm) : (−1392.8, 133.99, −692.7)	
Distance moyenne (mm) : 0.43852	
Temps (s) : 607.73	

Figure III.5 Recalage provenant d'un visage pris sous deux angles différents : première prise de vue : 108° et deuxième prise de vue : 288° .

III.2 Visages humains provenant de deux individus différents

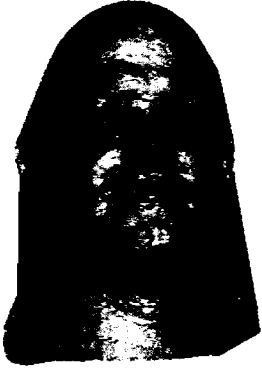
	
Première prise de vue 17 308 points, 34 522 triangles	Deuxième prise de vue 16 779 points, 33 429 triangles
	
Recalage	
Résolution de la scène (mm) : 2.0619	
Résolution du modèle (mm) : 2.2871	
Rotation ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) : (en degré) (−10.059, −8.1819, 5.6428)	
Translation (T_x, T_y, T_z) (mm) : (−300.78, 285.68, −193.24)	
Distance moyenne (mm) : 1.3293	
Temps (s) : 534.37	

Figure III.6 Visages provenant de deux individus différents pris sous deux angles similaires.

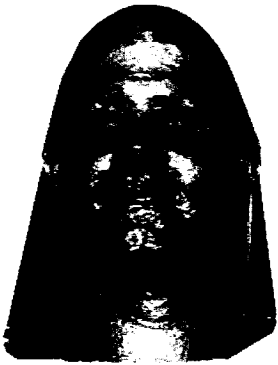
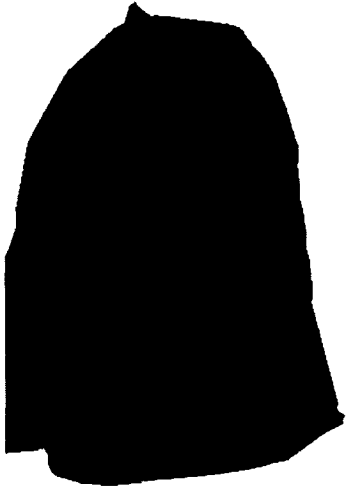
	
Première prise de vue 17 308 points, 34 522 triangles	Deuxième prise de vue 16 341 points, 32 558 triangles
	
Recalage	
Résolution de la scène (mm) :	
Résolution du modèle (mm) :	
Rotation $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$: (en degré)	
Translation (T_x, T_y, T_z) (mm) :	
Distance moyenne (mm) :	
Temps (s) :	

Figure III.7 Visages provenant de deux individus différents pris sous deux angles présentant un différence significative (environ 35° de différence).