



HAL
open science

Estimation de pose de grands blocs d'images panoramiques issues de systèmes de numérisation mobile

Bertrand Cannelle

► **To cite this version:**

Bertrand Cannelle. Estimation de pose de grands blocs d'images panoramiques issues de systèmes de numérisation mobile. Autre [cs.OH]. Université Paris-Est, 2013. Français. NNT : 2013PEST1164 . tel-00952252

HAL Id: tel-00952252

<https://theses.hal.science/tel-00952252>

Submitted on 26 Feb 2014

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

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



Thèse de doctorat

présentée pour obtenir le grade de docteur
de l'UNIVERSITÉ PARIS-EST

École Doctorale MSTIC

Spécialité : Sciences de l'Information Géographique

Bertrand CANNELLE

Estimation de pose de grands blocs
d'images panoramiques issues de
systèmes de numérisation mobile

Soutenue publiquement le 04/12/2013 devant le jury composé de :

El Mustapha MOUADDIB
Michel DHOME
Pierre GRUSSENMEYER
Konrad SCHINDLER
Nicolas PAPARODITIS
Marc PIERROT-DESEILLIGNY

Président
Rapporteurs

Examineur
Directeurs de thèse

Cette thèse s'est déroulée au laboratoire MATIS (Méthodes d'Analyses pour le Traitement d'Images et la Stéréorestitution) du Service de la Recherche de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN).

Laboratoire MATIS Service de la Recherche Institut National de l'Information Géographique et Forestière 73 avenue de Paris 94165 Saint-Mandé cedex FRANCE

Téléphone : 01 43 98 80 00

Référence Bib_TE_X :

```
@PHDTHESIS{Ca13,  
  author = {Cannelle, B.},  
  title = {Estimation de pose de grands blocs d'images panoramiques  
  issues de syst\emes de num\erisation mobile},  
  school = {Universit\e {P}aris-{E}st},  
  year = {2013}  
}
```

Résumé

Tirée par le développement et la démocratisation des globes numériques et des systèmes de géolocalisation grand public, la numérisation 3D mobile terrestre en milieux urbains s'est développée de manière très importante ces dix dernières années. Les principaux verrous résiduels de ces systèmes reste d'une part la localisation précise des données pour certaines applications (conduite autonome urbaine, levers de géomètres, etc.) du fait des masques et multi-trajets GPS dans les canyons urbains et d'autre part le passage à l'échelle du traitement de l'information vu les volumes de données considérables acquis chaque jour (plusieurs To).

La première partie de cette thèse est consacrée à la présentation de la numérisation mobile, aussi bien du point de vue système que du point de vue usage. Une description fine du système Stéréopolis V2, véhicule de numérisation mobile multi-caméras développée au laboratoire MATIS de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière, est faite afin de présenter les données utilisées dans cette thèse. Les blocs d'images manipulés dans ces travaux sont constitués de plusieurs centaines de milliers à un million d'image.

La seconde partie est consacrée à la calibration du système : calibration intrinsèque de caméra, tout d'abord, en utilisant une géométrie d'acquisition de type panoramique, qui permet de s'affranchir de réseaux de cibles 3D métrologiques. Une calibration extrinsèque des imageurs du véhicule, ensuite, qui permet de déterminer de façon précise la position et l'orientation de caméras sur un dispositif de numérisation mobile. Deux procédures sont détaillées et comparées : l'une dite "off-line" nécessitant une acquisition spécifique avec un réseau de cibles métrologiques et l'autre dite "on-line" utilisant uniquement les données d'acquisition standards. Nous démontrons que la méthode "on-line" produit dans les mêmes conditions une précision comparable à celle "off-line" tout en étant plus adaptée aux variations de conditions d'acquisition in-situ.

La troisième partie détaille le processus de compensation par faisceaux appliquée aux données de numérisation mobile multi-caméras qui permet d'estimer la pose d'un grand nombre d'images. La mise en équation ainsi que différents cas d'utilisations de la méthode sont explicités. La structuration et la gestion des données dans un entrepôt est elle aussi développée car elle permet la gestion d'importants volumes et donc le passage à l'échelle tout en restant performante.

La quatrième et dernière partie propose différentes méthodes de recalage qui peuvent être utilisées aussi bien de manière individuelle que combinées afin de permettre de mettre en cohérence des séquences d'images distinctes (boucles, passage multi-dates, etc.) dans des contextes applicatifs différents.

Mots Clés : *photogrammétrie, véhicule de numérisation mobile, calibration intrinsèque de caméra, calibration de véhicule de numérisation mobile, compensation par faisceaux*

Abstract

Title : Bundle adjustment of large blocks of panoramic images acquired by mobile mapping systems

Driven by the development and the democratization of digital globes and standard geolocation systems, land mobile 3D scanning in urban areas has grown very significantly over the past decade. The main existing locks of these systems remain, on the one hand, a precise location for various applications (urban autonomous driving, field surveying, etc.) due GPS masks and multipaths in urban canyons, and, on the other hand, the scalability of developed processes given the considerable volume of data acquired every day (several TerraBytes).

The first part of this thesis is devoted to the presentation of mobile mapping, both from the system point of view and from the application one. A detailed description of the Stéréopolis V2 system, the multi-camera mobile mapping system developed in the MATIS laboratory of the IGN (the French National Mapping Agency) and of the data used in this thesis will be presented. The image blocks that are handled in this work are composed of several hundred thousands up to one million images.

The second part deals with the calibration of the system : intrinsic camera calibration is first tackled using a panoramic-based acquisition geometry, which allows to discard network 3D metrology targets. Extrinsic image calibration vehicle is then performed for accurately determining the position and orientation of the cameras on a movable scanning device. Both procedures are detailed and compared : a so-called "off-line" procedure requiring specific acquisition with a network of metrology targets and another one called "on-line" using no specific acquisition. We show that the "on-line" method produces results similar to the "off -line" while being less sensitive to local environment variations.

The third section details the bundle adjustment process, specific to multi-camera mobile mapping system, to estimate the pose of a large number of images. Problem formulation and various use cases of the method are explained. Structuring and management of data in a warehouse are also developed since it allows to handle large data volumes and, consequently, a suitable solution for the problem upscaling while remaining efficient in terms of accuracy.

The fourth and final part offers different registration methods that can be used both individually and in a combined manner in order to enable to provide consistent sequences of images in various conditions (loops, different periods acquisition , etc.).

Keywords : *photogrammetry, mobile mapping system, camera calibration, system calibration, bundle adjustment*

Remerciements

Cette page prend un sens particulier pour moi parce qu'elle marque à la fois la fin de mon travail de thèse, mais aussi mon départ vers d'autres horizons. Je souhaite donc à travers ces quelques lignes remercier toutes les personnes qui ont contribué à ce travail de thèse et à mon aventure au MATIS.

Tout d'abord je souhaite remercier les personnes à l'initiative de ce travail : Didier BOLDO et Nicolas PAPARODITIS, chefs successifs du laboratoire MATIS, ainsi que Patrice BUESO et Bénédicte BUCHER, chefs successifs du service de la recherche de l'IGN.

Je souhaite également remercier Marc PIERROT-DESEILLIGNY et Nicolas PAPARODITIS pour m'avoir dirigé et encadré. J'ai beaucoup appris à vos côtés. J'espère que mon travail a répondu à vos attentes !

Je souhaite ensuite remercier les membres du jury qui ont eu la patience de lire ces pages et d'évaluer mon travail : Michel DHOME et Pierre GRUSSENMEYER pour avoir accepté la fonction de rapporteur ainsi que El Mustapha MOUADDIB et Konrad SCHINDLER pour avoir accepté celle d'examineurs. Vos remarques et vos questions m'ont permis de prendre du recul sur mon travail et de progresser. Merci pour tout !

Merci ensuite aux matinaux du MATIS : Jérôme, Fabrice, Clément, Nicolas D., Fabien et Jean-Pascal pour les (longues) discussions échangées au café qui m'ont toujours permis de démarrer la journée du bon pied.

Merci à Jean-Pierre, toujours disponible aussi bien pour acquérir des données en véhicule, pour réaliser des programmes permettant de faire tout et n'importe quoi ainsi que pour partager son expérience. J'ai beaucoup appris à tes côtés !

Merci à François, puis David Co. qui m'ont permis de travailler dans des conditions matériels toujours parfaites. Merci à David Ca., pour sa patience et sa technicité aussi bien en Linux qu'en administrateur PostgreSQL.

Un merci tout particulier à Marie-Claude au moment d'écrire ces lignes, qui m'a initié aux joies des démarches administratives avec une grande disponibilité.

Merci à toutes les personnes que j'ai côtoyé au quotidien : Alexandre H., Bahman, Rémi, Emmanuel, Isabelle, Narut, Neelanjan, Lijun, Abdalbassir, Wen, Bruno, Arnaud, Adrien, Jean-Christophe, Antonio, Lâman, Mathieu Br., Murat, Lionel, Alexandre D., Mathieu Be., Quoc-Dinh, Patrick, Erwann, Mahzad, Corina, Daniela, Olivier, Adrien C., Mélanie D, Mélanie S., Lionel P. ... qui m'ont permis de passer d'agréables moments.

Merci à Clément et Samuel, ainsi que Nicolas D. et Emmanuel et enfin Papa et Philippe d'avoir relu ce manuscrit de nombreuses fois afin d'arriver au résultat qui est présenté ici.

Merci à mes parents qui ont toujours été présents pour me soutenir.

Merci enfin à Léa, qui m'a toujours soutenu, encouragé et qui m'a permis de mener à bien ce travail. Un merci aussi à mes trois enfants qui m'ont laissé, de temps à autres, travailler à la maison et qui me font découvrir chaque jour les joies de la vie de famille.

Notation

\mathbf{x} , \mathbf{y} et \mathbf{z} seront les vecteurs de base dans \mathcal{R}^3 du référentiel terrain (respectivement ${}^t(1, 0, 0)$, ${}^t(0, 1, 0)$ et ${}^t(0, 0, 1)$)

\mathbf{i} , \mathbf{j} et \mathbf{k} seront les vecteurs de base dans \mathcal{R}^3 du référentiel image

$\mathcal{R}_{A,B}$ matrice de passage du repère A au repère B

$\mathcal{T}_{A,B}$ translation entre le repère A et le repère B

M_A point exprimé dans le repère A

Table des matières

Résumé	iii
Abstract	v
Remerciements	vii
Notation	ix
Table des matières	xiii
I Introduction	1
1 Révolution liée à la numérisation mobile	1
1.1 Numérisation mobile	1
1.2 Véhicules de numérisation mobile.....	3
1.3 Types et utilisations des données	4
2 Contexte	7
2.1 Utilisation de la numérisation mobile par l'IGN	7
2.2 Stéréopolis	8
2.3 Motivations	17
2.4 Présentation des données utilisées dans la thèse	19
2.5 Problématiques	24
2.6 Approche proposée et organisation du manuscrit	24
II Calibration de systèmes de numérisation mobile	27
3 Calibration intrinsèque de caméra	31
3.1 État de l'art	31
3.2 Autocalibration panoramique	40
4 Calibration de systèmes multi-caméras embarqué sur véhicule	55
4.1 Motivations	55
4.2 État de l'art	56
4.3 Formulation du problème	58

TABLE DES MATIÈRES

4.4	Calibration sur polygone dite méthode « Off-Line ».....	60
4.5	Calibration par les données dite méthode « On-Line ».....	68
4.6	Comparaison des méthodes.....	74
4.7	Conclusion.....	77
III Méthodes et outils pour la mise en géométrie de grands blocs d'images		79
5	Appariement et filtrage de points d'intérêt	83
5.1	Points d'intérêts.....	83
5.2	Appariement.....	86
5.3	Gestion de gros volumes de données.....	89
5.4	Élimination des erreurs.....	90
6	Gestion des mesures en base de données pour un passage à l'échelle	95
6.1	Système de fichiers.....	95
6.2	Base de données.....	96
6.3	Conclusion.....	99
7	Méthodologie et outils	101
7.1	Principe et intérêt.....	101
7.2	Formulation mathématique.....	102
7.3	Déroulement des processus.....	104
7.4	Exemples de processus.....	105
7.5	Conclusion.....	107
IV Localisation relative et absolue de systèmes de numérisation mobile basée image		109
8	Recalage de trajectoire sur des points d'appui externes	113
8.1	Relèvement.....	113
8.2	Extrapolation des relèvements individuels à l'ensemble de la trajectoire ...	117
8.3	Recalage ponctuel de trajectoire.....	118
9	Recalage multi-passages de la trajectoire	121
9.1	Gestion individuelle des intersections et passages multiples.....	121
9.2	Graphe de panoramiques.....	128
9.3	Algorithme de découpages.....	135
9.4	Evaluation de la qualité de recalage.....	138
9.5	Conclusion.....	140
10	Recalage interne et externe de la trajectoire	143

10.1 Utilisation conjointe de contraintes relatives et de relèvement.....	143
10.2 Utilisation de points d'appui le long de la trajectoire.....	144
11 Conclusion sur l'amélioration de trajectoire	147
11.1 Récapitulatif des méthodes	147
11.2 Bilan	147
 V Conclusion et perspectives	 149
 12 Conclusion	 151
12.1 Contributions marquantes.....	151
12.2 Points à améliorer	152
 13 Perspectives	 153
13.1 Amélioration du processus de calcul de trajectoire	153
13.2 Passage à l'échelle.....	154
13.3 Utilisation de primitives.....	155
 Bibliographie	 155
 A Différentielle de la formule image	 173
A.1 La formule image	173
A.2 Outils et notations.....	173
A.3 Dérivées Partielles.....	174
 B Matrices Creuses	 177
B.1 Méthodes de Stockage.....	177
B.2 Opérations.....	178
 C Détermination de la position d'un point issu de plusieurs droites	 179
 Publications	 181

Table des figures

1.1	Exemple de données laser.....	6
1.2	Utilisations des données image.	6
2.1	Stéréopolis V1.	9
2.2	Le véhicule Stéréopolis V2 et ses capteurs.	9
2.3	Capteurs laser du Stéréopolis V2.....	9
2.4	Exemples de données acquises simultanément par deux Riegl plans.	10
2.5	Exemples de données acquises par le LiDaR Velodyne HDL-64E.	10
2.6	Configurations possibles de disposition de caméras sur un véhicule de numérisation mobile.	11
2.7	Disposition des caméras sur le véhicule.	12
2.8	Caméras du Stéréopolis V2.	12
2.9	Exemples de panoramiques.	13
2.10	Capteurs du système de positionnement PosLV 220.....	15
2.11	Schéma de la procédure de géoréférencement en temps réel.	16
2.12	Histogramme représentant le nombre de panoramiques en fonction du nombre de satellites GPS visibles pour un chantier standard.....	17
2.13	Nombre de satellites visibles en fonction du temps pour 5 trajectoires linéaires.	18
2.14	Zones d'évaluation de la précision relative du système.	20
2.15	Écart en altitude entre les différentes trajectoires pour chaque zone.	21
2.16	Écart entre la position du Stéréopolis et les points de références.	22
2.17	Écart entre la position de Stéréopolis et les points de références en tenant compte de la continuité temporelle.....	22
2.18	Représentation de l'écart et de son incertitude entre la position de Stéréopolis et les points de référence.....	23
2.19	Représentation de l'écart en fonction de l'incertitude.....	23
2.20	Organisation de la thèse.....	25

TABLE DES FIGURES

3.1	Modélisation d'une caméra (modèle sténopé).....	32
3.2	Illustration de la distorsion dans les images.....	33
3.3	Illustration de la distorsion radiale.....	34
3.4	Illustration des distorsions radiale et tangentielle.....	34
3.5	Illustration de la distorsion complexe.....	35
3.6	Le système Cyclopolis.....	41
3.7	Illustration de la présence de parallaxe.....	42
3.8	Configuration de deux images en géométrie panoramique.....	42
3.9	Polynômes de distorsion des caméras simulées (cf tableau 3.3).....	45
3.10	Points servant pour la simulation de mesures homologues.....	45
3.11	Influence du bruit sur la détermination de la focale.....	46
3.12	Influence du bruit sur la détermination du PPA.....	46
3.13	Influence du bruit sur la détermination du modèle de distorsion.....	47
3.14	Influence de la parallaxe sur la détermination de la focale et du PPA.....	48
3.15	Influence de la parallaxe sur la détermination du modèle de distorsion.....	49
3.16	Site d'expérimentation pour la calibration de caméra.....	50
3.17	Traitement des données de Cyclopolis.....	51
3.18	Histogrammes des résidus après compensation de la panoramique.....	52
4.1	Écarts sur la mesure image lors d'un défaut de montage.....	56
4.2	Présentation des différents repères utilisés.....	59
4.3	Cibles et détails mesurables par topométrie et dans les images.....	60
4.4	Polygone de calibration pour Stéréopolis V2.....	61
4.5	Calibration « Off-Line » du Stéréopolis V2.....	61
4.6	Configuration de l'acquisition lors de la phase de calibration. Les points d'appui sont en gris et les positions de panoramiques en rouge.....	62
4.7	Histogramme des résidus sur les mesures image après calibration.....	64
4.8	Comparaison de la texturation des façades des batiments avec les images du véhicule sans tenir et en tenant compte de la calibration.....	65
4.9	Configuration de l'acquisition lors de la phase de contrôle de la calibration.....	66
4.10	Histogrammes des résidus sur les mesures image.....	66
4.11	Histogramme des résidus sur les points de contrôle en tenant compte de la calibration.....	67
4.12	Étapes nécessaires à la calibration « On-Line ».....	68
4.13	Calibration « On-Line ».....	70
4.14	Histogrammes des résidus sur les mesures image.....	71

4.15	Histogramme des résidus sur les points de contrôle.....	71
4.16	Zone de tests des différentes configurations.....	72
4.17	Résultats des différentes configurations.	73
4.18	Comparaison entre les processus de calibration.....	74
4.19	Accumulation des mesures image utilisées lors de la phase de calibration dans le plan image de chaque caméra.	76
5.1	Masque de points d'intérêt.....	85
5.2	Étapes de la phase d'appariement.....	87
5.3	Illustration de la stratégie pour le calcul d'appariement.....	89
5.4	Illustration des étapes du calcul des mesures homologue sur un gros volume de données.....	90
5.5	Exemple d'appariement entre deux couples consécutifs.....	91
5.6	Exemples d'appariement.	91
5.7	Caractéristiques extraites pour chaque point homologue.....	92
5.8	Schéma de la classification par SVM.	93
6.1	Schéma explicatif du système de fichiers mis en place pour un accès rapide aux données.....	96
6.2	Implémentation du schéma de notre base de données.....	98
6.3	Influence du temps de renvoi des requêtes en fonction du type d'indexation.	99
7.1	Principe de la compensation par faisceaux.....	101
7.2	Illustration de la compensation par faisceaux.	102
7.3	Illustration du remplissage de la matrice d'observation.	105
7.4	Schéma expliquant l'enchaînement des étapes.....	106
8.1	Principe du relèvement.	113
8.2	Configuration pour tester le processus de relèvement.....	115
8.3	Illustration du processus de relèvement.	115
8.4	Histogramme de répartition de la précision du relèvement.....	116
8.5	Procédure de relèvement.....	116
8.6	Principe de la gestion de trajectoire.....	117
8.7	Exemples d'utilisations de la gestion de trajectoire.....	118
8.8	Principe de l'utilisation du relèvement pour le recalage en absolu.....	118
8.9	Trajectoire pour l'expérimentation.	119
8.10	Représentation de l'erreur de positionnement en fonction de la distance à une panoramique connue.....	120

TABLE DES FIGURES

9.1	Recalage 3D/3D	122
9.2	Résidus 3D après recalage 3D/3D sur l'exemple (a).....	122
9.3	Résidus 3D après recalage 3D/3D sur l'exemple (b).....	123
9.4	Principe de notre méthode de recalage 2x2.....	124
9.5	Influence de la valeur du seuil minimum sur le module 2x2.....	126
9.6	Influence de la calibration sur le processus de recalage	127
9.7	Histogramme représentant le nombre de points homologues actifs après compensation par couples.	128
9.8	Histogramme représentant le ratio entre le nombre de points homologues actifs après compensation et le nombre de points homologues initial.....	129
9.9	Stratégies possibles pour la création du graphe de panoramiques.....	130
9.10	Algorithme d'Alpha Shape.....	130
9.11	Illustration de l'algorithme d'Alpha Shape avec les panoramiques.....	131
9.12	Influence du paramètre α sur le graphe de panoramiques.....	132
9.13	Exemple de graphe de panoramiques.....	133
9.14	Influence de la réorganisation des sommets sur la matrice normale.	134
9.15	Étapes de l'algorithme pour calculer le recalage relatif.	136
9.16	Nombre de recalage 2x2 à calculer en fonction de la distance entre panoramiques.....	138
9.17	Zones d'études choisies pour tester notre algorithme de recalage.....	140
10.1	Principe de l'utilisation du relèvement et de contraintes relatives pour le recalage en absolu.....	143
10.2	Principe de l'utilisation des mesures images pour le recalage en absolu.	144
10.3	Zone d'expérimentation pour l'utilisation de points d'appui le long de la trajectoire.....	145
11.1	Illustration de l'intérêt de recalcr la trajectoire.....	147
13.1	Système idéal d'estimation de pose et de calcul de trajectoire.....	154
13.2	Principe de la compensation par blocs.....	154

Liste des tableaux

1.1	Véhicules de recherche en numérisation mobile.	3
1.2	Solutions professionnelles pour la numérisation mobile.	5
2.1	Spécification du système PosLV 220.	16
3.1	Formules générales des familles de distorsion.	36
3.2	Différence de calibration par rapport au choix du modèle de distorsion.	38
3.3	Caractéristiques des quatre caméras simulées (en pixels).	44
3.4	Valeurs des calibrations avec et sans parallaxe sur les données réelles et simulées.	52
4.1	Norme L_2 des résidus image par caméra, avant et après calibration.	63
4.2	Résultats sur le site de contrôle des méthodes « Off-Line » et « On-Line ».	75
5.1	Statistiques par caméra sur les points d'intérêt extraits.	84
5.2	Nombre de mesures homologues appariées bonnes et mauvaises en fonction du nombre de meilleurs voisins.	88
5.3	Résultats de la classification des mesures bonnes et mauvaises par SVM.	94
8.1	Écarts de positions sur les points de contrôle.	119
9.1	Statistiques sur les mesures à la fin du processus 2x2 en fonction du seuil minimum.	127
9.2	Influence de la réorganisation des sommets sur la matrice normale.	135
9.3	Ratio optimal entre les recalages 2x2 et la trajectoire.	139
9.4	Résidus sur les points de contrôle après recalage en fonction de la distance entre panoramiques.	139
9.5	Écarts en altitude entre les différentes trajectoires pour chaque zone.	141
10.1	Écarts de positions sur les points de contrôles.	144
10.2	Résidus sur les zones de contrôle terrain et image.	146

11.1 Récapitulatif des différentes techniques de recalages possibles..... 148

Première partie

Introduction

Chapitre 1

Révolution liée à la numérisation mobile

1.1 Numérisation mobile

1.1.a Définition

La numérisation 3D (Mobile mapping en Anglais) est la discipline qui permet de collecter de l'imagerie 3D et/ou lasers géoréférencés à partir de plates-formes mobiles pour répondre aux besoins de nombreuses applications qui sont listées ci-après.

C'est une méthode complémentaire aux systèmes traditionnels qui utilisent des technologies aériennes ou spatiales [McGlone et al., 2004]. En effet, à l'heure actuelle, il est très difficile de distinguer depuis le ciel le fond des rues dans les centres villes et de capturer les façades des bâtiments, notamment pour des applications de texturations fines et de modélisation détaillée. Ces dernières années, la prise de vue aérienne oblique s'est développée, par exemple [Petrie, 2009], mais ne permet pas d'imager le fond des rues en toute situation. Pour pallier ce problème avec les méthodes traditionnelles, il faudrait que les avions volent à très basse altitude. Ces conditions d'acquisition sont en pratique irréalisables :

- un volume de données à gérer très important (plusieurs centaines de GigaOctets),
- une autorisation de vol spécifique afin de voler très bas de plus en plus difficile à obtenir pour les agglomérations importantes.

La numérisation mobile est surtout l'aboutissement des progrès technologiques concernant :

le matériel informatique : accroissement des capacités de stockage¹ et de transfert² des données tout en étant de plus en plus légers, plus compactes et peu coûteux³.

l'instrumentation :

-
1. 50 Mo en 1990, 500 Mo en 1994, 20 Go en 2000 et 500 Go en 2007.
 2. port série RS232 : 15 Ko/sec, USB 1.0 [1996] : 1,5 Mo/sec, USB 2.0 [2000] : 60 Mo/sec , firewire 800 [2002] 100 Mo/s (Les dates sont données à titre indicatif et concernent la diffusion grand public. Des écarts peuvent être constatés entre les dates de finalisations des normes et les dates de premières fabrications ou d'utilisation).
 3. 10 €/ Mo en 1990, 0.02 €/ Mo en 2000, 0.00001 €/ Mo en 2012.

les capteurs images accroissement de la résolution, diminution du temps de pose, augmentation du rapport signal sur bruit et augmentation des cadences d'acquisition,

les capteurs lasers augmentation de la densité de points, de la précision de mesure et de la fréquence d'acquisition (aujourd'hui plusieurs centaines de Hz), capacité d'enregistrer plusieurs retours par mesure laser.

le positionnement : développement des réseaux de positionnement par satellites (appelés aussi GNSS pour Global Navigation Satellite System) ainsi que des réseaux permanents. Plusieurs systèmes existent à l'heure actuelle : le système américain GPS [Duquenne et al., 2005] [GPS, 2012], le système russe GLONASS [GLONASS, 2012] et le système européen GALILEO [Barlier, 2008], [GALILEO, 2012].

L'hybridation du GNSS avec d'autres capteurs (accéléromètres, gyromètres, magnétomètres) a aussi permis d'améliorer la position et l'orientation des systèmes de positionnement (méthode présentée dans [Duquenne et al., 2005] et de nombreuses solutions algorithmiques existent dans la littérature comme [Won et al., 2010]).

Toutes ces avancées ont permis de faciliter l'intégration des capteurs et des systèmes d'enregistrements sur des véhicules à des fins cartographiques. La section suivante présente quelques applications de la numérisation mobile.

1.1.b Applications de la numérisation mobile

La numérisation mobile permet de répondre à différents besoins comme :

La diffusion au grand public qui permet à chacun de naviguer de manière immersive dans des images comme Google Maps [Anguelov et al., 2010; Google, 2012] ou Microsoft Bing Carte StreetSide [Streetside, 2012]

La modélisation de la ville qui permet d'obtenir des modèles 3D fins de façades [Bénitez et al., 2010]. La société VirtuelCity [VirtuelCity, 2012] modélise les villes en 3D à la fois grâce à des données aériennes et terrestres, constitue des bases de données 3D urbaines : le produit Carto3D (en partenariat avec l'IGN) [Carto3D, 2012], et produit des ortho-photos de façades.

La restitution participative qui permet grâce à l'extraction d'objets⁴, de façon automatique ou manuelle, de localiser une multitude d'informations [Devaux et al., 2012],[Devaux et Paparoditis, 2010] puis de les mettre en base de données.

La cartographie 3D urbaine qui permet de représenter les informations nécessaires pour simuler l'impact de nouvelles technologies. Par exemple la société Siradel [SIRADEL, 2012] établit des cartes d'exposition de champs magnétiques et propose des améliorations de couverture de réseaux de téléphonie.

La numérisation du patrimoine routier avec par exemple la société Viametris [Viametris, 2012] ou encore Immergis [Immergis, 2013] qui numérisent et vérifient la cohérence de la signalisation routière entre une base de données routières et la réalité. Cela permet de mettre à jour, par exemple, les GPS d'aide à la conduite en corrigeant les limitations de vitesse et les sens uniques.

4. textes, mobilier urbain, marquages au sol, fenêtres, façades

1.1.c Limitations

La principale limitation des procédés actuels de numérisation mobile réside dans la qualité du géoréférencement absolu et l'interopérabilité automatique entre les données.

Réaliser ces opérations manuellement n'est ni optimal ni rentable à cause notamment du volume de données de plus en plus important. Comment réaliser ces opérations sur une ville de grande taille comme Paris et à quel coût ?

Après avoir introduit la notion de numérisation mobile, nous allons nous intéresser aux véhicules qui permettent de la réaliser.

1.2 Véhicules de numérisation mobile

La numérisation mobile a été initiée au début des années 1990 par [Schwarz et al., 1993] avec des travaux sur le couplage GPS/INS/images. Le but de ces travaux était d'améliorer la localisation de véhicules en mouvement en utilisant l'image en plus du GPS et de l'INS. En effet une caméra permet de calculer des déplacements relatifs lors de passages multiples sur une même zone (carrefours, intersections), ce que ne peuvent pas faire les capteurs GPS/INS qui ne font que des successions de mesures temporelles. Ensuite de nombreuses équipes de recherches se sont équipées de véhicules pour répondre à différentes problématiques en intégrant différents capteurs pour répondre à différents besoins. Le tableau 1.1 présente quelques véhicules de recherche ainsi que leurs applications. Pour compléter cet inventaire le lecteur pourra se référer à ceux réalisés par [Ellum et El-Sheimy, 2002], [Peter et al., 2004] ou encore [Tao et Li, 2007].

Nom du Véhicule	Institut	Applications	Publication
VISAT	Laval, Canada	<ul style="list-style-type: none"> • Cartographie • Levés 	[Schwarz et al., 1993], [El-Sheimy, 1996]
GPSVan	Ohio State University, E.U.	<ul style="list-style-type: none"> • Cartographie • Levés 	[Grejner-Brzezinska, 1996]
PhotoBus	EPFL, Suisse	<ul style="list-style-type: none"> • Levés d'axes routier 	[Gontran et al., 2005]
Stéréopolis 1 et 2	IGN, France	<ul style="list-style-type: none"> • Estimation de trajectoire • Modélisation 3D • Extraction d'objets 	[Paparoditis et al., 2005] [Paparoditis et al., 2012]
Lara3D	Mines de Paris, France	<ul style="list-style-type: none"> • Estimation de trajectoire • Modélisation de route 	[Goulette et al., 2006]
Pacpus	UTC, France	<ul style="list-style-type: none"> • Navigation autonome 	[UTC, 2012]
Road-Scanner	Bologne, Italie	<ul style="list-style-type: none"> • Cartographie • Levés 	[Gandolfi et al., 2008]
KITTI car	KIT, Allemagne	<ul style="list-style-type: none"> • Corrélation dense • Extraction d'objets • Flot optique 	[Geiger et al., 2012]

TABLE 1.1 – Véhicules de recherche en numérisation mobile.

Aujourd'hui, de nombreuses solutions commerciales existent aussi bien pour le système

de calcul de trajectoire que pour les capteurs image et/ou laser. Certaines fournissent des véhicules n'ayant que des capteurs lasers [Puente et al., 2011], d'autres ne produisent que des images [Petrie, 2010]. Enfin certains contiennent les deux technologies [Petrie, 2010]. Ces différences de conception sont dues principalement à l'utilisation finale des données : pour des applications de métrologie (extraction de pentes, de modèles numériques de surface et extraction automatique d'objets), les lasers sont suffisants ; pour des applications de navigation et d'extractions et de reconnaissance d'objets, l'image devient nécessaire (identification de panneaux de direction par exemple). Le tableau 1.2 présente quelques systèmes constructeurs avec les technologies et les applications potentielles prévues.

Tous ces véhicules sont munis d'un système de positionnement (GPS/INS) capable de le positionner dans une rue avec une précision métrique, par contre peu de solutions utilisent la redondance d'information pour améliorer le positionnement. Autrement dit deux acquisitions réalisées dans la même rue ne seront pas directement superposables et il faudra une opération de recalage pour pouvoir les utiliser conjointement. D'autre part, les précisions de positionnement sont indiquées lorsque la réception GPS est optimale (pertes de signaux GPS sur des laps de temps très courts), ce qui n'est généralement pas le cas surtout en milieu urbain.

1.3 Types et utilisations des données

Nous allons maintenant nous intéresser aux différents types de données ainsi qu'à leurs utilisations. Nous ferons la différence entre les technologies laser et image qui ont leurs propres usages.

1.3.a Lasers

Les données lasers obtenues par les systèmes d'acquisition ont différents usages. L'un d'eux est la visualisation (figure 1.1.a). Un autre concerne la détection et la mesure d'objets (figure 1.1.b) : largeur de route, hauteur de pont, gabarit urbain ou la reconnaissance d'objets (piétons, poteaux...). Lorsque le laser peut acquérir un objet en entier dans un laps de temps très court, la précision est directement liée à la précision intrinsèque du laser (de l'ordre du centimètre [Riegl, 2013], [Velodyne, 2012]). Lorsque l'objet ne peut pas être mesuré sur une même acquisition, le véhicule doit effectuer plusieurs passages successifs avec un écart temporel conséquent (plusieurs dizaines de secondes). La précision attendue dépend alors directement de celle du système de positionnement.

1.3. Types et utilisations des données

Société	Véhicule	Capteurs	Applications
Google Car [Anguelov et al., 2010]		<ul style="list-style-type: none"> • GPS • IMU • odomètre • 2 lasers • 8 caméras 	<ul style="list-style-type: none"> • Visualisation 3D
Optech [Ussyshkin, 2009]		<ul style="list-style-type: none"> • GPS • IMU • 3 lasers • (4 caméras) 	<ul style="list-style-type: none"> • Modélisation 3D
RIEGL VMX-450 [Riegl, 2012]		<ul style="list-style-type: none"> • GPS • IMU • odomètre • 2 lasers • (6 caméras) 	<ul style="list-style-type: none"> • Modélisation 3D
Street Mapper [StreetMapper, 2012]		<ul style="list-style-type: none"> • GPS • IMU • 2 lasers • 2 caméras 	<ul style="list-style-type: none"> • Modélisation 3D • Classification • Levés d'objets
TopCon [TopCon, 2012]		<ul style="list-style-type: none"> • GPS • IMU • odomètre • 2 lasers • caméra 360° 	<ul style="list-style-type: none"> • Modélisation 3D • Levés d'objets
Trimble MX8 [Trimble, 2012]		<ul style="list-style-type: none"> • GPS • IMU • odomètre • 2 lasers • 4 caméras 	<ul style="list-style-type: none"> • Modélisation 3D • Levés d'objets • Inspection routière
Siteco [Siteco, 2012]		<ul style="list-style-type: none"> • GPS • IMU • odomètre • 3 lasers • 8 caméras • 1 profilomètre 	<ul style="list-style-type: none"> • Modélisation 3D • Levés d'objets

TABLE 1.2 – Solutions professionnelles pour la cartographie mobile. Les capteurs entre parenthèse signifient qu'ils sont en option.

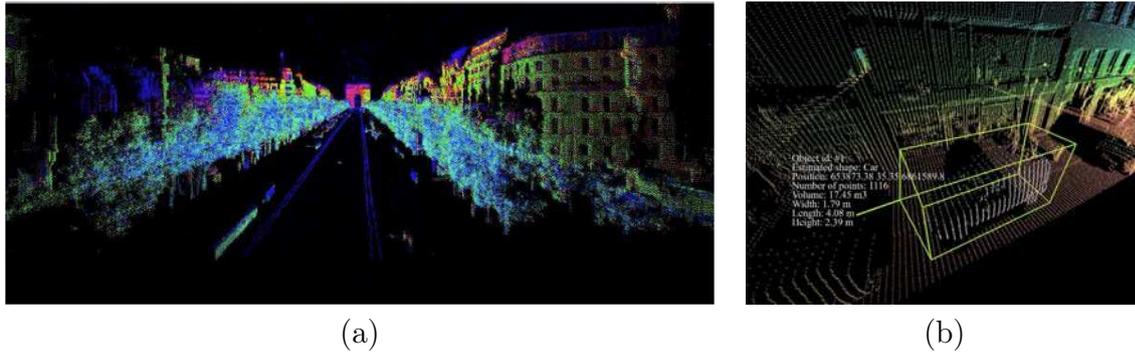


FIGURE 1.1 – Exemple de données laser. (a) Visualisation de nuages sur les Champs-Élysées à Paris. (b) Mesures de volumes à partir des données lasers [Paparoditis et al., 2012].

1.3.b Images

Les images acquises pour la numérisation mobile ont différents usages. Le premier est un usage de visualisation. Pour cette application, il suffit de connaître la topologie⁵ des images pour pouvoir naviguer de manière fluide dans les données. On peut citer par exemple Google qui diffuse ses données dans son système GoogleStreetView [Google, 2012] ou encore Itowns [Devaux et Paparoditis, 2010] (figure 1.2.a). Le second usage concerne l'enrichissement de modèles existants c'est-à-dire bénéficier de la résolution des images acquises depuis la rue afin de plaquer ses textures sur des modèles 3D fabriqués soit à partir d'images aériennes (figure 1.2.b), ou de plans topographiques. Pour ce dernier usage, une précision absolue et relative de l'ordre du centimètre est souhaitée. De même qu'il est nécessaire de pouvoir mettre en cohérence des missions acquises à des époques différentes afin de pouvoir faire de la détection de changements.

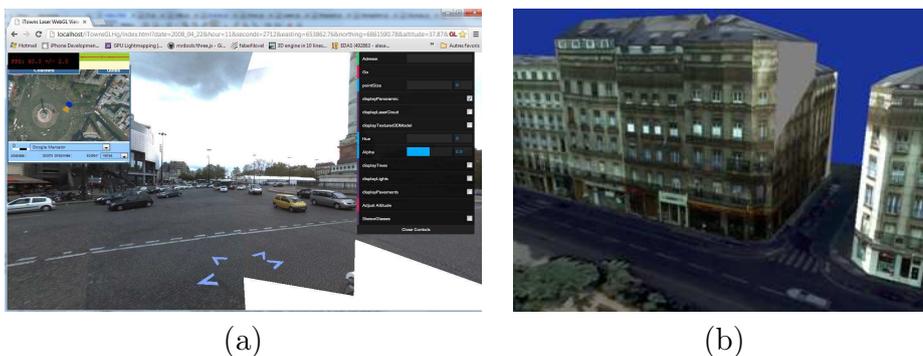


FIGURE 1.2 – Utilisations des données image. (a) visualisation à travers le web (source [Devaux et Paparoditis, 2010]). (b) modèle généré et texturé à partir d'images.

Après avoir présenté la numérisation mobile dans son ensemble nous allons nous intéresser au contexte de cette thèse qui est la création et l'utilisation d'un véhicule de numérisation mobile à l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière.

5. quelle(s) image(s) se trouve(nt) avant et/ou après celle que je suis en train de visualiser.

Chapitre 2

Contexte

2.1 Utilisation de la numérisation mobile par l'IGN

« L'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN) a pour vocation de décrire, d'un point de vue géométrique et physique, la surface du territoire national et l'occupation de son sol (...) »¹ Les images aériennes sont le support qui permet de cartographier le territoire et de mettre à jour les bases de données 2D et 3D. Celles-ci sont acquises par des caméras numériques embarquées dans des avions. Les différents processus de la chaîne production photogrammétrique (compensation par faisceaux, restitution, corrélation) permettent d'extraire les données utiles pour réaliser des cartes. L'informatisation des processus de traitements a conduit à la création des bases de données 3D mais toujours à partir de données aériennes. Ces dernières années, les modèles 3D se sont développés, à la fois pour de la visualisation mais aussi pour réaliser des simulations (bruit, implantation de relais téléphonique...). L'IGN, grâce au produit Bati3D [IGN, 2013], a pu répondre en partie à cette demande pour un nombre limité de villes. Le principal inconvénient de ce produit réside dans le fait qu'il est fabriqué à partir d'images aériennes ce qui ne permet pas de modéliser finement les façades (emprise au sol, balcon, décrochement du toit...). Afin de pallier cette difficulté et d'enrichir ses bases de données, le laboratoire MATIS, un des quatre laboratoires de recherche de l'IGN² a développé un véhicule capable d'acquérir les données depuis la rue afin de compléter les images aériennes : le système d'acquisition **Stéréopolis**. Ce projet va être décrit de manière détaillée dans la section suivante.

1. Décret 2011-1371 du 27 octobre 2011.

2. Le service de la recherche de l'IGN comporte 4 laboratoires spécialisés chacun sur une thématique précise :

COGIT Conception Objet et Généralisation de l'Information Topographique, spécialisé en Systèmes d'Information Géographique et Cartographie

LAREG Laboratoire de Recherches en Géodésie

LOEMI Laboratoire d'Opto-électronique et de Micro-Informatique, spécialisé en Instrumentation

MATIS Méthodes d'Analyses pour le Traitement d'Images et la Stéréorestitution, spécialisé en Photogrammétrie et traitement d'images

.

2.2 Stéréopolis

Dans cette section, nous allons présenter l’historique du projet puis nous présenterons le véhicule actuel, dont les données ont été utilisées durant cette thèse.

2.2.a Historique

Le premier véhicule Stéréopolis a été réalisé au début des années 2000. L’objectif était de créer un nouvel outil d’acquisition capable, grâce aux données acquises, d’enrichir les bases de données existantes³ et de créer un Référentiel à Grande Échelle (RGE) nouvelle génération contenant par exemple les hauteurs de trottoir, le mobilier urbain (poteaux, bancs, arrêts de bus) ou le positionnement précis des adresses. Les caméras numériques développées au laboratoire LOEMI de l’IGN étaient suffisamment abouties pour pouvoir les disposer sur un véhicule munis de mâts (cf. figure 2.1). Elles disposaient d’une grande résolution (pour l’époque) de 16 Méga pixels et une dynamique de 12 bits [Thom et Souchon, 1998, 2001]. La figure 2.1 présente le Stéréopolis V1. Le positionnement des images était assuré uniquement par GPS (les antennes sont visibles sur la figure 2.1 aux sommets des mâts). Le véhicule comportait quatre caméras réparties en deux bases stéréoscopiques :

- Arrière permettant la mesure d’objet sur la chaussée,
- Latérale permettant la mesure d’objet sur les façades.

De nombreux travaux ont été fait à partir des données acquises par le véhicule :

- [Bentrah et al., 2004] reconstruit la géométrie d’acquisition de séquences d’images acquises par le véhicule en milieu urbain,
- [Pénard et al., 2005] reconstruit des surfaces de façades et de rues en utilisant la corrélation dense multi-vues,
- [Soheilian et al., 2010] extrait et reconstruit des marquages au sol (passages piétons) en 3D,
- [Paparoditis et al., 2005] propose ce que devrait être une chaîne de traitements optimale, qui permet de réaliser l’acquisition de données jusqu’à la mise en base de données d’objets extraits.

Les limitations de ce premier véhicule étaient :

- La fréquence d’acquisition des caméras peu élevée⁴ (une image toute les trois secondes pour 16 Méga pixels⁵) ce qui ne permet pas de circuler dans des conditions de trafic normales (pour assurer le recouvrement entre images, les images doivent être prises tous les 4 mètres donc le véhicule doit rouler à moins de 10 km/h).
- Pas de capteurs lasers. La technologie n’était encore pas mature et très onéreuse.

Après ce premier prototype et les résultats prometteurs des travaux réalisés, le MATIS s’est lancé dans le développement d’un second véhicule spécialement conçu pour la numérisation mobile en 2007 : le Stéréopolis V2 [Paparoditis et al., 2012]. Sur la figure 2.2,

3. BD ORTHO, BD TOPO, BD ALTI, BD ADRESSE, BD PARCELLAIRE.

4. La fréquence d’acquisition dépend de la vitesse du véhicule et de la distance de l’objet à imager. Dans le cas aérien, l’avion vole vite mais l’altitude de vol est elle aussi élevée. Dans le cas terrestre, le véhicule doit avoir une vitesse adaptée pour la circulation, mais avec des objets pouvant être très proche.

5. Aujourd’hui la caméra numérique V2 du LOEMI permet de prendre des images toutes les 1,5 seconde à une résolution de 39 Méga pixels [Souchon et al., 2012].



FIGURE 2.1 – Stéréopolis V1.

nous pouvons voir le véhicule avec ses capteurs (ils sont décrit individuellement dans la section suivante).

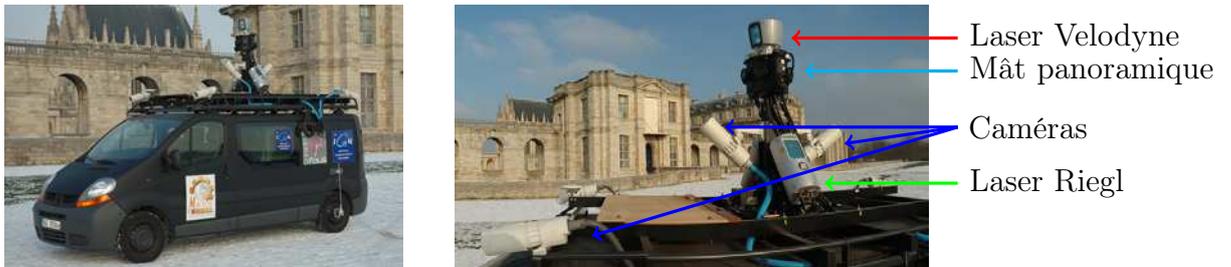


FIGURE 2.2 – Le véhicule Stéréopolis V2 et ses capteurs.

Après avoir présenté l'historique du projet et le véhicule actuel, nous allons maintenant nous intéresser plus particulièrement à ses capteurs.

2.2.b Capteurs du système Stéréopolis V2

2.2.b.i Lasers

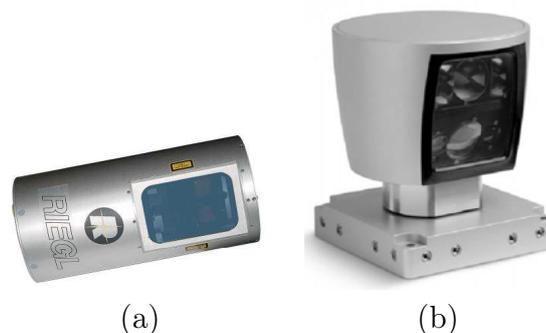


FIGURE 2.3 – Capteurs laser du Stéréopolis V2. (a) Laser RIEGL LMS-Q120i. (b) Laser Velodyne HDL-64E.

Il y a tout d'abord deux lasers RIEGL LMS-Q120 (figure 2.3.a) qui sont des lasers à balayages plans. Ils peuvent scanner sur un champ de 80° avec une résolution angulaire allant de 100 à 400 points par balayage, la fréquence d'acquisition étant fixe (10 kHz). Ce type de laser permet de faire de la numérisation précise de l'environnement : sa densité de scanner étant plus importante. La figure 2.4 représente une partie d'une acquisition. Chaque laser est représenté par une couleur.

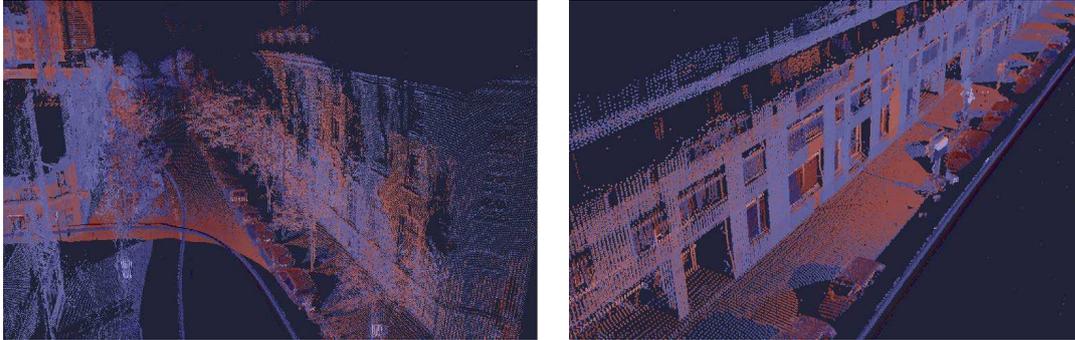


FIGURE 2.4 – Exemples de données acquises simultanément par deux Riegl plans. Chaque laser étant représenté par une couleur.

Il y a aussi un laser Velodyne HDL-64E (figure 2.3.b) qui est un laser multi-fibres (64 fibres) qui tourne sur lui même entre 5 et 15 Hz. Il permet d'acquérir 1,3 million points par seconde (cf. figure 2.5) ce qui représente un volume de données très important. Ce type de laser permet de faire de la détection d'objet mobile parce qu'il numérise rapidement et plusieurs fois les mêmes zones.

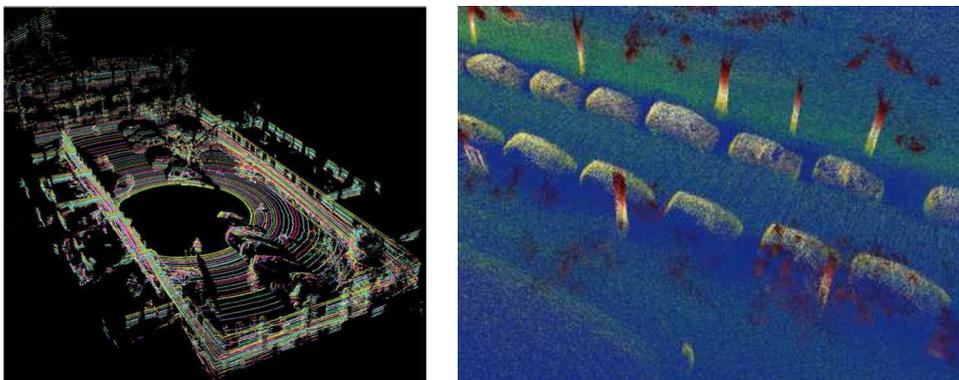


FIGURE 2.5 – Exemples de données acquises par le LiDaR Velodyne HDL-64E.

2.2.b.ii Caméras

Il y a plusieurs façons de répartir spatialement les caméras sur un véhicule en fonction des applications.

La première consiste à disposer toutes les caméras afin d'obtenir un minimum de recouvrement et d'imager tout l'environnement du véhicule (figure 2.6 a et b) (par exemple [Anguelov et al., 2010]). La stéréoscopie est assurée grâce au déplacement du véhicule. L'intérêt de ce type de configuration est principalement la visualisation. Un inconvénient est la difficulté à obtenir de la stéréoscopie dans le sens de déplacement à cause

des véhicules de la circulation qui masquent des portions de chaussée différentes d'une panoramique⁶ à l'autre.

Afin de pallier ce problème, les caméras peuvent être positionnées par paire stéréoscopique : deux caméras (ou plus) imagent la même scène (figures 2.6 c et d). Le premier avantage est d'avoir directement une mesure 3D possible et/ou de générer directement le modèle 3D par corrélation (par exemple [Geiger et al., 2012]). Le second avantage concerne la synchronisation : les images sont prises en même temps donc il n'y a pas d'objet se déplaçant dans la scène, ce qui évite des erreurs lors de processus d'appariement ou de corrélation par exemple. Par contre, l'inconvénient de cette méthode est de doubler le nombre de caméras.

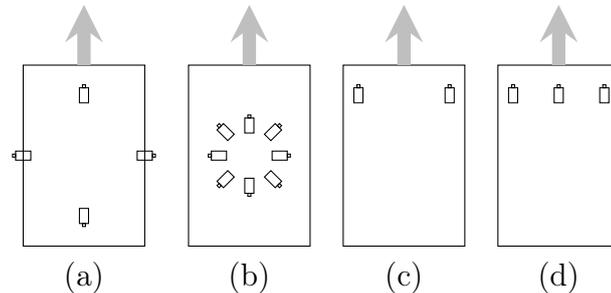


FIGURE 2.6 – Configurations possibles de disposition de caméras sur un véhicule de numérisation mobile. Les dispositions (a) et (b) permettent d'imager tout l'environnement du véhicule. Les configurations (c) et (d) avec une ou deux paires stéréoscopiques permettent une reconstruction 3D immédiate.

Sur un véhicule de numérisation mobile, la puissance électrique est limitée. On ne peut donc pas installer des dizaines de caméras ainsi que des ordinateurs permettant de les piloter et de stocker les données. En fonction des applications pour lesquelles le véhicule a été conçu, il faut faire des choix concernant le nombre de capteurs et leur disposition.

Concernant Stéréopolis V2, il avait été choisi de les disposer comme illustré sur la figure 2.7. Deux bases stéréoscopiques à l'avant (positions 11 et 12) et à l'arrière (positions 51 et 52) permettent d'imager la chaussée devant et derrière. Une tête panoramique placée en haut d'un mât, constitué de dix caméras (positions 21, 22, 23, 31, 32, 33, 34, 41, 42, 43), permet d'imager tout l'environnement. La stéréoscopie latérale étant assurée par l'avancement du véhicule ce qui est peu contraignant vu que les objets mobiles sont moins nombreux sur les côtés.

Les seize caméras du Stéréopolis V2 ont une résolution de 2 Méga pixels (1948×1080) (cf. figure 2.8)⁷. La figure 2.9 présente trois exemples d'images acquises par la tête panoramique. Pour une rue très étroite (cf. figure 2.9.a), le recouvrement entre les images est réduit à quelques pixels. La seconde panoramique, (cf. figure 2.9.b) présente une rue à double sens dans des conditions d'éclairage normal et avec des immeubles de taille moyenne. On constate que les caméras latérales hautes photographient le ciel pour près de 30%. La dernière panoramique, (cf. figure 2.9.c) présente une place dégagée. La caméra latérale gauche ne voit que du ciel, ce qui peut poser des problèmes pour l'appariement et pour l'estimation de pose si on la considère indépendamment des autres.

6. Une panoramique est l'ensemble des images prise par le véhicule à un instant donné.

7. Contrairement au Stéréopolis V1, ces caméras sont des produits du commerce (caméra Pike).

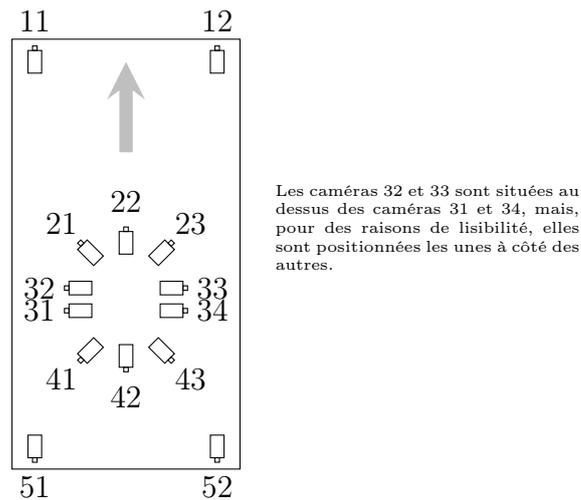


FIGURE 2.7 – Disposition des caméras sur le véhicule.



FIGURE 2.8 – Caméras du Stéréopolis V2. (a) Caméra droite. (b) Caméra coudée à 90 degrés.

Pendant toute une acquisition, le temps de pose est constant pour chaque caméra et il est fixé pour toute l'acquisition, ce qui est possible grâce à la grande dynamique des caméras. Cela permet par contre d'avoir une homogénéité colorimétrique entre les images même si on constate parfois qu'une partie des images est surexposée à cause du soleil tandis que d'autres sont sombres à cause des ombres.

Après avoir présenté les capteurs, nous allons maintenant nous intéresser aux applications pour lesquelles il a été conçu.

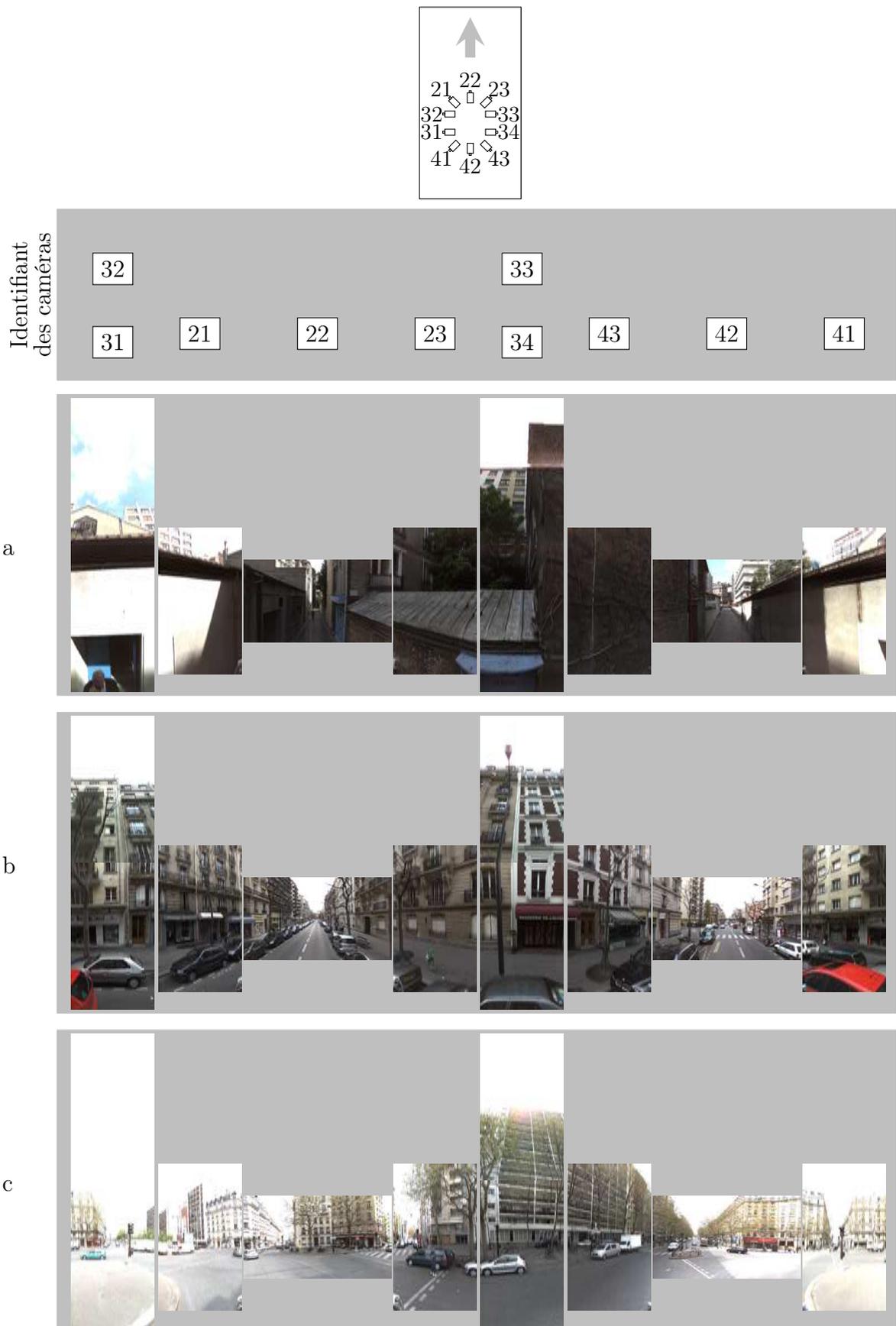


FIGURE 2.9 – Exemples de panoramiques. (a) Rue à une voie. (b) Rue à deux voies. (c) Place dégagée.

2.2.c Applications du Stéréopolis V2

2.2.c.i Lasers

Ces lasers plans, comme le Riegl, peuvent être utilisés dans différents contextes : pour l'extraction d'objets verticaux (poteaux) [Liberge et al., 2010], l'extraction de végétation [Monnier et al., 2012], l'extraction et la modélisation de façades [Demantké et al., 2012], ou encore l'analyse du sol (chaussée et trottoir) pour étudier l'accessibilité [Serna et Marcotegui, 2013] .

L'utilisation de laser rotatifs, comme le Velodyne, est la détection d'obstacles en robotique [Urmson et al., 2008] et, dans un contexte de cartographie, de faciliter la détection d'objets mobiles afin de les enlever de la scène lors de texturation (piétons, voitures...) [Spinello et al., 2010].

Dans cette partie, nous présentons le véhicule Stéréopolis dans son ensemble. Pour certaines applications, mise à jour de base de données par exemple, les données laser ne sont pas nécessaires. C'est pourquoi, dans le cadre de cette thèse, nous n'avons considéré que le système image. Pour l'utilisation de données laser le lecteur peut se référer à [Gressin et al., 2012] pour le géoréférencement en absolu et à [Monnier et al., 2013] pour le recalage sur modèles 3D urbain.

2.2.c.ii Images

Les données images peuvent d'abord servir à de la visualisation [Devaux et Paparoditis, 2010]. Ensuite, de nombreux objets peuvent être extraits automatiquement comme les panneaux routiers [Arlicot et al., 2009], les passages piétons [Soheilian, 2008], les marquages aux sols [Soheilian et al., 2010], les piétons pour de l'anonymisation [Devaux et al., 2009] ou encore les façades [Haugeard et al., 2009]. Enfin des travaux sur les calculs de visibilité et de texturation sont réalisés [Vallet et Houzay, 2011], à la fois à des fins de visualisation et d'enrichissement de modèles 3D.⁸

Après avoir présenté les capteurs spécifiques à l'acquisition de données, nous allons nous intéresser au système de positionnement qui permet de géoréférencer toutes les données acquises par le véhicule.

2.2.d Système de positionnement

Nous allons dans un premier temps nous intéresser aux capteurs propres au système de positionnement puis nous expliciterons le principe de fonctionnement du système. Enfin nous étudierons ses spécifications.

2.2.d.i Composants

Le système de positionnement utilisé sur le Stéréopolis V2 est une solution propriétaire : le PosLV 220 de la société Applanix/Trimble. Il est constitué :

8. Les applications autour du véhicule ont principalement été développées au MATIS.

d'une centrale inertielle qui comporte 3 accéléromètres, 3 gyromètres et 3 magnétomètres (figure 2.10.a). Elle permet de déterminer l'attitude du véhicule à tout instant et d'aider au positionnement lorsque la réception des signaux GPS est momentanément suspendue.

de deux GPS, le premier servant à calculer la position tandis que le second sert à déterminer le cap (figure 2.10.b)

d'un odomètre qui permet de déterminer la distance parcourue (figure 2.10.c)



FIGURE 2.10 – Capteurs du système de positionnement PosLV 220.

Le protocole, défini par Applanix, pour garantir un positionnement optimal (avec notre système de positionnement) consiste à stationner sur une zone dégagée au début et à la fin de l'acquisition pendant cinq minutes afin de capter le maximum de satellites en évitant les masques et les multi-trajets⁹.

Nous n'avons pas indiqué les précisions de chaque composant parce que la précision globale du système (décrit en 2.2.d.iii) dépend à la fois des composants et des algorithmes de traitements des données. Ceux utilisés par notre système sont décrits ci-après.

2.2.d.ii Principe de fonctionnement

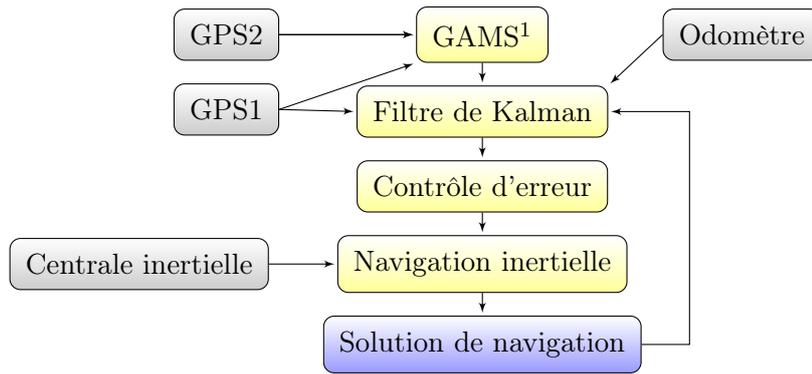
Le système de positionnement a deux modes de fonctionnement :

- Le premier est le mode "temps réel" : il correspond aux données directement accessibles dans le véhicule. Le principe de la fusion de données réalisées [Farrell et Barth, 1999], [Qi et Moore, 2002] est expliqué dans la figure 2.11. Cette étape est réalisée par le logiciel *POSland* de la société Applanix.
- Le second est le mode "post-traitement" qui permet d'intégrer les données d'une station GPS permanente dédiée au chantier ou appartenant au Réseau GNSS Permanent (RGP)¹⁰ de l'IGN lors du calcul. Un algorithme de fusion de données [Farrell et Barth, 1999] détermine alors la trajectoire du véhicule. Ce calcul est réalisé par le logiciel *POSPacTM Mobile Mapping Suite* de la société Applanix.

On constate, grâce à ce schéma (cf. 2.11), qu'il y a des paramètres dans ce type d'algorithme à la fois pour le contrôle des erreurs mais aussi dans les différentes pondérations du filtrage de Kalman [Kalman, 1960] et dans la fusion des différentes sources de données.

9. Les multi-trajets se produisent lorsqu'il y a des obstacles (bâtiments, murs) qui réfléchissent les signaux GPS. Ces réflexions augmentent le temps de parcours des signaux, donc perturbent le calcul de distances servant au calcul de localisation.

10. « Le RGP est, à l'origine un réseau de stations GPS permanentes enregistrant au minimum les données de code et de phase provenant de l'ensemble des satellites en visibilité. Aujourd'hui, de plus en plus de stations du réseau sont bi-constellations (GPS+GLONASS) en attendant l'arrivée prochaine de Galileo. » site <http://rgp.ign.fr/>.



1. GPS Azimuth Measurement Subsystem (*Calcul de cap par GPS*)

FIGURE 2.11 – Schéma de la procédure de géoréférencement en temps réel.

Ces pondérations sont définies dans les différents logiciels et ne sont pas accessibles. En effet, elles dépendent des précisions des différents capteurs et des algorithmes utilisés. Nous avons donc une seule trajectoire à notre disposition : la trajectoire post-traitée.

2.2.d.iii Spécifications

D’après les spécifications annoncées par le constructeur (cf. tableau 2.1), la précision dépend de la présence ou non de données GPS (précision divisée par 10 en planimétrie). Elles sont à relativiser car l’erreur sur le positionnement n’est pas une fonction linéaire du temps. En effet, la position en absence de signaux GPS est estimée grâce à une double intégration des données des accéléromètres et des gyromètres. En pratique, surtout dans les centres-villes, les masques GPS peuvent durer plusieurs minutes en raison de l’étroitesse des rues et de la hauteur des immeubles.

	Avec GPS	Après 1 minute de masque GPS
Position X,Y (m)	0,020	0,240
Position Z (m)	0,050	0,130
Roulis et Tangage (°)	0,020	0,060
Cap (°)	0,025	0,030

TABLE 2.1 – Spécification du système PosLV 220 (calcul différentiel en post-traitement) [Applanix, 2012].

Exemple d’un chantier standard L’histogramme de répartition du nombre de panoramiques en fonction du nombre de satellites sur un chantier standard¹¹ (figure 2.12) montre que :

- 50 % des panoramiques ont moins de 4 satellites pour se positionner¹²
- plus de 4 % ne voient aucun satellite

11. Acquisition réalisée dans des conditions de circulation normale alternant zones de masques GPS et zones dégagées en zone de type urbain dense.

12. Quatre étant le nombre de satellites minimums nécessaires pour déterminer une position (3 pour la position et 1 pour estimer le biais d’horloge du récepteur) (cf. [Duquenne et al., 2005]).

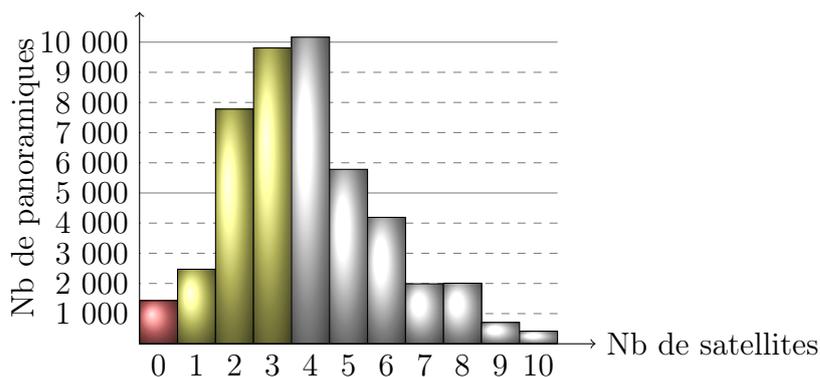


FIGURE 2.12 – Histogramme représentant le nombre de panoramiques en fonction du nombre de satellites GPS visibles pour un chantier standard.

Sur une acquisition type, le temps d’absence de signal GPS dépend de l’environnement où le véhicule circule. La figure 2.13 présente le nombre de satellites en fonction du temps sur 5 tronçons linéaires extraits d’une campagne d’acquisition sur le XII^e arrondissement de Paris. Un trajet dans des rues avec peu de bâtiments permet de capter beaucoup de satellites (figure 2.13 courbe rouge). Les trajets en milieu urbain dense captent souvent moins de quatre satellites sur des intervalles de temps pouvant dépasser la minute (figure 2.13 courbes bleues et jaune). On constate aussi que la durée d’absence de signal peut être bien supérieure à une minute, ce qui fait que le système est utilisé au delà des spécifications présentées dans le tableau 2.1.

2.2.d.iv Conclusion

Le système de positionnement à notre disposition permet d’avoir une solution initiale pour nos applications, mais il ne peut pas répondre à nos besoins directement : sa précision n’est pas suffisante (plutôt métrique que centimétrique) et il est souvent sollicité au delà de ses spécifications.

Après avoir présenté le véhicule, ses capteurs et son utilisation, nous allons présenter les motivations pour notre travail de thèse.

2.3 Motivations

Dans un contexte de création d’un Référentiel à Grande Échelle Urbain (RGEU), la précision de positionnement devra être sub-décimétrique. Ce RGEU pourrait contenir : les hauteurs de ponts, les largeurs de rues, les passages piétons, les panneaux de signalisation, les trottoirs (hauteur, passages bateaux), les plaques adresses ou encore le mobilier urbain. Il pourrait servir notamment à l’aménagement du territoire, aussi bien de manière globale (aménagement de boulevard, implantation de stade...) ou de manière locale (implantation d’arrêt de bus, de poteaux téléphoniques...), pour des services aux particuliers : calcul d’itinéraires pour les personnes à mobilité réduite, les poussettes ou des services pour les entreprises : planification d’itinéraires pour les convois exceptionnels, gabarit des emplacements de livraisons...

Dans un contexte de mise à jour et d’entretien de ce RGEU, nous devons pouvoir

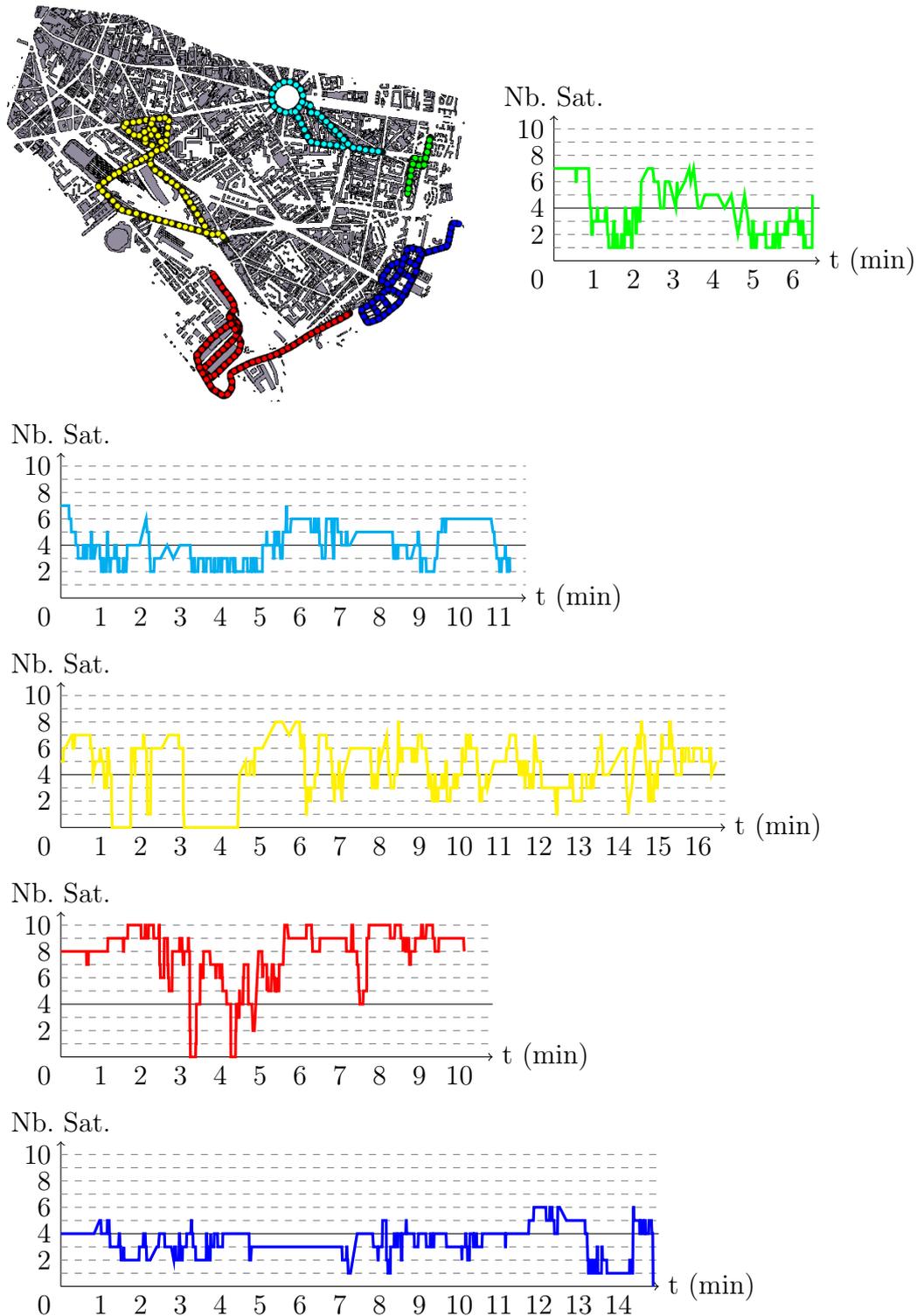


FIGURE 2.13 – Nombre de satellites visibles en fonction du temps pour 5 trajectoires linéaires.

recaler toutes nouvelles acquisitions avec une précision identique à l'acquisition initiale, de l'ordre du centimètre. Nous pouvons aussi vouloir intégrer des données images d'utilisateurs privés ou publics afin de compléter la base existante ou de mettre en cohérence la base utilisateur avec le RGEU.

La section suivante présente une analyse sur les données disponibles pour cette thèse.

2.4 Présentation des données utilisées dans la thèse

2.4.a Données véhicule

2.4.a.i Chantiers disponibles

Dans cette thèse, nous avons eu accès à plusieurs jeux de données et à deux configurations différentes du véhicule.

Le premier jeu de données concerne le chantier du XII^e arrondissement de Paris acquis en 2008. Il est représentatif d'une acquisition standard (chantier type réalisé par le véhicule). Il est composé de 46750 panoramiques¹³. Cela correspond à une acquisition de 2 jours pleins.

Le second jeu de données concerne le chantier de la mairie du XII^e arrondissement de Paris. Il est composé de 1617 panoramiques acquises durant une unique journée en 2009. Plusieurs passages successifs ont été réalisés autour de la mairie du XII^e arrondissement.

2.4.a.ii Analyse des données

Dans la sous-section 2.2.d {page 14}, les spécifications du système de positionnement données par le constructeur ont été explicitées. Maintenant une analyse des données réelles acquises va être faite afin de voir si les spécifications sont valables et si les incertitudes données pour chaque position sont fiables.

Nous différencions deux cas : le cas relatif et le cas absolu. Ces notions sont reprises de la géodésie et de la photogrammétrie. Nous donnons les définitions dans les paragraphes suivants.

En relatif. La notion de "relatif" correspond à la cohérence de répétitivité des données : quels écarts y-a-t-il lorsque le véhicule passe plusieurs fois au même endroit (durant la même acquisition ou plusieurs acquisitions successives) ? Pour pouvoir répondre, nous avons identifié plusieurs zones dans le XII^e arrondissement de Paris (points de couleurs sur la figure 2.14), qui sont des échantillons représentatifs d'une acquisition.

Nous avons ensuite tracé pour chaque zone des courbes représentant la différence entre l'altitude du système de positionnement et le sol, en fonction de la distance à la zone considérée pour différents passages (figure 2.15). Chaque passage est relié par une ligne. Plusieurs remarques peuvent être faites sur ces tracés :

- sur une même trajectoire, l'altitude du camion est constante ce qui signifie qu'il n'y a pas de "saut" dans la trajectoire : elle est cohérente (lignes continues sur les graphiques de la figure 2.15).
- entre différents passages, on constate qu'il peut y avoir des écarts de plusieurs mètres entre les différentes trajectoires (figures 2.15.c,d,e,f,h,i et k). De gros problèmes de

13. Images de toutes les caméras acquises au même instant.



FIGURE 2.14 – Zones d'évaluation de la précision relative du système. La ligne correspond aux trajets effectués par le véhicule. Chaque point de couleurs correspond à une zone d'étude.

cohérence entre les données provenant de différentes trajectoires sur une même zone sont donc présents.

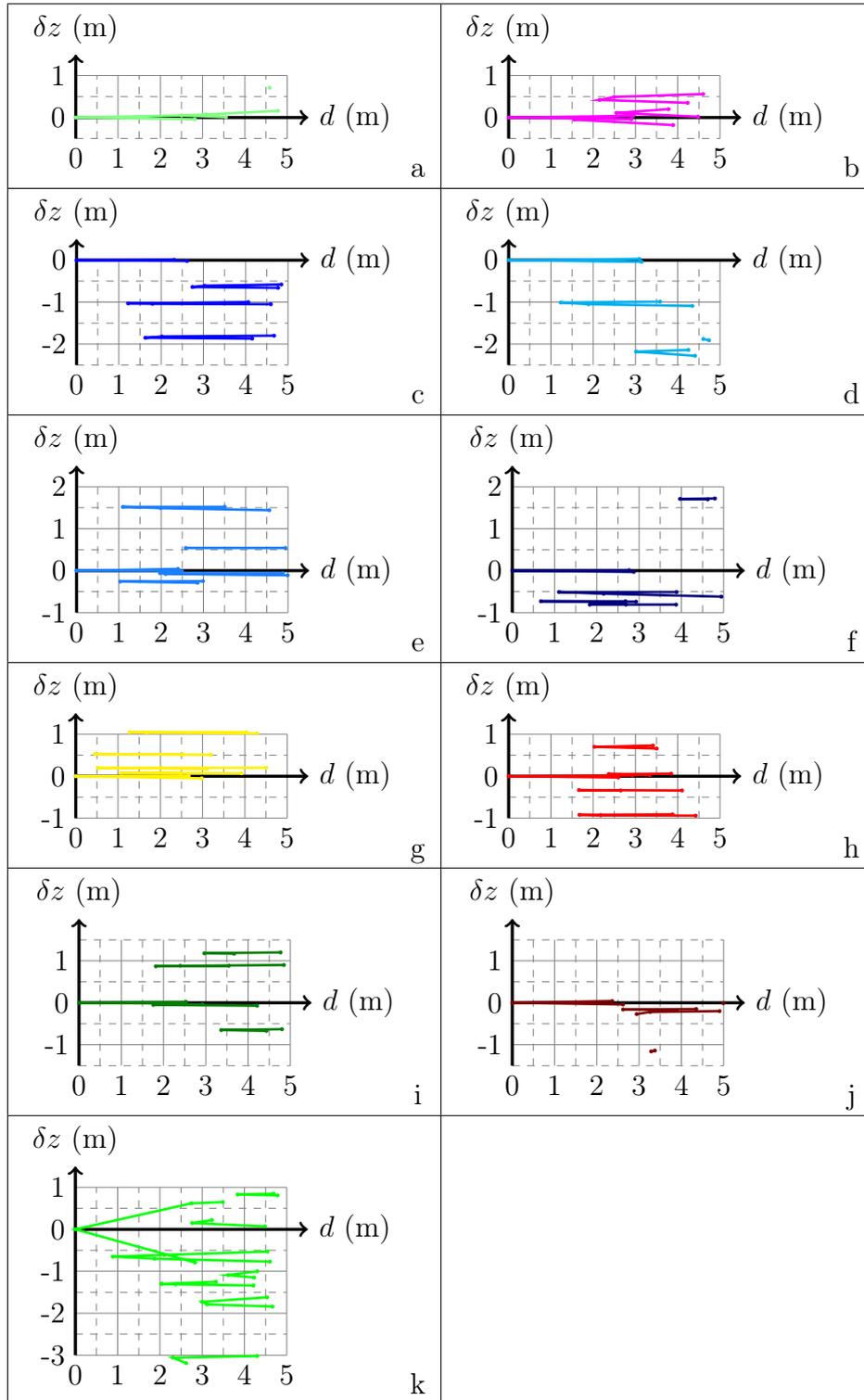


FIGURE 2.15 – Écarts en altitude entre les différentes trajectoires pour chaque zone. En abscisse : distance à la zone considérée. En ordonnée : différence d'altitude entre les passages. Chaque couleur correspond à une zone reportée sur le plan 2.14.

En absolu. La notion "d'absolu" signifie l'écart entre les données fournies par le système de positionnement et des données externes (borne géodésique, levé terrain...) dont la précision est maîtrisée (ici mieux que le centimètre, cf section 2.4.b {page 24}).

La figure 2.16 présente la différence altimétrique entre la position du camion et des passages piéton levés par topométrie (δz) et la distance planimétrique entre le véhicule et les points de référence (d_{plani}). On remarque que même lorsque le véhicule passe à la verticale d'un point connu, la différence est loin d'être nulle. Elle est souvent décimétrique, voir métrique.

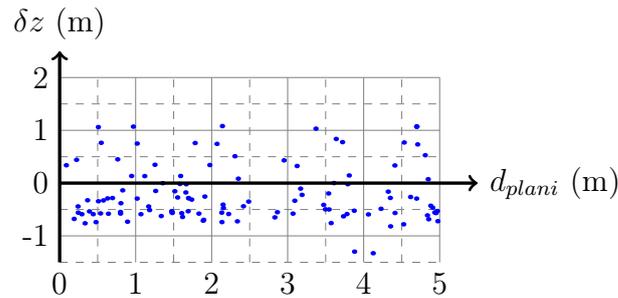


FIGURE 2.16 – Écarts entre la position du Stéréopolis et les points de références.

La figure 2.17 représente les mêmes données que la figure 2.16 mais en affichant les panoramiques successives par une même couleur et en les reliant par une droite. On constate qu'au sein d'une même acquisition, les écarts altimétriques sont constants, ce qui montre que le système est cohérent sur un intervalle de temps restreint (quelques secondes). Lors de passages consécutifs, on peut avoir des écarts qui peuvent atteindre deux mètres (courbes la plus haute et la plus basse).

Pour conclure, on peut prendre la solution fournie par le système de positionnement comme quasi parfaite pour deux panoramiques successives dans une même acquisition, mais il peut y avoir un écart significatif avec la réalité (jusqu'à un mètre).

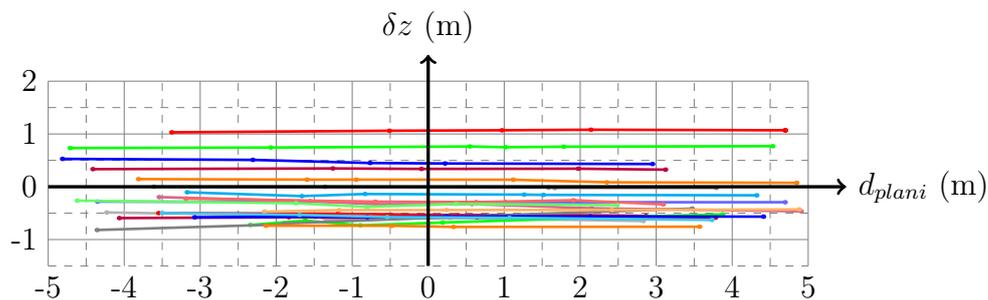


FIGURE 2.17 – Écart entre la position de Stéréopolis et les points de référence en tenant compte de la continuité temporelle. Chaque couleur représente une acquisition temporelle continue.

Lors du post-traitement, nous avons accès aux incertitudes qui sont calculées pour chaque position. Malheureusement, celles ci ne sont pas suffisamment fiables pour pouvoir être utilisées. La figure 2.18 représente l'écart entre la position de points connus et

l'altitude vraie. Nous avons indiqué la barre d'incertitude en vert lorsqu'elle est fiable et en rouge lorsqu'elle ne l'est pas. d_{plani} correspond à la distance planimétrique entre le véhicule et les points de référence.

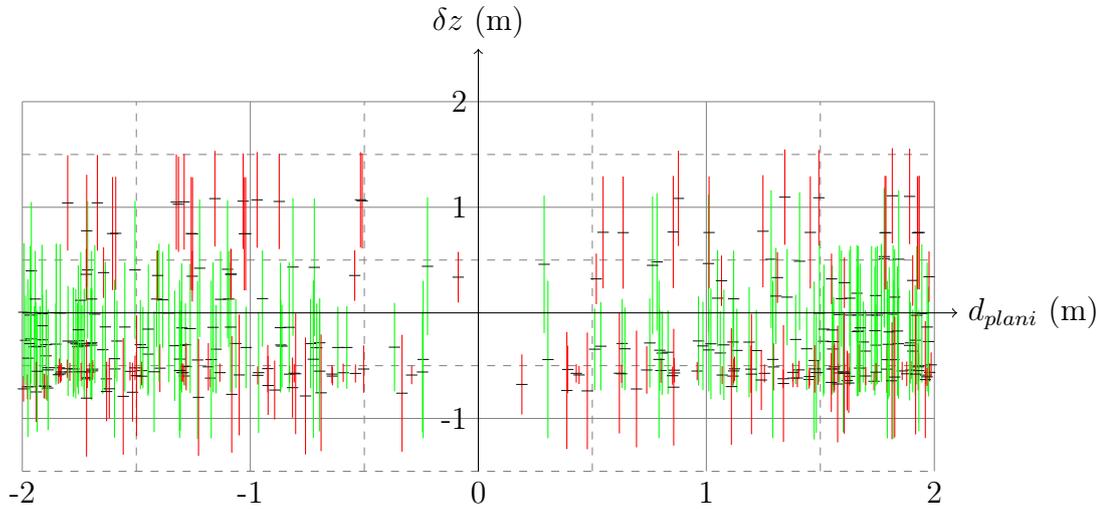


FIGURE 2.18 – Représentation de l'écart et de son incertitude entre la position de Stéréopolis et les points de référence. La barre d'incertitude est représentée par un trait vertical. Il est vert lorsque la barre d'incertitude est fiable, en rouge sinon.

La figure 2.19 représente l'écart de l'altitude du système de géoréférencement en fonction de l'incertitude donnée par le logiciel de post-traitement. Les points sont en vert lorsque l'incertitude est supérieure à l'écart entre l'altitude vraie, autrement dit l'incertitude est fiable tandis que les points sont en rouge lorsque l'incertitude est inférieure à l'écart entre l'altitude vraie autrement dit l'incertitude n'est pas fiable. Nous constatons qu'il n'y a aucune corrélation entre la précision annoncée et l'écart constaté.

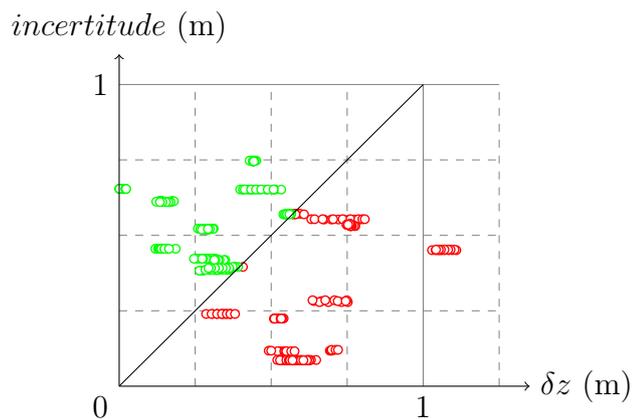


FIGURE 2.19 – Représentation de l'écart en fonction de l'incertitude.

Au final, les deux figures précédentes illustrent que dans plus de la moitié des cas, l'incertitude n'est pas fiable. Elle ne pourra donc pas servir comme source de données pour nos traitements.

Ainsi le système de positionnement peut avoir des écarts de l'ordre du mètre. Les incertitudes fournies par le système de positionnement ne sont pas suffisamment fiables pour pondérer les observations lors du calcul de compensation. En relatif, le système de positionnement est cohérent : on peut donc localement considérer la trajectoire comme rigide.

2.4.b Données externes

Les données externes utilisées dans ces travaux sont principalement des points connus avec une grande précision. Pour une position millimétrique, les points ont été mesurés par des méthodes de topométrie traditionnelles : utilisation de tachéomètres¹⁴ sur différentes stations avec redondances des mesures. Toutes ces mesures ont été ensuite compensées par moindres carrés [Gauss et Bertrand, 1855], afin d'estimer la meilleure position de ces points. Les passages piétons qui ont servi pour la qualification des données (2.4.a.ii {page 19} et au chapitre 10) ont une précision centimétrique. Ce travail a été réalisé par les Travaux Spéciaux de l'IGN [TS, 2013].

2.5 Problématiques

Le véhicule de numérisation mobile de l'IGN est capable d'acquérir des milliers d'images sur des périodes d'acquisition courtes.

Comme nous l'avons constaté dans la section précédente, nous nous heurtons à de nombreux problèmes :

- la solution fournie par le système de positionnement n'est pas toujours précise (écart parfois métrique avec la vérité terrain),
- les données ne sont pas cohérentes entre elles lors de passages successifs au même endroit (à partir de quelques minutes),
- les indicateurs de précision fournis par le système ne sont pas fiables.

Pour constituer le nouveau référentiel à grande échelle centimétrique, nous utiliserons uniquement :

- les trajectoires fournies par le système de positionnement,
- les images acquises par le véhicule.

Nous pourrions aussi utiliser quelques¹⁵ points connus en 3 dimensions, en quantité limitée : leur coût (matériel et humain) de production étant élevé.

La section suivante présente l'approche que nous allons suivre ainsi que l'organisation du manuscrit, afin de répondre à la problématique qui vient d'être exposée.

2.6 Approche proposée et organisation du manuscrit

L'approche que nous allons suivre dans cette thèse consiste à étudier la chaîne qui permet de produire une image géoréférencée précise acquise à partir d'un véhicule de

14. appareil permettant de mesurer des angles (avec une précision proche 0.0001 °) et les distances.

15. Le nombre de points nécessaire sera quantifié dans cette thèse.

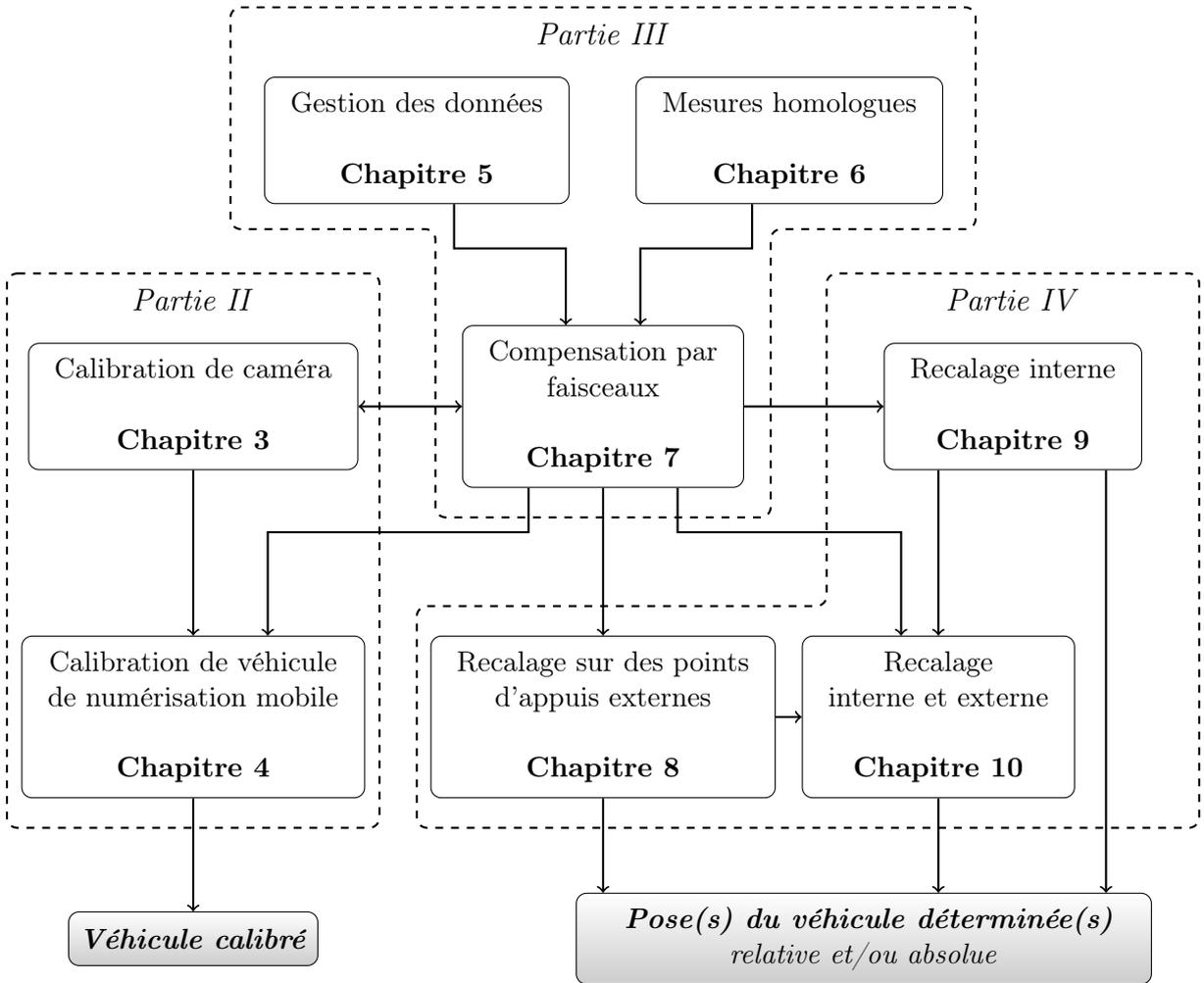


FIGURE 2.20 – Organisation de la thèse.

numérisation mobile. L'organigramme présenté à la figure 2.20 présente les différents éléments et permet de les situer dans le manuscrit.

La partie II démontre l'utilité d'une calibration fine des capteurs. Le chapitre 3 s'intéresse à la façon de calibrer une caméra en utilisant la géométrie panoramique. Il présente aussi un état de l'art sur les différentes méthodes de calibration ainsi que les différents types de modélisation de distorsion. Le chapitre 4 est consacré aux différentes méthodes permettant de positionner de façons fines des caméras sur un véhicule.

La partie III est consacrée à la compensation par faisceaux qui est une méthode de recalage fine utilisant uniquement l'image. Le chapitre 5 présente deux mécanismes complémentaires permettant la gestion de gros volume de données. Le chapitre 6 propose un processus d'appariement de mesures homologues permettant d'éliminer un grand nombre d'erreurs. Finalement le chapitre 7 explique la manière de réaliser la compensation par faisceaux.

La partie IV est consacrée au recalage de données trajectographiques. Le chapitre 8 s'intéresse à des méthodes de recalages utilisant des données externes connues. Le chapitre 9 propose des méthodes de mise en cohérence relative des données en utilisant l'image pour recalibrer les différents tronçons de trajectoire. Le chapitre 10 propose une méthode permettant d'utiliser à la fois l'information de trajectoire du système de positionnement

et les mesures images sur des objets.

Les parties peuvent être lues de manière indépendante par le lecteur. Des renvois sont fait vers les différents chapitres/sections/sous-sections lorsque cela est nécessaire afin que le lecteur puisse suivre facilement les différents raisonnements présentés.

Deuxième partie

Calibration de systèmes de
numérisation mobile basés images

Dans cette partie, nous nous intéressons aux méthodes de calibrations.

Le chapitre 3 étudie une méthode particulière de calibration de caméra. : l' auto-calibration panoramique. Ce composant est le premier élément de notre véhicule de numérisation mobile.

Le chapitre 4 présente deux méthodes permettant de déterminer avec précision la position des caméras sur le véhicule.

Chapitre 3

Calibration intrinsèque de caméra

Nous allons tout d'abord passer en revue l'état de l'art, très riche dans ce domaine, concernant la modélisation d'une caméra. Nous présenterons différents modèles de distorsion qui permettent de pallier les défauts de l'optique puis nous nous intéresserons aux différentes méthodes de calibration qui existent.

Nous présenterons alors une méthode qui peut être utilisée pour étalonner nos caméras : l'autocalibration panoramique. Pour cela nous utilisons un dispositif particulier : le Cyclopolis (présenté dans la section 3.2.a {page 41}) développé par le MATIS. Nous expliciterons les spécificités de la méthode puis nous étudierons sa sensibilité au bruit sur les mesures et aux défauts de montage de la caméra sur le dispositif Cyclopolis, grâce à des simulations. Enfin nous présenterons le protocole d'acquisition de données réelles, les résultats obtenus et la validation de notre méthode.

3.1 État de l'art

Le domaine de la calibration de caméra a été étudié depuis que des mesures sont faites à partir des images notamment à des fins cartographiques. En effet, plus nous nous rapprochons de la géométrie d'acquisition de l'image, plus la qualité des objets restitués sera grande. On peut citer le manuel de photogrammétrie [McGlone et al., 2004] réalisé par l'ASPRS¹. Il y a aussi de nombreux états de l'art réalisés par la communauté photogrammétrique [Clarke et Fryer, 1998] et ceux de la communauté de la vision par ordinateur [Tsai, 1986]. [Sturm et al., 2011] présentent en plus des méthodes de calibrations pour des systèmes complexes (multi-caméras, caméra et miroir hémisphérique par exemple).

Nous allons d'abord étudier la modélisation d'une caméra d'un point de vue optique et photogrammétrique. Ensuite nous ferons un état de l'art des modèles de distorsion ainsi que des méthodes de calibration.

1. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing. Cet ouvrage est ré-édité régulièrement, tous les 5 à 10 ans

3.1.a Modélisation d'une caméra

Le modèle le plus simple et le plus souvent utilisé est le modèle sténopé. La principale hypothèse pour l'utilisation de ce modèle est que le système optique respecte les conditions de Gauss². La figure 3.1 représente le modèle d'une caméra sténopé avec un point M sur le terrain qui a pour image m dans l'image. Nous allons compléter ce schéma par quelques définitions :

le plan image est caractérisé par sa hauteur (H) et sa largeur (L). On définit le repère image tel que les deux premiers axes appartiennent à ce plan (i et j sur la figure 3.1) et le troisième est défini pour que le repère soit orthogonal direct (k sur la figure 3.1). Dans le cas d'une caméra numérique, on le définit tel que le premier axe soit dans le sens des colonnes croissantes, le second axe soit dans le sens des lignes croissantes et le dernier est construit pour que le repère soit orthogonal direct.

la focale notée p , est la distance entre le centre de perspective et le plan image.

le centre de perspective est le point de convergence des rayons issus de l'objet. Ce point, noté S , a pour coordonnées ${}^t(X_S, Y_S, Z_S)$ dans le repère terrain, noté F , qui a pour coordonnées ${}^t(c_{PPA}, l_{PPA}, -p)$ dans le repère caméra. Dans le modèle sténopé, S et F sont confondus.

le point principal d'autocollimation noté PPA . Il est situé sur la droite orthogonale au plan du capteur et qui passe par le centre de perspective. Il a pour coordonnées ${}^t(c_{PPA}, l_{PPA}, 0)$ dans le repère caméra.

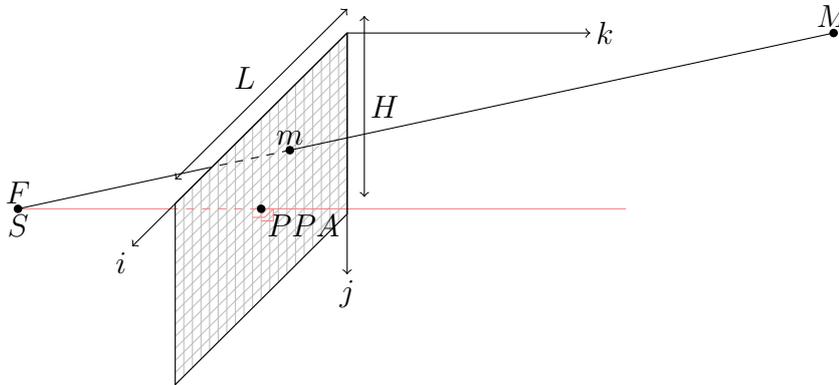


FIGURE 3.1 – Modélisation d'une caméra (modèle sténopé).

Les distances caractéristiques d'une caméra sont généralement exprimées en millimètres ou en pixels depuis l'arrivée du numérique. Le choix de l'unité n'a aucune importance sur les équations et sur les notations utilisées. Par contre, elle doit être spécifiée afin d'éviter toute source d'erreur. Dans ce manuscrit, comme les caméras utilisées sont numériques, nous utiliserons le pixel comme unité de mesure.

L'équation de colinéarité (équation 1) relie un point terrain M à sa position dans l'image m [Schmid, 1959] et [McGlone et al., 2004]. \mathcal{R} est la matrice rotation qui permet

2.

- angle faible entre les rayons incidents et l'axe optique,
- les rayons lumineux passent par le centre optique.

de passer du repère terrain au repère image, c et l donnent la position du point image m respectivement la colonne et la ligne.

$$m = \begin{pmatrix} c \\ l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{PPA} \\ l_{PPA} \end{pmatrix} - p \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \frac{\mathcal{R}(M - S)}{t_{\mathbf{k}}\mathcal{R}(M - S)} \quad (1)$$

\mathcal{R} et S sont appelés les paramètres *extrinsèques* tandis que c_{PPA} , l_{PPA} et p sont appelés les paramètres *intrinsèques*.

Nous avons choisi le modèle sténopé parce qu'il convient parfaitement pour nos caméras comme nous le verrons par la suite du manuscrit.

D'autres travaux introduisent des modèles de caméras beaucoup plus complexes, avec par exemple la notion de raxels [Sturm et Ramalingam, 2004],[Grossberg et Nayar, 2005] qui représentent directement le rayon incident pour chaque pixel, ce qui permet de modéliser plusieurs types de caméra.

3.1.b Modèles de distorsion

3.1.b.i Problème physique

L'hypothèse qui vient d'être faite pour la modélisation d'une caméra est loin d'être vérifiée. En effet, les conditions de Gauss ne sont pas respectées : le champ d'une caméra est de plusieurs dizaines de degrés et tous les rayons ne passent pas forcément par un point unique. L'objectif contient plusieurs lentilles qui affectent le trajet des rayons de manière individuelle : cette complexité de l'optique est difficilement modélisable. La figure 3.2.a présente une image acquise par une caméra ayant de la distorsion. Les joints de bâtiments sont courbes alors qu'ils devraient être droits. La figure 3.2.b présente la même image corrigée de la distorsion. Nous pouvons remarquer que, dans le cas d'une image sans distorsion, les joints de bâtiments sont droits.



FIGURE 3.2 – Illustration de la distorsion dans les images. (a) Image avec distorsion, (b) Image sans distorsion.

3.1.b.ii Modélisation

Même si la distorsion provient de différentes sources qui sont difficiles à modéliser de manière individuelle, il est quand même possible de faire une modélisation globale de tous ces phénomènes. Il suffit de définir une fonction mathématique permettant de passer des mesures brutes (celles mesurées directement sur l'image) aux mesures corrigées (celles correspondant au modèle sténopé parfait).

Il existe de nombreuses familles de modèles de distorsion que l'on peut regrouper en trois catégories :

Modèle de distorsion radiale : il ne permet de corriger que les défauts radiaux de la distorsion. Les lentilles étant à symétrie de révolution, les défauts sont pratiquement radiaux. Ce type de modèle a été décrit dans de nombreux articles dont [Brown, 1971], [Tsai, 1987], [Fraser, 1997], [Hartley et Zisserman, 2004], [Parian et Gruen, 2010], [Pierrot-Deseilligny et Cléry, 2011]. La figure 3.3 présente la déformation d'une grille régulière en présence de distorsion radiale.

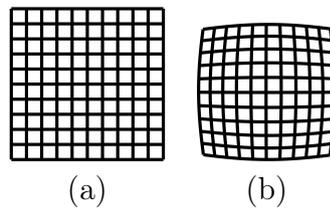


FIGURE 3.3 – Illustration de la distorsion radiale. (a) Image sans distorsion. (b) Image avec distorsion radiale.

Modèle de distorsion radiale et tangentielle : il arrive que le modèle radial ne soit pas suffisant : des résidus après calibration sont trop élevés, la répartition des résidus est non aléatoire. Dans ce cas, on ajoute une composante tangentielle à la distorsion. Ce modèle a été décrit dans notamment [Li et Lavest, 1995], [Fraser, 1997], [Lavest et al., 1998], [Bradski, 2000], [Heikkilä, 2000] et [Pierrot-Deseilligny et Cléry, 2011]. La figure 3.4 présente la déformation d'une grille régulière en présence de distorsions radiale et tangentielle.

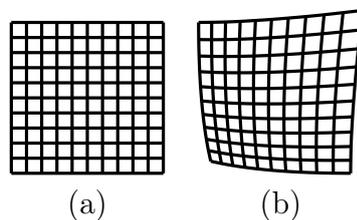


FIGURE 3.4 – Illustration des distorsions radiale et tangentielle. (a) Image sans distorsion. (b) Image avec distorsion radiale et tangentielle.

Modèle mathématique "pur" : à la différence des modélisations précédentes qui se basent sur des fonctions qui ont une signification physique, d'autres choisissent d'utiliser des fonctions mathématiques pures. Par exemple [Tang et al., 2012b] utilisent une décomposition en série de Fourier, [Tang et al., 2012a] les polynômes de Legendre, et [Pierrot-Deseilligny et Cléry, 2011] un polynôme général d'ordre 7. Le

principal intérêt de ces méthodes est de modéliser tout type de distorsion (radiale, tangentielle et plus complexe). Le principal inconvénient est le nombre de paramètres à estimer qui est très important. Il faut donc beaucoup d'observations pour étalonner une caméra avec cette famille de modèle. La figure 3.5 présente la déformation d'une grille régulière en présence de distorsion complexe.

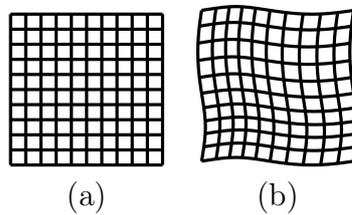


FIGURE 3.5 – Illustration de la distorsion complexe. (a) Image sans distorsion. (b) Image avec distorsion complexe avec une formule à base de sinus et cosinus.

Le tableau 3.1 présente des formules mathématiques correspondant aux trois familles de modèles.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + S \quad \text{On pose : } \begin{cases} x' = \frac{x}{z} \\ y' = \frac{y}{z} \end{cases}, \quad r = \sqrt{(x' - x_{PPS})^2 + (y' - y_{PPS})^2} \text{ et } \begin{cases} x_{cor} = x_{mes} + \delta x \\ y_{cor} = y_{mes} + \delta y \end{cases}$$

La notion de Point Principal de Symétrie n'existe pas toujours (de coordonnées ${}^t(x_{PPS}, x_{PPS}, 0)$ dans le repère image). Certains le confondent avec le PPA, d'autres le placent au milieu du capteur et tandis que d'autres l'estiment dans leur processus de calibration.

Famille		Modèle	Inconnues
Radiale	radial (1)	$\begin{cases} \delta x = \sum_{m=1}^M a_m r^m \\ \delta y = \sum_{m=1}^M a_m r^m \end{cases}$	a_n
	radial (2)	$\begin{cases} \delta x = \sum_{m=1}^M a_m r^{2m} \\ \delta y = \sum_{m=1}^M a_m r^{2m} \end{cases}$	a_n
Radiale et Tangentielle		$\begin{cases} \delta x = (1 + ar^2 + br^4 + cr^6) x' + 2dx'y' + e(r^2 + 2x'^2) \\ \delta y = (1 + ar^2 + br^4 + cr^6) y' + d(r^2 + 2y'^2) + 2ex'y' \end{cases}$	a, b, c, d, e
Mathématique	Série de Fourier	$\begin{cases} u = -\pi + \frac{c}{W} 2\pi \\ v = -\pi + \frac{l}{H} 2\pi \end{cases} \begin{cases} \delta x = \sum_{m=1}^M \sum_{n=-N}^N (a_{m,n} \cos(mu + nv) + b_{m,n} \sin(mu + nv)) \\ \quad + \sum_{n=1}^N (a_{0,n} \cos(mu + nv) + b_{0,n} \sin(mu + nv)) \\ \delta y = \sum_{m=1}^M \sum_{n=-N}^N (a_{m,n} \cos(mu + nv) + b_{m,n} \sin(mu + nv)) \\ \quad + \sum_{n=1}^N (a_{0,n} \cos(mu + nv) + b_{0,n} \sin(mu + nv)) \end{cases}$	$a_{m,n}, b_{m,n}$
	Polynôme de Legendre	$\begin{cases} u = -1 + 2\frac{c}{W} \\ v = -1 + 2\frac{l}{H} \end{cases} \begin{cases} P_i(x) = \frac{1}{2^i} \sum_{k=0}^i C_k^i (x-1)^{i-k} (x+1)^k \\ \delta x = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N (a_{m,n} P_m(u) P_n(v)) \\ \delta y = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N (a_{m,n} P_m(u) P_n(v)) \end{cases}$	$a_{m,n}, b_{m,n}$
	Polynôme	$\begin{cases} \delta x = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N (a_{m,n} x^m y^n) \\ \delta y = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N (b_{m,n} x^m y^n) \end{cases}$	$a_{m,n}, b_{m,n}$

TABLE 3.1 – Formules générales des familles de distorsion.

Pour conclure, il n'y a pas de modèle de distorsion universel, il y a seulement des modèles qui sont plus ou moins appropriés pour une caméra donnée. Si le modèle est bien choisi et que le processus de calibration présente des résultats satisfaisants : résidus images faibles, bien répartis et sans systématisme, alors le modèle est adapté à la caméra. Sinon il est préférable changer de modèle car il n'est pas adapté à la distorsion de la caméra.

Pour illustrer cette remarque, nous avons choisi de calibrer une caméra avec la même méthode et les mêmes données mais en utilisant trois modèles de distorsion différents. Ils sont tous les trois radiaux. Le premier comporte un unique paramètre en r^3 , le second en a deux en r^3 et r^5 tandis que le dernier en comporte trois r^3 , r^5 et r^7 . Le tableau 3.2 présente les résultats des calibrations pour chaque modèle.

Nous pouvons constater que l'histogramme de répartition des résidus sur les mesures est beaucoup plus étroit (centré en 0) pour le modèle ayant trois paramètres de distorsion. Le modèle ne présentant qu'un seul paramètre radial est lui beaucoup plus réparti sur des plages de valeurs élevées ce qui signifie que le modèle n'absorbe pas tous les défauts de la caméra.

Lorsqu'on observe les résidus images dans le plan du capteur, il y a des systématismes et des erreurs non modélisées dans les deux premiers modèles (la direction des résidus n'est pas aléatoire et la norme des résidus est importante). Ensuite, la moyenne des résidus pour les deux premiers modèles est élevée (supérieure au pixel) ce qui indique que les mesures faites dans l'image ne seront pas correctement corrigées. Le troisième modèle lui présente un champs de résidus de norme faible (inférieur au demi pixel) et de répartition aléatoire. C'est donc le troisième modèle qui est le mieux adapté à notre caméra.

Modèle	Radial à 6 paramètres	Radial à 7 paramètres	Radial à 8 paramètres
Équation	$\begin{cases} c_c = c_b + (c_b - c_{PPS})(ar^3) \\ l_c = l_b + (l_b - l_{PPS})(ar^3) \\ r = \sqrt{(c_b - c_{PPS})^2 + (l_b - l_{PPS})^2} \end{cases}$	$\begin{cases} c_c = c_b + (c_b - c_{PPS})(ar^3 + br^5) \\ l_c = l_b + (l_b - l_{PPS})(ar^3 + br^5) \\ r = \sqrt{(c_b - c_{PPS})^2 + (l_b - l_{PPS})^2} \end{cases}$	$\begin{cases} c_c = c_b + (c_b - c_{PPS})(ar^3 + br^5 + cr^7) \\ l_c = l_b + (l_b - l_{PPS})(ar^3 + br^5 + cr^7) \\ r = \sqrt{(c_b - c_{PPS})^2 + (l_b - l_{PPS})^2} \end{cases}$
Inconnues	$p, c_{PPA}, l_{PPA}, c_{PPS}, l_{PPS}, a$	$p, c_{PPA}, l_{PPA}, c_{PPS}, l_{PPS}, a, b$	$p, c_{PPA}, l_{PPA}, c_{PPS}, l_{PPS}, a, b, c$
Histogramme des résidus			
Champs des résidus dans le plan image	<p style="text-align: center;">10 pixels</p>	<p style="text-align: center;">10 pixels</p>	<p style="text-align: center;">10 pixels</p>
Focale (pix.)	1045,428	1039,998	1038,469
PPA (pix.)	1023,590 1092,696	1033,393 1122,405	1025,934 1129,284
EMQ (pix.)	5,7871	1,2705	0,4817

TABLE 3.2 – Différence de calibration par rapport au choix du modèle de distorsion.

Le modèle que nous avons utilisé est celui présenté dans l'équation 2. Il comporte une modélisation de la distorsion radiale (a , b et c) ainsi qu'une inconnue de positionnement du point principal de symétrie (c_{PPS} et l_{PPS}). Ce modèle est inspiré de celui de [Fraser, 1997] présenté dans la partie "standard eight parameter model". Il est utilisé depuis longtemps à l'IGN [Thom et Souchon, 1998] et [Paparoditis et al., 2006] et est approprié pour les caméras aériennes et pour les caméras utilisées au MATIS (sur le véhicule et sur le Cyclopolis). Toutes les caméras calibrées avec ce modèle présentent des résidus faibles et du même ordre de grandeur que la précision de la mesure et une répartition aléatoire du champs de résidus.

$$\begin{cases} c_c &= c_b + (c_b - c_{PPS})(ar^3 + br^5 + cr^7) \\ l_c &= l_b + (l_b - l_{PPS})(ar^3 + br^5 + cr^7) \\ r &= \sqrt{(c_b - c_{PPS})^2 + (l_b - l_{PPS})^2} \end{cases} \quad (2)$$

3.1.c Méthodes de calibration

Maintenant que nous avons vu la manière de modéliser le faisceau d'une caméra ainsi que ses défauts, il faut maintenant la "calibrer" : c'est à dire déterminer ses paramètres intrinsèques³. Il existe de nombreuses techniques pour les déterminer et nous allons ici en détailler quelques unes :

Mesure directe : très ancienne technique qui permet, grâce à un ou plusieurs collimateurs, de mesurer directement la distorsion. La caméra à étalonner est placée dans le plan orthogonal à l'axe du collimateur [Karren, 1968] et des rayons lumineux sont envoyés dans la caméra.

Utilisation d'un réseaux de cibles 3D ou polygone d'étalonnage : il suffit de prendre en photos des cibles dont les coordonnées sont très précisément connues en 3D et de les mesurer dans l'image [Ameller et al., 2002], [Triggs, 1999] et [Thom et Souchon, 2001].

Utilisation de formes géométriques particulières dans l'image : avoir une géométrie particulière connue dans l'image permet d'ajouter des contraintes mathématiques dans le calcul de calibration.

droites : [Brown, 1971] utilise des fils lestés de plomb qu'il place devant une caméra avant de les prendre en photos. D'autres ajoutent des mires [Alvarez et al., 2009] ou prennent des photos de scènes contenant des segments [Devernay et Faugeras, 2001], [Lourakis et Deriche, 2000b] pour faire cette calibration. Quand à [Tang, 2011], il utilise une harpe dont il prend des photos sous différents angles.

plan : [Tsai, 1987] propose une méthode qui peut être utilisée avec une seule image de points coplanaires. [Zhang, 1999] utilise plusieurs photos d'un même plan qui peut être soit une mire soit des objets 3D sur un plan.

mires : [Zhang, 1999] et [Triggs, 1998] utilisent des mires comportant un damier. Des mires avec des motifs circulaires peuvent être aussi employées soit en utilisant le centre des cercle [Heikkilä, 2000] et [Lavest et al., 1998], soit en utilisant

3. Dans certaines méthodes, la notion de calibration interne ne concerne que le point principal d'autocollimation ainsi que la focale, tandis que d'autres incluent aussi un modèle de distorsion. Pour nous, la calibration consiste à déterminer aussi bien le PPA et la focale que le modèle de distorsion

les orientations des cercles dues à la projection [Tarel, 1994]. Un comparatif entre différents types de motif (cercle et carré) a été fait dans [Datta et al., 2009].

point de fuite : [Caprile et Torre, 1990],[Beardsley et Murray, 1992] exploitent les points de fuite de l'image⁴.

Autocalibration de type panoramique : cette technique permet une mise en équation efficace s'appuyant uniquement sur la minimisation des résidus entre les faisceaux tandis que toutes les autres méthodes minimisent les résidus entre la projection d'objets 3D connus et leur représentation dans l'image. [Hartley, 1994], [Agapito et al., 2001] et [Parian et Gruen, 2010] utilisent cette méthode. Son principal intérêt est de ne pas tenir compte de la position 3D des points homologues.

Auto calibration : cette méthode présente l'avantage de ne pas nécessiter d'objet particulier (mire, segment...) ou de condition d'acquisition spécifique pour calibrer une caméra [Faugeras et al., 1992], [Lavest et al., 1998], [Triggs et al., 2000] et [Pierrot-Deseilligny et Cléry, 2011]. La calibration est faite en utilisant uniquement des points communs entre plusieurs images d'une même scène. Cette technique permet de calibrer ou de ré-estimer la calibration d'une caméra avec un jeu de données quelconque.

Il faut noter que toutes les méthodes ne sont pas valables pour toutes les caméras. Par exemple, une caméra grand champ avec une mire de un mètre de côté ne pourra pas être utilisée : la surface de la mire étant toute petite par rapport au champ de la caméra. De même que la configuration des prises de vues, par rapport à la méthode utilisée peut introduire des corrélations entre les différents paramètres du modèle, donc conduire à une mauvaise estimation de ceux-ci [Li et Lavest, 1995]. Pour toutes ces raisons, l'état de l'art est très riche et de nombreux travaux sont encore menés afin de trouver la ou les technique(s) permettant de calibrer le plus grand nombre de caméras.

Dans tous les travaux cités précédemment, les paramètres intrinsèques des caméras sont considérés comme constants. C'est-à-dire que la focale, le PPA et le modèle de distorsion ne varient pas pour une même séquence d'images. [Willson, 1994],[Lourakis et Deriche, 2000a] et [Park et Hong, 2001] présentent différentes manières de calibrer des caméras en considérant que les paramètres intrinsèques peuvent varier. Cela correspond notamment aux caméras munies d'un focus automatique modifiant notamment la focale. Dans notre cas, nous n'avons pas constaté de variabilité sur les paramètres intrinsèques des caméras durant une acquisition ce qui fait que nous n'avons pas utilisé cette modélisation.

Nous avons choisi d'utiliser la méthode de calibration en géométrie panoramique pour différentes raisons : la mise en équation est simple (cf. sous-section 3.2.b) et elle ne dépend que de la qualité des mesures homologues. La section suivante détaille cette méthode.

3.2 Autocalibration panoramique

Pour réaliser une calibration en géométrie panoramique, il faut tout d'abord avoir un dispositif adapté. Il est détaillé dans une première sous-section. Ensuite, nous présentons des simulations permettant de mesurer la précision pouvant être atteinte par cette

4. Les points de fuite sont les intersections des représentations dans l'image de droites parallèles sur le terrain.

technique. Enfin nous validerons notre processus en travaillant sur des données réelles produites lors d'une phase d'expérimentation.

3.2.a Système d'acquisition

Le système complet d'acquisition utilisé s'appelle Cyclopolis et a notamment été présenté dans [Cannelle et al., 2010] et [Cannelle et al., 2011]. Il contient différents éléments : un dispositif tournant sur deux axes, la caméra à étalonner et un ordinateur qui permet à la fois de piloter le dispositif et de déclencher la prise d'images. La figure 3.6.a montre le système lors d'une acquisition et la figure 3.6.b présente le dispositif pan-tilt muni de la caméra qui est située à l'intersection des axes de rotation. Cyclopolis a été conçu afin d'être compact et léger pour une utilisation simple et rapide dans tout type de milieux.

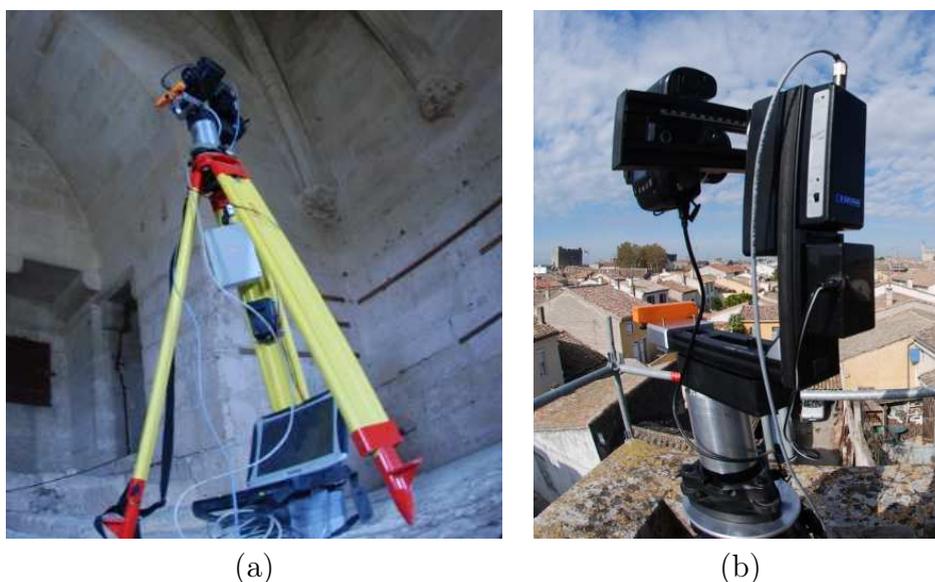


FIGURE 3.6 – Le système Cyclopolis. (a) Dispositif complet. (b) Système tournant + caméra.

Le principal intérêt du dispositif pan-tilt est de permettre la rotation autour de deux axes orthogonaux. Il suffit de positionner le centre perspectif de la caméra que l'on veut étalonner à l'intersection des axes de rotations du dispositif pour acquérir les images avec une géométrie panoramique sans parallaxe.

Un moyen pratique, mais efficace, permet de placer le centre optique à l'intersection des axes de rotations. Pour cela, il suffit de prendre deux images contenant un objet proche et un objet éloigné puis de vérifier si les objets sont à la même place dans les deux images. Par exemple la figure 3.7 présentent deux images contenant un fil (au premier plan) et une antenne (bâtiment au second plan). Pour deux images successives, (figures 3.7.a et 3.7.b). L'antenne est à gauche du fil dans la première, mais à droite du fil dans la seconde. La caméra n'est donc pas parfaitement montée sur le dispositif parce qu'il y a un changement d'ordre entre les objets. En pratique, on arrive à centrer la caméra à environ 2 millimètres⁵, ce qui est suffisant pour obtenir une calibration correcte (cf. suite du chapitre).

5. Le processus étant itératif jusqu'à l'annulation de la parallaxe, cette valeur a été déterminée en faisant la différence des positions sur les deux dernières itérations.

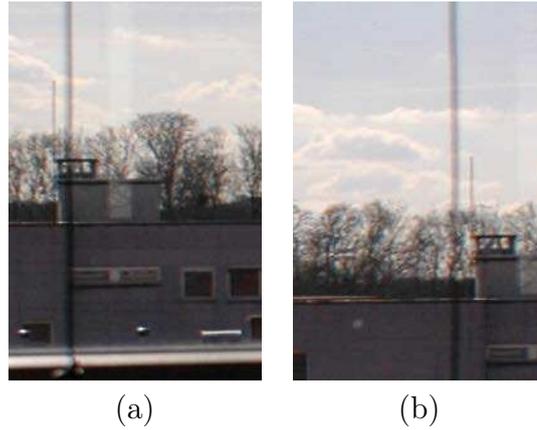


FIGURE 3.7 – Illustration de la présence de parallaxe avec le Cyclopolis. Les images (a) et (b) comportent des objets proche et loin dans la partie de gauche (a) et la partie droite (b). Il y a une inversion entre l’antenne au second plan et le fil au premier plan. Ainsi la caméra n’est pas parfaitement centrée.

3.2.b Mise en équation de la compensation par faisceaux

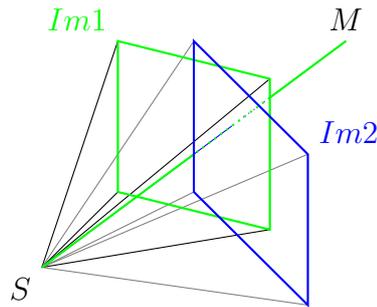


FIGURE 3.8 – Configuration de deux images en géométrie panoramique.

En géométrie panoramique, les images ont (quasiment) le même centre (S sur la figure 3.8). En définissant la rotation $\mathcal{R}_{Im,pano}$ de l’image par rapport à l’origine du dispositif et M un point terrain, un faisceau d’une image acquise en géométrie panoramique s’écrit selon l’équation :

$$\overrightarrow{SM} = \frac{\mathcal{R}_{Im,pano} \begin{pmatrix} c - c_{PPA} \\ l - l_{PPA} \\ p \end{pmatrix}}{\sqrt{(c - c_{PPA})^2 + (l - l_{PPA})^2 + p^2}} \quad (3)$$

Un même détail de la scène vu dans deux images différentes représente le même vecteur en 3D. Ce vecteur passe par le sommet (qui est commun grâce à la géométrie panoramique) et le détail. Si on établit cette équation pour deux faisceaux issus de deux images distinctes, et que l’on considère que les images sont prises du même sommet (hypothèse d’une acquisition panoramique), on peut écrire l’équation 4 qui relie deux mesures homologues.

$$\begin{aligned}
 \vec{SM} &= \begin{pmatrix} c_{Im1} - c_{PPA} \\ l_{Im1} - l_{PPA} \\ p \end{pmatrix} \text{ faisceau exprimé pour l'image 1} \\
 \vec{SM} &= \begin{pmatrix} c_{Im2} - c_{PPA} \\ l_{Im2} - l_{PPA} \\ p \end{pmatrix} \text{ faisceau exprimé pour l'image 2} \\
 \frac{\mathcal{R}_{Im1,pano} \begin{pmatrix} c_{Im1} - c_{PPA} \\ l_{Im1} - l_{PPA} \\ p \end{pmatrix}}{\sqrt{(c_{Im1} - c_{PPA})^2 + (l_{Im1} - l_{PPA})^2 + p^2}} &= \frac{\mathcal{R}_{Im2,pano} \begin{pmatrix} c_{Im2} - c_{PPA} \\ l_{Im2} - l_{PPA} \\ p \end{pmatrix}}{\sqrt{(c_{Im2} - c_{PPA})^2 + (l_{Im2} - l_{PPA})^2 + p^2}} \quad (4)
 \end{aligned}$$

En introduisant la fonction f correspondant au modèle de distorsion retenu, on a :

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} c_{Im1,cor} \\ l_{Im1,cor} \end{pmatrix} &= f \begin{pmatrix} c_{Im1,b} \\ l_{Im1,b} \end{pmatrix} \\
 \frac{\mathcal{R}_{Im1,pano} \begin{pmatrix} c_{Im1,cor} - c_{PPA} \\ l_{Im1,cor} - l_{PPA} \\ p \end{pmatrix}}{\sqrt{(c_{Im1,cor} - c_{PPA})^2 + (l_{Im1,cor} - l_{PPA})^2 + p^2}} &= \frac{\mathcal{R}_{Im2,pano} \begin{pmatrix} c_{Im2,cor} - c_{PPA} \\ l_{Im2,cor} - l_{PPA} \\ p \end{pmatrix}}{\sqrt{(c_{Im2,cor} - c_{PPA})^2 + (l_{Im2,cor} - l_{PPA})^2 + p^2}} \quad (5)
 \end{aligned}$$

Pour calibrer une caméra il suffit de :

1. Prendre des images du même point de vue, avec un fort recouvrement (plus de 50 %) afin que chaque détail soit vu dans au moins deux images,
2. Calculer les couples d'images ayant du recouvrement (on note NbC le nombre de couples),
3. Extraire les mesures homologues pour chaque couple. On note
 - NbM le nombre de mesures homologues,
 - $(c_{A(i),j}, l_{A(i),j})$ et $(c_{B(i),j}, l_{B(i),j})$ la j ème mesure image du faisceau homologue du i ème couple d'images (A_i, B_i) .

Avec ces conventions, le système à minimiser peut s'écrire comme dans l'équation :

$$\sum_{i=0}^{NbC} \left(\sum_{j=0}^{NbM} \left(\frac{\mathcal{R}_{A(i),pano} \begin{pmatrix} c_{A(i),j} - c_{PPA} \\ l_{A(i),j} - l_{PPA} \\ p \end{pmatrix}}{\sqrt{(c_{A(i),j} - c_{PPA})^2 + (l_{A(i),j} - l_{PPA})^2 + p^2}} - \frac{\mathcal{R}_{B(i),pano} \begin{pmatrix} c_{B(i),j} - c_{PPA} \\ l_{B(i),j} - l_{PPA} \\ p \end{pmatrix}}{\sqrt{(c_{B(i),j} - c_{PPA})^2 + (l_{B(i),j} - l_{PPA})^2 + p^2}} \right) \right) = 0 \quad (6)$$

Nous pouvons constater que seule l'orientation relative des images et les paramètres intrinsèques, sont à déterminer tandis que les autres méthodes doivent en plus déterminer la position des images.

3.2.c Résultats sur données synthétiques

Afin de valider le processus de calibration en géométrie panoramique avec le modèle de distorsion choisi, nous avons décidé de travailler dans un premier temps sur des données synthétiques. Ainsi le processus peut être validé. Une mesure de l'écart entre le résultat

obtenu⁶ et le résultat attendu⁷ est donnée. Tout type de caméras peut de plus être simulé (aérienne, terrestre, grand public, industrielle).

Nous présenterons tout d'abord les différents types de capteurs simulés, puis le protocole mis en œuvre lors de nos simulations. Nous étudierons l'influence du bruit de mesure et l'impact de la parallaxe due à un mauvais centrage de la caméra sur le dispositif.

3.2.c.i Présentations des capteurs simulés

Nous avons choisi de simuler quatre capteurs répondant à différentes applications :

Caméra 1 : un appareil photo grand public avec un objectif équivalent 20 mm (courte focale),

Caméra 2 : un appareil photo grand public avec un objectif équivalent 50 mm (longue focale),

Caméra 3 : une caméra haute définition avec obturateur électronique pouvant être utilisée pour faire des acquisitions très rapides⁸,

Caméra 4 : une caméra numérique à champ large utilisée pour la prise de vue aérienne traditionnelle.

Le tableau 3.3 récapitule les caractéristiques numériques des quatre caméras utilisées pour la simulation. Les valeurs de distorsion dans la simulation sont représentatives de cas réels. La première ligne indique la convention de légende utilisée dans les figures.

	Caméra 1	Caméra 2	Caméra 3	Caméra 4
Largeur	3000	3000	1920	7256
Hauteur	2008	2008	1080	5450
Focale	2610	6627	1400	11775
PPA	1498	1511	961	3657
	985	985	542	2728
PPS	1481	1721	961	3697
	971	1145	542	3709
a	$-1.7 \cdot 10^{-8}$	$-6.2 \cdot 10^{-10}$	$-4.6 \cdot 10^{-8}$	$-2.8 \cdot 10^{-11}$
b	$3 \cdot 10^{-15}$	$6.1 \cdot 10^{-17}$	$-3.1 \cdot 10^{-14}$	$-4.2 \cdot 10^{-19}$
c	$-2.2 \cdot 10^{-22}$	$-8.2 \cdot 10^{-24}$	$-1.2 \cdot 10^{-21}$	$9.7 \cdot 10^{-27}$
Correction en bords de champ	59.7	4.2	14.9	3.1

TABLE 3.3 – Caractéristiques des quatre caméras simulées (en pixels).

La figure 3.9 représente les corrections dr à appliquer aux mesures images afin de tenir compte de la distorsion pour chaque caméra.

3.2.c.ii Simulation des mesures

Dans toutes les expérimentations suivantes, nous avons estimé au sein du même processus tous les paramètres intrinsèques (focale, PPA, PPS et coefficients du polynôme

6. Caractéristiques de la caméra calculées à la fin du processus.

7. Caractéristiques de la caméra simulée.

8. Celle utilisée sur le véhicule Stéréopolis

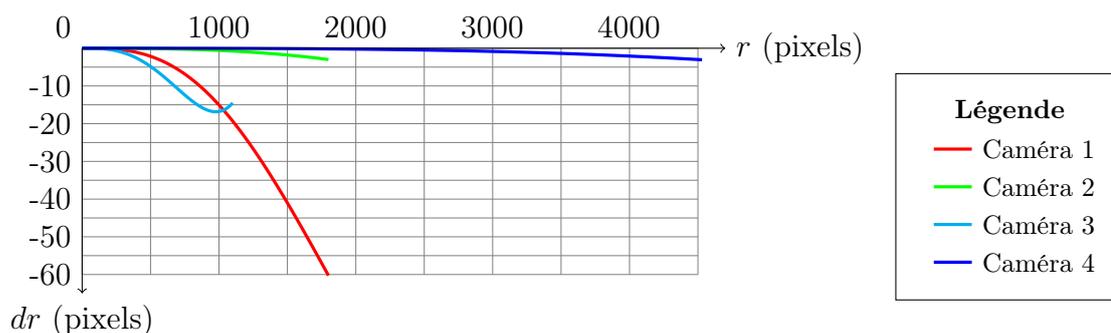


FIGURE 3.9 – Polynômes de distorsion des caméras simulées (cf tableau 3.3).

de distorsion) ainsi que l'orientation de chaque image. Les conditions initiales lors de la compensation sont :

- Focale égale à 80% de la valeur réelle⁹,
- PPA et PPS au centre de l'image,
- Coefficients du polynôme de distorsion mis à zéro.

Les mesures ont été simulées en utilisant une répartition de points sur une sphère¹⁰ autour des images en géométrie panoramique. La répartition a été réalisée en utilisant les points d'un maillage géodésique qui a comme élément de base le tétraèdre [Kenner, 1976]. La figure 3.10.a représente l'élément de base du dôme, la figure 3.10.b présente le dôme après une étape de division et la figure 3.10.c représente les points ayant servi à la simulation des mesures.

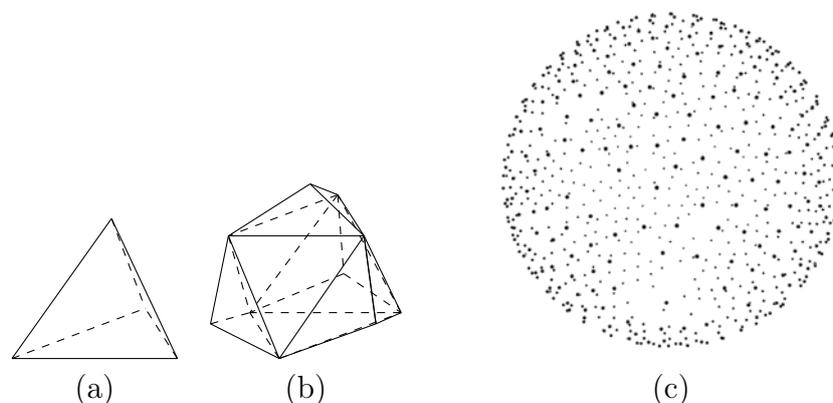


FIGURE 3.10 – Points servant pour la simulation de mesures homologues. (a) Élément de base du dôme. (b) Première division. (c) Résultat après 4 divisions.

3.2.c.iii Influence du bruit

Notre méthode ne nécessitant aucun point d'appui, elle est totalement tributaire de la qualité des mesures homologues entre les images. Nous avons donc simulé un bruit

9. En général, la valeur de la focale est connue de manière approchée que ce soit grâce aux données EXIF des images ou grâce à la documentation des objectifs.

10. La sphère a été choisie afin de pouvoir évaluer l'influence d'un défaut de centrage par rapport au rayon de celle-ci cf 3.2.c.iv {page 47}.

aléatoire de type Gaussien sur les mesures dans les images afin d'évaluer l'impact de celui-ci sur la calibration. La fonction utilisée est une gaussienne centrée sur la "vraie" mesure et dont l'écart type dépend de la simulation.

Les figures 3.11, 3.12 et 3.13 présentent les écarts sur la focale, le PPA et la distorsion en présence de bruit.

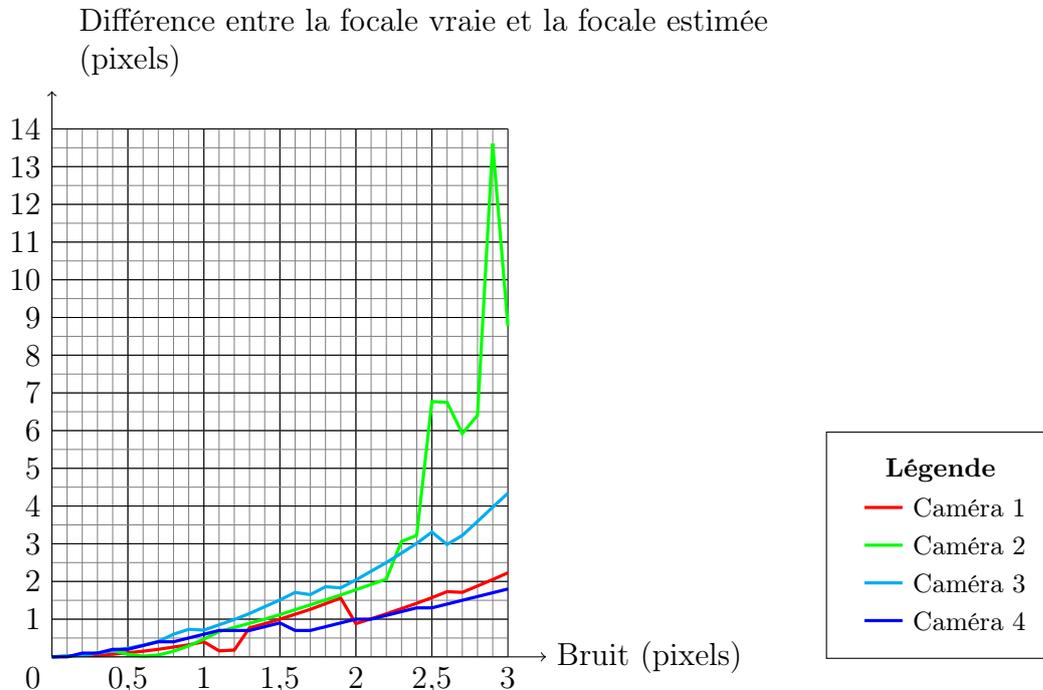


FIGURE 3.11 – Influence du bruit sur la détermination de la focale.

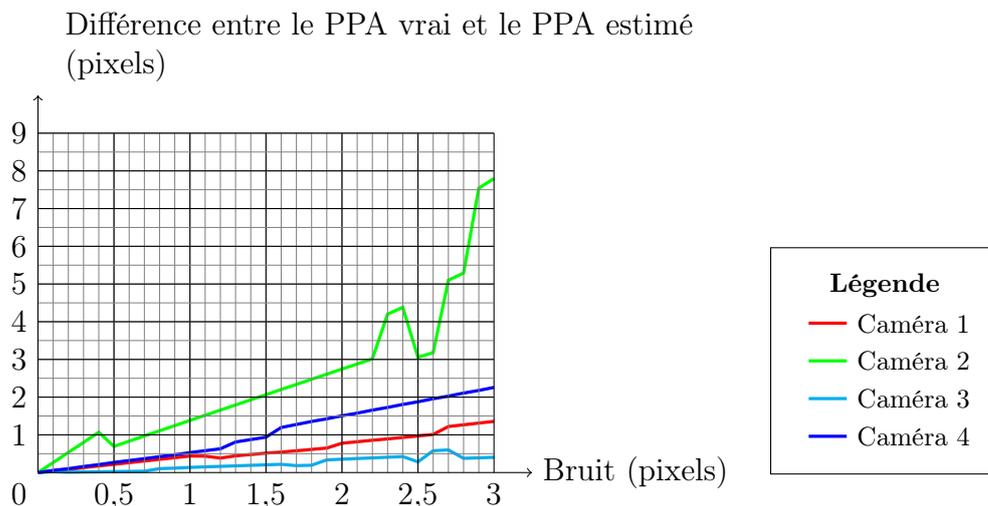


FIGURE 3.12 – Influence du bruit sur la détermination du PPA.

Plusieurs constatations peuvent être faites sur ces expérimentations :

- L'erreur sur la calibration est proportionnelle à l'écart-type du bruit sur les mesures et ce quel que soit le type de caméras,
- Entre 0 et 0,5 pixel de bruit, la calibration des caméras est quasiment parfaite,

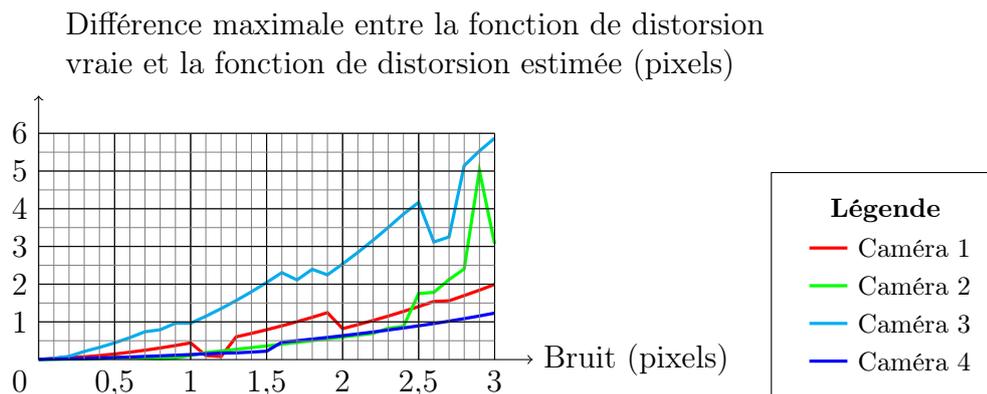


FIGURE 3.13 – Influence du bruit sur la détermination du modèle de distorsion.

- Lorsque le bruit de mesure dépasse 2 pixels, la calibration obtenue peut être significativement éloignée de la "vraie" calibration.

Afin d'utiliser notre processus dans des conditions optimales, nous devons donc nous assurer que le bruit sur les mesures est faible. Pour cela il faut utiliser une méthode d'extraction de points homologues précise (cf. chapitre 5). En géométrie panoramique, toutes les images "voient" la scène du même point de vue ce qui permet de minimiser les erreurs et les biais liés aux changements de relief et de point de vue.

3.2.c.iv Influence de la parallaxe

La calibration panoramique repose sur l'hypothèse que la caméra tourne autour de son centre perspectif et donc que toutes les images ont le même centre de prise de vue. Cette hypothèse est fondamentale car sous-jacente à l'équation 4 {page 43}. Il est donc important d'étudier le comportement de notre méthode si l'hypothèse initiale n'est pas totalement vérifiée. Dans la simulation suivante, nous avons considéré que toutes les mesures homologues étaient faites sur des points situés à une distance fixée (ici 10 mètres) du centre perspectif de notre système¹¹. Ensuite, nous avons simulé une parallaxe comprise entre 1 mm et 10 cm selon les 3 axes.

11. Le paramètre important est le rapport parallaxe/distance fixée mais pas la valeur de la distance elle-même

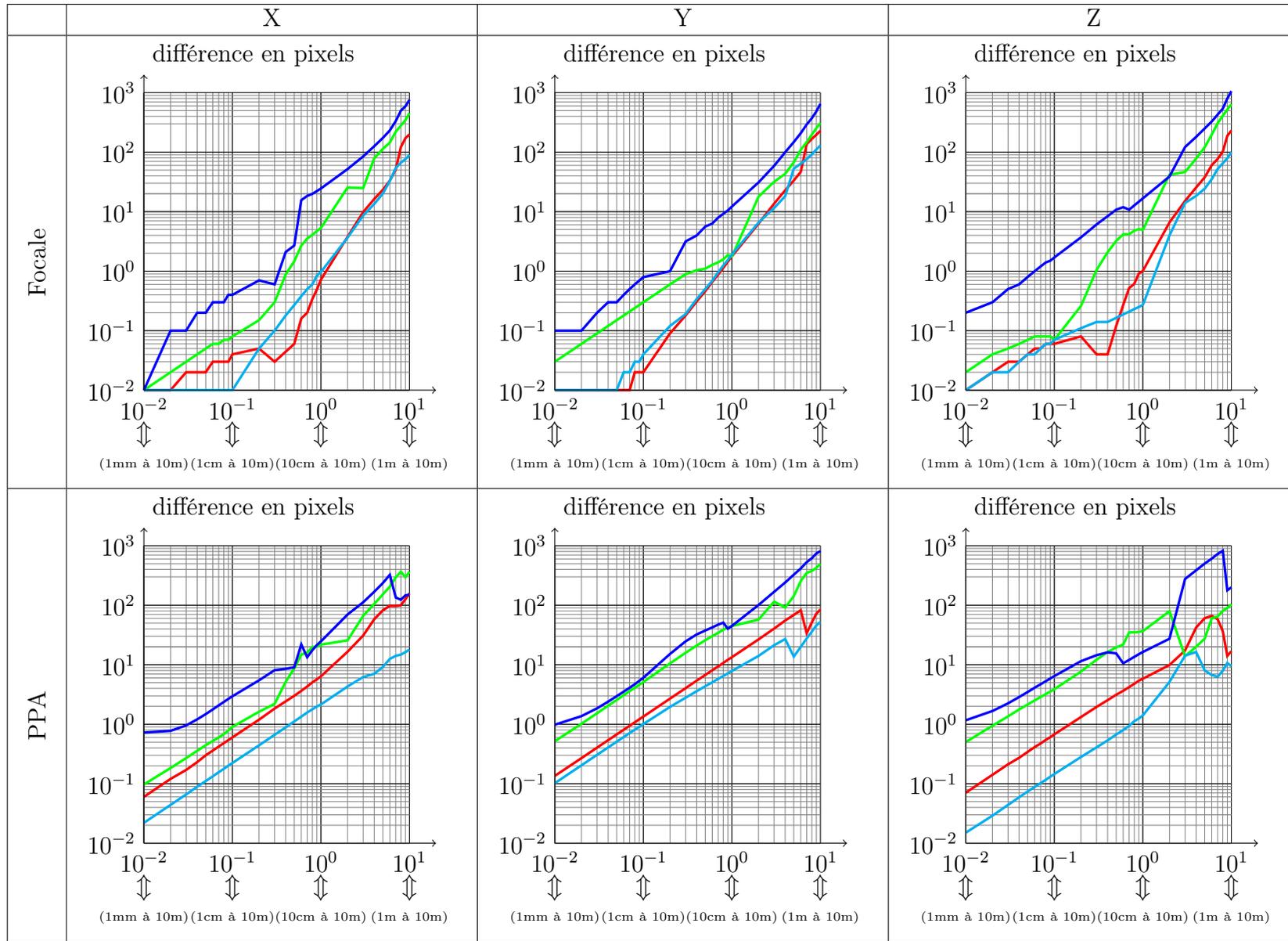


FIGURE 3.14 – Influence de la parallaxe sur la détermination de la focale et du PPA.

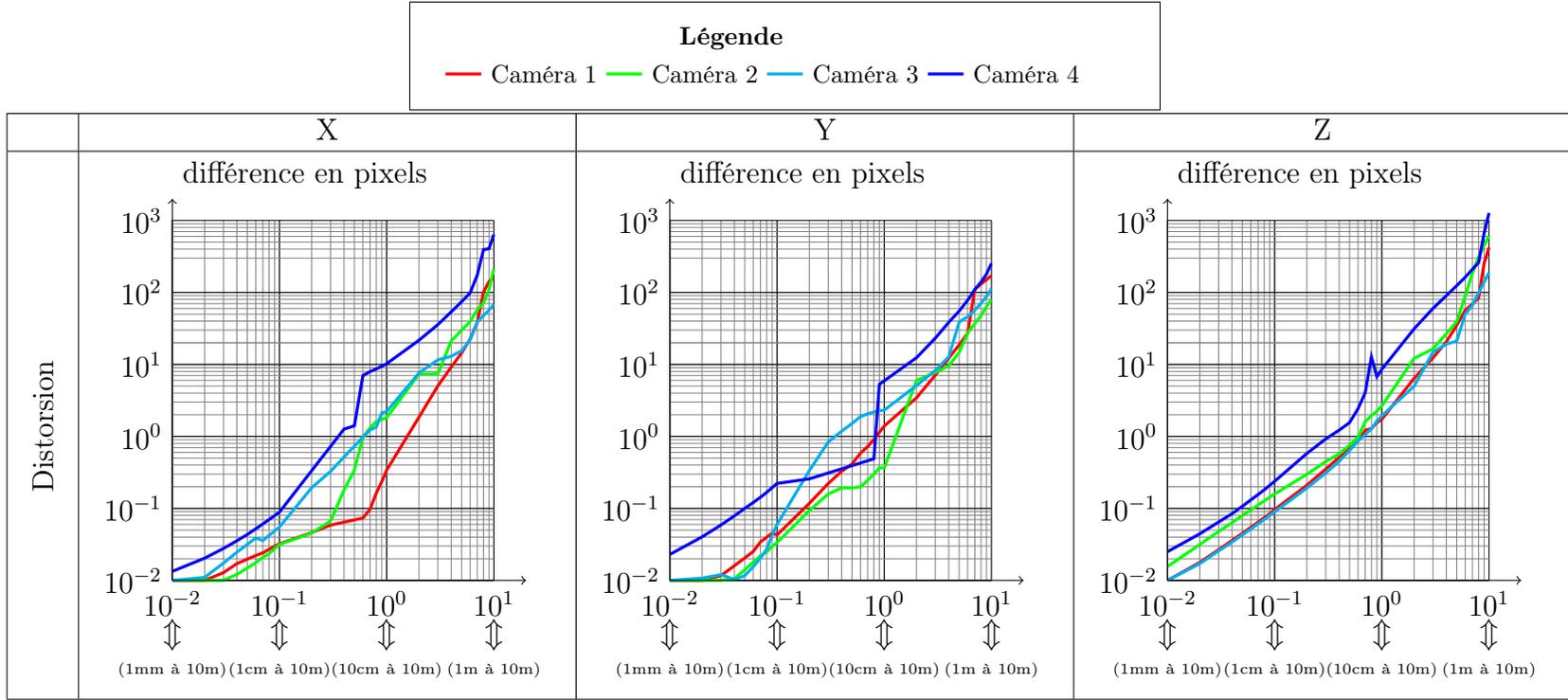


FIGURE 3.15 – Influence de la parallaxe sur la détermination du modèle de distorsion.

Les figures 3.14 et 3.15 récapitulent tous les résultats de l'expérience. Nous pouvons en extraire trois conclusions :

- Une erreur de centrage de 1 cm (en pratique, la caméra peut être positionnée à 2 millimètre cf. sous-section 3.2.a {page 41}) entraîne sur des cibles à 10 mètres une erreur de calibration de 2 pixel sur la focale, le PPA et la distorsion. Ceci est relativement faible.
- Quel que soit le type de caméra, le processus converge vers les valeurs quasi exactes lorsque la parallaxe est faible.
- L'erreur sur la calibration est plus importante lorsque l'erreur de positionnement se trouve selon l'axe de visée (axe Z). Plus la focale est longue, plus les effets de la parallaxe se ressentent sur la qualité de la calibration.

La simulation permet de voir si un processus est fiable et sensible au bruit et/ou aux défauts de mécanique mais ne permet pas de conclure totalement quant à la validité expérimentale d'une méthode dans des cas réels. En effet, la répartition des mesures ne sera pas forcément homogène, les mesures homologues ne seront pas parfaites et le bruit sur les mesures ne sera pas forcément gaussien ¹².

3.2.d Résultats sur données réelles

Le site utilisé pour les acquisitions réelles est le hall de l'École Nationale des Sciences Géographiques (voir figure 3.16). Ce site a été choisi parce qu'il a un grand volume intérieur ce qui permet de limiter les effets de la parallaxe résiduelle ¹³ due au défaut de centrage de l'appareil sur le dispositif.



FIGURE 3.16 – Site d'expérimentation pour la calibration de caméra.

Nous allons maintenant vérifier les résultats de nos simulations en utilisant des données réelles. En ce qui concerne les mesures nous avons utilisé Scale Invariant Feature Transform (SIFT) de [Lowe, 2004] pour l'extraction de points caractéristiques ainsi que son descripteur. Ce choix est argumenté dans le chapitre 5 et présente un bruit faible (inférieur au demi-pixel dans le cas général, mais inférieur dans le cas présent où l'on est du même point de vue).

12. Ou tout autre méthode de simulation de bruit.

13. Plus les objets sont loin de la caméra, moins les effets de décentrage de la caméra ont une influence sur la calibration.

La figure 3.17 représente la chaîne de traitement de Cyclopolis, de l'acquisition à la calibration. En entrée du processus, nous devons choisir les recouvrements longitudinaux et latéraux des images ainsi que le temps de pose. Les points SIFT sont extraits et l'appariement est fait. La phase de calibration peut avoir lieu dès que l'ensemble de ces processus a été réalisé (quelques minutes).

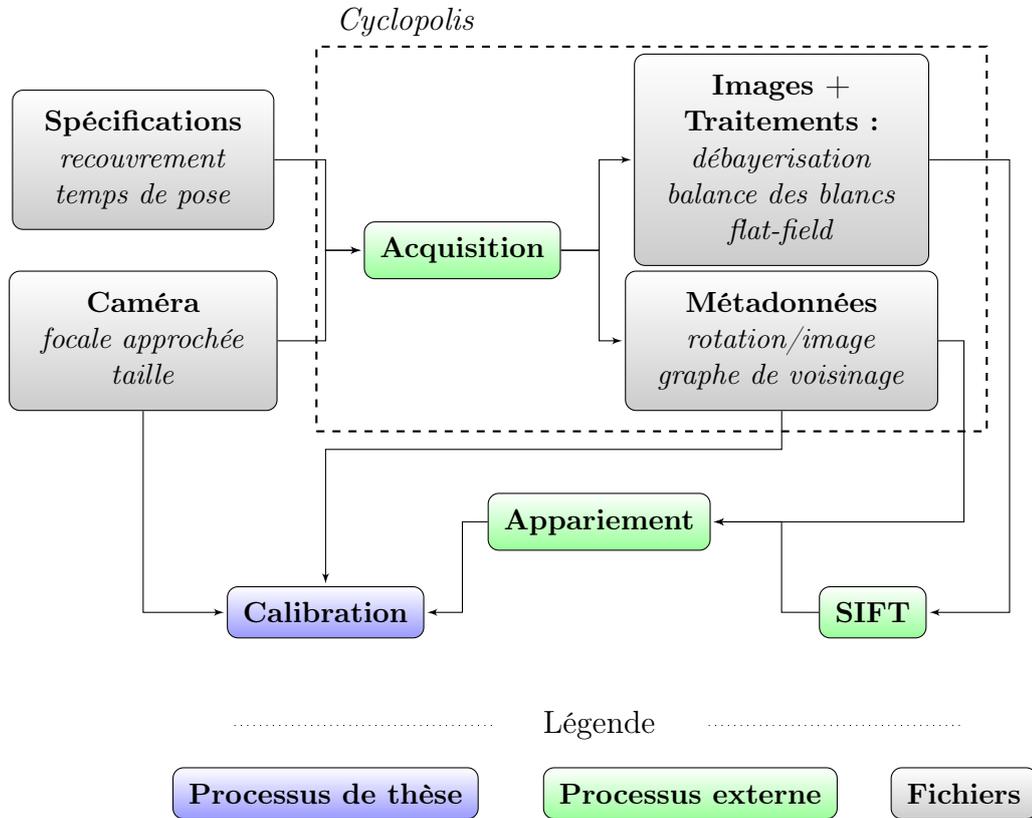


FIGURE 3.17 – Traitement des données de Cyclopolis.

3.2.d.i Influence de la parallaxe

Pour étudier l'influence de la parallaxe, nous avons réalisé deux jeux de données. Le système Cyclopolis a été placé au même endroit, les images ont été prises aux mêmes emplacements, mais par contre, la caméra a été désaxée de 5 cm entre les deux acquisitions.

Le tableau 3.4 présente les résultats des deux calibrations. Les valeurs indiquées comparent la calibration de la caméra dans le cas d'une panoramique parfaitement centrée et une calibration avec une caméra décentrée. $\delta_{simu.}$ est l'écart observé lors des simulations et δ_{reelle} est l'écart observé avec les données réelles. Concernant la focale, l'écart est de 3,43 pixels tandis que moins de 1 pixel de différence était prévu sur les simulations. L'écart sur le PPA est de 0,5 pixel ce qui est beaucoup mieux que les simulations (5 pixels). Pour finir, l'écart sur la distorsion est de 2,84 pixels d'écart (au maximum), tandis que moins de 1 pixel de différence était prévu sur les simulations.

La figure 3.18 présente les histogrammes des résidus image entre la panoramique compensée avec la calibration panoramique centrée (figure 3.18.a) et la panoramique compensée avec la calibration sur la panoramique désaxée (figure 3.18.b). Les résidus image sont

	$focale$	l_{PPA}	c_{PPA}	l_{PPS}	c_{PPS}	$r^3 \cdot 10^{-08}$	$r^5 \cdot 10^{-14}$	$r^7 \cdot 10^{-21}$
Montage Parfait	1402,58	546,47	955,24	528,84	965,84	-4,926	3,373	-4,283
Montage Désaxé	1399,15	551,55	957,53	527,81	973,52	-5,111	3,455	-5,158
δ_{reelle}	3,43	5,00		2,84				
$\delta_{simu.}$	0,52	0,53		0,49				

TABLE 3.4 – Valeurs des calibrations avec et sans parallaxe sur les données réelles et simulées.

plus élevés en utilisant la calibration réalisée avec la panoramique désaxée mais ils restent dans des proportions raisonnables (majoritairement inférieurs au pixel).

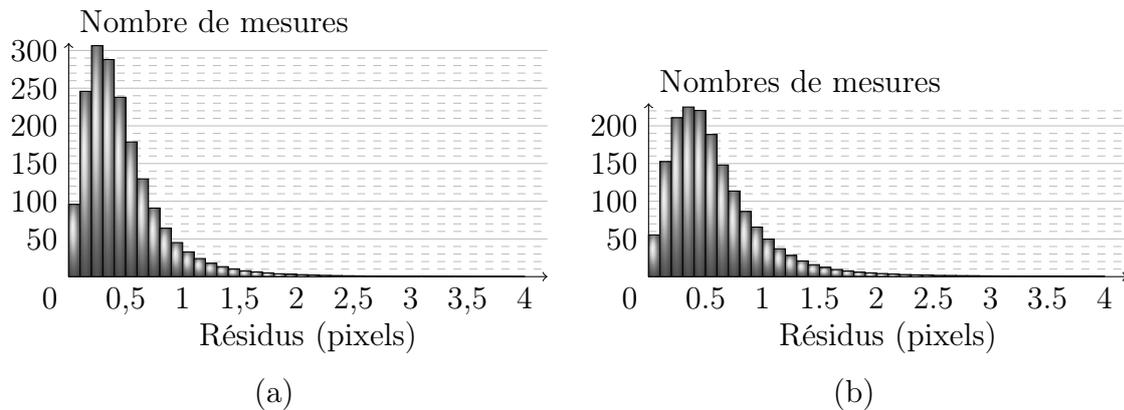


FIGURE 3.18 – Histogrammes des résidus après compensation de la panoramique en tenant compte de la calibration de la caméra centrée (a) et de la calibration de la caméra désaxée (b).

En conclusion, la parallaxe a une influence sur la calibration qui est quatre fois plus grande sur les données réelles que sur les simulations. Par contre, une parallaxe de 5 cm pour le positionnement est très exagérée, en pratique on peut centrer la caméra au millimètre (cf. partie 3.2.a {page 41}). Ce choix a été fait pour avoir des résultats parlant. Sur un site comme le hall de l’ENSG (objets éloignés de la caméra de manière homogène), en multipliant l’erreur obtenue avec les simulations par quatre, une précision de l’ordre du dixième de pixel peut être attendue.

3.2.e Conclusion

Dans cette partie, nous avons démontré l’intérêt de calibrer une caméra pour des applications de mesures fines (de l’ordre du pixel). Nous avons vu que l’acquisition de type panoramique permet de calibrer une caméra qui présente de la distorsion même forte. Cette méthode présente de nombreux avantages : elle ne nécessite pas de matériels d’acquisition coûteux ni de polygone ou de mire, et n’a besoin que d’un système de motorisation pan-tilt pour extraire les mesures homologues.

Il reste encore des perspectives à ce travail, au niveau de l’expérimentation sur différents types de caméras, notamment aériennes. Nous n’avons pas pu le faire dans le cadre de cette thèse car cela nécessite le développement de matériel spécifique : Cyclopolis ne

pouvant pas supporter le poids d'une caméra aérienne. Une seconde perspective est l'inclusion d'un modèle de distorsion plus complexe, par exemple un polynôme généralisé, puis de déterminer dans le processus les coefficients à conserver dans la modélisation afin d'avoir le modèle adapté à la caméra. Une seconde perspective concerne l'appariement. En effet, une source d'erreur principale est l'erreur d'appariement qui est dû au phasage de l'objet dans la grille. A priori cette erreur est systématique et aléatoire. Elle peut être réduite significativement par des techniques de corrélation sub-pixellaires ([Craciun, 2010]).

Chapitre 4

Calibration de systèmes multi-caméras embarqué sur véhicule

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté une méthode pour déterminer les paramètres intrinsèques des caméras. Nous savons donc modéliser avec précision la projection d'un point 3D dans le repère de la caméra sur une image 2D. Nous allons maintenant nous intéresser aux différentes manières d'estimer la position des centres perspectifs et des orientations des caméras sur un véhicule de numérisation mobile. Cette étape est nécessaire pour considérer le véhicule et ses caméras comme un ensemble rigidement lié plutôt que de considérer chaque image comme indépendante.

Dans un premier temps, nous ferons l'état de l'art des méthodes existantes, puis nous établirons la formule image¹ pour un véhicule de numérisation mobile. Nous présenterons ensuite les deux méthodes que nous avons mises en œuvre : la première issue de l'état de l'art tandis que la seconde a été développée dans le cadre de cette thèse. Enfin nous effectuerons une comparaison de ces méthodes et conclurons sur le protocole adapté.

4.1 Motivations

Le design photogrammétrique sur le véhicule Stéréopolis V2 a été défini pour répondre à des besoins de diffusion (mât panoramique munis de 10 caméras) et de mesures fines (bases stéréoscopique avant et arrière) par modélisation sur plan dans un logiciel de conception assistée par ordinateur [CATIA, 2013]. La réalisation des pièces puis l'assemblage ont été faits dans les ateliers de l'IGN. Toutes ces étapes introduisent des écarts entre les plans théorique et sur réalisation, ce qui se traduit par des erreurs de positionnement et/ou d'orientation des capteurs qui doivent être évaluées.

Le schéma 4.1 représente l'influence d'une erreur de positionnement sur l'orientation d'une camera. ϵ représente l'erreur de montage et α l'erreur d'orientation. En raisonnant en 2 dimensions, on constate qu'une erreur d'un dixième de millimètre (erreur de perçage) peut introduire des écart de 3 à 5 pixels pour deux fixations espacées de 73 mm (cette valeur correspond aux caméras qui sont sur les côtés) et de 7 à 10 pixels pour deux fixations espacées de 38 mm (cette valeur correspond aux caméras avants et arrières). Ces erreurs

1. Par analogie avec la photogrammétrie traditionnelle, formule qui permet de passer d'un point en coordonnées terrain à sa position dans une image pour une position du véhicule donnée.

ne sont pas significatives pour des applications de navigation ou de texturation de modèles 3D. Pour les applications métrologiques que nous visons avec ce système (présentées dans le chapitre 2), nous sommes tenus de déterminer précisément les positions et orientations des capteurs [El-Sheimy, 1996], [Cramer et Stallmann, 2002].

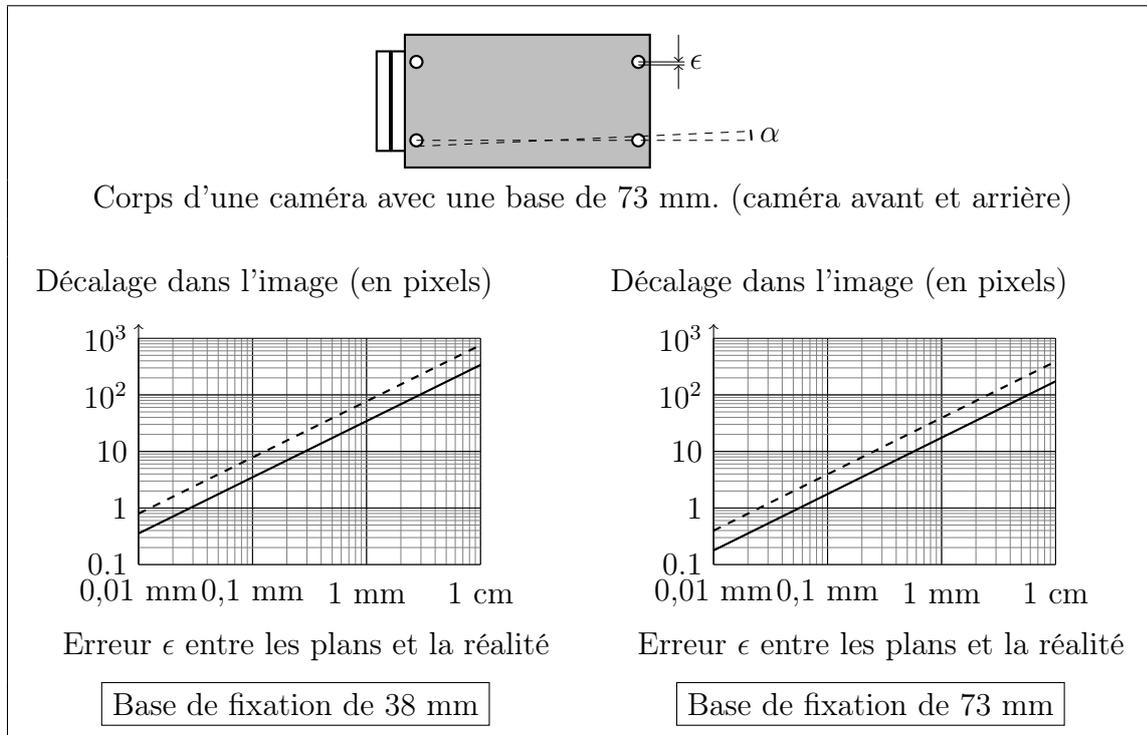


FIGURE 4.1 – Écart sur la mesure image lors d'un défaut de montage. La ligne continue représente l'erreur au centre de la caméra tandis que la ligne en pointillée représente l'erreur en bord d'image.

4.2 État de l'art

Différentes méthodes existent pour positionner de façon précise un capteur sur un véhicule :

La mesure directe du capteur : il s'agit de mesurer directement, par des méthodes de topométrie classique, la position du capteur dans le repère du véhicule en se servant de cibles facilement identifiables et dont les coordonnées sont connues dans le référentiel capteur. Malheureusement, les caméras ne possèdent pas ce type de détails. Ensuite, suivant la conception du véhicule, les caméras ne sont pas forcément visibles et mesurables facilement. Ces limitations ont conduit à des travaux sur des nouvelles méthodes.

Méthodes en deux étapes : il s'agit soit :

- de calibrer les caméras entres elles sur un site, puis de calibrer les autres capteurs (GPS, INS) avec le groupe de caméras,
- de calculer les poses de toutes les images directement par rapport au terrain puis en déduire les positions relatives par rapport au véhicule.

Voici quelques procédures utilisant soit la première manière (a) soit la seconde (b) :

- Méthode a : — [Wang et al., 2012] réalisent une première calibration sur polygone pour estimer la position de toutes les caméras entre elles, puis une seconde en extérieur pour déterminer la position du GPS par rapport aux caméras.
- Méthode b : — [Esquivel et al., 2007] proposent de calculer pour chaque caméra une trajectoire et ensuite de trouver l'orientation relative des caméras.
- [Kumar et al., 2008] utilisent des miroirs pour que les caméras visualisent la même scène soit directement soit au travers d'un miroir. Pour nos applications il faudrait de nombreux miroirs (un par caméra) possédant une qualité optique parfaite, ce qui les rend très coûteux.
 - [Habib et al., 2011] et [Rau et al., 2011] calculent les poses de toutes les images directement par rapport au terrain puis en déduisent les positions relatives par rapport au véhicule.

Le principal inconvénient de ces approches en 2 étapes est qu'on obtient plusieurs poses relatives des caméras par rapport au véhicule. Il faut donc ensuite calculer la pose relative optimale. Pour la translation, une moyenne peut être faite, mais pour les rotations le problème est plus complexe : [Schaer et al., 2003] proposent une méthode stochastique qui permet de déterminer la rotation en pondérant les différentes orientations en fonction des résultats des calculs intermédiaires ou plus récemment [Hartley et al., 2013] présentent différentes méthodes permettant de "moyenner" les rotations.

Nous avons donc cherché une autre méthode ne présentant pas ce défaut pour effectuer la calibration.

Méthodes en une étape : cette technique consiste à injecter directement les poses relatives des caméras dans le processus de minimisation. [Habib et al., 2011] proposent de modifier l'équation de colinéarité afin de tenir compte des différents repères (caméras, véhicule, terrain) et présentent des résultats sur des simulations.

[Kersting et al., 2012] présentent des résultats de la méthode précédente sur des données réelles. Ces deux approches utilisent des cibles qui sont connues dans le système terrain.

[Lébraly et al., 2011] proposent une méthode qui utilise des cibles mais dont la position n'est pas connue en 3 dimensions.

Ces méthodes en une étape correspondent à la réalité mécanique du système mais complexifient la mise en équation du problème.

Dans notre cas, nous avons choisi d'utiliser une méthode en une étape. Elle correspond à la réalité du système : une pose par caméra par rapport au véhicule et une pose du camion par rapport au terrain. Dans un premier temps, nous utiliserons des cibles dont les coordonnées sont connues en 3D. Dans un second temps, nous présentons une variante par auto-calibration qui a été développée dans le cadre de cette thèse et qui présente plusieurs avantages :

- ne nécessite pas de cible,
- ne nécessite pas de points définis en 3D,
- ne nécessite pas d'acquisition spécifique,
- cohérente avec la mission.

4.3 Formulation du problème

4.3.a Formule image

La formule image ou équation de colinéarité est la formule qui permet de passer d'un point M en 3 dimensions à sa mesure dans l'image en colonne et en ligne (c et l) [Schmid, 1959], [McGlone et al., 2004]. Cette formule est explicitée dans l'équation 1 (c_{PPA} et l_{PPA} sont les coordonnées du PPA, \mathcal{R} et S l'orientation et la position de l'image par rapport au terrain) et p la distance focale.

$$\begin{pmatrix} c \\ l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{PPA} \\ l_{PPA} \end{pmatrix} - p \frac{\mathcal{R}(M - S)}{{}_t\mathbf{k}\mathcal{R}(M - S)} \quad (1)$$

Pour déterminer la formule qui permet de passer d'un point en coordonnées terrain à sa position dans l'image dans le cas d'un véhicule de numérisation mobile, nous avons besoin de définir différents repères :

Le repère caméra : le premier axe est dirigé dans le sens des colonnes croissantes, le second est dirigé dans les lignes croissantes et le dernier est défini de manière à définir un repère orthogonal dans le sens direct².

Le repère Stéréopolis : ce repère est directement lié au véhicule. Nous l'avons choisi confondu avec le repère de la centrale inertielle afin d'éviter de rajouter un repère intermédiaire et des bras de levier inutiles qu'il faudrait déterminer.

Le repère terrain : il est notre repère de travail. La position du véhicule ainsi que celle des points 3D sont exprimés dans ce repère. Il est notre repère de minimisation c'est pourquoi il doit être orthonormal.

L'équation 2 permet de passer du repère terrain au repère Stéréopolis :

$$M_{ste} = \mathcal{R}_{ter,ste}(M_{ter} - \mathcal{S}_{ter,ste}) \quad (2)$$

L'équation 3 permet de passer du repère Stéréopolis au repère caméra.

$$M_{cam} = \mathcal{R}_{ste,cam}(M_{ste} - \mathcal{S}_{ste,cam}) \quad (3)$$

Les repères introduits ainsi que les matrices de changement de base associées sont illustrés sur la figure 4.2.

En utilisant l'équation de colinéarité (1) et les formules de changement de repères (2) et (3), nous pouvons établir la formule image qui permet de passer d'un point terrain à une mesure image (équation 4). Les indices i et j représentent la caméra i et la pose j du véhicule. Dans la suite du manuscrit, nous utiliseront la notation $f_{i,j}(M)$ qui permet de passer d'un point M_{ter} en 3D à sa position m en colonne ligne.

$$\begin{pmatrix} c \\ l \end{pmatrix}_{i,j} = \begin{pmatrix} c_{PPA} \\ l_{PPA} \end{pmatrix}_i - p_i \frac{{}_t\mathbf{k}\mathcal{R}_{ste_j,cam_i} \mathcal{R}_{ter,ste_j} (M_{ter} - (\mathcal{R}_{cam_i,ste_j} \mathcal{S}_{cam_i} + \mathcal{T}_{ste_j,ter}))}{{}_t\mathbf{k}\mathcal{R}_{ste_j,cam_i} \mathcal{R}_{ter,ste_j} (M_{ter} - (\mathcal{R}_{cam_i,ste_j} \mathcal{S}_{cam_i} + \mathcal{T}_{ste_j,ter}))} \quad (4)$$

$$m = f_{i,j}(M_{ter})$$

2. il est le même que celui défini dans la partie 3.1.a {page 32}.

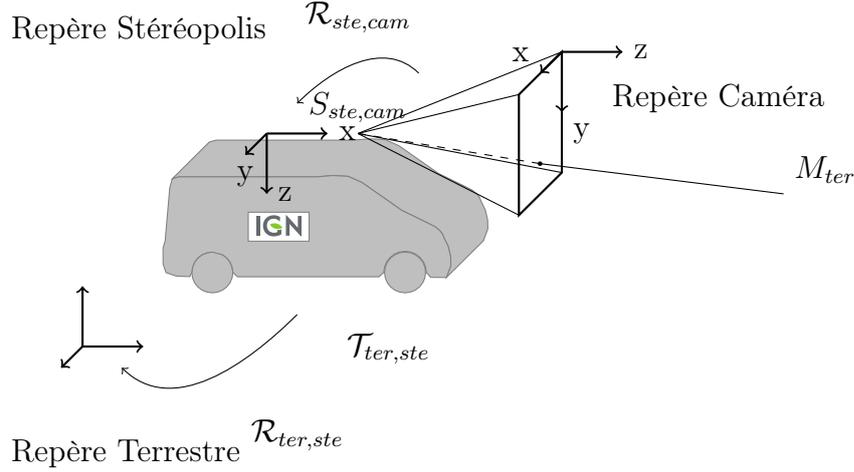


FIGURE 4.2 – Présentation des différents repères utilisés.

4.3.b Système à minimiser

La calibration consiste à utiliser la formule 4 en cherchant à estimer les paramètres $\mathcal{S}_{ste,cam}$ et $\mathcal{R}_{ste,cam}$ décrivant respectivement la position et la rotation des caméras sur le véhicule. Pour chaque panoramique, on doit en plus déterminer la position et l'orientation du véhicule dans le repère terrestre ($\mathcal{S}_{ter,ste}$ et $\mathcal{R}_{ter,ste}$).

Dans la partie 2.2.d {page 14}, on a constaté que la précision du système de positionnement est de l'ordre du décimètre, ce qui n'est pas adapté pour notre processus qui requiert une précision millimétrique. Il faut donc soit mesurer, soit déterminer la position et l'orientation du véhicule dans le référentiel terrain.

Une méthode possible serait de mettre le véhicule sur cales afin de rendre le véhicule solidaire du sol en annulant les mouvements dus aux suspensions, puis de déterminer sa pose par topométrie. Pour cela, il faudrait mesurer la position de points connus sur le véhicule et sur le terrain pour déterminer sa position et son orientation. Ce processus étant relativement long et complexe, nous avons choisi de déterminer ces paramètres dans notre minimisation.

Les inconnues du système d'équations sont explicitées dans l'équation 5. Il y en a 6 par caméra (avec $NbCam$ le nombre de caméras), 6 par panoramique (avec $NbPano$ le nombre de panoramiques) et 3 par point d'appui ($NbPts$).

$$X = \left([\mathcal{T}_{cam,ste}^i, \mathcal{R}_{cam,ste}^i]_{i=0}^{NbCam}, [\mathcal{T}_{ste,ter}^j, \mathcal{R}_{ste,ter}^j]_{j=0}^{NbPano}, [\mathcal{M}_{ter}^k]_{k=0}^{NbPts} \right) \quad (5)$$

On remarque que l'équation 4 n'est pas linéaire par rapport aux inconnues. Pour résoudre notre système d'équations, nous le linéariserons et utiliserons une solution initiale qui sera explicitée ci-après pour les différents cas d'utilisation. De manière itérative, nous calculerons ensuite les valeurs des inconnues à l'itération $N + 1$ en utilisant la solution à l'itération N du système 6.

$$\left[\frac{df_{i,j}(M_{ter}, X_N)}{dX} \right]_{X_N} dX = m - f_{i,j}(M_{ter}, X_N)$$

$$X_{N+1} = X_N + dX \tag{6}$$

Le détail de la différentielle de la formule image est donnée en annexe A {page 173}

Après avoir posé mathématiquement notre problème, nous allons étudier dans les sections suivantes deux techniques différentes pour le résoudre : la première à l'aide d'un réseau de cibles métrologiques et la seconde en les considérant comme non connues.

4.4 Calibration sur polygone dite méthode « Off-Line »

La première technique de calibration présentée est inspirée de la méthode en une étape décrite dans la section 4.2 {page 56}. Nous avons appelé cette méthode « la calibration sur polygone » ou « Off-Line » parce qu'elle nécessite une acquisition spécifique et un environnement maîtrisé (cibles connues en 3D). Le terme « Off-Line » a été choisi afin de souligner le fait qu'une acquisition spécifique est nécessaire.

Nous allons tout d'abord présenter la zone choisie pour effectuer la calibration puis nous expliciterons les données utilisées. Enfin nous discuterons des résultats et de l'intérêt de la méthode.

4.4.a Notre polygone de calibration

Un polygone de calibration est un réseau de cibles 3D et/ou des détails facilement repérables dans les images et dont les coordonnées 3D ont été déterminées par topométrie classique. La figure 4.4.a présente une cible photogrammétrique et la figure 4.3.b présente un détail facilement identifiable (joint de dilatation sur les murs).

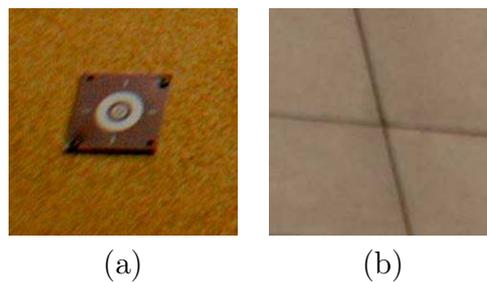


FIGURE 4.3 – Cibles et détails mesurables par topométrie et dans les images.

Le polygone utilisé se situe dans une partie en U d'un bâtiment de l'IGN à Saint Mandé (cf. figure 4.4). Le véhicule peut facilement circuler entre les trois façades d'une hauteur de 15 mètres visibles sur toutes les panoramiques. Le polygone possède 101 cibles et 153 détails remarquables uniformément répartis. La mesure des points a été réalisée par l'unité des Travaux Spéciaux du Service de Géodésie et Nivellement de l'IGN. La précision de positionnement des points dans le système terrain est de l'ordre du millimètre pour les détails mesurables et 0,1 millimètre pour les cibles.



FIGURE 4.4 – Polygone de calibration pour Stéréopolis V2.

4.4.b Données

4.4.b.i Acquisition

Pour l'acquisition, il suffit de faire évoluer le véhicule dans le polygone et de capturer des panoramiques. Afin d'éviter certains biais dus à certaines conditions particulières³, nous veillons à ce que le véhicule change d'orientation entre plusieurs panoramiques. La figure 4.5 présente le véhicule dans le polygone ainsi que les mesures image qui sont faites pour la calibration.

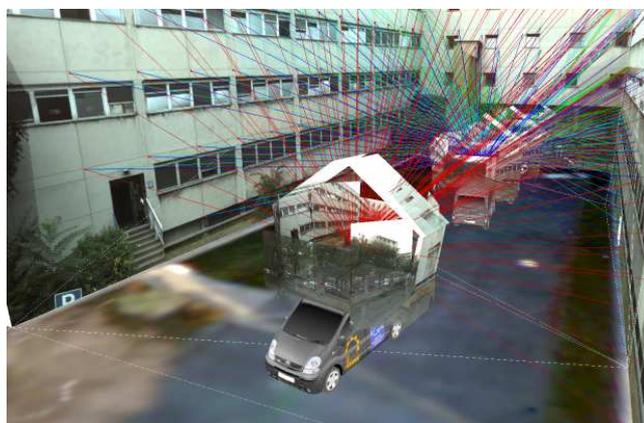


FIGURE 4.5 – Illustration de la calibration « Off-Line » du véhicule Stéréopolis avec les données acquises durant la phase de calibration. Les images des panoramiques sont visibles sous forme de plans et les mesures dans les images sont représentées sous forme de lignes.

La figure 4.6 présente les différentes positions du véhicules (en rouge) à chacune desquelles correspondent une panoramique et les points d'appui (en gris).

3. Ces conditions particulières sont difficiles à caractériser de façon précise. Elles entraînent une instabilité mathématique lors de la résolution du système. Cette instabilité peut être détectée (divergence du calcul) a posteriori mais pas toujours lors de l'acquisition.

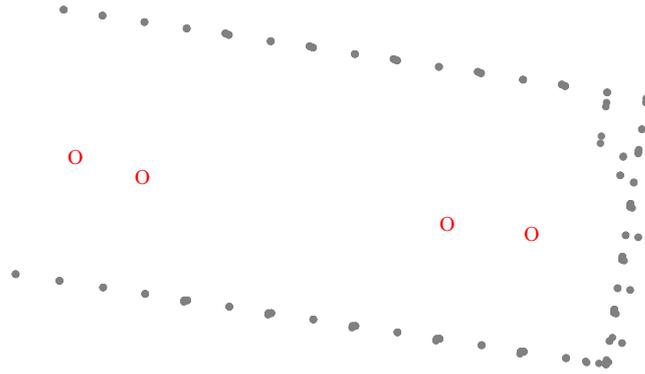


FIGURE 4.6 – Configuration de l’acquisition lors de la phase de calibration. Les points d’appui sont en gris et les positions de panoramiques en rouge.

4.4.b.ii Mesure dans les images

Une fois les données acquises pour effectuer la calibration, il faut mesurer les cibles dans les images. A l’heure actuelle, cette opération est manuelle. L’opérateur est tout de même guidé grâce à la prédiction de la position des cibles dans l’image en utilisant l’équation 4 {page 58} avec comme positions et orientations initiales des caméras, les plans de conception du mât et comme position et orientation du véhicule, la solution donnée par le système de positionnement. L’erreur de prédiction peut être de quelques dizaines de pixels, mais cela permet d’éviter toute erreur de saisie.

On pourrait très bien automatiser cette phase en utilisant des cibles codées [Ahn et Schultes, 1997], ou alors ne saisir que 3 points par panoramique, affiner la position et l’orientation de la panoramique puis détecter automatiquement les autres cibles. En pratique, il faut moins de trois heures de saisie pour obtenir 534 mesures image sur 231 cibles, sachant que cette étape peut être faite en parallèle des autres traitements (récupération des données RINEX de la station permanente la plus proche, post-traitement de trajectoire, création des métas-données...). La phase de calibration doit être réalisée après chaque modification majeure du véhicule (démontage et remontage du mât, changement de caméras).

Après avoir détaillé les différentes données nécessaires, nous allons mettre en équation notre processus de calibration.

4.4.c Formulation mathématique

Pour notre calibration nous avons :

- des panoramiques ($NbPano = 4$) avec une solution initiale donnée par le système de positionnement,
- des positions de caméras ($NbCam = 10$) par rapport au véhicule avec une solution initiale donnée par les plans de CAO,
- des points d’appui connus en 3 dimensions ($NbPts = 231$, cibles ou détails) avec leurs mesures image (c_k, l_k) .

La fonction de coût correspond donc à minimiser l’écart entre toutes les mesures image calculées par la formule image et celles mesurées manuellement (voir équation 7). Dans notre cas nous avons 462 observations pour 84 inconnues ($NbPano \times 6 + NbCam \times 6$).

$$s = \arg \min_{\substack{[\mathcal{S}_{cam}, \mathcal{R}_{ste, cam}]_{i=1}^{NbCam} \\ [\mathcal{T}_{grd, ste}, \mathcal{R}_{grd, ste}]_{j=1}^{NbPano}}} \sum_k^{NbPts} \sum_i^{NbCam} \sum_j^{NbPano} \left(f_{i,j}(M_k) - \begin{pmatrix} c_k \\ l_k \end{pmatrix}_{i,j} \right)^2 \quad (7)$$

Le temps de calcul pour résoudre notre problème est inférieur à la seconde et le nombre d'itérations est de dix. Nous avons choisi de résoudre notre système non linéaire (préalablement linéarisé) grâce à l'algorithme de Levenberg-Marquardt [Levenberg, 1944], [Marquardt, 1963] qui peut être initialisé avec une solution de départ peu précise⁴, dans notre cas quelques mètres sur la position du véhicule et quelques degrés sur l'orientation.

4.4.d Résultats de la calibration

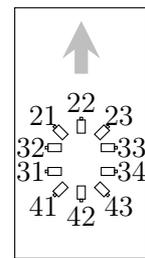
Nous allons maintenant nous intéresser aux résultats en nous attardant d'abord sur les résultats chiffrés, puis nous nous intéresserons aux résultats visuels.

Dans la suite, lorsque nous parlons de résultats sans calibration, cela signifie que les valeurs de pose de caméras par rapport au véhicule sont issues des plans techniques.

4.4.d.i Résultats chiffrés

Le tableau 4.1 présente les moyennes et les écarts-types avant et après calibration par caméra. On constate que sans calibration, les résidus images sont de l'ordre de la dizaine de pixels tandis qu'après calibration, les moyennes sont de l'ordre du demi-pixel. Les écarts-types sont de l'ordre du tiers de pixel en norme L_2 . En norme L_1 , l'écart-type est nul par caméra ce qui signifie qu'il n'y a pas de biais dans le processus de calibration.

Caméras	Avant calibration (pixels)		Après calibration (pixels)	
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
21	6,10	1,31	0,41	0,25
22	3,47	1,99	0,76	0,41
23	7,52	3,63	0,43	0,25
31	18,67	2,50	0,25	0,14
32	15,27	1,79	0,57	0,39
33	8,16	2,02	0,35	0,22
34	22,12	1,91	0,44	0,25
41	6,00	2,24	0,49	0,31
42	2,21	1,09	0,35	0,22
43	5,00	0,89	0,41	0,19



Identifiant des caméras

TABLE 4.1 – Norme L_2 des résidus image par caméra, avant et après calibration.

La figure 4.7 présente l'histogramme des résidus images après calibration pour toutes les caméras. La moyenne des résidus est de 0,49 et l'écart-type est de 0,32 pixel. L'histogramme est concentré autour de la valeur moyenne ce qui signifie que la répartition des erreurs est homogène et qu'il n'y a pas de biais lors du calcul.

4. La méthode de résolution ne change pas la formulation du problème ni sa résolution.

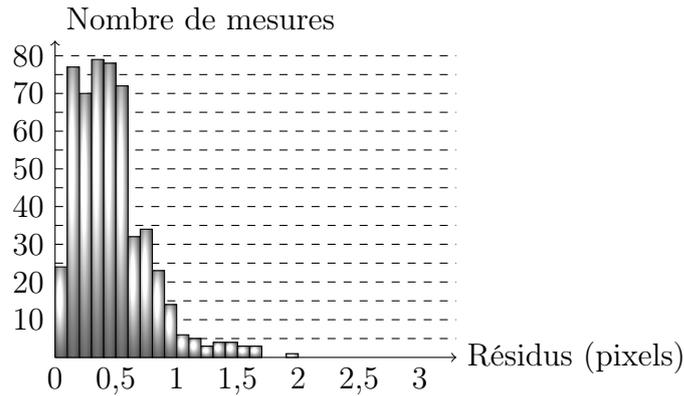


FIGURE 4.7 – Histogramme des résidus sur les mesures image après calibration.

4.4.d.ii Qualification visuelle

Afin de vérifier la qualité de la calibration, nous avons choisi de projeter les images du véhicule sur le modèle 3D du bâtiment. Celui-ci comportant 3 plans principaux, cette opération est simple et fiable à réaliser. L'algorithme utilisé pour texturer les façades avec plusieurs caméras est celui présenté dans [Vallet et Houzay, 2011]. Il permet de choisir les meilleures images pour texturer une face du modèle grâce à différents critères : angles d'incidence, nombre de pixels à projeter, distance à la face. Nous n'avons volontairement pas réalisé d'égalisation radiométrique afin de pouvoir facilement identifier les raccords entre les différentes images.

Les figures 4.8.a et 4.8.b permettent respectivement de faire la comparaison entre la texturation réalisée sans et avec la calibration. Sur les aperçus (figures 4.8.c et 4.8.d) on remarque que les joints des bâtiments, ainsi que les fenêtres, sont bien alignés après calibration. On peut mesurer un écart de 1 pixel entre deux images plaquées sur la même façade, ce qui est cohérent avec les résultats numériques présentés précédemment.

Nous avons étudié les résultats aussi bien chiffrés que visuels après calibration. Pour nous assurer de la fiabilité de notre méthode, nous avons effectué une phase de contrôle qui utilise des données indépendantes de celles utilisées pour la calibration.



FIGURE 4.8 – Comparaison de la texturation des façades des batiments avec les images du véhicule sans tenir et en tenant compte de la calibration.

4.4.d.iii Contrôle de la calibration

Pour vérifier le résultat de notre calibration, nous avons utilisé un jeu de données différent de celui qui a servi pour celle-ci. Ce jeu de données contient 2 positions du véhicule et 188 mesures image. Nous avons utilisé 3 points d'appui et 92 points de contrôle. Nous avons calculé la pose du véhicule en tenant compte des mesures image sur les points d'appui et sur les points de contrôle. La figure 4.9 présente les différentes positions du véhicule (en bleu), les points d'appui (en rouge) et les points de contrôle (en gris). Nous avons

volontairement choisi des points d'appui réparti tout autour des positions du véhicule afin de déterminer celle-ci de façon fiable⁵.

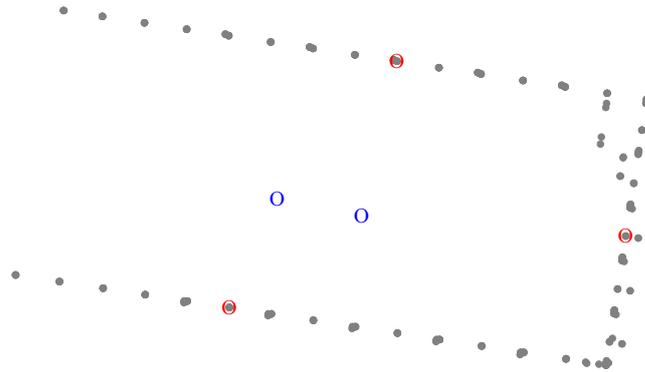


FIGURE 4.9 – Configuration de l'acquisition lors de la phase de contrôle de la calibration. Les points d'appui sont en rouge, les points de contrôle en gris et la position des panoramiques en bleu.

La figure 4.10.a représente l'histogramme des mesures image sans tenir compte de la calibration tandis que la figure 4.10.b tient compte de la calibration. On constate que la procédure de calibration permet d'améliorer significativement les résidus sur les mesures image. La moyenne des résidus est de 1,75 pixel sans calibration et de 0,14 pixel avec. L'écart type des résidus est de 1,56 pixel sans calibration et de 0,11 pixel avec.

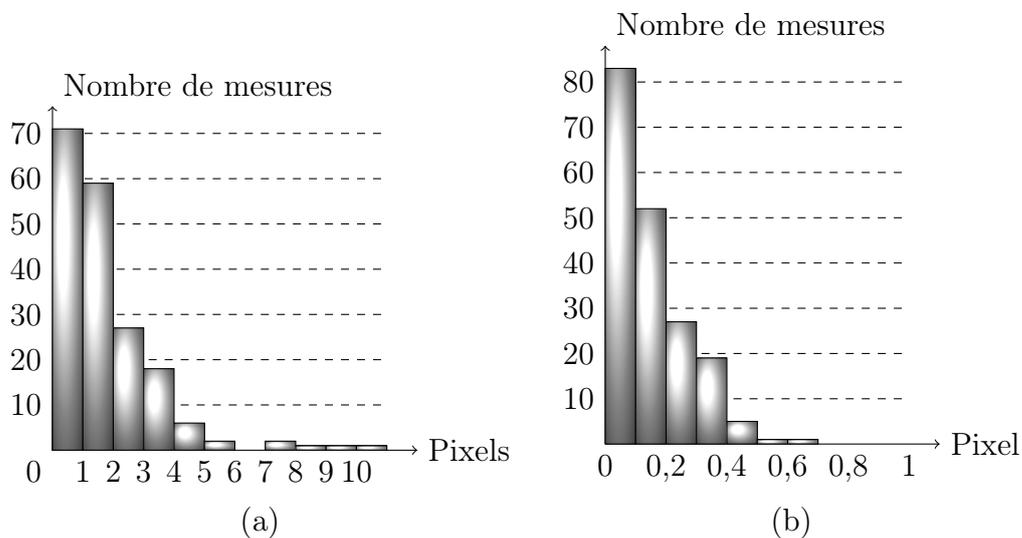


FIGURE 4.10 – Histogramme des résidus sur les mesures image sans tenir compte (a) et en tenant compte (b) de la calibration.

La figure 4.11 représente l'histogramme de répartition des résidus sur les points de contrôle. La moyenne est de 1,6 cm et l'écart-type est de 1,9 cm. On constate que quelques points ont des résidus un peu plus importants (supérieur à 5 cm) mais ce sont des points dont l'intersection n'est pas bien déterminée parce que les faisceaux sont quasiment parallèles. Ils sont à proximité du point d'appui (en rouge) à l'est du plan de la figure 4.9.

5. Le lecteur peut se référer à la section 8.1 {page 113} pour plus d'informations.

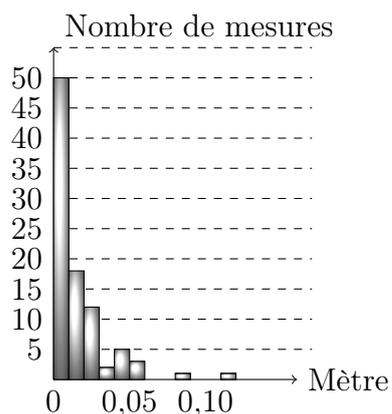


FIGURE 4.11 – Histogramme des résidus sur les points de contrôle en tenant compte de la calibration.

4.4.d.iv Conclusion

Nos résultats montrent qu'une étape de calibration est nécessaire pour des applications qui ont besoin d'effectuer des mesures sur des images plus précises que le pixel. On constate que la méthode sur polygone est efficace pour calibrer un véhicule de numérisation mobile et qu'elle est relativement rapide à mettre en oeuvre lorsqu'un polygone de calibration est disponible. Celui-ci doit être suffisamment large et accessible pour que le véhicule puisse circuler. Des cibles élevées sont nécessaires pour que les caméras regardant en hauteur puissent les photographier. Enfin les cibles doivent pouvoir être facilement mesurables dans les images : il faut par ailleurs prendre garde à la taille des cibles par rapport à la résolution des caméras.

4.5 Calibration par les données dite méthode « On-Line »

La calibration sur polygone présente plusieurs inconvénients. Le premier est qu'il faut posséder un polygone ce qui n'est pas forcément simple et qui est assez coûteux à fabriquer. En cas de modification du véhicule (changement de caméra à cause d'une défaillance par exemple), il faut refaire une calibration sur le site de calibration ce qui n'est pas toujours possible. Nous avons donc développé une méthode « On-Line » qui n'a ni besoin de points d'appui ni besoin d'acquisition spécifique.

4.5.a Principe

Le principe de base pour réaliser une calibration sans points d'appui est d'utiliser seulement des points homologues, points dont les positions terrain ne sont pas connues initialement mais estimées dans le processus de calibration.

Pour réaliser une calibration sans point d'appui, plusieurs panoramiques successives sont nécessaires. Il faut ensuite extraire des points homologues entre les différentes images et les appareiller tout en évitant les fautes. La succession de ces étapes est décrite dans le schéma 4.12 et les méthodes utilisées sont explicitées dans le chapitre 7.

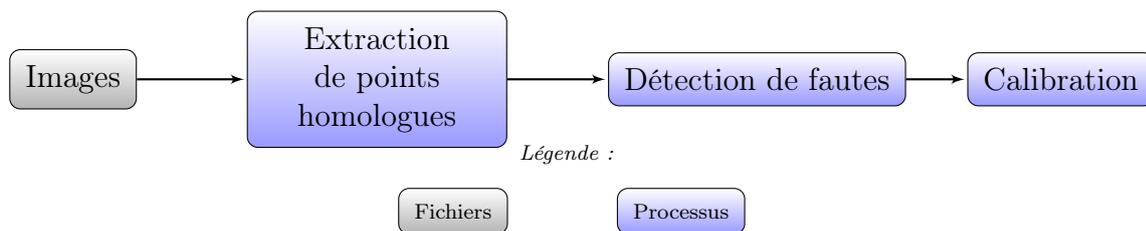


FIGURE 4.12 – Étapes nécessaires à la calibration « On-Line ».

4.5.b Formulation mathématique

La calibration consiste à utiliser la formule 4 {page 58} qui relie un point terrain à une mesure image sur une caméra du véhicule. Pour chaque panoramique, on doit déterminer la position et l'orientation du véhicule ainsi que la position et l'orientation des caméras par rapport au camion. Contrairement à la calibration sur polygone, la position des points homologues est elle aussi inconnue.

Le système d'équation comporte trois groupes distincts d'inconnues :

- la position et l'orientation de chaque caméra,
- la position et l'orientation de chaque panoramique,
- la position de chaque point homologue.

Pour le résoudre, on a deux équations pour chaque mesure image selon la formule 4 {page 58}. La fonction de coût est présentée dans l'équation 8. Elle consiste à minimiser les mesures image $f_{i,j}(M_k)$ des points homologues M_k dans la panoramique j prise par la caméra i :

$$s = \underset{\substack{[\mathcal{S}_{cam}, \mathcal{R}_{ste, cam}]_{i=1}^{\#Nc} \\ [\mathcal{T}_{ter, ste}, \mathcal{R}_{ter, ste}]_{j=1}^{\#Np} \\ [\mathcal{M}_k]_{k=1}^{\#Nm}}}{\arg \min} \sum_i^{Nc} \sum_j^{Np} \sum_k^{Nm} \sum_n^{Ni} \left(f_{i,j}(M_k) - \begin{pmatrix} c_n \\ l_n \end{pmatrix} \right)^2 \quad (8)$$

Si on laisse le système à minimiser tel quel, il n'y a pas unicité de la solution. Il présente 7 degrés de liberté correspondant à la position et à l'orientation des données ainsi qu'à l'échelle. Il faut le stabiliser en fixant 7 inconnues. Il y a différentes façons de procéder :

- fixer la position et l'orientation d'une panoramique ainsi que la distance entre 2 panoramiques (n'importe lesquelles),
- fixer la position de deux panoramiques et un des angles de rotation,
- ajouter trois points d'appui non alignés,
- ou tout autre combinaison d'observations permettant de fixer 7 inconnues.

Quel que soit la méthode utilisée, le résultat de la calibration doit être équivalent.

Une autre façon de faire et de rajouter un terme d'attache au données avec le résultat de l'itération précédente. C'est un algorithme de Levenberg-Marquardt [Levenberg, 1944], [Marquardt, 1963] sauf que le terme d'amortissement ne varie pas. Nous allons donc ajouter plusieurs équations d'observations (équations 9, 10 et 11). Les premières concernent les points homologues, les secondes les positions des panoramiques et les dernières les orientations. La solution finale au niveau de la calibration est bien déterminée mais la position et l'orientation des panoramiques ne sont pas forcément cohérentes avec la réalité.

Pour un point homologue M, il suffit de rajouter l'équation d'observation à l'itération N :

$$M_N = M_{N-1} \quad (9)$$

Pour un sommet S, l'équation d'observation à l'itération N devient :

$$S_N = S_{N-1} \quad (10)$$

Pour une rotation R, l'équation d'observation à l'itération N devient :

$$R_N = R_{N-1} \quad (11)$$

Après avoir explicité le système d'équations à résoudre, nous allons maintenant nous intéresser aux résultats de notre algorithme.

4.5.c Résultats de la calibration « On-Line »

Pour réaliser la calibration du véhicule, nous avons choisi 30 panoramiques le long d'une trajectoire ayant une configuration optimale (point discuté en 4.5.c.ii {page 71}). La figure 4.13.a représente la zone utilisée. Nous avons utilisé 10 756 mesures homologues réparties sur les 300 images. Après avoir effectué la minimisation, nous obtenons une

moyenne de 0,29 pixel et un écart type de 0,40 pixel. Ces résultats, mis en relation avec la qualité de calibration propre à chaque caméra (cf chapitre 3), sont proches des valeurs théoriques.

La figure 4.13.b représente la visualisation à la fin du processus. En blanc nous avons les points homologues en 3D et en noir les différentes positions du véhicule. En rouge, il s'agit du modèle Bati3D sur la zone. Ce modèle n'a pas servi dans le processus mais permet de constater différents éléments :

- les points 3D se trouvent principalement sur les bâtiments et la route,
- la solution du processus, même s'il n'y a pas d'appui, reste cohérente avec des données géoréférencées (de précision métrique).

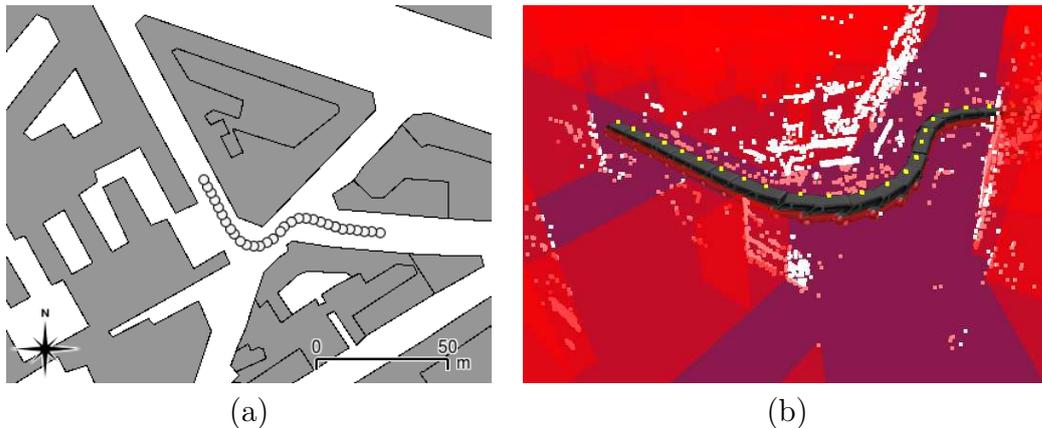


FIGURE 4.13 – (a) Plan du site servant à la calibration « On-Line ». (b) Position des points homologues (en blanc) et modèle Bati3D (en rouge). On constate que les points 3D se trouvent principalement sur les bâtiments et la route et que la solution du processus reste cohérente avec des données géoréférencées.

4.5.c.i Contrôle de la calibration

Pour vérifier le résultat de notre calibration, nous avons utilisé un jeu de données différent de celui qui a servi pour la calibration. Ce jeu de données est le même que celui présenté au paragraphe 4.4.d.iii {page 65}.

La figure 4.14.a représente l'histogramme des mesures image sans tenir compte de la calibration tandis que la figure 4.14.b en tient compte. On constate que la procédure de calibration permet d'améliorer significativement les résidus sur les mesures image. On passe de 1,75 en moyenne et 1,56 en écart-type sans calibration à 0,25 en moyenne et 0,24 en écart-type avec calibration. Notre procédure permet donc d'avoir une précision au demi-pixel.

La figure 4.15 représente l'histogramme de répartition des résidus sur les points de contrôle. La moyenne est de 2,7 centimètres et l'écart-type est de 2,9 centimètres. On constate que quelques points ont des résidus un peu plus importants (supérieur à 5 cm) mais ce sont des points dont l'intersection n'est pas bien déterminée. Cette intersection est mal déterminée car les faisceaux sont quasiment parallèles. Ils sont à proximité du point d'appui (en bleu) à l'est du plan de la figure 4.9.

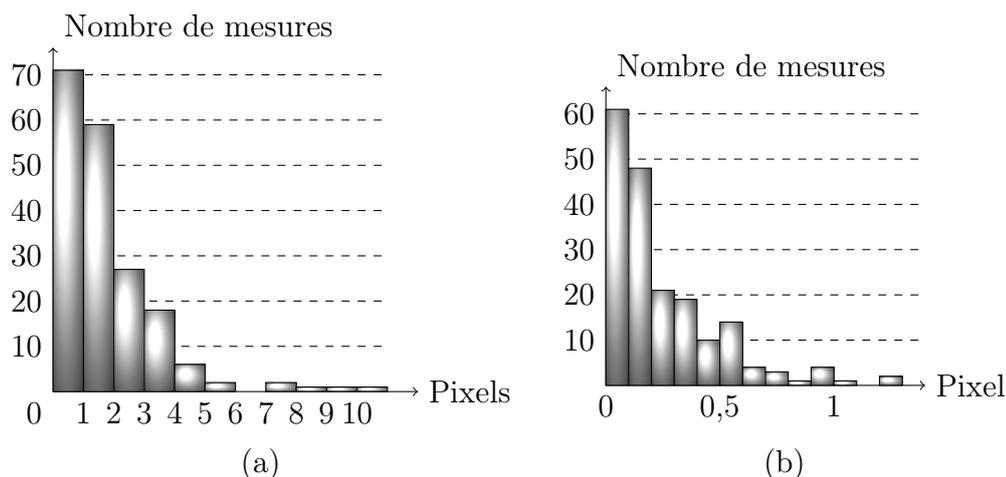


FIGURE 4.14 – Histogramme des résidus sur les mesures image sans tenir compte de la calibration (a) et en tenant compte de la calibration (b).

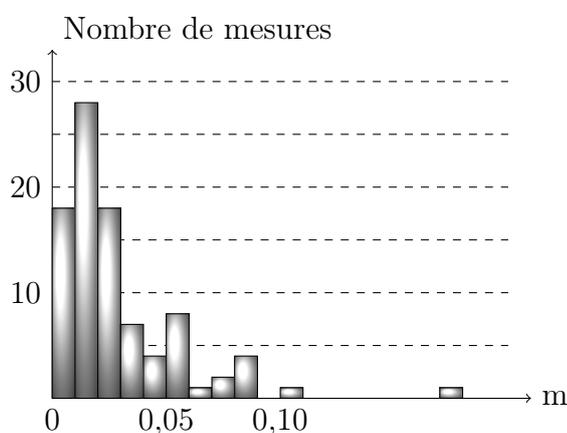


FIGURE 4.15 – Histogramme des résidus sur les points de contrôle.

4.5.c.ii Influence de la configuration

Dans la partie précédente, nous avons démontré que la méthode de calibration « On-Line » donne des résultats satisfaisants. La configuration choisie pour réaliser la calibration était en forme de S et nous l'avons qualifiée d'optimale. Pour affirmer cela, nous avons testé différentes configurations pour calibrer notre plate-forme puis nous avons qualifié les différents résultats de calibration sur une zone test avec des points d'appui et de contrôle. Nous avons choisi d'étudier plusieurs scénarii :

- un virage droite et gauche,
- une ligne droite (3 tailles distinctes),
- une trajectoire en forme de S.

La figure 4.16 présente les différentes configurations utilisées pour les calibrations.

Pour chaque configuration, le processus de calibration « On-Line » décrit précédemment, a été réalisé. On obtient donc autant de calibrations que de configurations. Afin de comparer nos différentes calibrations, nous avons choisi une seconde zone qui comporte : 21 points d'appui, 142 mesures image, et 8 panoramiques. Sur ce site, nous avons déterminé la position et l'orientation du véhicule en tenant compte des différentes calibrations

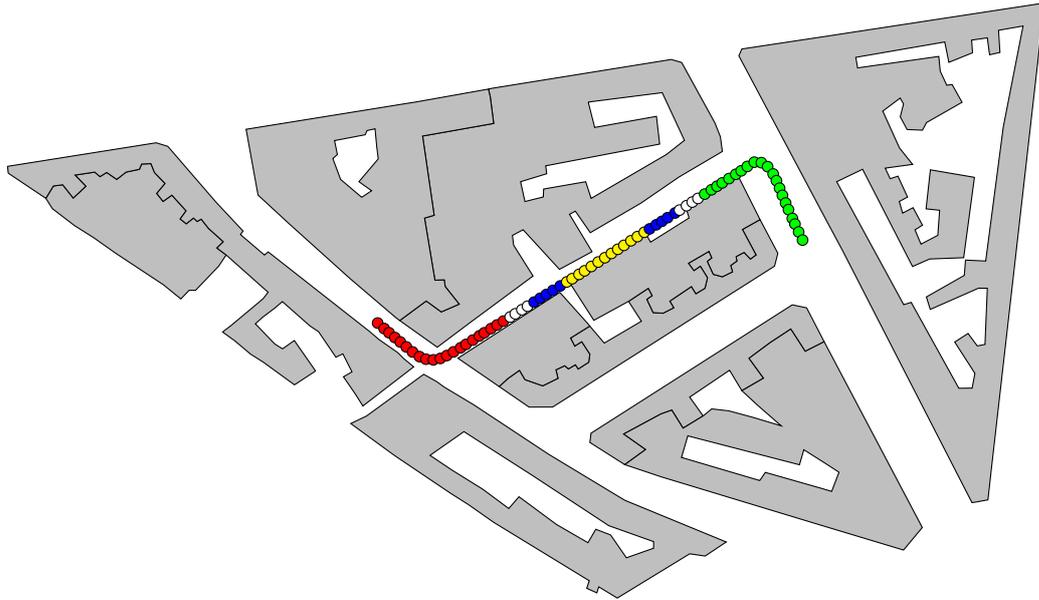


FIGURE 4.16 – Zone de tests des différentes configurations. Les bâtiments sont représentés en gris. Six configurations ont été testées : panoramiques jaune, panoramiques jaune + bleu, panoramiques jaune + bleu + blanc, panoramiques rouges, panoramiques vertes, toutes les couleurs.

issues des diverses configurations.

Le tableau 4.17 présente les résultats (résidus sur les mesures image et sur les points d'appui) sur la zone de vérification de chaque calibration. Les configurations ont été triées par ordre croissant sur les résidus images. Tout d'abord, la meilleure configuration (celle dont les résidus sont les plus faibles) pour calibrer le véhicule est lorsque toutes les panoramiques sont utilisées pour le calcul. Par contre, dans certains cas (ici le dernier), on constate que la procédure peut aboutir à un résultat plus mauvais que celui obtenu sans calibration. Lorsqu'on analyse ce dernier cas, on constate qu'il n'y a pas beaucoup de mesures image utilisées pour la calibration et qu'elles ne sont pas bien réparties.

4.5.c.iii Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté une approche novatrice de calibration de véhicule de numérisation mobile qui n'utilise que des données d'acquisition(s) normale(s). Cette méthode est fiable, précise, et fonctionne dans la plupart des situations. L'utilisateur de cette méthode devra juste s'assurer de la répartition homogène des mesures image.

Nous avons établi deux méthodes de calibrations de notre véhicule qui améliorent de façon significative le positionnement des caméras. Nous allons maintenant faire une comparaison de ces deux méthodes.

4.5. Calibration par les données dite méthode « On-Line »

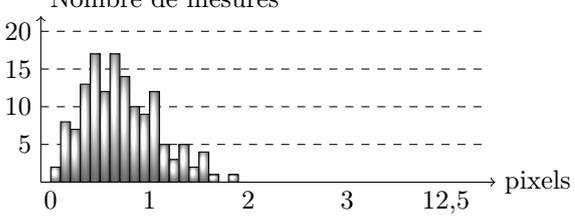
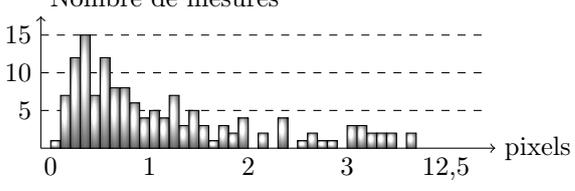
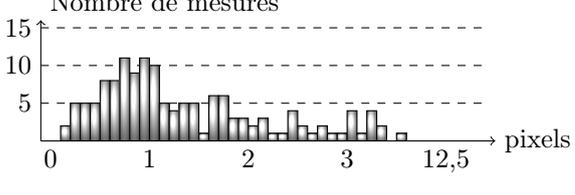
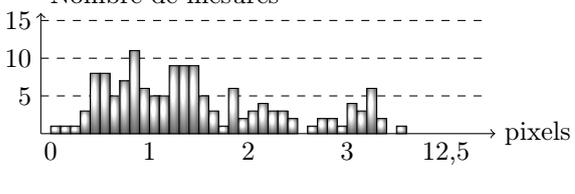
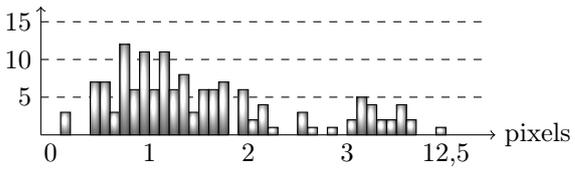
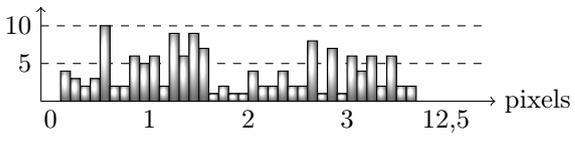
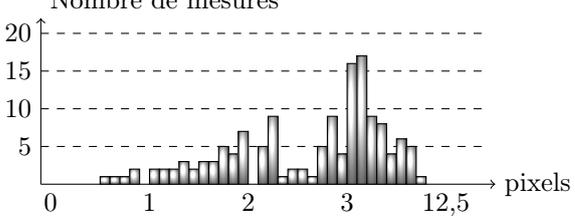
Configuration En bleu, portion de trajectoire utilisée pour la calibration	Répartitions des mesures images	Res. Images (Moyenne) (Ec.Typ.)	Res. Point (Moyenne) (Ec.Typ.)
	<p style="text-align: center;">Nombre de mesures</p> 	$\begin{pmatrix} 0,72 \\ 0,38 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,017 \\ 0,009 \end{pmatrix}$
	<p style="text-align: center;">Nombre de mesures</p> 	$\begin{pmatrix} 1,30 \\ 1,34 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,021 \\ 0,011 \end{pmatrix}$
	<p style="text-align: center;">Nombre de mesures</p> 	$\begin{pmatrix} 1,43 \\ 1,07 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,022 \\ 0,009 \end{pmatrix}$
	<p style="text-align: center;">Nombre de mesures</p> 	$\begin{pmatrix} 1,59 \\ 1,13 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,027 \\ 0,016 \end{pmatrix}$
	<p style="text-align: center;">Nombre de mesures</p> 	$\begin{pmatrix} 1,83 \\ 1,67 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,019 \\ 0,013 \end{pmatrix}$
	<p style="text-align: center;">Nombre de mesures</p> 	$\begin{pmatrix} 2,07 \\ 1,53 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,025 \\ 0,016 \end{pmatrix}$
	<p style="text-align: center;">Nombre de mesures</p> 	$\begin{pmatrix} 3,17 \\ 1,59 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,027 \\ 0,020 \end{pmatrix}$

FIGURE 4.17 – Résultats des différentes configurations. La première colonne indique la portion de trajectoire ayant servi pour la calibration (en bleu).

4.6 Comparaison des méthodes

4.6.a Comparaison entre les processus

Le point commun entre ces deux processus est la détermination de la pose du véhicule et de chaque caméra en utilisant des mesures image homologues. Dans le cas « Off-Line » ces points sont connus en 3D tandis que dans le cas « On-Line » leurs positions doivent être déterminées dans le processus. Dans les deux cas, le processus de calibration est le même. On peut donc envisager une procédure de calibration comprenant et des points homologues (non connus en 3D) et des points d'appui (connus en 3D) mais en quantité limitée (parce qu'ils coûtent cher à produire). Le schéma 4.18 représente les processus de calibration avec leurs différences et leurs points communs.

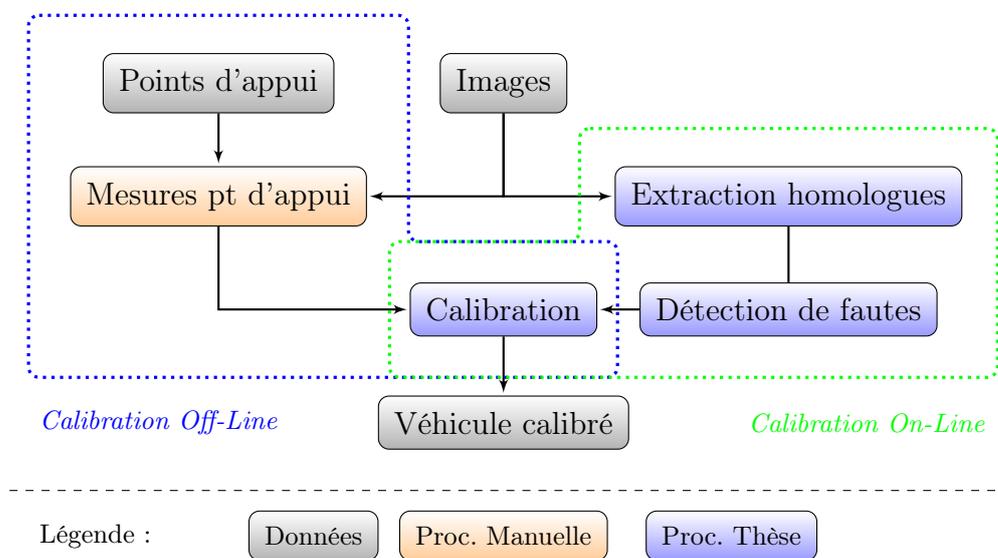


FIGURE 4.18 – Comparaison entre les processus de calibration.

4.6.b Comparaison des résultats de calibration du véhicule

Pour comparer les deux méthodes de calibration, nous avons choisi un site comportant 3 panoramiques consécutives et 22 points remarquables. Sur ces 22 points, 14 ont été utilisés en point d'appui et 8 en point de contrôle. Nous avons mesuré ces points et sur le terrain et dans les images. Nous avons ensuite résolu le système d'équations en cherchant les poses du véhicule et les coordonnées des points de contrôle tout en fixant la calibration du véhicule en utilisant les résultats de chaque procédure.

Le tableau 4.2.a présente les résidus sur les mesures image après compensation sans calibration (plan CAO) et avec les deux méthodes de calibration. On remarque directement qu'une calibration est nécessaire pour pouvoir exploiter les images d'un point de vue photogrammétrique. On constate aussi que les deux méthodes présentent des résultats similaires pour les points d'appui et pour les points de contrôle. Les résidus images sont de l'ordre du tiers de pixel sur les points de contrôle et du demi pixel sur les points d'appui. Il est logique que les résidus images soient plus faibles sur les points de contrôle que sur les points d'appui. Pour les points de contrôle, il n'y a que des observations liées aux mesures

image. Sur les points d'appui, il y a à la fois des observations liées aux mesures image, mais aussi des observations liées à la position des points.

Le tableau 4.2.b présente les écarts sur les points d'appui et de contrôle sur les coordonnées 3D. On constate là aussi qu'une calibration est nécessaire, sinon les écarts sur les positions seraient de plusieurs dizaines de centimètres. On remarque aussi que les écarts sur les points de contrôle pour les deux méthodes sont de l'ordre de quelques centimètres.

		Résidus sur les mesures image							
		Points d'appui				Points de contrôle			
		Max	Med	Moy	Ec.Typ.	Max	Med	Moy	Ec.Typ.
(a)	Sans calibration	11,75	2,13	3,96	3,88	6,73	1,45	2,11	1,83
	« Off-Line »	1,43	0,52	0,54	0,27	0,95	0,26	0,30	0,19
	« On-Line »	1,49	0,50	0,55	0,30	1,04	0,28	0,32	0,21

		Résidus sur les points							
		Points d'appui				Points de contrôle			
		Max	Med	Moy	Ec.Typ.	Max	Med	Moy	Ec.Typ.
(b)	Sans calibration	0,125	0,020	0,030	0,029	1,034	0,269	0,396	0,350
	« Off-Line »	0,012	0,004	0,005	0,003	0,092	0,040	0,044	0,023
	« On-Line »	0,013	0,004	0,005	0,004	0,032	0,025	0,023	0,009

TABLE 4.2 – Résultats sur le site de contrôle des méthodes « Off-Line » et « On-Line ». (a) Résidus sur les mesures image sur les points de contrôle et d'appui (en pixel). (b) Résidus sur les points de contrôle et d'appui (en mètre).

4.6.c Comparaison de la répartition des mesures image

La figure 4.19 présente la répartition des mesures image entre les deux méthodes. La différence de densité des mesures ainsi que la répartition de celles-ci dans chacune des caméras est très importante. La méthode « On-Line » a une répartition beaucoup plus dense et homogène des mesures que la méthode « Off-Line ». Cette répartition est due à la répartition aléatoire des points homologues liée à des détails du paysage. La méthode « Off-Line » ne permet pas de répartir les cibles dans tout le plan du capteur, notamment sur les caméras qui "regardent en l'air" (32 et 33), ce qui peut poser des biais de calibration. En effet, il est difficile de trouver un site où des cibles pourrait être placées en hauteur (tunnel, garage), où le véhicule peut circuler et manœuvrer pour répartir les cibles dans le plan image.

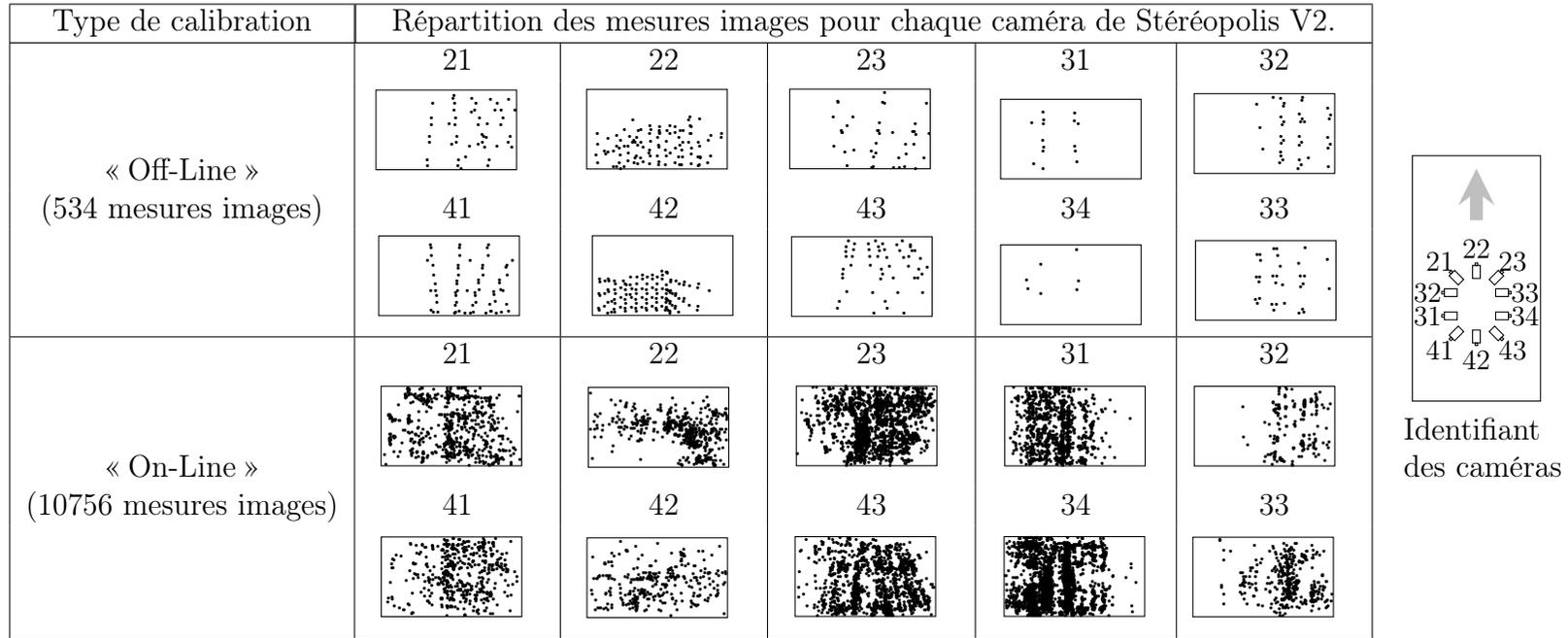


FIGURE 4.19 – Accumulation des mesures image utilisées lors de la phase de calibration dans le plan image de chaque caméra.

4.7 Conclusion

Les deux méthodes présentent des résultats similaires sur les mesures image et sur les points. Elles convergent toutes les deux vers la même solution et sont donc équivalentes. Toutefois, elles présentent des avantages et des inconvénients qui leur sont propres.

La méthode « Off-Line » nécessite un polygone de calibration qui n'est pas simple à construire et à maintenir. Par contre elle est plus simple à mettre en place : les mesures image sont manuelles et il suffit de quelques panoramiques. Un second inconvénient est que la calibration est faite à un instant donné, dans des conditions particulières qui peuvent être différentes pour une autre acquisition. Une calibration réalisée en plein hiver ne correspondra pas au montage d'une acquisition faite en plein été parce que la structure mécanique reliant les caméras au véhicule peut avoir subi des déformations liées aux variations de température.

La méthode « On-Line » utilise les mesures elles-mêmes et tous les points homologues disponibles (quelques milliers) ce qui permet d'avoir une répartition des mesures par image la plus homogène possible. Par contre, elle est tributaire de l'environnement. Par exemple, des zones de forêt ou des routes en pleine campagne, peuvent entraîner des difficultés pour détecter suffisamment de points homologues sans risque d'erreur et, en milieux urbain, la texture des façades peut être uniforme ce qui empêche d'obtenir un grand nombre de mesures homologue. Le principal avantage de cette méthode est qu'elle peut être faite sans acquisition particulière.

Nous pouvons très bien réaliser une combinaison des deux méthodes : avoir des points d'appui (cibles et/ou détails) et des points homologues. L'idée est de prendre un sous-ensemble d'une acquisition puis de lever (par des techniques classiques : GPS, topométrie) des points facilement mesurables et identifiables dans les images. Ainsi on bénéficie à la fois des avantages de la méthode « On-Line » (densité de mesures importante, calibration cohérente temporellement avec les données) et des avantages de la méthode « Off-Line » (indicateur de qualité écart sur les points d'appui et de contrôle). Malheureusement, la texture des murs sur le polygone de calibration n'a pas permis d'extraire des points homologues suffisants pour faire cette expérimentation(texture trop homogène).

Troisième partie

Méthodes et outils pour la mise en géométrie de grands blocs d'images

Dans cette partie nous allons étudier le mécanisme de compensation par faisceaux qui est utilisé de nombreuses fois dans cette thèse.

Le chapitre 5 détaille la création des points homologues ainsi que les méthodes mises en place afin d'éliminer les erreurs.

Le chapitre 6 explique les stratégies nécessaires pour gérer les données utiles pour la compensation.

Le chapitre 7 présente le mécanisme de compensation a proprement parlé.

Chapitre 5

Appariement et filtrage de points d'intérêt

La détermination des mesures homologues est le point le plus critique dans le processus de compensation par faisceaux. Ce sont ces mesures qui permettent de faire le lien entre les images.

Nous allons tout d'abord étudier les points d'intérêt, c'est à dire les détails caractéristiques de l'image, ainsi que les descripteurs qui sont associés à ces détails. Ensuite nous étudierons les différentes manières de mettre en correspondance les points d'intérêts. Enfin nous présenterons les techniques utilisées pour appliquer l'extraction et l'appariement à de gros volume de données.

5.1 Points d'intérêts

Les points d'intérêt sont étudiés depuis de nombreuses années. En effet, cette étape est nécessaire que se soit pour de la reconnaissance d'objets, de la photogrammétrie, ou encore de la robotique.

Plusieurs critères doivent être respectés pour définir un bon point d'intérêt. Il faut qu'il soit :

- facilement identifiable et reconnaissable (soit par un humain, soit par un algorithme),
- insensible au bruit de mesure,
- invariant (au changement d'échelle, à la translation, à la rotation),
- insensible au changement d'illumination.

Nous allons tout d'abord présenter les différentes manières de les détecter puis nous étudierons les descripteurs pouvant servir dans la phase d'appariement.

5.1.a Détections

On peut tout d'abord citer les détecteurs de coins de [Moravec, 1977, 1979] qui étudie le voisinage de chaque pixel et calcule une mesure de changement d'intensité, amélioré par [Harris et Stephens, 1988]. Ces détecteurs ne prennent pas en compte la variation d'échelle.

Des variantes existent comme le détecteur Hessian-Laplace de [Mikolajczyk et Schmid, 2002] ou le Harris-Laplace de [Mikolajczyk et Schmid, 2004] qui appliquent différents flous sur l'image afin de "simuler" une variation d'échelle puis le détecteur de Harris sur les différentes échelles pour extraire les points d'intérêts. Certains se sont aussi intéressés aux contours en général comme SUSAN de [Smith et Brady, 1995] ou encore l'algorithme FAST de [Rosten et Drummond, 2006] amélioré dans [Rosten et al., 2010].

Une autre approche consiste à détecter des formes et/ou des régions d'intérêts. On peut citer [Crowley et Parker, 1984] ou encore l'algorithme de MSER [Matas et al., 2004].

Une dernière méthode consiste à utiliser l'image comme surface, puis à détecter des extrema au sens mathématique : [Mikolajczyk et Schmid, 2002], [Lowe, 2004] ou encore [Bay et al., 2006, 2008].

Un état de l'art très complet a été réalisé par [Tuytelaars et Mikolajczyk, 2008] et de nombreux comparatifs entre les détecteurs ont été faits comme celui de [Mikolajczyk et al., 2005]. Certains travaux comme [Gauglitz et al., 2011] utilisent plusieurs détecteurs puis choisissent grâce à leurs algorithmes celui qui est le plus adapté. Le principal inconvénient des travaux pour déterminer le meilleur détecteur est le temps de calcul.

La plupart des méthodes précédentes n'utilisent qu'un des canaux de couleur ou convertissent l'image en image monocal. Cette conversion peut introduire une perte d'information et potentiellement une sous-détection de points d'intérêt. Il existe pourtant des détecteurs qui tiennent compte de la couleur comme [Gouet et al., 2000]

Dans notre cas, nous avons utilisé la différence de Gaussienne de [Lowe, 2004], appelé SIFT (Scale Invariant Feature Transform) qui est très largement utilisée aussi bien dans la communauté photogrammétrique que dans celle de vision par ordinateur. Sur le chantier du XII^e arrondissement de Paris, il y a eu plus de 3.5 milliards de SIFT extraits. Le tableau 5.1 présente par caméra les statistiques sur le nombre et la répartition des points extraits. On constate que ce sont les caméras qui regardent à l'avant et à l'arrière qui ont le plus de points d'intérêts. Cela est logique parce qu'il y a le plus de variété de paysage sur ces deux caméras. Les caméras ayant les moins de points détectés sont les quatre caméras latérales à cause principalement du ciel et de la route.

Position	Minimum	Maximum	Moyenne	Total sur tout le XII ^e
21	20	46460	8499,93	379 530 238
22	96	34727	9899,85	442 018 225
23	38	50366	8275,73	369 503 134
31	5	38006	6824,61	304 643 806
32	0	54203	5353,26	239 017 713
33	0	50142	7285,9	325 227 927
34	2	44123	6148,23	274 518 568
41	20	36980	8586,99	383 417 857
42	77	31549	10289,7	459 322 997
43	20	44038	8029,72	358 518 854

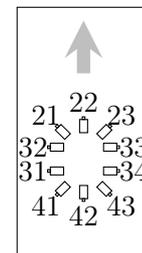


TABLE 5.1 – Statistiques par caméra sur les points d'intérêt extraits.

Par contre il y a une précaution à prendre avec les points d'intérêts qui vont servir dans la compensation. Ces points doivent correspondre à un point unique en 3D dans l'espace terrain. Lorsque les images comportent des parties du véhicule d'acquisition : toit, antenne,

galerie, cela introduit des points d'intérêts parasites. Ce sont de vrais points d'intérêt mais qui sont solidaires du véhicule c'est à dire qu'ils ne correspondent pas à un point 3D de la scène. Ils sont source de divergence du processus de compensation par faisceaux. Comme il est très difficile de placer des caméras sans que celles-ci ne photographient une partie du véhicule tout en imageant complètement l'environnement, il faut être capable de les détecter et de les extraire de l'ensemble des points d'intérêts. Une manière simple et efficace de les filtrer est d'établir un masque qui comprend les parties visibles du véhicule et de les enlever de la liste des points d'intérêt. Ce masque est établi pour chaque caméra, de manière manuelle¹. Une minute par caméra suffit. Cette étape prend donc moins de 5 minutes pour toutes les caméras imageant des parties du véhicule. La figure 5.1.b présente une image acquise par la caméra avant gauche. Celle-ci contient une partie du véhicule (coin en bas à gauche). La figure 5.1.a présente le masque qui a été saisi manuellement et qui est associé à la caméra. Dans notre cas cela représente 2 943 284 points pour tout le XII^e.

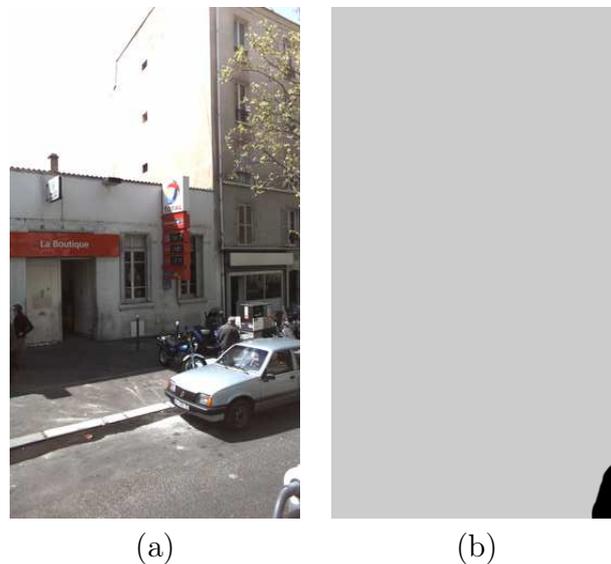


FIGURE 5.1 – Masque de points d'intérêt

Maintenant que nous sommes capables de détecter des points caractéristiques dans les images, nous allons nous intéresser aux descripteurs qui permettent de les appailler de manière fiable.

5.1.b Descripteurs

Une fois qu'un point d'intérêt a été détecté, il doit être appaillé dans d'autres images. Pour cela, il faut extraire un descripteur pour chaque point qui permet de les différencier les uns des autres. Un bon descripteur doit remplir plusieurs critères. Il doit être :

- invariant aux changements de lumière,
- invariant à la translation,
- invariant à la rotation,

1. Cette étape pourrait être automatisée en regardant pour toutes les images d'une caméra les zones qui ne varient pas par exemple.

- invariant aux changements d'échelles,
- local, pour être robuste aux occlusions,
- discriminant, pour pouvoir être retrouvé parmi des milliers.

Certains descripteurs utilisent des informations concernant la forme comme [Crowley et Parker, 1984]. Avec son détecteur de points d'intérêt, [Lowe, 2004] propose un descripteur qui tient compte de l'échelle et de la rotation, qui est basé sur les histogrammes d'orientation du voisinage du point d'intérêt. Le descripteur SURF de [Bay et al., 2008] tient compte, lui aussi, de l'échelle et de la rotation. Il est basé sur les réponses du voisinage du point aux ondelettes de Haar. ASIFT de [Morel et Yu, 2009] propose une amélioration de SIFT en simulant des déformations aux images avant l'extraction des points d'intérêt ce qui permet de trouver plus de points lors d'une forte déformation liée à la différence de perspective entre les points.

Des travaux comme [Mikolajczyk et Schmid, 2005] font des évaluations de quelques descripteurs locaux.

Dans notre cas, nous avons utilisé le descripteur SIFT de [Lowe, 2004] qui est là encore très largement utilisé aussi bien dans la communauté photogrammétrique que dans celle de vision par ordinateur.

Une fois les points caractéristiques ainsi que leurs descripteur extraits, nous allons nous intéresser à la façon d'effectuer la mise en correspondance.

5.2 Appariement

La phase d'appariement est une étape importante pour déterminer les mesures homologues.

Dans un premier temps, nous étudierons les différentes stratégies pouvant être utilisées pour l'appariement dans l'espace des descripteurs. Dans un second temps, nous présenterons les méthodes de détections d'erreurs lors de l'appariement.

5.2.a Stratégies

Quel que soit le type de descripteur utilisé pour un point d'une image A, l'appariement consiste à trouver le descripteur du point de l'image B qui ressemble le plus au descripteur du point de l'image A. La première étape consiste à calculer une distance (Manhattan, Euclidienne, Minkowski,...) entre les descripteurs, puis à comparer les distance entre elles. Il s'agit d'un problème de recherche de plus proche voisin qui est étudié depuis de nombreuses années. De nombreuses solutions sont proposées :

- le quadtree de [Samet et Webber, 1985] en dimension 2,
- l'octree de [Gervautz et Purgathofer, 1990] puis amélioré notamment par [Eberhardt et al., 2010] en dimension 3,
- le kd-tree de [Friedman et al., 1977] en dimension N qui présente de nombreuses variantes comme :
 - [Vaidya, 1989] qui utilise un modèle d'arbre de décision pour ordonner les données (en $O(n \log(n))$),

- [Arya et al., 1994] qui propose une stratégie approchée pour déterminer les plus proches voisins, ce qui diminue le temps de recherche (en $O(\log(n))$),
- [Muja et Lowe, 2009] qui utilise des kd-tree aléatoires multiples qui permettent d'améliorer la aussi le temps de recherche.

Nous avons choisi celle implémentée dans ANN (Approximate Nearest Neighbor) de [Mount et Arya, 2013] qui permet de faire un kd-tree de [Friedman et al., 1977] ainsi que [Arya et al., 1994].

Nous avons réalisé l'appariement par couple d'images plutôt que sur la base de données complète des points et de leurs descripteurs (3,5 milliards). En effet nous ne connaissons pas à l'avance le nombre d'images dans lequel est vu un détail caractéristique, ce qui rend le nombre de voisins potentiels non déterminé.

Ensuite, nous avons choisi les N meilleurs candidats plutôt que le meilleur. En effet, notamment sur les façades présentant de nombreux motifs répétitifs (gardes corps, volets, fenêtres...), le meilleur candidat peut être une faute tandis que le second peut être correct. Pour savoir si les candidats sont potentiellement corrects, nous avons utilisé le même critère que [Lowe, 2004] qui consiste à calculer le ratio r entre les deux plus petites distances. Si $r < 0,8$ alors le candidat est considéré comme correct. Dans notre cas, comme nous conservons N voisins, nous avons adapté ce critère en calculant le ratio r par rapport à la distance au voisin $N + 1$.

Enfin, pour diminuer le nombre d'erreurs d'appariement, nous utilisons une succession de 3 étapes pour un couple d'images A et B :

- recherche des plus proches voisins de l'ensemble des points de l'image A dans l'ensemble des points de l'image B (cf figure 5.2.a),
- recherche des plus proches voisins de l'ensemble des points de l'image B dans l'ensemble des points de l'image A (cf figure 5.2.b),
- intersection des résultats des étapes 1 et 2 (cf figure 5.2.c).

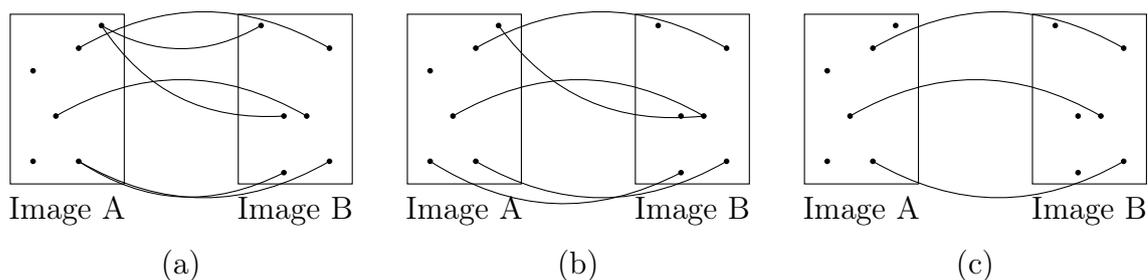


FIGURE 5.2 – Étapes de la phase d'appariement. (a) Recherche des plus proches voisins de A dans B. (b) Recherche des plus proches voisins de B dans A. (c) Intersection des étapes (a) et (b).

Le tableau 5.2 présente le nombre de couples de points appareillés correctement en fonction du nombre de voisins. La première remarque concerne le nombre de bons candidats. En prenant les 3 meilleurs voisins, on constate qu'il y a deux fois plus de bons candidats qu'en utilisant le meilleur. Nous avons donc deux fois plus de mesures homologues ce qui rend la compensation plus précise et sûre. La seconde remarque concerne le taux de bons appariements sur le nombre total. On aurait pu croire qu'en prenant les

meilleurs candidats plutôt que le meilleur, le ratio *bon appariement / appariement total* diminuerait énormément. En pratique, ce taux diminue très faiblement même en prenant les 4 meilleurs voisins.

En conclusion, nous avons choisi de prendre les trois meilleurs candidats lors de la phase d'appariement, cela permet d'avoir un nombre de bon appariement satisfaisant tout en ayant un temps de calcul faible (inférieur à 1 seconde).

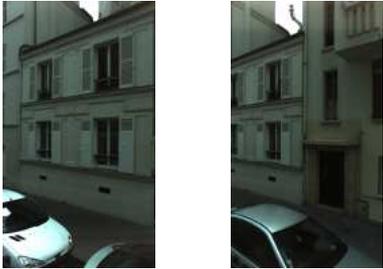
	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Bonnes</th> <th>Mauvaises</th> <th>Ratio</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>52</td> <td>1.4</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>3</td> <td>92</td> <td>2.4</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>4</td> <td>132</td> <td>2.3</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>7</td> <td>188</td> <td>3.5</td> </tr> </tbody> </table>		Bonnes	Mauvaises	Ratio	1	1	52	1.4	2	3	92	2.4	3	4	132	2.3	4	7	188	3.5
	Bonnes	Mauvaises	Ratio																		
1	1	52	1.4																		
2	3	92	2.4																		
3	4	132	2.3																		
4	7	188	3.5																		
	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Bonnes</th> <th>Mauvaises</th> <th>Ratio</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>72</td> <td>97</td> <td>38.5</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>134</td> <td>280</td> <td>29.5</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>164</td> <td>457</td> <td>24.5</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>190</td> <td>647</td> <td>22.7</td> </tr> </tbody> </table>		Bonnes	Mauvaises	Ratio	1	72	97	38.5	2	134	280	29.5	3	164	457	24.5	4	190	647	22.7
	Bonnes	Mauvaises	Ratio																		
1	72	97	38.5																		
2	134	280	29.5																		
3	164	457	24.5																		
4	190	647	22.7																		
	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Bonnes</th> <th>Mauvaises</th> <th>Ratio</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>20</td> <td>41</td> <td>32.2</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>42</td> <td>70</td> <td>36.8</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>49</td> <td>95</td> <td>32.8</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>57</td> <td>118</td> <td>32.5</td> </tr> </tbody> </table>		Bonnes	Mauvaises	Ratio	1	20	41	32.2	2	42	70	36.8	3	49	95	32.8	4	57	118	32.5
	Bonnes	Mauvaises	Ratio																		
1	20	41	32.2																		
2	42	70	36.8																		
3	49	95	32.8																		
4	57	118	32.5																		
	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Bonnes</th> <th>Mauvaises</th> <th>Ratio</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>139</td> <td>20</td> <td>86.3</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>167</td> <td>42</td> <td>78.7</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>183</td> <td>82</td> <td>68.0</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>193</td> <td>126</td> <td>60.5</td> </tr> </tbody> </table>		Bonnes	Mauvaises	Ratio	1	139	20	86.3	2	167	42	78.7	3	183	82	68.0	4	193	126	60.5
	Bonnes	Mauvaises	Ratio																		
1	139	20	86.3																		
2	167	42	78.7																		
3	183	82	68.0																		
4	193	126	60.5																		

TABLE 5.2 – Nombre de mesures homologue appariées bonnes et mauvaises en fonction du nombre de meilleurs voisins.

Après avoir présenté les méthodes d'extraction et d'appariement, nous allons expliciter la façon dont nous l'avons fait sur de gros volumes de données.

5.3 Gestion de gros volumes de données

L'une des principales difficultés de cette thèse réside dans le volume de données à traiter. En considérant le chantier du XII^e, chantier de taille normale pour notre véhicule, nous avons plus de 500 000 images à traiter. Il faut donc mettre en place des stratégies pour effectuer les tâches d'extraction et d'appariement.

Concernant l'extraction de points caractéristiques sur les images, puis la suppression des points appartenant au masque, nous devons effectuer l'extraction sur chaque image quel que soit la méthode utilisée. Le même processus est appliqué à chaque image de manière indépendante, ce qui le rend parallélisable aussi bien sur un seul ordinateur que sur plusieurs.

Concernant l'appariement des points caractéristiques, nous avons choisi de travailler par couples plutôt que de travailler sur l'ensemble des points d'intérêts extraits. En effet, le nombre de points d'intérêts est très important (plus de 3,5 milliards) et rechercher les points similaires dans ce volume n'est pas simple. Ensuite, nous possédons une information de topologie d'acquisition et de géoréférencement qui nous permet de restreindre le nombre de couples à appairer. Par exemple, il est inutile d'essayer d'appairer deux images distantes de plusieurs centaines de mètres. Nous avons limité le nombre de couples potentiels (plus de 250 milliards) en ne gardant que les images distantes de moins de 30 mètres (d sur la figure 5.3) et dont les cônes perspectifs s'intersectent (cf figure 5.3).

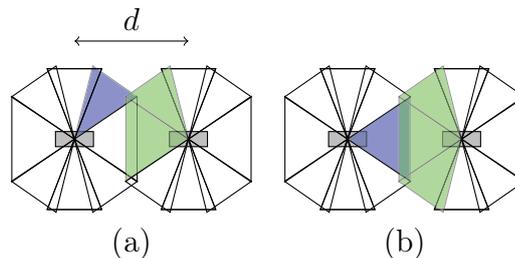


FIGURE 5.3 – Illustration de la stratégie pour le calcul d'appariement. d est la distance entre deux panoramiques. Les triangles représentent les cônes perspectifs de chaque caméra. (a) La caméra latérale avant (en bleue) intersecte l'une des caméras latérales arrières et la caméra centrale (en vert) : 2 appariements sont calculés. (b) La caméra avant (en bleue) intersecte les 3 caméras arrières (en vert) : 3 appariements sont calculés.

Une fois que l'appariement a été fait couple par couple, il faut recréer la relation d'homologie pour chaque point. Pour cela, nous allons utiliser la théorie des graphes : les noeuds sont les mesures images, les arêtes la relation d'appariement. Chaque composante connexe de ce graphe représente un point homologue. Il existe de nombreux algorithmes de recherche de composantes connexes dans les graphes [Tarjan, 1983] et [Cormen et al., 2001], mais notre graphe comporte près de 700 millions d'arêtes, ce qui ne permet pas de les utiliser sur une machine traditionnelle² (la taille de la mémoire vive ne suffisant pas). Afin d'effectuer cette recherche, nous avons choisi de décomposer notre graphe en plusieurs puis de combiner les résultats. Cette solution est décrite dans la figure 5.4. Cette solution comporte trois étapes :

1. découpage du graphe en sous-graphes. La manière de scinder le graphe n'a aucune importance. Nous avons choisi une stratégie de découpe simple et qui présente

2. 8 processeur et 8 Go de RAM lors de l'écriture du manuscrit

l'avantage d'être rapide : le découpage en zones rectangulaires.

2. calcul des composantes connexes pour chaque zone, mais aussi sur le graphe contenant toutes les arêtes sur la frontière.
3. ré-attribution des identifiants pour les composantes connexes et à la frontière et dans une cellule.

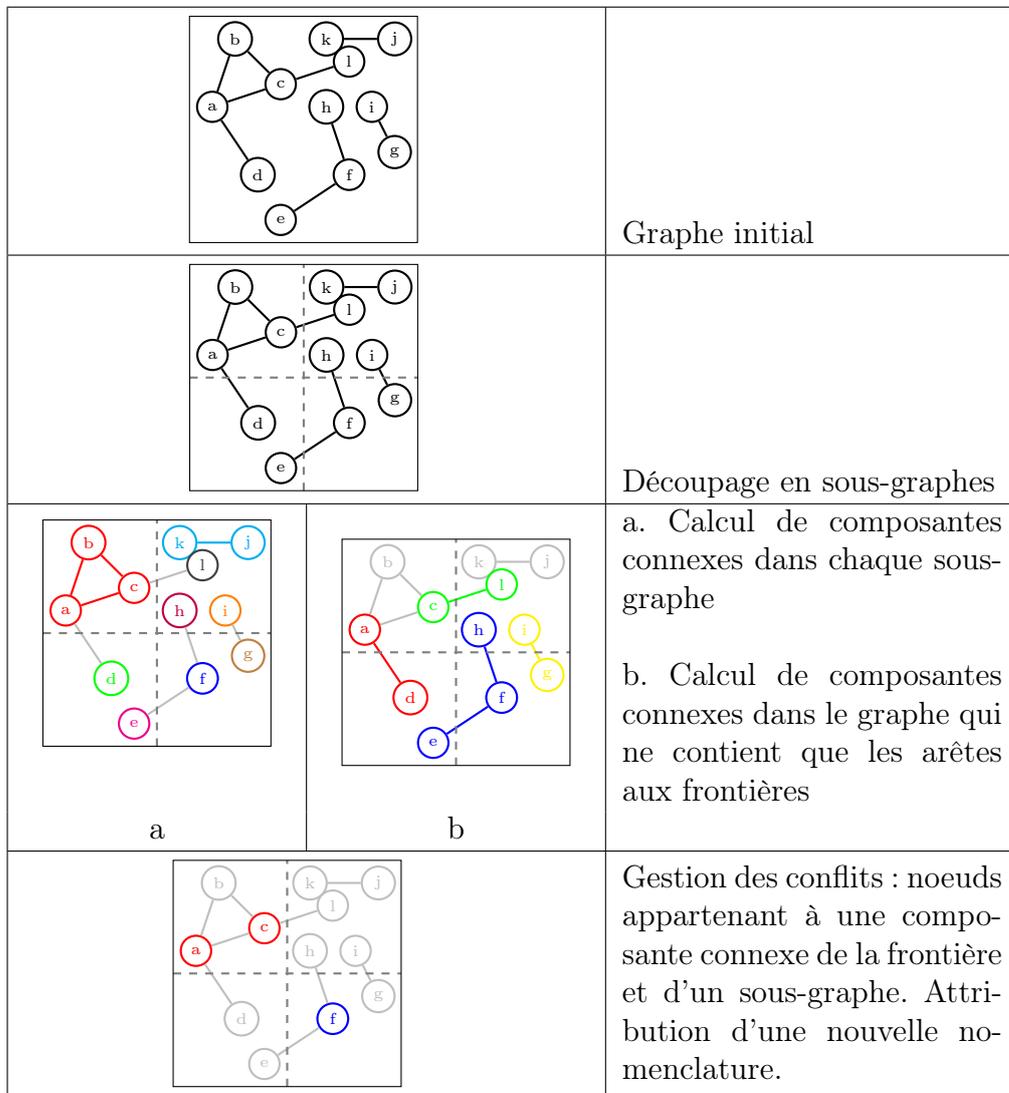


FIGURE 5.4 – Illustration des étapes du calcul des mesures homologue sur un gros volume de données.

5.4 Élimination des erreurs

La figure 5.5 présente le résultat d'appariement entre deux panoramiques. Les appariements corrects sont dessinés en vert tandis que ceux erronés sont indiqués en rouge (cet étiquetage a été réalisé manuellement). La première remarque concerne le nombre d'appariements corrects par rapport au nombre d'appariements erronés. Il peut être, en fonction des zones, très faible, malgré la stratégie présentée précédemment.

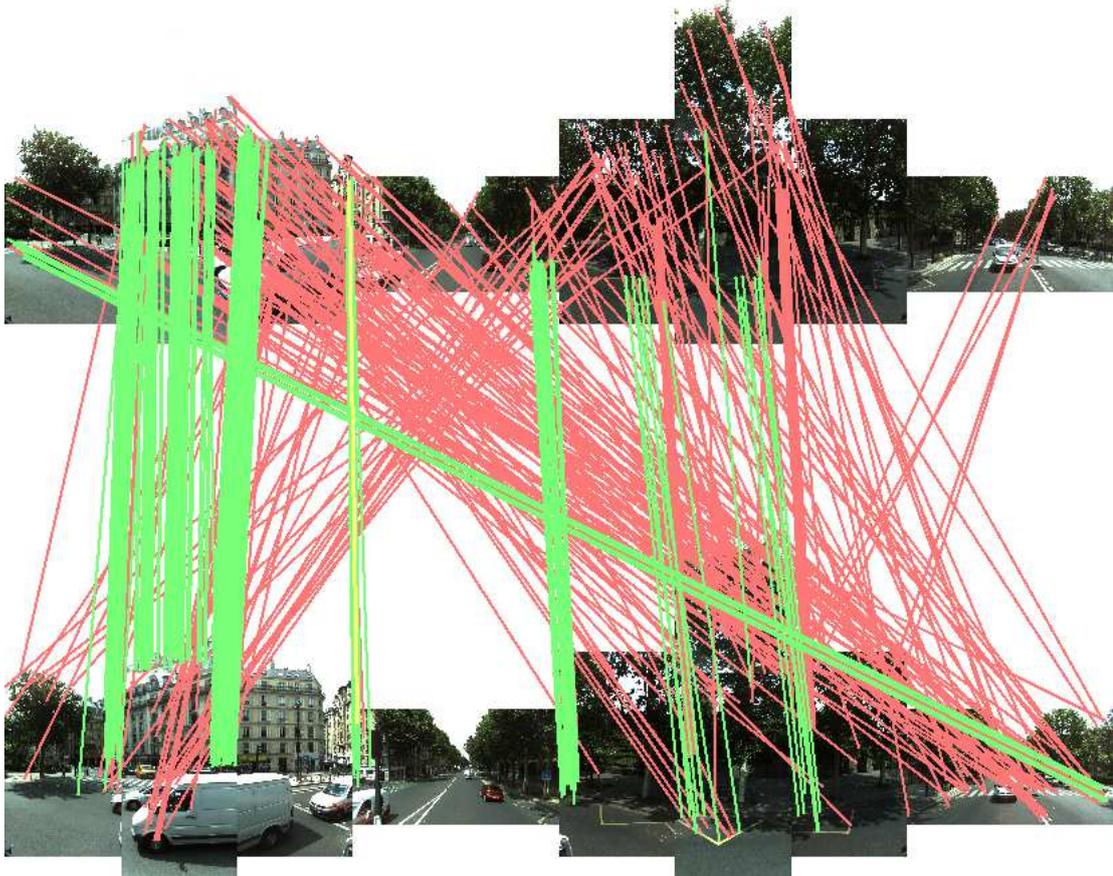


FIGURE 5.5 – Exemple d'appariement entre deux couples consécutifs. Les appariements corrects sont en vert et les appariements erronés en rouge.

La figure 5.6 présente quelques exemples d'appariements. On constate que l'appariement fonctionne même lors de forts changements d'échelle et de rotation (figure 5.6 *Vrai*). Il effectue aussi l'appariement dans le cadre d'objets mobiles (figure 5.6 *Mobile*). Par contre sur des motifs répétitifs (marquages, poteaux, fenêtres), il peut y avoir des erreurs (figure 5.6 *Faux*). Pour les deux derniers cas, ni le choix du descripteur, ni la méthode d'appariement n'est à incriminer, ce qui pose les limites de la stratégie retenue.



FIGURE 5.6 – Exemples d'appariement. *Faux* correspond aux erreurs, *Vrai* aux appariements correctes et *Mobile* aux objets mobiles.

Nous avons donc mis en place des stratégies complémentaires afin d'éliminer les erreurs restantes qui sont présentées dans les paragraphes suivants.

5.4.a Extraction de caractéristiques sur les points homologues

Dans la sous section 2.4.a.ii, nous avons constaté que le système de positionnement relatif était fiable et précis en relatif (entre deux panoramiques successives). Nous pouvons donc utiliser cette information pour extraire des caractéristiques sur les points homologues, représentés sur la figure 5.7. Les caractéristiques extraites sont :

- position du point dans le système terrain (noté M),
- plus petite distance entre les faisceaux (noté r_M),
- résidus après reprojection du point dans les images (noté r_{im}),
- distances au véhicule (notés d_1 et d_2),
- angle entre les faisceaux (noté α).

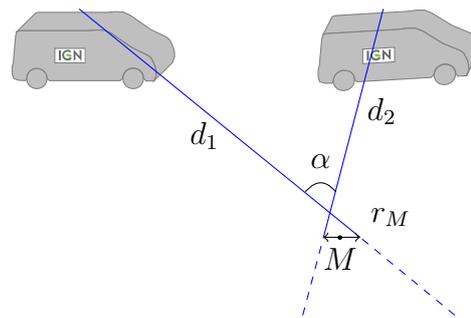


FIGURE 5.7 – Caractéristiques extraites pour chaque point homologue. M est la position dans le système terrain du point homologue. d_1 et d_2 sont les distances entre le point homologue et les deux positions du véhicule. α est l'angle fait par les faisceaux perspectifs. r_M est la plus petite distance entre les faisceaux.

Une fois ces caractéristiques extraites $\{r_M, r_{im}, d, \alpha\}$, nous avons choisi d'utiliser une approche par Séparateurs à Vaste Marge afin de déterminer si la mesure d'appariement est correcte ou non.

5.4.b Élimination des fautes par Séparateurs à Vaste Marge

Dans notre processus, il ne serait pas judicieux de fixer des seuils arbitrairement pour éliminer les fautes : résidus sur les mesures, positions des points, etc... parce que l'environnement dans lequel circule le véhicule est très complexe : objets très proches et très lointains, objets de tailles et de formes différents (voiture, piéton, bâtiment, etc...) pour une même scène. Pour une mesure correcte, les résidus images peuvent être élevés (quelques pixels) si l'objet est très proche à cause d'une faible erreur de positionnement, ou si l'angle formé par les faisceaux est faible (l'intersection est mal déterminée). Les règles énoncées précédemment ne sont qu'un ensemble restreint de comportements qu'il n'est pas possible d'inventorier de manière exhaustive. Par contre, il est très facile de

réaliser un apprentissage sur un nombre faible mais représentatif de cas puis d'effectuer une classification automatique.

Il existe différentes méthodes de classification comme les Arbres de Classification et de Régression ([Breiman, 1984]), les Forêts Aléatoires (Random Forest) ([Breiman, 2001]) ou encore les Séparateur à Vaste Marge (Support Vector Machine, SVM) ([Boser et al., 1992]). Dans notre cas, nous avons utilisé les SVM qui sont largement utilisés dans la littérature avec l'implémentation proposée par [Chang et Lin, 2011]. Cette thèse n'étant pas un travail sur les SVM, nous rappelons ici le principe et nous nous positionnons seulement en tant qu'utilisateur éclairé. Le lecteur pourra se référer à [Boser et al., 1992], [Cortes et Vapnik, 1995] et [Scholkopf et Smola, 2001] pour les concepts théoriques.

5.4.b.i Principe des classifieurs par Séparateur à Vaste Marge

Pour utiliser un classifieur SVM, il faut des instances (ici, des mesures homologues) avec des attributs (ici, ceux présentés au 5.4.a). Ensuite on fournit un sous-ensemble d'objets déjà classés qui constituent la base d'apprentissage et qui, en général, est établie manuellement. Nos objets sont répartis en deux classes : les mesures homologues correctes et celles erronées. Le classifieur détermine, à partir de cette base, la "meilleure frontière" qui sépare les classes en fonction des attributs : la vaste marge. Une fois cette frontière déterminée, il suffit au SVM de comparer tout nouvel objet avec ses attributs aux frontières afin de savoir s'il appartient ou non à une classe.

La figure 5.8 illustre le fonctionnement des SVM. Nous avons 2 classes (verte et bleue) qui ont des attributs A et B. Elles sont représentées dans l'espace des attributs A et B. Plusieurs frontières sont possibles (en rouge) mais une seule est conservée par le classifieur. Il s'agit de la droite rouge pleine : elle est la frontière qui maximise la marge entre la frontière et les objets des classes (d'où la notion de Vaste Marge).

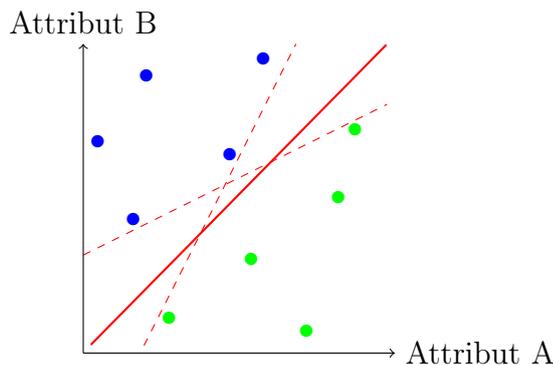


FIGURE 5.8 – Schéma de la classification par SVM. En bleu et en vert, les points appartenant à deux classes distinctes. En rouge pointillé, les différentes séparations possibles pour les deux classes. En rouge plein, la frontière déterminée par SVM.

5.4.b.ii Utilisation dans le cas de détection de fautes d'appariement

Afin de savoir quelle(s) caractéristique(s) est (sont) pertinente(s) pour détecter les fautes d'appariement, nous avons testé toutes les configurations possibles avec les 4 attributs présentés en 5.4.a. Nous avons aussi étudié l'influence du nombre de données dans la

phase d'apprentissage. Les résultats de ces expérimentations sont recensés dans le tableau 5.3.

Plusieurs remarques sont à faire sur cette expérimentation :

- il n'est pas nécessaire de réaliser l'apprentissage sur un grand nombre de données. Une centaine d'objets par classe est suffisant (les résultats sont similaires sur les colonnes 2, 3, 4 et 5) pour estimer les marges entre les deux classes.
- le taux de bonne classification est identique entre les données ayant servies à l'apprentissage (chiffre en italique dans le tableau) et les données de test (chiffre droit), cela signifie que le modèle retenu est ainsi correct.
- le taux de classification est supérieur à 90% à partir de 2 attributs. Il reste peu d'erreurs après ce processus.
- l'utilisation des 4 attributs dans la classification n'est pas pertinent, les résultats sont moins bon qu'avec 3. Cela s'explique car le paramètre r_{im} (résidu image) et r_M (plus petit distance entre les faisceaux) sont "liés" : plus r_M est grand, plus r_{im} l'est aussi.

Critères testés				Nb de mesures									
				2040	<i>(92)</i>	1946	<i>(186)</i>	1854	<i>(278)</i>	1760	<i>(372)</i>	1666	<i>(466)</i>
r_{im}	r_M	d	α	Bonne classification des données de test (en %)									
				<i>Bonne classification des données d'apprentissage (en %)</i>									
			•	68,7	<i>(70,6)</i>	68,2	<i>(70,9)</i>	67,7	<i>(68,7)</i>	68,5	<i>(71,2)</i>	68,5	<i>(72,5)</i>
		•		70,1	<i>(70,6)</i>	72,8	<i>(75,8)</i>	72,8	<i>(75,5)</i>	71,3	<i>(76,0)</i>	72,1	<i>(76,3)</i>
•				75,6	<i>(81,5)</i>	75,2	<i>(80,6)</i>	75,1	<i>(76,9)</i>	77,1	<i>(77,1)</i>	74,9	<i>(78,3)</i>
	•			83,4	<i>(88,0)</i>	84,5	<i>(88,1)</i>	85,9	<i>(83,0)</i>	86,0	<i>(83,3)</i>	85,0	<i>(86,9)</i>
		•	•	77,2	<i>(77,1)</i>	75,9	<i>(82,2)</i>	77,6	<i>(80,2)</i>	78,1	<i>(78,4)</i>	79,1	<i>(78,3)</i>
•	•			83,0	<i>(89,1)</i>	84,6	<i>(89,7)</i>	86,6	<i>(85,6)</i>	87,6	<i>(85,2)</i>	86,9	<i>(89,9)</i>
•			•	83,3	<i>(88,0)</i>	86,4	<i>(91,3)</i>	87,3	<i>(86,3)</i>	87,2	<i>(90,3)</i>	87,0	<i>(89,4)</i>
	•		•	84,6	<i>(90,2)</i>	88,1	<i>(92,4)</i>	88,4	<i>(87,7)</i>	87,7	<i>(88,1)</i>	87,8	<i>(88,4)</i>
•		•		89,7	<i>(90,2)</i>	90,8	<i>(94,0)</i>	90,8	<i>(91,3)</i>	90,7	<i>(91,6)</i>	90,7	<i>(91,4)</i>
	•	•		89,1	<i>(90,2)</i>	89,6	<i>(93,5)</i>	91,5	<i>(91,0)</i>	91,1	<i>(91,1)</i>	91,1	<i>(92,0)</i>
•	•		•	83,2	<i>(89,1)</i>	90,1	<i>(93,0)</i>	90,7	<i>(89,2)</i>	91,0	<i>(90,8)</i>	90,8	<i>(91,8)</i>
•	•	•		88,5	<i>(90,2)</i>	91,0	<i>(93,5)</i>	91,5	<i>(91,7)</i>	91,0	<i>(92,4)</i>	91,3	<i>(90,3)</i>
	•	•	•	88,9	<i>(89,1)</i>	92,1	<i>(96,7)</i>	94,1	<i>(94,6)</i>	93,8	<i>(96,7)</i>	92,5	<i>(96,1)</i>
•		•	•	90,9	<i>(88,0)</i>	92,1	<i>(95,1)</i>	93,3	<i>(93,1)</i>	94,2	<i>(94,6)</i>	93,5	<i>(95,7)</i>
•	•	•	•	84,4	<i>(89,1)</i>	91,7	<i>(94,6)</i>	92,6	<i>(93,8)</i>	93,7	<i>(95,6)</i>	92,1	<i>(95,2)</i>

TABLE 5.3 – Résultats de la classification des mesures bonnes et mauvaises par SVM. Cinq jeux de données pour l'apprentissage ont été utilisés (un par colonne) et toutes les combinaisons de paramètres ont été testées (une par ligne). En gris le jeu de paramètres conservé.

5.4.b.iii Conclusion

L'approche par SVM est efficace lorsqu'on l'utilise pour éliminer les erreurs d'appariement. Nous avons choisi de ne garder que trois attributs : le résidu image, la distance du point aux caméras ainsi que l'angle fait par le faisceau homologue.

Chapitre 6

Gestion des mesures en base de données pour un passage à l'échelle

Un des enjeux de cette thèse réside dans la gestion de gros volumes de données. En effet, nous sommes en présence de plusieurs dizaines de milliers de panoramiques et des centaines de milliers d'images pour un seul arrondissement de Paris (cf section 2.4 {page 19}). Nous devons être capable de stocker et d'accéder aux données de manière rapide, simple et optimale. Deux solutions complémentaires ont été adoptées pour la gestion des données. La première est un système de fichiers adapté à nos données et la seconde est une base de données dédiée à notre application.

6.1 Système de fichiers

Dès l'acquisition, les données du véhicule sont organisées dans un système de fichiers qui permet d'effectuer les différents traitements que se soit aux niveaux de la trajectoire, des lasers ou encore des images. Les données images sont organisées dans des dossiers correspondant à la date, puis à la session (début d'une acquisition), puis à la section (ensemble de panoramiques successives) et enfin par caméra. Pour les produits propres à chacune des images (extraction de points d'intérêt, suppression des points appartenant au véhicule et calcul des descripteurs de points, cf chapitre suivant), nous avons choisi de structurer ces données dans la même arborescence de fichiers (cf. figure 6.1). Les avantages de ce type de rangement sont :

- nombre de fichiers par dossier faible ce qui permet un accès rapide,
- identification simple de l'arborescence grâce au nom de la panoramique. Par exemple les images avant (identifiant 22) et arrière (identifiant 42) de la panoramique, *Paris_12-080428_0727-00-00001_0002237* se trouve dans les dossiers :
 - *Images/080428/727/1/22/Paris_12-080428_0727-22-00001_0002237.tif* pour la caméra avant.
 - *Images/080428/727/1/42/Paris_12-080428_0727-42-00001_0002237.tif* pour la caméra arrière.

Ce système permet de récupérer quasiment instantanément toutes les caractéristiques propres à une image (image brute, point d'intérêt, descripteur). Par contre il n'est pas

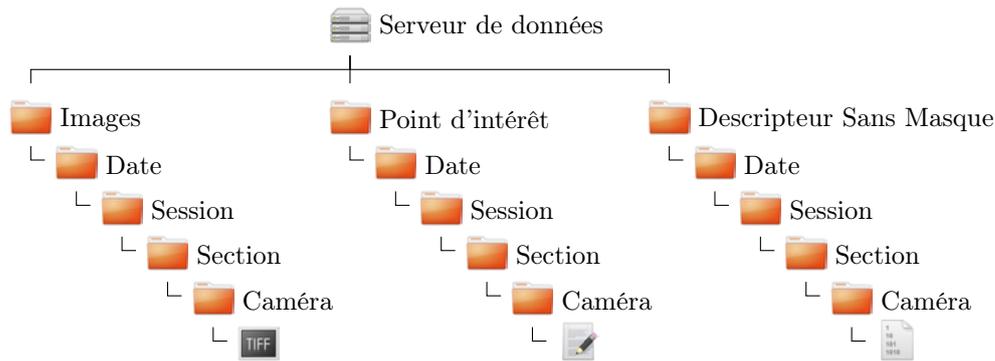


FIGURE 6.1 – Schéma explicatif du système de fichiers mis en place pour un accès rapide aux données.

adapté pour faire des requêtes plus complexes : par exemple récupérer toutes les panoramiques à une position donnée. En effet, il n'est pas facile de gérer de manière simple et rapide grâce à un système de fichiers des mesures homologues entre plusieurs images ou d'effectuer des requêtes géographiques sur des positions de véhicule par exemple. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser une base de données.

6.2 Base de données

Une base de données présente plusieurs avantages par rapport au système de fichiers. Elle permet :

- un accès multi-utilisateurs, sans risque de conflit sur les accès aux données aussi bien en lecture qu'en écriture,
- d'avoir une cohérence des données :
 - éviter les duplicatas (clé primaire),
 - vérifier l'existence de liens (clé secondaire) entre les différents types de données : une mesure, stockée dans la table *Mesure*, est faite entre un point, stocké dans la table *Point* et une image. Une clé secondaire dans la table *Mesure* sur la table *Point* doit être créée afin de s'assurer de l'existence du point.
 - attribution d'identifiants uniques.
- un accès optimal des données grâce aux index,
- un accès pérenne aux données grâce à des mécanismes de journaux internes (coupures réseaux, coupure électrique, arrêt inopiné du serveur de stockage...).

La seule difficulté dans l'utilisation d'une base de données est de réaliser le schéma qui permet de répondre à tous les besoins identifiés. Ce schéma est décrit de manière détaillée dans la sous section suivante. Le Système de Gestion de Bases de Données (SGBD) qui a été utilisé durant cette thèse est PostgreSQL [PostgreSQL, 2012] avec son extension PostGIS [PostGIS, 2012] qui permet d'effectuer des opérations comme le changement de référentiel géodésique, le calcul de surface ou l'indexation spatiale.

6.2.a Structure de la base

La structure utilisée pour la base de données correspond à celle décrite dans la figure 6.2. On trouve différentes tables qui contiennent toutes les données nécessaires :

Table *Caméra* contient les caractéristiques intrinsèques propre à chaque caméra : paramètres intrinsèques, modèle de distorsion et taille du capteur.

Table *Véhicule* contient les différentes configurations du véhicule. La date du début de la configuration est indiquée pour avoir un historique des modifications.

Table *Lien Véhicule/Capteurs* permet de faire les liens entre les capteurs et le véhicule. Dans notre cas, nous n'utilisons que des caméras mais les lasers peuvent être aussi gérés dans cette implémentation. La position et l'orientation des capteurs sur le véhicule sont elles aussi indiquées.

Table *Panoramique* contient les données de positionnement propre à chaque panoramique ainsi que toutes les métadonnées d'acquisition (datation, précision, nombre de satellites GPS utilisé pour le positionnement...) sont stockées dans cette table. L'attribut *ID. Véhicule* permet de connaître la configuration du véhicule qui a servi à réaliser la panoramique.

Concernant la gestion des mesures, nous avons choisi de faire la différence entre les mesures sur des points d'appui et les mesures de points homologues automatiques. En effet les mesures de point d'appui sont des mesures fiables réalisées la plupart du temps de manière manuelle tandis que les mesures homologues sont issues de processus automatiques pouvant comporter des erreurs. Stocker ces mesures dans une table à part permet d'effectuer des processus propres à ces données (détection d'erreurs, attribution d'identification de composantes connexes détaillé dans le chapitre suivant).

Table *Point d'appui* contient tous les points d'appui avec leurs coordonnées et leurs précisions ainsi que leurs noms.

Table *Mesures Appuis* permet de stocker les mesures faites par les panoramiques sur les points d'appui.

Table *Mesures Homologues* permet de stocker les mesures homologues entre deux images.

6.2.b Indexation

Une base de données permet d'indexer les données afin de pouvoir y accéder en des temps très rapides. Nous avons testé deux types d'indexation : l'arbre binaire (BTree en anglais) de [Bayer, 1971] [Lehman et Yao, 1981] et le hachage [Knuth, 1975].

Afin de comparer les performances, nous avons utilisé trois tables de données identiques (structure et données). La première ne contient aucun index, la seconde contient un index de type arbre binaire et la dernière un index de type hachage. Les tables utilisées contiennent des appariements de mesures images par couples. Les tables contiennent plus de 460 millions de lignes soit plus de 26 Go. Nous avons lancé près de 45 000 requêtes identiques sur les 3 tables, en même temps afin que les conditions soient identiques : charge de la machine d'où sont lancés les tests, charge du serveur, trafic sur le réseau. Chaque requête récupère en moyenne plus de 16 000 mesures.

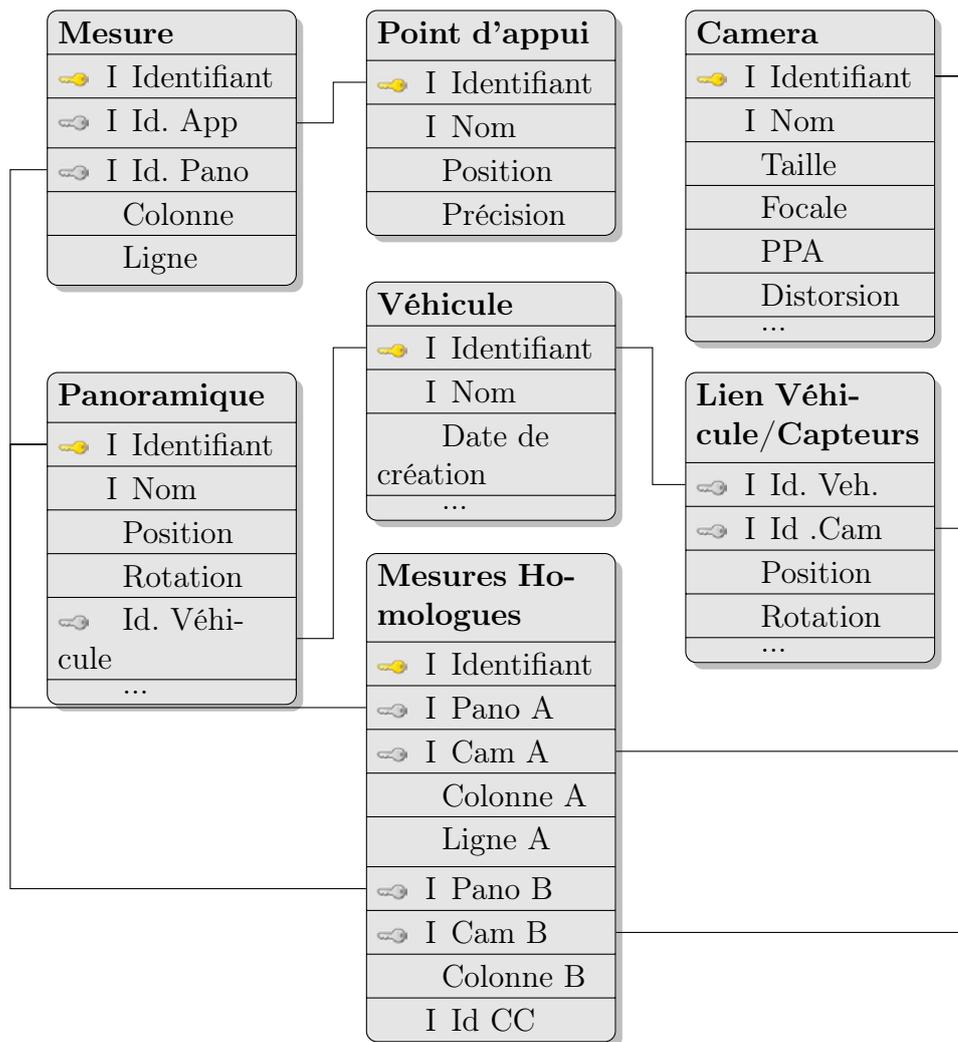


FIGURE 6.2 – Implémentation du schéma de notre base de données. 🗝️ indique une clé primaire, ➡️ indique une clé secondaire avec le lien vers la table et les champs. I indique un index.

La figure 6.3 présente les résultats de ce test. La première remarque est qu'il n'est pas envisageable de ne pas utiliser d'index (courbes violettes). Pour 500 requêtes, il s'est écoulé près de 60 000 secondes (16h30). On constate aussi qu'entre deux expériences identiques (couleurs vives et couleurs pastel), il peut y avoir une différence sur les temps de calcul de 1,5, ce qui est important. La principale raison vient du fait que le serveur contenant la base de données et la machine qui effectue les requêtes se trouvent dans le réseau commun de l'IGN. En fonction des périodes de la journée et des opérations lancées par les services de productions, les charges réseaux ne sont pas les mêmes. D'ailleurs, on peut constater que lors de l'expérience B, le système a mis plus de temps pour renvoyer les résultats entre les requêtes 9 000 et 12 000 (zone rouge en pointillée sur la figure 6.3) que lors de l'expérience A pour revenir à un temps de réponse identique. La cause la plus probable est l'augmentation de la charge réseaux de l'IGN au moment du test¹.

Concernant le choix de l'indexation, celle par arbre binaire semble plus adaptée à notre problème et permet de récupérer 16 000 lignes parmi 460 000 000 en 0,5 seconde en

1. Il n'a pas été possible de vérifier cette hypothèse parce qu'il aurait fallu dépouiller tous les fichiers journaux de tous les serveurs ainsi que des baies de brassages.

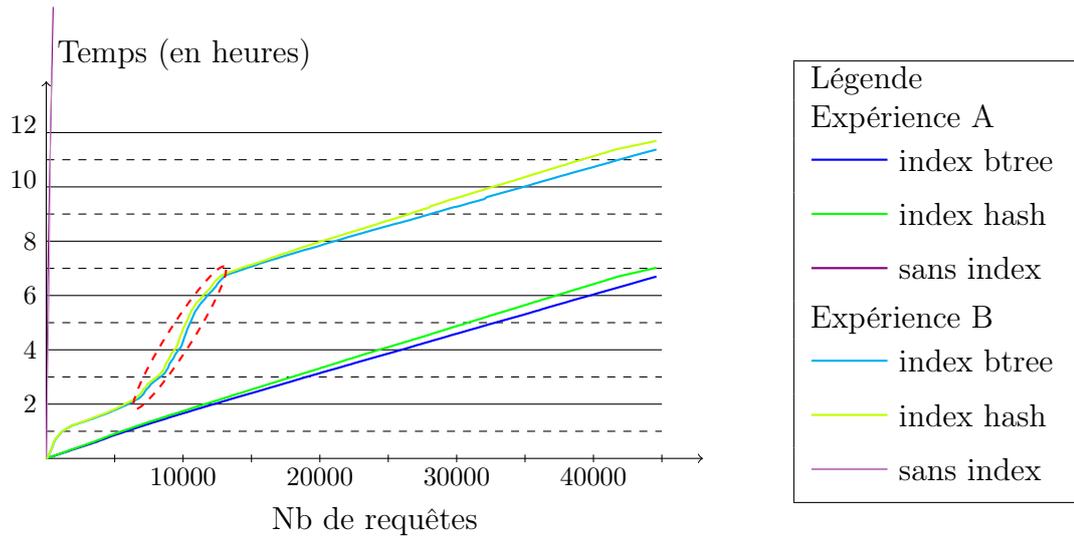


FIGURE 6.3 – Influence du temps de renvoi des requêtes en fonction du type d’indexation.

moyenne.

6.3 Conclusion

Le couplage système de fichiers / base de données est adapté à notre problématique. Il permet de connaître les caractéristiques propres à chaque image en des temps très courts tout en étant capable d’effectuer des requêtes complexes sur des centaines de milliers de mesures images.

Après avoir mis en place les moyens nécessaires, à la fois matériels et logiciels, nous allons étudier le mécanisme de la compensation par faisceaux de manière détaillée.

Chapitre 7

Méthodologie et outils

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la compensation par faisceaux. L'intérêt de la méthode sera décrite, puis la formulation mathématique sera présentée. Des expérimentations sont ensuite présentées afin de valider et de quantifier la méthode.

7.1 Principe et intérêt

Le principe de la compensation par faisceaux est de déterminer dans le même processus la pose des panoramiques et la position des points. Dans le cas de la calibration, les poses des caméras sur le véhicule sont elles aussi déterminées. La figure 7.1 illustre ce processus.

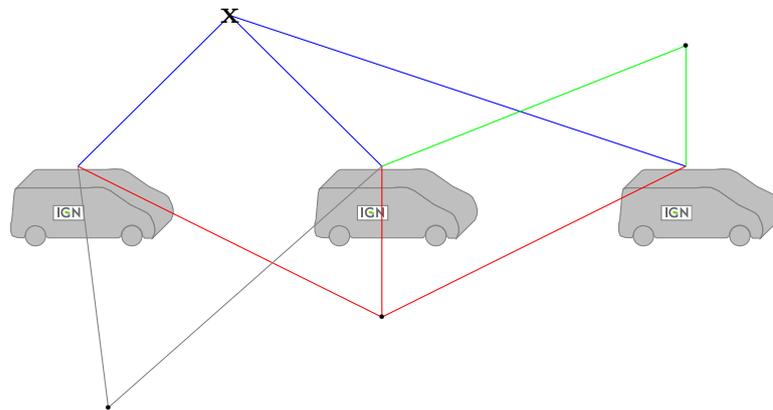


FIGURE 7.1 – Principe de la compensation par faisceaux. Les mesures images sur les points sont représentées par des segments, les poses des panoramiques par les véhicules, les points homologues par des \cdot et les points d'appui par des x .

Le principal intérêt de la compensation par faisceaux est d'améliorer d'une part la pose des panoramiques et, d'autre part, de limiter le nombre de points d'appui nécessaires pour obtenir un géoréférencement précis. En effet, ces points s'avèrent onéreux à produire car nécessitent la mobilisation d'une équipe de topographes et des moyens matériels conséquents. Afin de limiter le nombre de points d'appui, les panoramiques sont reliées entre elles par des points homologues (cf chapitre précédent) dont les coordonnées 3D sont déterminées dans le processus de compensation par faisceaux. A titre d'exemple, la figure

7.2 présente le résultat d'une compensation par faisceaux réalisée avec 20 panoramiques, 5267 points homologues et 22 points d'appui.



FIGURE 7.2 – Illustration de la compensation par faisceaux. En rouge, les points d'appui, en blanc, les points homologues. Le modèle 3D texturé ne sert que d'illustration.

7.2 Formulation mathématique

Nous détaillons tout d'abord les inconnues de notre système puis nous présentons ensuite les différentes observations. Enfin nous présenterons la manière choisie pour le résoudre.

7.2.a Les inconnues

Les premiers types d'inconnues sont ceux concernant la position et l'orientation des caméras sur le véhicule : $\mathcal{T}_{cam,ste}$ et $\mathcal{R}_{cam,ste}$ dans l'équation 1. Ces données peuvent être considérées comme inconnues, dans ce cas, la calibration est recalculée (cf chapitre 4). Sinon la calibration peut avoir déjà été réalisée lors d'un précédent chantier, dans ce cas là, elle n'est pas considérée comme inconnue (et n'apparaît donc pas dans le système d'équation. La solution initiale est fournie par les plans ou par une calibration précédente dans le cas d'un nouveau calcul de calibration.

Ensuite, il y a ceux concernant la position et l'orientation du véhicule par rapport au terrain : $\mathcal{T}_{ste,ter}$ et $\mathcal{R}_{ste,ter}$ dans l'équation 1. La solution initiale est fournie par le système de positionnement.

Enfin il y a les inconnues de positions de points homologues, d'appui ou de contrôle, \mathcal{M}_{ter} dans l'équation 1. Ces trois types de points jouent un rôle différent dans le processus :

points homologues : leurs coordonnées approchées sont calculées en utilisant l'intersection de faisceaux décrite dans l'annexe C.

points d'appui : leurs coordonnées sont déjà déterminées dans le système terrain et ne nécessitent pas de calculs de coordonnées approchées.

points de contrôle : leurs coordonnées, bien que connues dans le système terrain, voient leurs coordonnées approchées recalculées avant le début du calcul. En effet, les points de contrôle sont considérés comme points homologues dans tout le processus. L'écart de position entre la "vraie" position et celle déterminée à la fin du calcul est un indicateur de la qualité de la compensation.

$$X = \left([\mathcal{T}_{cam,ste}i, \mathcal{R}_{cam,ste}i]_{i=0}^{NbCam}, [\mathcal{T}_{ste,ter}j, \mathcal{R}_{ste,ter}j]_{j=0}^{NbPano}, [\mathcal{M}_{ter}k]_{k=0}^{NbPts} \right) \quad (1)$$

7.2.b Les observations

Plusieurs types d'observations interviennent dans le processus de compensation par faisceaux. Il y a :

la formule image : elle permet de lier les différents type de points aux images prises par la caméra i de la panoramique j . Cette formule est établie au 4

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} c \\ l \end{pmatrix}_{i,j} &= \begin{pmatrix} c_{PPA} \\ l_{PPA} \end{pmatrix}_i - p_i \frac{\mathcal{R}_{ste_j, cam_i} \mathcal{R}_{ter, ste_j} (M_{ter} - (\mathcal{R}_{cam_i, ste_j} S_{cam_i} + \mathcal{T}_{ste_j, ter}))}{t \mathbf{k} \mathcal{R}_{ste_j, cam_i} \mathcal{R}_{ter, ste_j} (M_{ter} - (\mathcal{R}_{cam_i, ste_j} S_{cam_i} + \mathcal{T}_{ste_j, ter}))} \\ m &= f_{i,j}(M_{ter}) \end{aligned} \quad (2)$$

le point d'appui : un point d'appui est un point dont les coordonnées sont connues dans le système terrain $\mathcal{M}_{ter, connue}$ avec une précision δ .

$$\delta \mathcal{M}_{ter} = \delta \mathcal{M}_{ter, connue} \quad (3)$$

l'orientation du véhicule : l'orientation donnée par le système de positionnement ($\mathcal{R}_{ste, ter, systeme_de_positionnement}$) est déterminée avec une précision δ .

$$\delta \mathcal{R}_{ste, ter} = \delta \mathcal{R}_{ste, ter, systeme_de_positionnement} \quad (4)$$

la position du véhicule : si la précision de position du véhicule δ était fiable, on pourrait ajouter une équation d'observation de la position avec la position donnée par le système de positionnement ($\mathcal{T}_{ste, ter, systeme_de_positionnement}$). En pratique, nous ne le faisons pas car elle n'est pas suffisamment fiable (cf sous section 2.4.a.ii {page 19})

$$\delta \mathcal{T}_{ste, ter} = \delta \mathcal{T}_{ste, ter, systeme_de_positionnement} \quad (5)$$

7.2.c Résolution du système

Le système qui doit être minimisé n'est pas linéaire. Il doit donc être linéarisé autour d'une solution initiale (explicité pour chaque inconnue dans la section 7.2.a). Nous avons

choisi de résoudre notre système grâce à l’algorithme de Levenberg-Marquardt [Levenberg, 1944] et [Marquardt, 1963] qui est plus stable que celui de Gauss-Newton et peut être initialisé avec une solution de départ peu précise. La méthode de résolution ne change pas la formulation du problème ni sa résolution.

$$\left[\frac{df_{i,j}(M_{ter}, X)}{dX} \right]_{X_N} dX = m - f_{i,j}(M_{ter}, X_N)$$

$$X_{N+1} = X_N + dX \tag{6}$$

Afin d’optimiser la structure et la résolution de système, nous avons utilisé la formalisation en matrice creuse (cf. annexe B) qui permet de ne stocker qu’un nombre restreint de coefficients. Une seconde optimisation, présentée dans la sous section 9.2.c {page 132}, est aussi utilisée dans le processus : la réorganisation des inconnues. Il s’agit de trouver une permutation¹ des inconnues qui permet de diminuer encore, en fonction du type de rangement creux, le nombre de coefficients stockés. Nous avons utilisé l’algorithme de [Cuthill et McKee, 1969] qui est rapide et qui permet une résolution du système également rapide (cf 9.2.c {page 132}).

7.2.d Exemple de remplissage de la matrice

La figure 7.3 illustre la façon de remplir la matrice des observations pour une configuration donnée (schéma en haut). Une zone grisée correspond à un bloc. La configuration du véhicule comporte deux caméras, une à gauche et l’autre à droite (notées C_g et C_d) (non représentées sur la figure). Il y a 3 panoramiques (notées P_1 , P_2 et P_3), ainsi que 2 points d’appui (M_1 et M_4) et 2 points homologues (M_2 et M_3). Chaque relation entre un point et une caméra d’une panoramique (1 à 10 sur la figure) ajoute deux lignes dans la matrice. Cela correspond à la différentielle de la fonction image $f_{i,j}(M_{ter})$ avec i l’identifiant de caméra et j celui de la panoramique. Concernant les points d’appui, chaque point ajoute 3 observations (une pour chaque coordonnée). Pour rappel, chaque caméra C_j comporte 6 inconnues ($\mathcal{T}_{cam,ste}^i$ et $\mathcal{R}_{cam,ste}^i$), chaque panoramique P_i également ($\mathcal{T}_{ste,ter}^j$ et $\mathcal{R}_{ste,ter}^j$) et chaque point M_k 3 .

7.3 Déroulement des processus

La figure 7.4 présente le déroulement global de la compensation par faisceaux. La première étape consiste à déterminer les inconnues du système et à recenser les observations. Une phase de réorganisation des inconnues peut être effectuée afin d’optimiser le rangement du système. Les observations sont filtrées en utilisant soit la solution initiale, soit la solution de l’itération précédente ; permettant ainsi d’éliminer une grande majorité de fautes restantes.

Le processus de résolution à lieu tant que la norme des résidus est supérieure à un seuil, ou tant que le nombre maximum d’itérations n’est pas atteint. Cette dernière condition permet d’arrêter le calcul si celui-ci diverge : trop d’erreurs, solution initiale trop éloignée, manque d’observations entre certaines inconnues.

1. Il peut exister plusieurs permutations pour un système donné

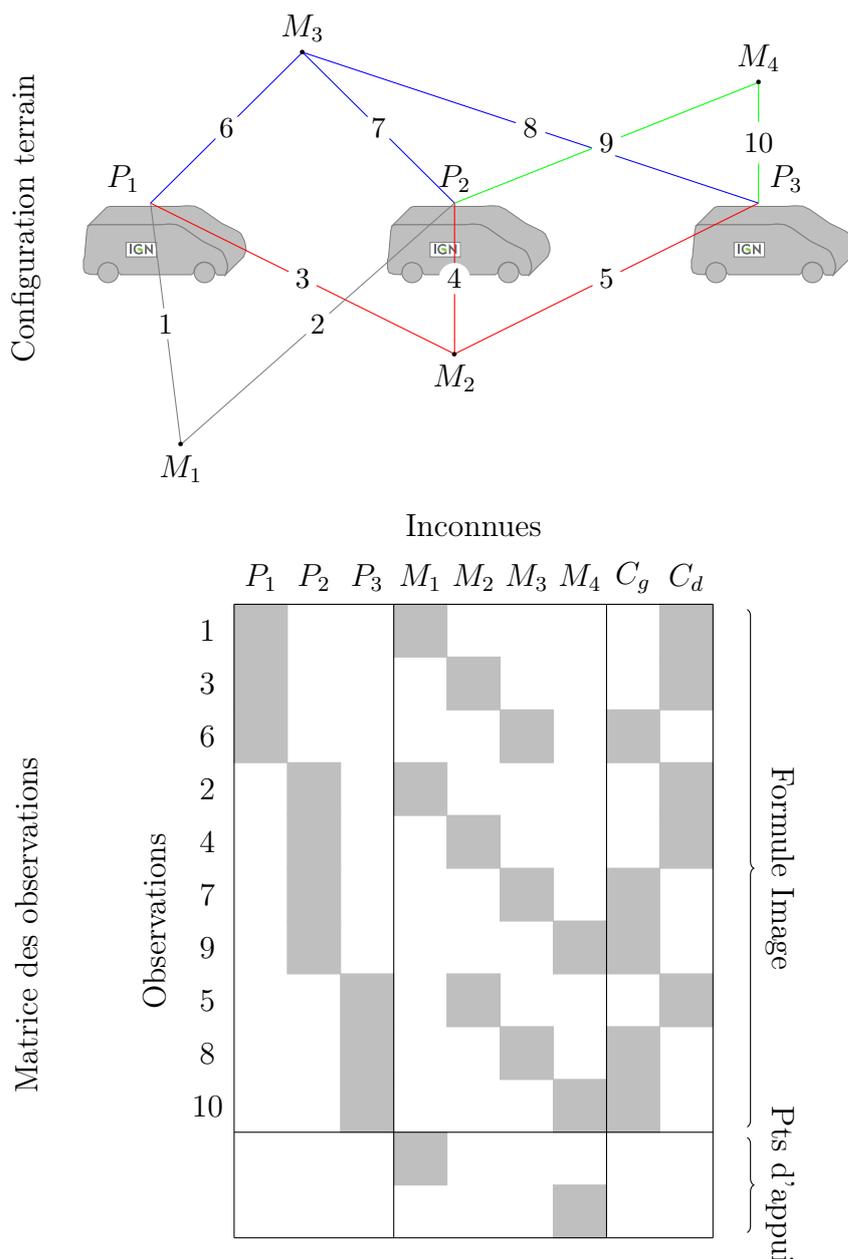


FIGURE 7.3 – Illustration du remplissage de la matrice d’observation. Les panoramiques sont identifiées par P_1 , P_2 et P_3 , les points par M_1 , M_2 , M_3 et M_4 et les caméras par C_g et C_d .

7.4 Exemples de processus

7.4.a Calibration du véhicule

La première méthode de calibration, dite « Off-Line », présentée dans la section 4.4 {page 60}, comporte trois types d’inconnues : celles concernant la pose des caméras sur le véhicule (10 caméras et 6 inconnues par caméra), celles concernant la pose du véhicule par rapport au terrain (4 poses et 6 inconnues par pose) et celles concernant les points d’appui (231 points soit 693 inconnues). Concernant les observations, il n’y a que

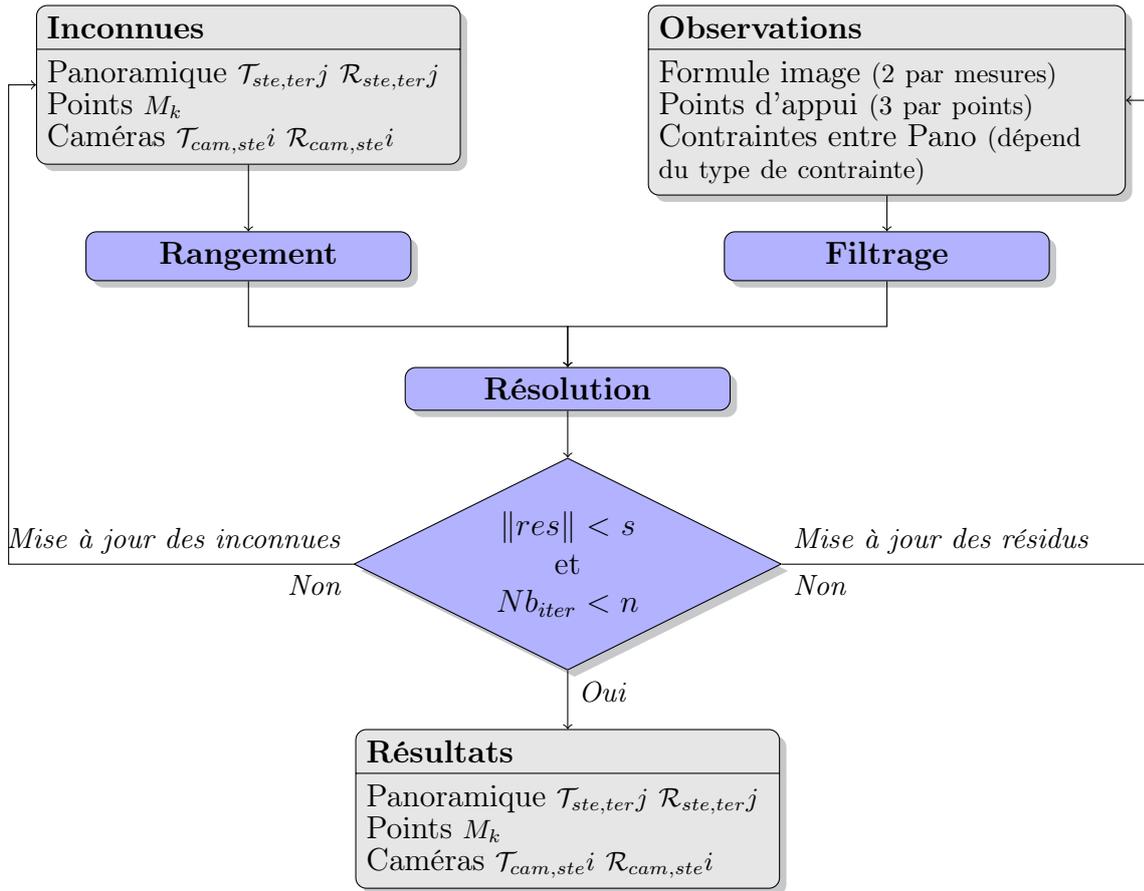


FIGURE 7.4 – Schéma expliquant l’enchaînement des étapes

celles utilisant la formule image, qui lie un point d’appui à sa position dans l’image pour une caméra et une pose du véhicule (534 mesures, soit 1068 observations, 2 par mesures). Il y a aussi celles concernant les points d’appui au nombre de 231 soit 693 observations supplémentaires. La phase de filtrage est inexistante car les mesures sont réalisées manuellement. La phase de réarrangement n’apporte pas de réduction significative du temps de calcul qui est inférieure à la seconde pour une vingtaine d’itération. Concernant les résidus, ils étaient supérieurs à 10 pixels avant calculs, pour diminuer autour de 0,49 pixel à la fin du processus.

7.4.b Relèvement

La procédure de relèvement, qui sera présentée au 8.1 {page 113} avec seulement 3 points comporte 15 inconnues : 6 pour la panoramique et 9 pour les points d’appui (3 par points). Ce processus comporte 15 observations : 6 pour les mesures images (2 observations par mesure par point) et 9 pour les points d’appui. Là encore, la phase de filtrage est inexistante parce que les mesures sont réalisées manuellement. La phase de réarrangement ici est totalement inutile devant le faible nombre d’inconnues et d’observations. Le nombre d’itération est inférieur à 5 pour un temps de calcul inférieur au dixième de seconde.

7.4.c Processus complexe

Dans la section 10.2 {page 144}, une méthode de recalage comportant des points d'appui, des points homologues, des contraintes entre panoramiques successives ainsi qu'aux intersections sera présentée.

Concernant les inconnues, il y a les poses des 44 633 panoramiques, les positions des points homologues (ici de contrôle) et d'appui. Nous avons plusieurs familles d'observations. La première concerne la formule image : 4075 mesures sur 46 points de contrôle et 299 points d'appui. La seconde concerne les points d'appui qui représentent 897 observations. La troisième concerne les contraintes entre panoramiques successives au nombre de 44 593. La quatrième et dernière famille concerne les contraintes entre panoramiques aux intersections qui représente 78703 observations.

La phase de filtrage est inexistante parce que les mesures sont réalisées manuellement, par contre l'étape de réarrangement d'inconnues est nécessaire afin d'optimiser le stockage et la résolution du système mathématique.

7.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons détaillé le processus de compensation par faisceaux, trop souvent jugé comme acquis et simple dans la littérature mais qui nécessite une succession d'étapes importantes que nous avons jugé utile de rappeler.

La partie suivante présente plusieurs techniques utilisant le principe de la compensation par faisceaux qui permettent de recalcr aussi bien en relatif comme en absolu des données acquises par un véhicule de cartographie mobile.

Quatrième partie

Localisation relative et absolue de systèmes de numérisation mobile basée image

Dans cette partie nous allons étudier différentes façons d'améliorer la trajectographie du véhicule en utilisant à la fois l'image et aussi la solution initiale fournie par le système de positionnement.

Cette partie est composée de trois chapitres regroupant des méthodes permettant d'améliorer :

- le positionnement du véhicule par rapport au terrain, chapitre 8 ;
- la géométrie relative des trajectoires lors de multi-passages, chapitre 9 ;
- la géométrie à la fois interne et par rapport au terrain, chapitre 10 ;

Le dernier chapitre (chapitre 11) récapitule les différentes méthodes et permet d'identifier la meilleure en fonction : des besoins, des données disponibles et des précisions internes et absolues souhaitées.

Chapitre 8

Recalage de trajectoire sur des points d'appui externes

Ce chapitre permet de s'intéresser à deux méthodes permettant d'améliorer la position du véhicule par rapport au terrain. La première, la plus précise, nécessite au moins trois points d'appui. La seconde permet d'extrapoler ce relèvement individuel à un très grand nombre de panoramiques mais avec une précision moindre.

8.1 Relèvement

Cette première méthode permet de positionner le véhicule avec une précision centimétrique en absolu (i.e., par rapport au terrain) sur des points spécifiques mesurés par des géomètres ou par repiquage sur un plan ou une base de données topométrique.

Nous allons tout d'abord présenter son fonctionnement, puis sa formalisation mathématique. Enfin, les résultats sur les expérimentations seront discutés.

8.1.a Principe

Cette procédure consiste à déterminer la position et l'orientation du véhicule en utilisant des points connus à la fois dans le système terrain et dans les images (cf figure 8.1). Le terme de *relèvement* a été choisi par analogie avec la procédure photogrammétrique qui consiste à déterminer la position et l'orientation d'une image grâce à des points connus.



FIGURE 8.1 – Principe du relèvement.

Cette méthode propose différentes applications :

- le recalage absolu de toutes les images acquises au même instant par le véhicule avec seulement 3 points, et ce, quel que soit le nombre de caméras,
- le recalage des images sur un modèle 3D pour la texturation,

— la mise en cohérence de données issues de station terrestre laser avec des images.

Les points connus peuvent être des cibles mais aussi des points naturels facilement mesurables et sur le terrain et dans l'image (joints de pierre, marquages au sol, balcons, etc...).

La différence avec les algorithmes de relèvement classique vient du fait que les mesures sur les points d'appui peuvent être faites sur n'importe quelle caméra.

8.1.b Formulation mathématique

Pour établir la formulation mathématique, nous utilisons la fonction image établie dans la section 4.3.a {page 58} $f_{i,j}(M)$ qui relie un point terrain M à une mesure image m . Cette formule nécessite :

- la position et la rotation des caméras par rapport au véhicule (S_{cam_i} et $\mathcal{R}_{cam_i,ste}$) qui ont été préalablement déterminées par la calibration du véhicule (chapitre 4)
- la position et la rotation du véhicule par rapport au terrain ($\mathcal{T}_{ste,ter}$ et $\mathcal{R}_{ter,ste}$) déterminées dans le processus de relèvement.

Pour effectuer le relèvement, il faut donc minimiser l'écart entre les positions des mesures images déterminées et celles issues de la formule image. Le système à minimiser s'écrit selon l'équation 1 (avec N le nombre de points d'appui).

$$s = \arg \min_{[\mathcal{T}_{grd,ste}, \mathcal{R}_{grd,ste}]} \sum_k^N \left(f_{i,j}(M_k) - \begin{pmatrix} c_k \\ l_k \end{pmatrix}_{i,j} \right)^2 \quad (1)$$

Effectuée par un opérateur humain, cette méthode a l'avantage d'être robuste, extrêmement simple et rapide à mettre en oeuvre : le risque de faute dans les mesures est minime.

8.1.c Sensibilité de la méthode à la configuration des points d'appui

Pour que notre méthode fonctionne, il faut au minimum 3 points d'appui. Pour évaluer la fiabilité du relèvement ainsi que sa sensibilité à la configuration des points d'appui, nous avons calculé avec 17 points d'appui une position de référence (cf figure 8.2). Ensuite toutes les configurations possibles avec 3 points ont été calculées (C_{17}^3 soit 680 combinaisons).

Trois comportements se dégagent de cette expérimentation : les cas de divergence (cf figure 8.3.a), les cas de convergence avec mauvaise précision (cf figure 8.3.b), et les cas de convergence avec une précision meilleure que le décimètre (cf figure 8.3.c). Ces trois familles sont détaillées individuellement.

Cas de divergences Dans 71 cas (10%), le système ne converge pas. Ces cas de divergence se produisent lorsque les points d'appui sont alignés (cf figure 8.3.a). En effet, avec 3 points alignés, plusieurs solutions mathématiques sont possibles, donc le système ne

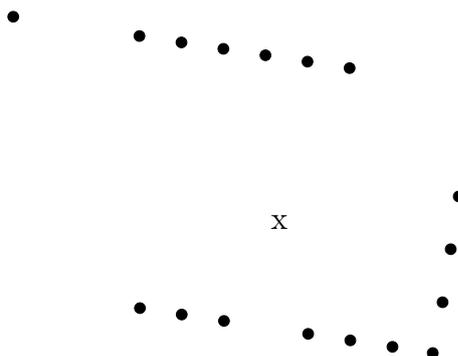


FIGURE 8.2 – Configuration pour tester le processus de relèvement. La position du véhicule est représentée par x et les positions des points d'appui sont représentées par le symbole •.

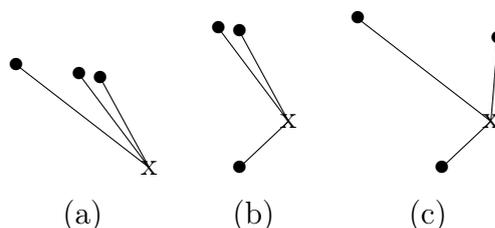


FIGURE 8.3 – Illustration du processus de relèvement. (a) Exemple de divergence. (b) Exemple de cas de convergence avec précision dégradée. (c) Exemple de cas de convergence avec bonne précision.

peut pas converger. Si la précision fournie par le système de positionnement était fiable, elle pourrait être intégrée dans le calcul et il n'y aurait pas de divergence. Malheureusement ce n'est pas notre cas (cf sous-section 2.4.a.ii {page 19}). Dans des conditions réelles d'acquisition, il faut donc prendre garde à éviter cette configuration.

Cas de convergence avec précision dégradée Moins de 3% des relèvements qui convergent sont moins précis que 10 cm et 7% que 5 cm. Cette dégradation est principalement due à une configuration des points d'appui défavorable par rapport à la position du véhicule. Celle-ci se traduit par un angle faible entre deux points d'appui et le véhicule (cf figure 8.3.b)

Cas de convergence optimaux Dans les 93% des relèvements qui convergent à mieux que 5 cm, près de 50% convergent à mieux que le centimètre. L'histogramme du nombre de solutions par rapport à la distance en planimétrie est présenté sur la figure 8.4.a et l'histogramme du nombre de solutions par rapport à la distance en altimétrie est présenté sur la figure 8.4.b. Pour que les cas de convergence soient optimaux, il faut que l'angle formé par les points d'appui et la panoramique soit supérieur à 20 degrés.

8.1.d Conclusion

Le processus de relèvement est facile à mettre en oeuvre et permet d'atteindre une précision centimétrique lorsque les points d'appui sont correctement répartis : non alignés et angle avec le véhicule à mieux que 20 degrés. La figure 8.5 présente un cas concret

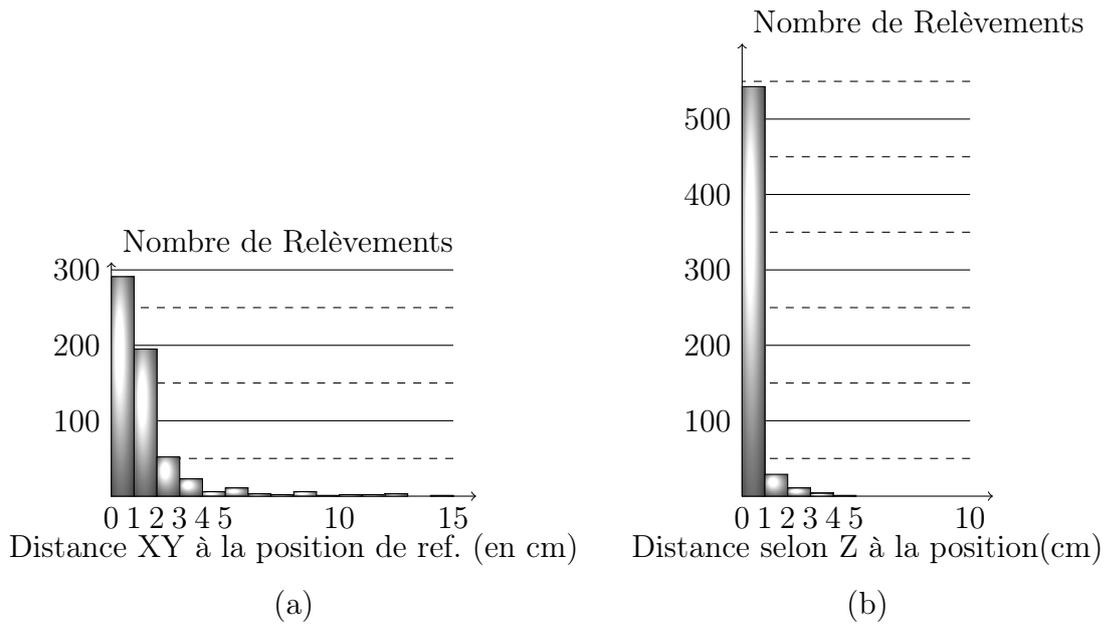


FIGURE 8.4 – Histogramme de répartition de la précision du relèvement. (a) en planimétrie et (b) en altimétrie.

d'utilisation. Le véhicule a été recalé grâce à des points d'appui. Le modèle 3D ne sert qu'à se rendre compte de l'effet du recalage mais ne sert en aucun cas dans le processus. Sa précision est décimétrique.



FIGURE 8.5 – Illustration de la procédure de relèvement. (a) Avant le processus, le véhicule est "en dessous" de la chaussée. (b) Après le processus, le véhicule est sur la chaussée. Le modèle 3D présent sur l'illustration n'est là que pour aider à la compréhension (précision décimétrique). Le véhicule est à l'échelle du modèle.

8.2 Extrapolation des relèvements individuels à l'ensemble de la trajectoire

Cette section explique la façon de gérer la trajectoire fournie par le système de positionnement. Nous allons dans un premier temps expliquer le principe, puis dans un second temps, nous présenterons sa formulation mathématique.

8.2.a Principe

D'après les spécifications et nos constatations (cf. section 2.4.a.ii {page 19} et section 2.2.d {page 14}), la dérive du système de positionnement est faible (inférieure au cm) sur un intervalle de temps relativement court (quelques secondes). La trajectoire peut être considérée comme une succession de positions et d'orientations dont l'écart entre chaque pose est mesuré par le système de positionnement de façon fiable. Cela se résume à une chaîne dont les maillons sont les panoramiques. La figure 8.6 illustre le principe de la gestion de trajectoire.

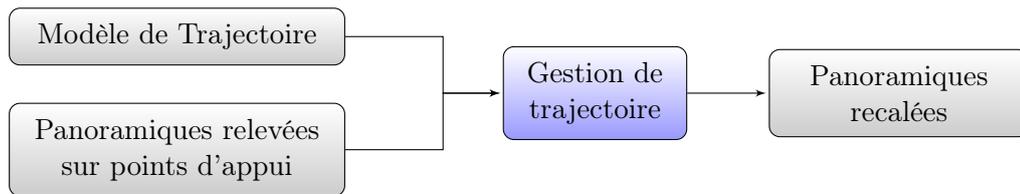


FIGURE 8.6 – Principe de la gestion de trajectoire.

8.2.b Formulation mathématique

Gérer la trajectoire comme une chaîne se présente mathématiquement sous la forme de deux équations. La première, l'équation 2, concerne la position. La différence entre deux positions successives correspond à la translation mesurée par le système de positionnement, δS_{Traj} dans l'équation. La seconde, l'équation 3, concerne l'orientation. La variation d'orientation entre deux orientations successives correspond à la variation mesurée par le système de positionnement, $\delta \mathcal{R}_{Traj}$ dans l'équation.

$$S_i - S_{i-1} = \delta S_{Traj} \quad (2)$$

$${}^t\mathcal{R}_{i-1} \cdot R_i = \delta \mathcal{R}_{Traj} \quad (3)$$

Les incertitudes fournies par le système de positionnement n'étant pas fiables (cf. sous-section 2.4.a.ii {page 19}), nous pondérerons chaque maillon de la chaîne de manière identique. Dans le cas contraire, le système d'équations devrait alors être pondéré en tenant compte de ces incertitudes.

8.2.c Applications

Cette formulation ne peut pas être utilisée indépendamment. Elle permet seulement de conserver la forme de la trajectoire.

Voici deux cas d'utilisations possibles :

- recaler une trajectoire en fixant une panoramique (par relèvement par exemple) (cf figure 8.7.a). Toutes les panoramiques sont décalées d'une même translation.
- contraindre une trajectoire en fixant deux panoramiques (cf figure 8.7.b). La répartition des écarts se fait alors de manière homogène sur toutes les panoramiques. Cette dernière méthode est présentée dans la section suivante.

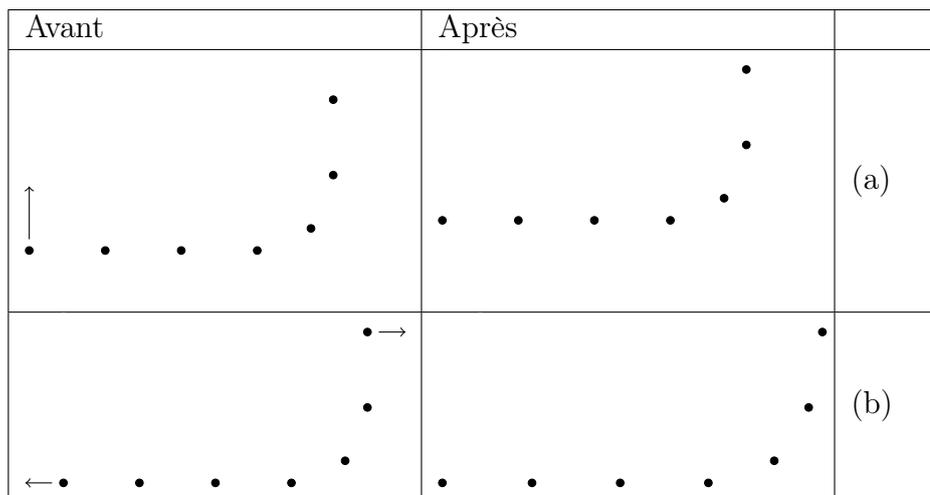


FIGURE 8.7 – Exemples d'utilisations de la gestion de trajectoire. Les panoramiques sont représentées par des •. (a) Mise en référence d'un ensemble de panoramiques grâce à un relèvement local. (b) Dilatation d'un ensemble de panoramiques en fixant la position de deux panoramiques aux extrémités.

8.3 Recalage ponctuel de trajectoire

8.3.a Principe

Une application possible pour le recalage en absolu consiste à effectuer quelques relèvements de panoramiques le long d'une trajectoire puis de recalcr la trajectoire en la contraignant sur ces panoramiques de passage. Le schéma 8.8 présente le principe de l'algorithme.

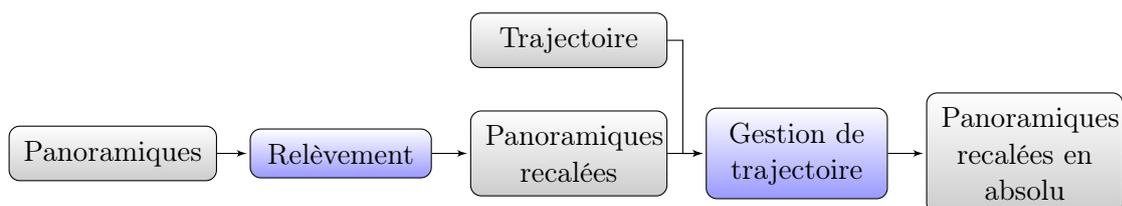


FIGURE 8.8 – Principe de l'utilisation du relèvement pour le recalage en absolu.

8.3.b Résultats

Afin de vérifier la validité et la précision de notre processus, nous avons choisi une zone urbaine sur une boucle (2 passages faits par le véhicule). Nous avons 2 zones avec des points d'appui (A et B sur la figure 8.9). Les positions des panoramiques qui nous servent de référence sont les positions déterminées par relèvement de manière individuelle.

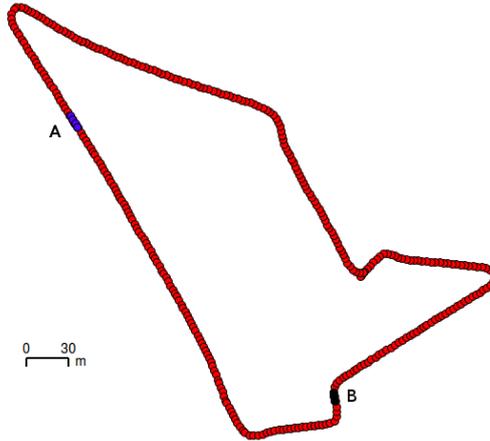


FIGURE 8.9 – Trajectoire pour l'expérimentation (en rouge). Les panoramiques calculées par relèvement sont en bleu et les panoramiques de contrôle sont en noir.

Nous avons lancé notre algorithme en utilisant successivement les zones en appui et en contrôle. Le tableau 8.1 présente les différents résultats sur les jeux tests. A_1 , B_1 , A_2 , B_2 et A_3 sont respectivement les passages aux points A et B à l'issue des 2 tours.

Configuration	Écart entre la position estimée et la vraie position									
	(m)	%	(m)	%	(m)	%	(m)	%	(m)	%
$A_1 B_1$ ● ●	(2,38)		(4,13)		(1,60)		(1,24)		(0,68)	
$A_2 B_2$ ● ● ● ●	(1,28)	46%	(-)	-	(-)	-	(-)	-	(-)	-
A_3 ● ● ● ● ● ●	(-)	-	(0,70)	82%	(-)	-	(-)	-	(-)	-
	(-)	-	(-)	-	(0,70)	56%	(-)	-	(-)	-
	(-)	-	(-)	-	(-)	-	(0,53)	57%	(-)	-
	(-)	-	(-)	-	(-)	-	(-)	-	(1,03)	-50%
	(1,69)	29%	(0,59)	85%	(-)	-	(-)	-	(-)	-
	(-)	-	(0,88)	78%	(0,80)	50%	(-)	-	(-)	-
	(-)	-	(-)	-	(1,00)	37%	(0,64)	48%	(-)	-
	(-)	-	(-)	-	(-)	-	(0,72)	41%	(1,48)	-115%
	(1,23)	48%	(0,19)	95%	(0,72)	54%	(-)	-	(-)	-
	(-)	-	(1,19)	71%	(1,53)	4%	(1,05)	15%	(-)	-
	(-)	-	(-)	-	(0,59)	63%	(0,19)	84%	(1,01)	-47%
	(0,68)	71%	(1,01)	75%	(1,48)	7%	(1,03)	16%	(-)	-
	(-)	-	(1,28)	69%	(1,69)	-5%	(1,23)	1%	(0,68)	0%

TABLE 8.1 – Écarts de positions sur les points de contrôle. La première colonne permet de spécifier les panoramiques relevées en appui (gris). Les poses des panoramiques utilisées en contrôle (vert) sont estimées dans notre processus. Les valeurs entre parenthèses sont les écarts (en mètre) entre la position estimée par notre processus et celle calculée par relèvement (centimétrique). Les valeurs en % sont le gain de précision entre la position sans recalage et celle estimée par notre processus.

La première constatation concerne la solution initiale : elle peut être éloignée de plus de 2 mètres, ce qui est très important (1^{ère} ligne du tableau).

Dans tous les cas, les zones de contrôle avant et après une panoramique fixée ont une amélioration de positionnement d'environ 50%, excepté la dernière position. Cette position était la plus précise par rapport à la solution initiale. En voulant améliorer le positionnement des autres panoramiques, on a dégradé cette position. Plus on s'éloigne de la panoramique fixée, moins l'amélioration est visible.

Le principal inconvénient de cette méthode est le nombre de points d'appui nécessaires (au moins 3 par panoramique relevée). En effet, ceux-ci sont très coûteux à produire : équipe à envoyer sur le terrain et techniques de positionnement précis à mettre en oeuvre. Un second inconvénient est la précision, qui est décimétrique, alors que les relèvements ont une précision centimétrique. Le dernier inconvénient est qu'il n'est pas possible de prévoir la précision finale de notre algorithme : nous ne pouvons pas utiliser l'incertitude donnée par le système de positionnement qui n'est pas fiable. La figure 8.10 représente l'erreur de positionnement d'une panoramique en fonction de la distance à une panoramique relevée. On constate qu'il n'y a aucune fonction mathématique qui permet de déterminer la précision de positionnement en fonction de la distance à une panoramique connue.

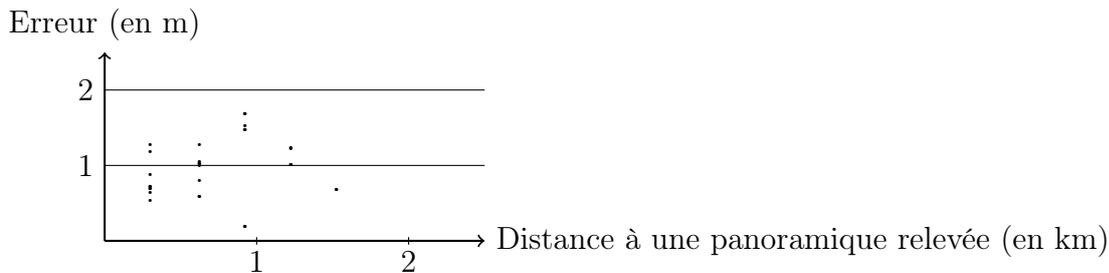


FIGURE 8.10 – Représentation de l'erreur de positionnement en fonction de la distance à une panoramique connue.

A cause de ces difficultés, nous avons développé des méthodes permettant d'améliorer la précision relative. Celles-ci sont explicitées dans les chapitres suivants.

Chapitre 9

Recalage multi-passages de la trajectoire

Lors d'une acquisition, il est fréquent que le véhicule passe plusieurs fois au même endroit. Nous pouvons donc améliorer la trajectographie relative sur ces zones de recouvrement en recalant nos données images.

La première section présente le recalage lors de passages multiples sur une même zone, à une intersection par exemple. La seconde explicite la fabrication et la gestion du graphe de panoramiques qui permet de lier les panoramiques les unes aux autres. Enfin, une section d'expérimentations et de validations des résultats sera présentée.

9.1 Gestion individuelle des intersections et passages multiples

Lors de passages multiples dans une même zone, des écarts importants peuvent être constatés à cause des dérives du système de positionnement qui sont dépendantes de la constellation GNSS et de la durée des masques (cf 2.4.a.ii {page 19}). Il faut donc développer une méthode de recalage capable de pallier ces écarts sinon cela provoque des anomalies dans la génération de produits en aval : nuages lasers entre deux passages non cohérents, défauts de textures : raccords entre images imparfaits etc.

Nous présentons ici plusieurs stratégies pouvant être mises en place dans le cas de passages multiples sur une même zone (intersections, rue parcourue plusieurs fois). Le but est de déterminer la stratégie la plus simple, rapide et surtout fiable afin de recaler les données. Cette méthode doit être automatique avec des paramétrages pouvant être utilisés pour le plus grand nombre de cas possibles afin de pouvoir travailler sur des chantiers de grandes tailles (plusieurs kilomètres d'acquisitions avec plusieurs centaines d'intersections). Nous avons volontairement restreint le nombre de panoramiques à recaler à quatre (deux consécutives à deux instants distincts). Un plus grand nombre de panoramiques entraînerait des stratégies beaucoup plus complexes à mettre en place, qui sont explicitées dans la partie III {page 81} tandis qu'un nombre plus restreint ne permet pas de mettre en place des stratégies fiables et efficaces.

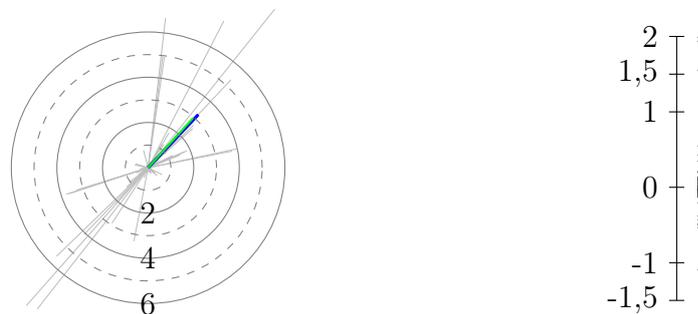
9.1.a Recalage 3D-3D

La première méthode utilisée est le recalage 3D/3D. Il suffit de prendre deux panoramiques consécutives acquises au même instant puis deux autres panoramiques acquises au même endroit mais à une période différente. En extrayant des points homologues communs aux quatre panoramiques (méthode décrite dans le chapitre 5), nous pouvons calculer deux jeux de coordonnées 3D pour ces points : chaque couple de panoramiques permet de calculer la position 3D du point homologue en intersectant les faisceaux. Ensuite, il suffit de calculer la transformation rigide entre ces deux jeux de coordonnées pour obtenir la différence de position entre les deux acquisitions du véhicule. Nous avons testé cette méthode sur deux jeux de données. Le premier présente une rue où le véhicule a circulé en deux fois dans la même rue tandis que le second est un carrefour où le véhicule est passé dans deux rues perpendiculaires. La figure 9.1 représente les deux configurations avec la solution initiale fournie par le système de positionnement.



FIGURE 9.1 – Recalage 3D/3D. (a) Passages multiples dans une même rue. (b) Passages à une intersection.

Les figures 9.2 et 9.3 présentent les résidus issus du processus de recalage 3D/3D pour les deux jeux de données. En bleu et en vert sont représentés chacun des couples de panoramiques issues des deux acquisitions (une couleur par couple). En gris sont représentés les résidus sur chacun des points 3D après estimation de la transformation rigide entre les deux jeux de coordonnées. Pour ces cas d'utilisations, nous avons volontairement éliminé les erreurs (manuellement) dans l'appariement 3D. La précision des mesures est meilleure que le pixel.



Résidus (en mètre) dans le plan (OXY) Résidus (en mètre) selon (OZ)

FIGURE 9.2 – Résidus 3D après recalage 3D/3D sur l'exemple (a).

Dans la figure 9.2, les deux couples sont dans la même direction et on constate que les résidus sur les points le sont aussi. En effet, les coordonnées des points sont calculées par intersections de faisceaux avec la technique présentée dans l'annexe C {page 179}.

Pour des faisceaux quasi parallèles, l'intersection est difficile à estimer de façon fiable et l'erreur de positionnement du point se trouve principalement dans l'axe des deux faisceaux. Cela signifie qu'un léger écart sur les mesures et/ou sur la pose du véhicule entraînera des défauts de positionnement des points en 3D pouvant être très importants (plusieurs mètres) ce qui ne permet pas de calculer de manière fiable une transformation. On constate aussi que les résidus sont en majorité plus importants que le mètre (de 2 à 6 m).

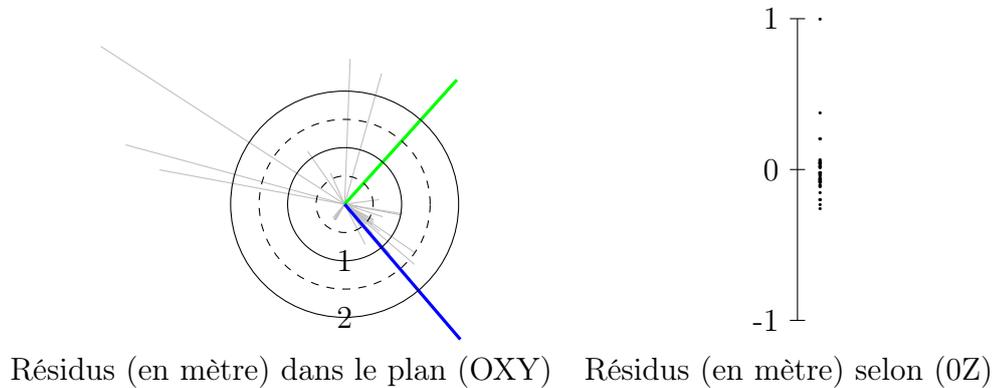


FIGURE 9.3 – Résidus 3D après recalage 3D/3D sur l'exemple (b).

Pour le second cas (figure 9.3), les résidus après calculs sont répartis de manière plus homogène. En effet, les couples n'ayant pas la même direction, les incertitudes de positionnement des points ne sont pas dans la même direction ce qui se traduit après compensation par un champ de résidus aléatoire. Là encore, les résidus sur les points peuvent être métriques.

Dans les deux exemples que nous avons présentés, nous avons constaté que cette technique ne pouvait pas être utilisée, malgré l'absence d'erreurs d'appariement, à cause principalement de l'incertitude de positionnement sur l'intersection des faisceaux. Les résidus sur les points étant métrique (aussi bien sur des points loin ou proche des caméras), la position relative des panoramiques n'est pas assurée.

On aurait pu utiliser les paires stéréoscopiques avant et arrière en extrayant des points homologues directement en 3D, mais là encore, l'intersection des faisceaux est mal déterminée. Ensuite, les paires stéréoscopiques n'imagent que les parties avant et arrière. Hors, lors de changement de trajectoire, il arrive qu'il n'y ait pas de recouvrement entre les différentes poses du véhicule entre les paires stéréoscopiques.

Pour pallier ce problème, nous avons choisi de développer notre propre méthode qui est explicitée dans la section suivante. Elle exploite la panoramique, qui permet d'imager tout ce qu'il y a autour du véhicule, et ainsi, garantit du recouvrement entre différentes poses quelle que soit l'orientation du véhicule.

9.1.b Notre processus de recalage 2x2

9.1.b.i Principe

Les principaux inconvénients de la méthode précédente sont : les intersections de points ne sont pas bien déterminées par chaque couple de panoramiques et la solution initiale pas suffisamment précise. Dans la sous section 2.4.a.ii {page 19}, nous avons validé la

précision relative du système de positionnement. Nous pouvons ajouter une hypothèse de travail qui consiste à considérer les panoramiques successives comme un ensemble rigide. Ainsi, il ne reste plus qu'à déterminer les positions relatives des couples de panoramiques et des points homologues.

Le principe de notre méthode consiste à :

- considérer les couples de panoramiques comme rigides deux à deux,
- extraire des points homologues intra et inter couples (le choix d'extraction et d'appariement de points est argumenté dans le chapitre 5),
- compenser la position des points, la position relative des couples et les mesures images dans un même processus.

La figure 9.4 présente le fonctionnement de notre méthode.

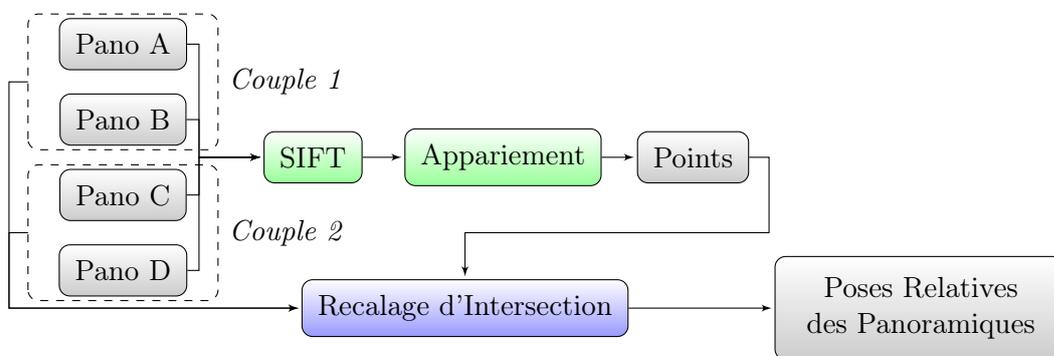


FIGURE 9.4 – Principe de notre méthode de recalage 2x2

Nous avons volontairement limité le nombre d'images à 4 (2x2) parce qu'un nombre d'images plus élevé nécessite des stratégies plus complexes : appariement de points triples ou plus, détection de fautes plus complexes, choix des points homologues entre deux acquisitions non consécutives non triviales. Le problème est à la fois plus simple et plus rapide en ne considérant que deux paires de couples.

9.1.b.ii Formulation du problème

Notre processus comporte différentes équations (cf. équation 1). Les équations 1.a₁ et 1.a₂ servent à stabiliser notre système d'équations en fixant le premier couple composé des panoramiques A et B. S_A (resp. S_B) étant la position de la panoramique A (resp. B) à l'itération courante et $S_{A,ini}$ (resp. $S_{B,ini}$) sa position issue du système de positionnement. L'équation 1.b permet de rigidifier le deuxième couple constitué des panoramiques C et D durant le calcul du recalage. La valeur de δ , translation entre les deux panoramiques, est celle mesurée par le système de positionnement. L'équation 1.c correspond aux mesures pour chaque point homologue. Pour un point homologue, quatre équations d'observations sont posées. Elles correspondent à la mesure d'un même point mesuré dans les quatre panoramiques.

$$\left\{ \begin{array}{ll} S_A = S_{A,ini} & (a_1) \\ S_B = S_{B,ini} & (a_2) \\ S_D - S_C = \delta S_{CD} & (b) \\ \sum_{k=0}^{Nm} f_{i,j}(M_k) = \begin{pmatrix} c_k \\ l_k \end{pmatrix}_{i,j} & (c) \end{array} \right. \quad (1)$$

Pour résoudre ce système d'équations, nous le linéariserons en utilisant une solution initiale fournie par le système de positionnement. Ensuite, de manière itérative, nous calculons les valeurs des inconnues à l'itération $N + 1$ en utilisant la solution à l'itération N par moindres carrés [Sillard, 2001].

9.1.b.iii Description de l'algorithme

Afin d'éliminer les erreurs d'appariement qui peuvent se produire, nous avons développé un algorithme comportant plusieurs paramètres :

- deux seuils s_{max} et s_{min} qui permettent d'éliminer les mesures erronées. Le premier pour éliminer les erreurs grossières avant le calcul et un second pour éliminer les mesures erronées durant le processus.
- un nombre d'itérations maximum afin d'éviter la non convergence d'un calcul à cause d'un trop grand nombre d'erreurs.

Cette méthode est décrite de manière détaillée par l'algorithme 9.1

Algorithme 9.1 : Recalage 2x2

entrée :

- Mes , les mesures images sur les points homologues communs aux 4 panoramiques
- s_{max} et s_{min} seuils d'élimination des résidus maximum et minimum
- $iter_{max}$, le nombres maximum d'itérations

sortie : Panoramiques recalées

```

s = smax pour i = 1 a itermax faire
| pour m = 1 a Card(Mes) faire
| | si Residus(Mes(m)) < s alors
| | | Suppression(Mes(m))
| | fin
| fin
| Moindres Carrées
| Mise a jours des inconnues
| s = smax - (smax - smin) * i/itermax
fin

```

En pratique, 20 itérations suffisent pour obtenir une solution et l'évaluer, s_{max} a été fixé à 200 pixels et s_{min} à 3 pixels. Les choix de ces valeurs sont argumentés dans le paragraphe suivant.

9.1.b.iv Expérimentations

Afin de tester la sensibilité et la fiabilité de notre algorithme, nous avons réalisé plusieurs expérimentations. La première consiste à tester la sensibilité aux seuils s_{max} et s_{min} . La seconde consiste à étudier l'influence de la calibration sur le processus et le dernier est un test de fiabilité sur un grand nombre de cas.

Valeurs des paramètres Afin de déterminer la sensibilité au seuil de résidus, nous avons testé notre algorithme avec des valeurs de seuils minimales allant de 1 à 100 pixels. La valeur maximale a été fixée à 200. Cette valeur est volontairement élevée afin de conserver toutes les mesures possibles. La figure 9.1.a présente le nombre de mesures valides en fonction du seuil minimum et la figure 9.1.b les valeurs des résidus en pixel.

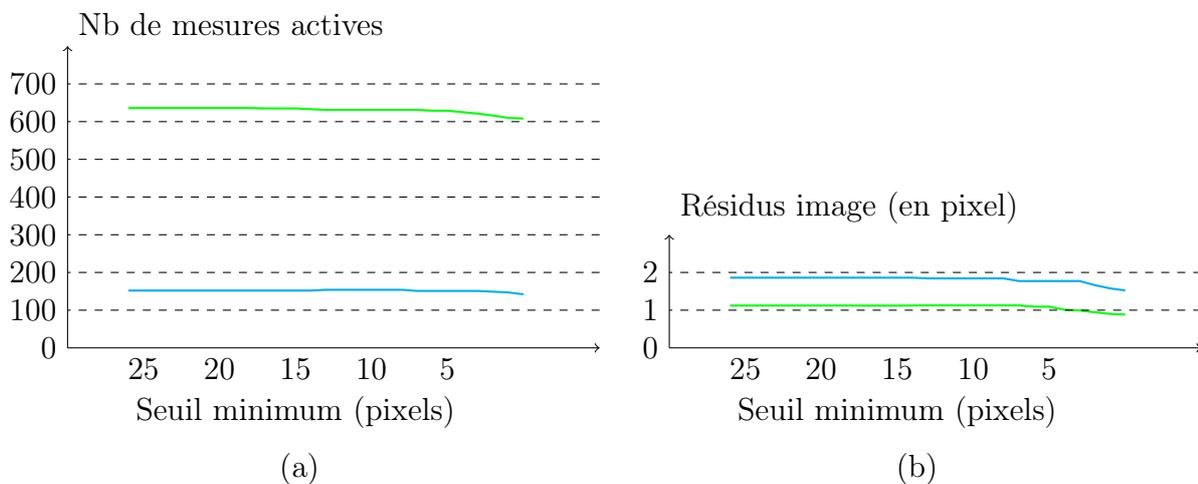


FIGURE 9.5 – Influence de la valeur du seuil minimum sur le module 2x2. En vert, avec le jeu de données 1 et en bleu, avec le jeu de données 2. (a) Nombres de mesures valides en fonction du seuil minimum et (b) valeurs des résidus (en pixel) en fonction du seuil minimum.

Le comportement le plus intéressant à noter est que l'influence du seuil devient important lorsqu'il est inférieur à 5 pixels. Cela s'explique par le fait que notre processus de sélection (chaque point doit être vu dans les 4 images) permet d'éliminer un maximum de fautes avant même la compensation.

Le tableau 9.1 présente le nombre de mesures fausses encore actives et le nombre de mesures correctes éliminées en fonction du seuil bas. Il permet de fixer la valeur du seuil choisi. À 3 pixels, peu d'erreurs sont conservées dans le calcul et peu de mesures correctes sont éliminées.

Influence de la Calibration Nous avons testé les calculs en ne tenant pas compte de la calibration du véhicule afin de vérifier la convergence et l'influence de la calibration. Les résultats sont présentés sur la figure 9.6. On constate que le processus converge vers la même solution à quelques centimètres près (cf figure 9.6.a). Le nombre de mesures valides (cf figure 9.6.b) est un peu plus faible (la calibration étant moins précise, les résidus images sont plus importants) mais suffisants (plus de 600 mesures), tandis que les résidus sur les mesures sont un peu plus élevés (2 pixels, selon la figure 9.6.c). La position relative

Seuil (pix.)	Exemple 1 : passages multi-temporels		Exemple 2 : intersection	
	Mes. fausses Actives	Mes. vraies Inactives	Mes. fausses Actives	Mes. vraies Inactives
1	6	110	1	26
2	8	17	2	18
3	7	10	4	5
4	9	1	3	3
5	9	1	2	4
6	10	5	2	2
7	10	2	2	0

TABLE 9.1 – Statistiques sur les mesures à la fin du processus 2x2 en fonction du seuil minimum.

des caméras n'étant pas précise, cela se traduit par des incertitudes plus grandes sur les faisceaux.

Notre algorithme, bien qu'initialement développé pour un véhicule calibré, converge même lorsque le dispositif ne l'est pas. On pourra effectuer un recalage, certes moins précis, mais suffisant, pour une mise en cohérence des données plus précise que celle fournit par le système de positionnement.

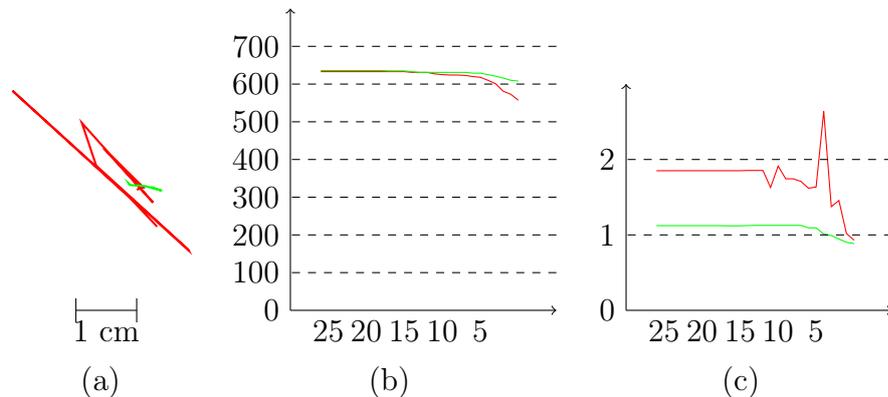


FIGURE 9.6 – Influence de la calibration sur le processus de recalage. (a) écart de positionnement entre le véhicule calibré (en vert) et non calibré (en rouge), (b) nombre de mesures valides durant le processus et (c) résidus sur les mesures images en fonction du seuil d'élimination des fautes

Passage à l'échelle Les configurations où le véhicule passe plusieurs fois au même endroit sont nombreuses lors d'une acquisition traditionnelle (passages multiples aux carrefours et obligation de repasser plusieurs fois dans les mêmes rues à cause de sens uniques). Nous avons testé notre algorithme sur plus de 100 000 intersections potentielles¹ pour définir des critères de convergence. Les résidus à chaque itération doivent diminuer et plus de 20 mesures doivent être actives à la fin du processus pour garantir suffisamment de redondance pour le calcul. Avec ces critères, plus de 70 % des calculs ont convergé. Pour les 30% restants, il y a 3 causes possibles de divergence :

1. Le choix des intersections est détaillé en sous-section 9.2.a {page 129}

- 83,3 % qui n'ont pas de mesures communes,
- 8,4 % qui ont entre 1 et 20 mesures communes,
- 8,3 % qui ne convergent pas (faisceaux homologues mal répartis et alignés avec les couples).

Les cas d'absence de mesures communes sont identifiables en amont du processus et peuvent être préalablement rejetés. On peut donc dire que notre algorithme présente un taux de 93,3 % de convergence.

L'histogramme (cf. figure 9.7) représente le nombre de calculs en fonction du nombre de points homologues actifs après compensation. La très grande majorité des processus contient plus d'une centaine de points actifs après compensation rendant l'estimation des paramètres recherchés (pose relative des panoramiques) optimale en raison d'un nombre bien plus élevé d'observations que d'inconnues.

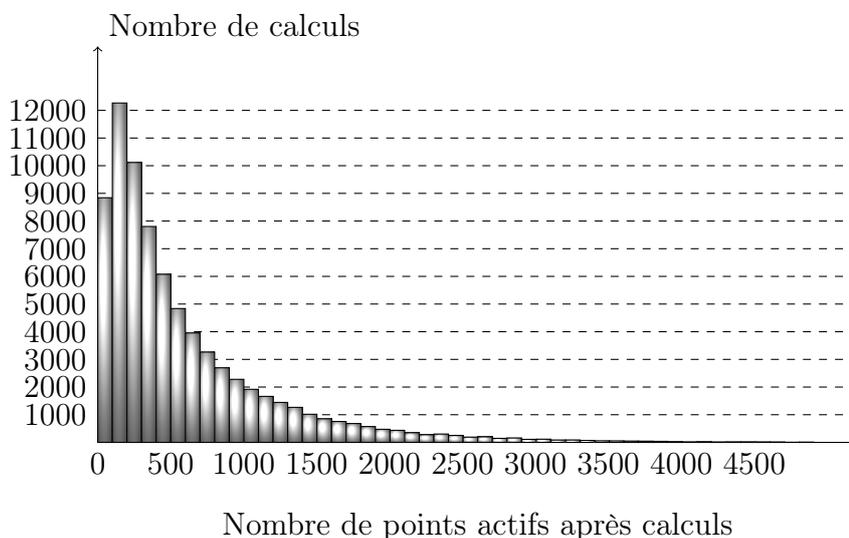


FIGURE 9.7 – Histogramme représentant le nombre de points homologues actifs après compensation par couples.

Un autre critère intéressant à observer est le nombre de mesures actives conservées par rapport aux nombres de mesures initiales (cf histogramme 9.8) qui est largement supérieur à 80%. Il s'explique par le fait qu'il ne reste que très peu d'erreurs.

9.1.c Conclusion

La meilleure solution pour effectuer un recalage de façon fiable et rapide est d'utiliser l'algorithme que nous avons développé. Il est performant, facile à paramétrer, et fonctionne même lorsque le dispositif n'est pas calibré. Ainsi, il sera utilisé pour chaque recalage à effectuer aux intersections.

9.2 Graphe de panoramiques

La seule information que nous avons concernant les connections entre panoramiques sont les données d'acquisition : pour une panoramique donnée, seules les panoramiques

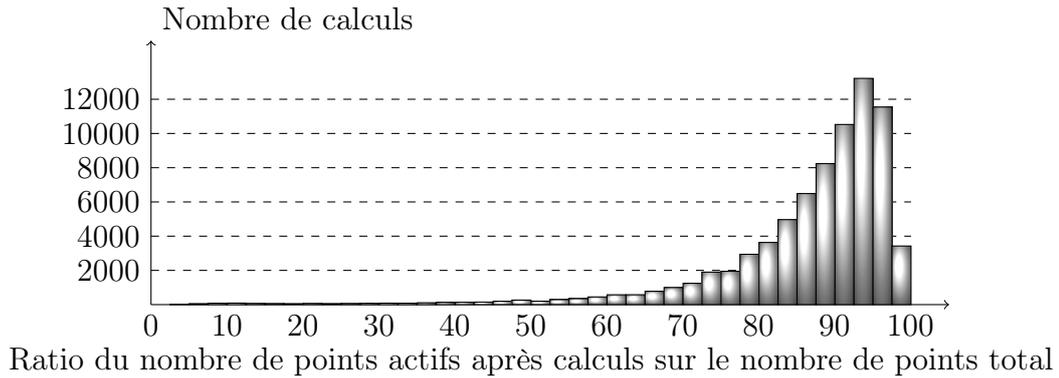


FIGURE 9.8 – Histogramme représentant le ratio entre le nombre de points homologues actifs après compensation et le nombre de points homologues initial.

suivantes et précédentes sont connues. Le manque de précision du système de positionnement ne permet pas de travailler directement avec les données initiales de manière simple (différence d'altitude entre panoramiques, écarts planimétriques) pour savoir quelles sont les panoramiques voisines les unes des autres. Différentes stratégies ont été envisagées pour déterminer les liens entre panoramiques afin de créer "un graphe de panoramique" pouvant servir :

- à la visualisation immersive de type Google Street View [Anguelov et al., 2010],
- à de la cartographie,
- à du recalage.

Dans notre cas, il sert à identifier les zones où plusieurs trajectoires ont été acquises afin de les recalculer.

9.2.a Stratégies possibles

Nous allons présenter deux stratégies pouvant être utilisées.

La première stratégie possible est de calculer la distance entre toutes les panoramiques et de ne garder que les panoramiques qui sont distantes de moins qu'une distance d . Le principal inconvénient de cette technique est le nombre d'arêtes du graphe qui est trop important et inutile. Les caractéristiques d'acquisition sont de prendre une panoramique tous les 4 mètres ou toutes les 10 secondes². Si une rue a été parcourue dans les deux sens, une panoramique est donc connectée à un grand nombre de panoramiques dont la plupart sont inutiles (cf. figure 9.9.a).

Une seconde stratégie permet d'éliminer des arêtes inutiles en utilisant une triangulation sur les positions du véhicule et de ne garder que les arêtes dont la longueur est inférieure à une distance d . Le nombre d'arêtes est énormément réduit (au moins un facteur 3), mais il est difficile de savoir si les arêtes sont utiles ou non (cf. figure 9.9.b).

Ces stratégies "simples" ne répondant pas exactement à notre problématique, nous avons étendu notre recherche à la communauté de vision par ordinateur. Nous avons

². Caractéristiques déterminées pour chaque acquisition. Ces données correspondent aux caractéristiques des chantiers utilisés durant cette thèse.

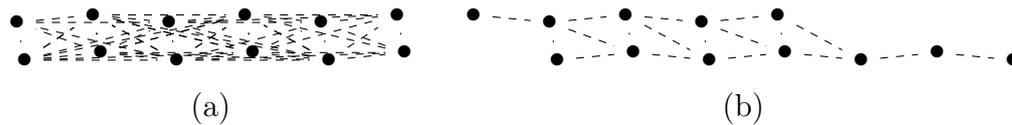


FIGURE 9.9 – Stratégies possibles pour la création du graphe de panoramiques. (a) Graphe basé uniquement sur la distance entre panoramiques. (b) Graphe basé sur une triangulation et un critère de distance.

identifié une autre stratégie possible : l'utilisation d'Alpha Shape, qui permet la triangulation et la classification des arêtes. Cette stratégie est détaillée dans la sous-section suivante.

9.2.b Utilisation d'Alpha Shape

L'algorithme d'Alpha Shape ([Edelsbrunner et Mücke, 1994] et [Bernardini et Bajaj, 1997]) a été développé pour trouver la surface qui approxime au mieux un nuage de points, aussi bien en 2D qu'en 3D. La figure 9.10 présente l'utilisation traditionnelle de l'algorithme d'Alpha Shape. La figure 9.10.a montre les données initiales et la figure 9.10.b présente le maillage obtenu.

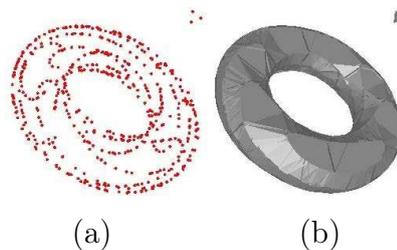


FIGURE 9.10 – Algorithme d'Alpha Shape (source : [Da et Yvinec, 2012]). (a) Données initiales et (b) résultat de l'algorithme.

La première étape de l'algorithme consiste à calculer une triangulation à partir des points. Dans notre cas nous avons choisi la triangulation de Delaunay [Delaunay, 1934]. Il faut définir un rayon (noté α), unique paramètre de l'algorithme. Il permet de savoir si les arêtes, les faces et les tétraèdres de la triangulation appartiennent ou pas à l'Alpha Shape :

- une arête appartient à l'Alpha Shape si sa longueur est plus petite que 2α ,
- une face appartient à l'Alpha Shape si le rayon du cercle circonscrit est plus petit que α ,
- un tétraèdre appartient à l'Alpha Shape si le rayon de la sphère circonscrite est plus petite que α .

Une fois cette classification binaire faite, on peut l'affiner en triant les arêtes suivant 4 catégories :

- extérieure : l'arête n'appartient pas à l'Alpha Shape,
- intérieure : l'arête appartient à l'Alpha Shape et toutes les faces la contenant appartiennent à l'Alpha Shape,

- frontière : l'arête appartient à l'Alpha Shape et aucune face la contenant n'appartient à l'Alpha Shape,
- normale : (toutes les autres) l'arête appartient à l'Alpha Shape et certaines faces la contenant appartiennent à l'Alpha Shape et d'autres non).

Dans le cadre de cette thèse, nous avons choisi d'utiliser l'implémentation de [Da et Yvinec, 2012] dans [The CGAL Project, 2012] qui est à la fois rapide et optimisée pour l'utilisation de gros volume de données (plusieurs dizaines de milliers de panoramiques).

La figure 9.11 présente les classifications des arêtes issues de l'algorithme sur les positions des panoramiques. Chaque couleur représente un type d'arêtes : en rouge, les intérieures, en bleu les normales et en vert les frontières. Les arêtes extérieures n'ont pas été représentées pour alléger la figure et parce qu'elles sont inutiles.

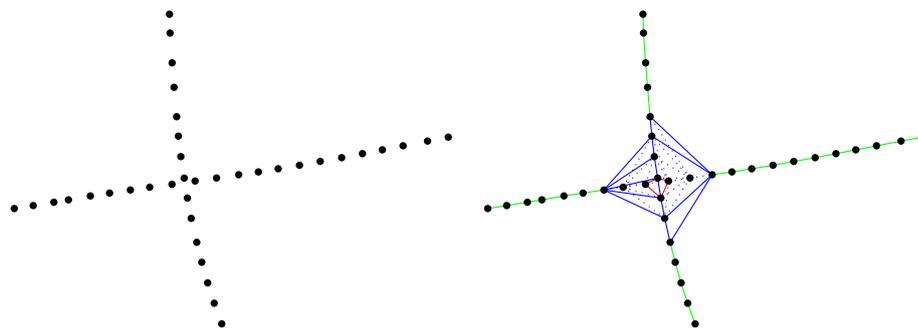


FIGURE 9.11 – Illustration de l'algorithme d'Alpha Shape avec les panoramiques. À gauche, répartition des panoramiques avant classification. À droite, résultat de l'algorithme. Chaque couleur représente un type d'arête : rouge intérieure, bleue frontière et verte normale. Les arêtes n'appartenant pas à l'Alpha Shape n'étant pas représentées.

Pour déterminer la meilleure valeur de α , seul paramètre de l'algorithme, nous devons prendre trois choses en compte :

- la distance entre deux panoramiques successives. Si α est trop petit, les panoramiques ne seront reliés que par des arêtes de type extérieur. On perd donc l'intérêt de la classification.
- la distance planimétrique maximale entre deux panoramiques. Il faut que α soit suffisamment grand pour relier deux panoramiques d'une même rue sur deux passages différents, notamment aller-retour (par exemple, sur les Champs Élysées, cette distance est de près de 20 mètres).
- la distance altimétrique. Si α est trop faible, sur deux passages dans une même rue, les panoramiques ne seront pas reliés tandis que si α est trop élevé, deux trajectoires distinctes peuvent être reliés alors qu'elles sont indépendantes (une route passant au dessus d'une autre). La hauteur maximale pour relier deux panoramiques est de 4 mètres (hauteur du véhicule (3m) + épaisseur du pont (1m)).

La figure 9.12 illustre l'influence du paramètre α de l'algorithme d'Alpha Shape pour les panoramiques sur 3 zones distinctes. Un α trop faible (2m par exemple), le graphe n'est pas connexe tandis qu'un α trop grand (22m par exemple) introduit des arêtes inexistantes dans la réalité.

La zone 1 représente des rues où le véhicule est passé plusieurs fois : un α petit ne permet pas de relier les différents passages. La zone 2 représente des rues voisines où le

véhicule est passé : un α petit ne permet pas de relier ensemble des rues voisines. La zone 3 représente deux routes passant l'une au dessus de l'autre : un α trop grand les relie alors qu'il n'existe aucun lien entre elles dans la réalité.

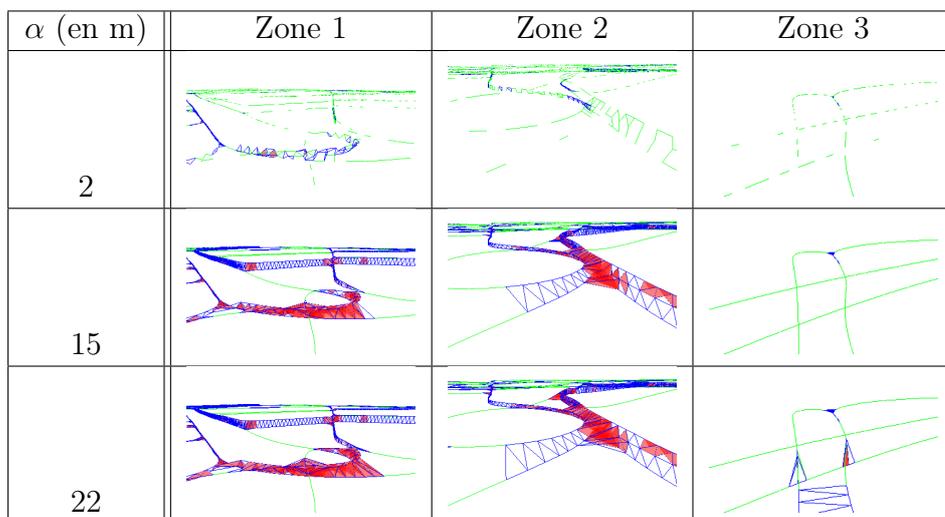


FIGURE 9.12 – Influence du paramètre α sur le graphe de panoramiques. Un α trop petit (2) rend le graphe non connexe tandis qu'un α trop important (22) crée des arêtes inutiles.

L'algorithme d'Alpha Shape utilise des distances euclidiennes. Seulement, les distances d'appariement en planimétrie et en altimétrie n'ont pas les mêmes valeurs de seuils pour α . Nous devons donc dans un premier temps changer de repère de travail et appliquer un coefficient de dilatation sur la troisième composante. Ce facteur s'obtient simplement en faisant le rapport des distances maximales pour lesquelles nous voulons joindre les panoramiques (cf. équation 2). XY_{max} représente la plus grande distance entre 2 panoramiques successives (dépend directement de l'acquisition) et Z_{max} représente la différence de hauteur entre deux panoramiques. Dans notre cas, ce facteur d'échelle (e_z) a pour valeur 5.

$$e_z = XY_{max}/Z_{max} \quad (2)$$

Après avoir présenté la constitution du graphe de panoramiques, nous allons présenter une seconde application qui est l'optimisation du rangement lors de la minimisation mathématique de nos processus.

9.2.c Optimisation du rangement des panoramiques

Dans les systèmes que nous devons minimiser, nous avons plus de 45 000 panoramiques, engendrant plus de 270 000 inconnues. Concernant les observations (dont le nombre peut aller jusqu'à 250 000 observations), il y a celles correspondantes à la trajectoire entre deux panoramiques consécutives et celles correspondantes aux intersections. Sans précautions, le système, même rangé sous forme de matrices creuses ([Tewarson, 1973] et [Pissanetzky, 1984]), dépasse les capacités mémoires de l'ordinateur. Il faut donc organiser les inconnues de manière à optimiser la structure de la matrice normale.

Nous allons d'abord reformuler notre problème à l'aide de graphes, puis nous présenterons différents algorithmes qui permettent d'optimiser le rangement.

9.2.c.i Système d'équations et graphe

Le système d'équations peut être vu comme un graphe dont les inconnues sont les sommets et les observations (trajectoire, contraintes relatives et absolues) sont les arêtes. La figure 9.13 illustre une acquisition de 20 panoramiques (a,b,...,t) avec des liens entre les panoramiques le long de la trajectoire mais aussi aux intersections.

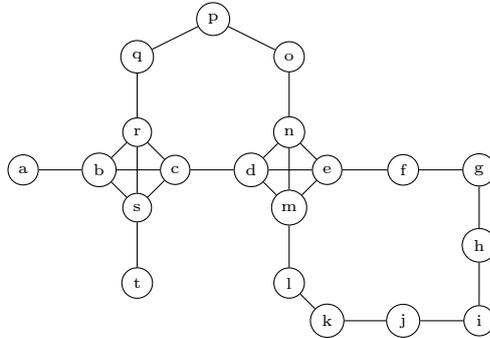


FIGURE 9.13 – Exemple de graphe de panoramiques. Chaque lettre représente une panoramique et une arête signifie que les panoramiques ont des détails communs.

9.2.c.ii Algorithmes de rangements

Les algorithmes de rangements sont étudiés depuis de nombreuses années. De nombreux comparatifs ont été fait notamment en physique dans le calcul d'éléments finis. [Gibbs et al., 1976] comparent 6 algorithmes de rangements dans le cadre de calcul par éléments finis, [George et al., 1993] qui proposent différentes méthodes d'implémentation de matrices creuses (symétrique et non symétrique), ainsi que des méthodes de résolutions de système.

Le principe de base de ces méthodes est de réorganiser l'ordre des inconnues dans le calcul. Dans notre cas, nous avons testé plusieurs algorithmes utilisés dans la littérature :

Cuthill-McKee [Cuthill et McKee, 1969] : le principe de l'algorithme est de réduire la largeur de bande¹ d'un graphe. Il est basé sur l'algorithme de parcours en largeur (Breadth First Search ou BFS) [Moore, 1959] qui calcule le degré des sommets. Le nouvel ordonnancement des sommets est l'ordre d'apparition dans l'algorithme de BFS.

Sloan [Sloan, 1986] : le principe de l'algorithme est de réduire le profil² et le front d'onde d'une matrice. La différence avec l'algorithme précédent est la prise en compte du voisinage du sommet lors du ré-arrangement des sommets tandis que Cuthill-McKee fonctionne plutôt de manière globale.

L'implémentation de ces algorithmes a été choisi dans [Siek et al., 2001].

1. Nombre maximum de sommets entre deux sommets adjacents.

2. Le profil correspond à la somme de toutes les distances maximales entre le i -ème sommet et l'un de ses voisins avec un indice $j > i$.

9.2.c.iii Comparaisons

En utilisant le graphe de la figure 9.13, on peut visualiser l'effet des différents algorithmes sur la structure de la matrice normale. La figure 9.14.a présente la matrice d'adjacence sans réorganisation, la figure 9.14.b présente la matrice d'adjacence après rangement grâce à l'algorithme de Cuthill-McKee et la figure 9.14.c après rangement grâce à l'algorithme de Sloan. On constate que les effets du rangement sont similaires : les coefficients sont regroupés le long de la diagonale.

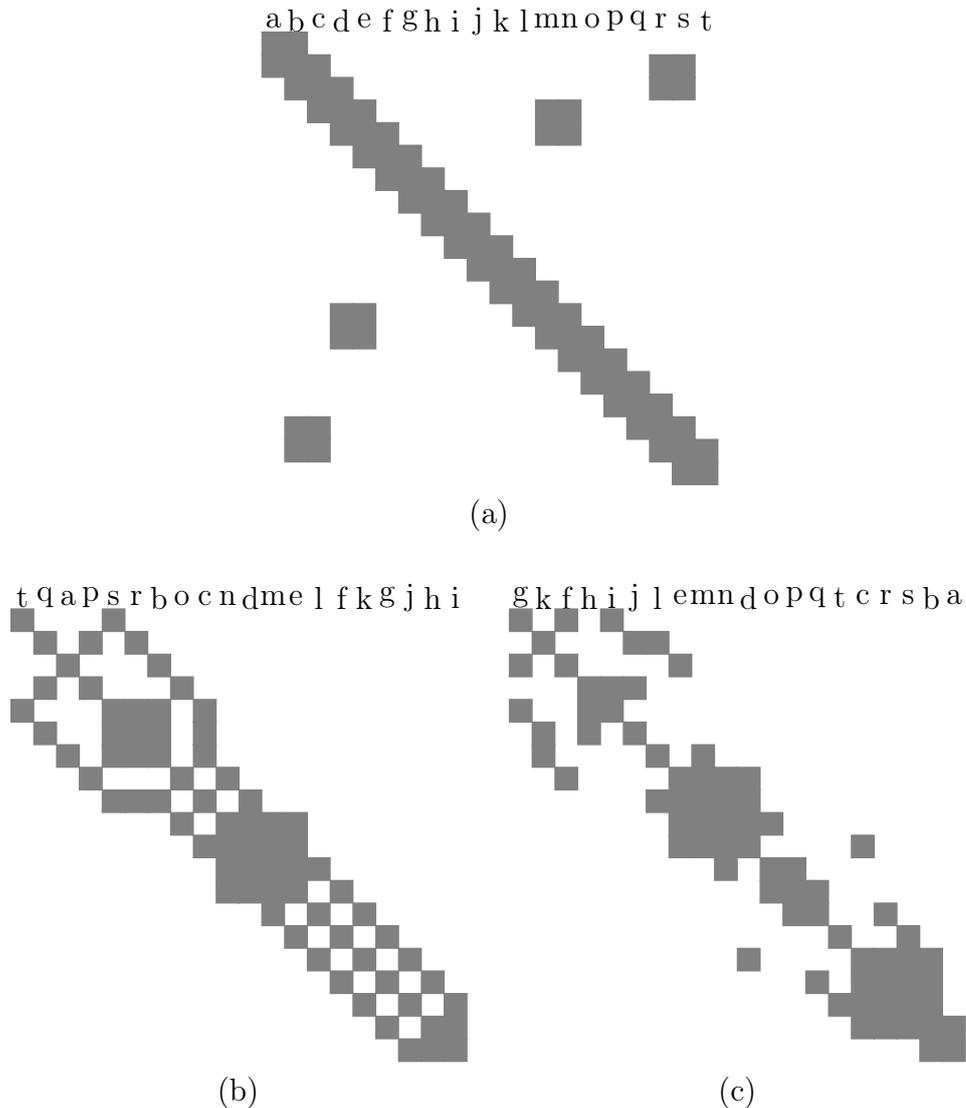


FIGURE 9.14 – Influence de la réorganisation des sommets sur la matrice normale. (a) Sans renumérotation, (b) algorithme de Cuthill-McKee et (c) algorithme de Sloan.

Après avoir présenté et visualisé les différents algorithmes, nous examinons maintenant les temps de calcul de la réorganisation et de la résolution du système mathématique. La librairie mathématique utilisée durant cette thèse est Eigen [Guennebaud et al., 2010]. Les résultats présentés dans le tableau 9.2 sont valables pour l'association du rangement et de la résolution du système d'équations. La taille de notre système est de 267 798 inconnues.

Sans rangement, l'ordinateur utilisé n'avait pas assez de mémoire (4 Go) pour le résoudre tandis qu'avec les deux algorithmes testés le système est résolu et dans un laps de

temps très court (2 dixièmes de seconde). L'algorithme de Sloan est plus lent que celui de Cuthill-McKee (trois fois) mais son temps de calcul est inférieur à la seconde ce qui est largement suffisant pour nos applications.

	Sans rangement	Cuthill-McKee	Sloan
Positionnement (en s)	0	0,23	0,9
Résolution du système (en s)	-	0,25	0,26
Largeur de bande ¹	43 601	301	13 013
Profile ²	73 662 248	4 952 528	3 671 653

TABLE 9.2 – Influence de la réorganisation des sommets sur la matrice normale.

9.2.c.iv Conclusion

L'optimisation de la structure de la matrice normale est nécessaire afin de pouvoir procéder à son inversion. Les algorithmes de Cuthill-McKee et Sloan utilisés présentent des résultats similaires (temps de rangement et de résolution) pour notre problème. Celui de Cuthill-McKee étant plus rapide, nous avons choisi de l'utiliser afin de réorganiser nos systèmes à minimiser (méthodes présentées aux chapitres 9, 10 et 7).

9.3 Algorithme de découpages

Maintenant que nous avons notre graphe de panoramiques, nous devons déterminer les zones pour lesquelles nous allons calculer un recalage local afin de mettre en cohérence les différentes trajectoires.

Dans notre graphe, il y a des zones qui ne nécessitent pas de recalage. Ce sont les zones qui ne contiennent que des panoramiques consécutives. Notre algorithme ne remettant pas en cause la pose relative et le système de positionnement étant à priori satisfaisant en relatif, il est donc inutile de calculer un recalage locale dans ces zones. Il se trouve que les panoramiques successives ne sont reliées que par des arêtes de type frontière. Nous pouvons donc travailler uniquement dans le sous-graphe ne contenant que les arêtes de type intérieure et normale (cf. figure 9.15.a en bleu).

A partir de ce sous-graphe, nous extrayons toutes les composantes connexes (cf. figure 9.15.b, une couleur par composante connexe) qui sont susceptibles de nécessiter un recalage relatif.

Ensuite, pour chaque composante connexe, nous trions les panoramiques par identifiants puis nous définissons une distance maximale entre des identifiants de panoramique d_{cons} . Il se peut qu'une composante connexe ne contienne que des panoramiques issues d'une même session (le véhicule a effectué une marche arrière par exemple). Si cette composante est suffisamment petite (contient moins de d_{cons} panoramiques) alors il n'y a pas de recalage à effectuer (cf. figure 9.15.c, en rouge). Si cette composante est plus grande alors on effectue un recalage tous les d_{cons} panoramiques (cf. figure 9.15.c, en bleu).

Lorsqu'une composante connexe contient plusieurs tronçons acquis à des instants différents, chaque tronçon est étudié. Si le tronçon est de petite taille (contient moins de d_{cons} panoramiques) un recalage au milieu du tronçon est calculé avec tous les autres tronçons

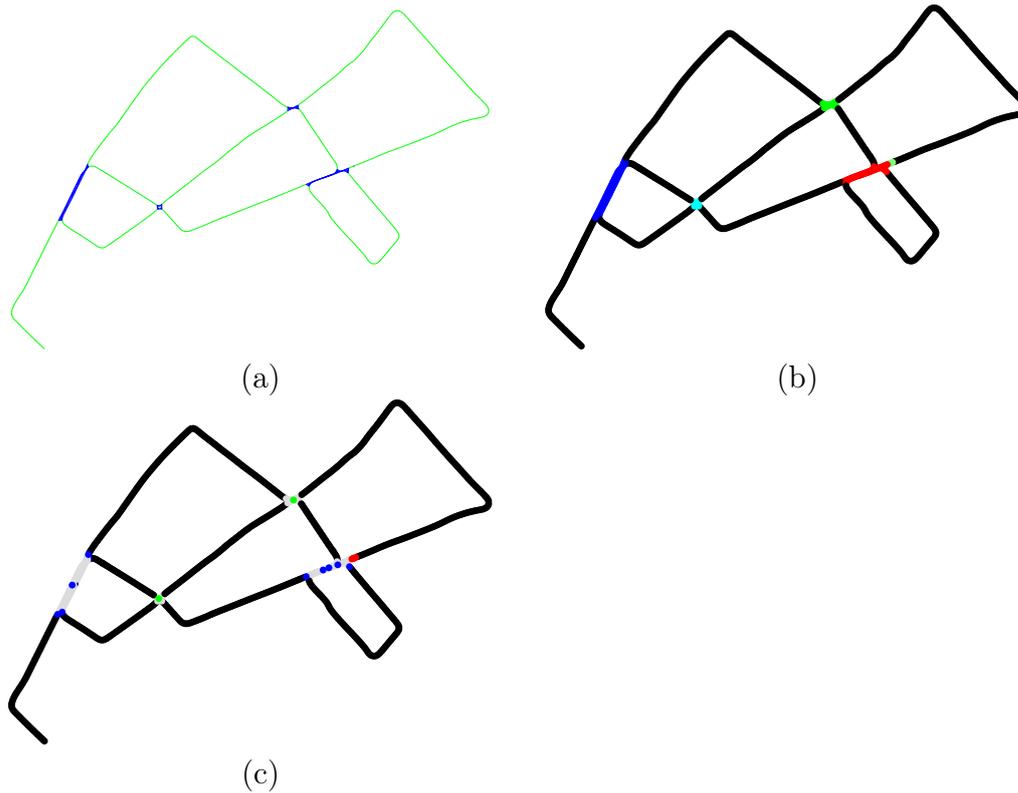


FIGURE 9.15 – Étapes de l’algorithme pour calculer le recalage relatif. (a) Alpha Shape initiale. (b) Identification des composantes connexes du sous-graphe ne contenant que les arêtes de type intérieure et normale. (c) Identification des zones de recalage.

(cf. figure 9.15.c, en vert). Si le tronçon est grand, on effectue un recalage tous les d_{cons} panoramiques avec les autres (cf. figure 9.15.c, en bleu).

Le schéma global de notre algorithme est décrit dans l’algorithme 9.3.

Algorithme 9.3 : Algorithme de détection des zones d'intérêts.**entrées** :

- Positions de panoramique \mathcal{P} de taille N_p
- Distance entre panoramiques maximum d_{max}
- Distance entre panoramiques consécutives d_{cons}

sortie : Panoramiques d'intérêts \mathcal{P}_I $\mathcal{G}(\mathcal{N}, \mathcal{A}) = \text{AlphaShape3D}(P)$ $\mathcal{G}(\mathcal{N}, \mathcal{A}) = \mathcal{G}(\mathcal{N}, \mathcal{A} \setminus \text{Type}(\mathcal{A}) = \text{Exterieur})\}$ $\mathcal{CC} = \text{ComposanteConnexes}(\mathcal{G})$ **pour** $i = 1$ **a** $\text{Card}(\mathcal{CC})$ **faire**
 $\mathcal{G}_{cc}(\mathcal{N}, \mathcal{A}) = \mathcal{G}(\mathcal{N} \setminus \mathcal{N}_{cc}(i), \mathcal{A} \setminus (\mathcal{N}_{cc}(i) \times \mathcal{N}_{cc}(i)))$
 $d = \max(\text{Id}(\mathcal{N}_{\mathcal{G}_{cc}})) - \min(\text{Id}(\mathcal{N}_{\mathcal{G}_{cc}}))$
*Petite CC***si** $\text{Card}(\mathcal{N}_{\mathcal{G}_{cc}}) < d_{cons}$ **alors**
si $d < d_{cons}$ **alors**

| continue

sinon

| $\mathcal{P}_I = \mathcal{P}_I \cup \mathcal{N}_{\mathcal{G}_{cc}}(0)$
fin
*Grande CC***sinon**
 $\mathcal{T} = \text{Troncon}(\mathcal{N}_{\mathcal{G}_{cc}})$
pour $j = 1$ **a** $\text{Card}(\mathcal{T})$ **faire**
si $\text{Card}(\mathcal{T}_j) < d_{cons}$ **alors**

| $\mathcal{P}_I = \mathcal{P}_I \cup \mathcal{T}_j(0)$
sinon

| $\mathcal{P}_I = \mathcal{P}_I \cup \text{Decoupage}(\mathcal{T}_j)$
fin
fin
fin
fin

9.4 Evaluation de la qualité de recalage

Dans cette section, nous allons tester la sensibilité aux paramètres de notre algorithme ainsi que la qualité du recalage obtenu.

9.4.a Influence des paramètres

La figure 9.16 présente l'influence de d_{cons} sur le nombre d'intersections 2x2 à calculer. Le graphe de panoramiques contient toutes celles du chantier XII^e ce qui représente plus de 45 000 panoramiques. On constate qu'une distance très faible entraîne un nombre d'intersections à calculer très important (plus de 80 000 si un calcul d'intersection est lancé tous les 3 panoramiques). Après 30 panoramiques consécutives, il n'y a plus que 17 500 recalages à effectuer.

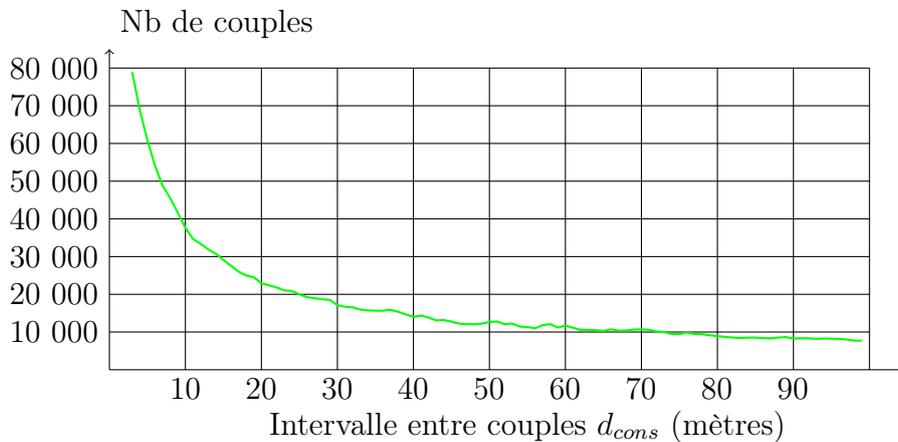


FIGURE 9.16 – Nombre de recalage 2x2 à calculer en fonction de la distance entre panoramiques.

Dans la suite de notre exposé, différents paramètres vont être testés. Afin d'évaluer nos résultats, nous avons effectué 4 218 mesures manuelles dans des images sur les passages piétons (objets facilement mesurables dans l'image et sur le terrain). Ces mesures sont de contrôle et ne sont donc pas utilisées dans le calcul et ne servent qu'à l'évaluation de notre algorithme à posteriori.

Voici quelques chiffres significatifs pour analyser les résidus images. Un résidu image de 10 pixels correspond à :

- une erreur de rotation de 0,4 degré,
- une erreur en translation de 3,5 cm pour un objet à 5 m,
- une erreur en translation de 7 cm pour un objet à 10 m

Pour le recalage, nous utilisons deux systèmes d'équations distinctes (équations relatives à la trajectoire et équations relatives aux recalages intermédiaires) que nous minimisons dans le même système mathématique. Il faut aussi déterminer la pondération relative entre ces systèmes. Pour cela, nous avons lancé notre algorithme avec différentes pondérations et nous avons sélectionné le meilleur jeu de paramètres en fonction des résultats. Le tableau 9.3 présente les résultats des différents calculs.

Ratio Recalage/Trajectoire	Résidus images moyens (pix.)
10000	14,385
1000	14,385
100	14,384
10	14,333
1	12,603
0,1	10,942
0,01	11,500
0,001	24,818
0,0001	40,970

TABLE 9.3 – Ratio optimal entre les recalages 2x2 et la trajectoire.

On constate qu'un ratio trop important dans un sens ou dans l'autre entraîne des résidus images importants. Par contre la valeur du paramètre n'est pas très sensible. Par exemple entre 0,01 et 1, les résidus images n'augmentent que de 2 pixels ce qui n'est pas trop important. Le ratio que nous avons retenu est 0,1 qui est le meilleur compromis.

Une fois le meilleur ratio intersection/trajectoire trouvé, il reste à déterminer la distance entre chaque intersection optimale. Pour cela nous avons examiné les résidus images en fonction de différents intervalles de distance. Le tableau 9.4 présente les différents résultats.

	min	max	med	moy	ect
sans recalage	0,197906	313,515	22,0071	36,04	36,0078
3	0,217733	82,1101	9,61794	10,9421	7,37349
5	0,207441	58,5634	9,66482	10,8088	6,84517
10	0,131583	55,1738	9,52297	10,673	6,6801
15	0,0834072	63,7257	9,17118	10,5089	6,79139
20	0,220293	86,2084	9,67259	11,3309	8,04332
25	0,23123	92,3281	9,7357	11,2073	7,92393
30	0,155811	91,0758	9,37589	10,7748	7,60748

TABLE 9.4 – Résidus sur les points de controle après recalage en fonction de la distance entre panoramiques (en pixels).

La première chose est que, quelle que soit la distance choisie, notre processus est utile et permet de mettre en cohérence nos données. En effet, un facteur 3 est gagné sur la moyenne des résidus et un facteur 5 sur l'écart-type.

Une seconde remarque concerne l'impact de la distance. Une distance courte, comprise entre 3 et 5 mètres, a des résidus un peu plus élevés qu'une distance moyenne parce qu'il n'y a pas de vérification de cohérence entre les recalages relatifs. Une distance longue a des résidus un peu plus élevés qu'une distance moyenne.

Nous avons donc choisi d'utiliser la distance de 15 mètres.

9.4.b Résultats

La figure 9.17 présente la zone de 6 cas d'études dont les résultats sont présentés dans le tableau 9.5.

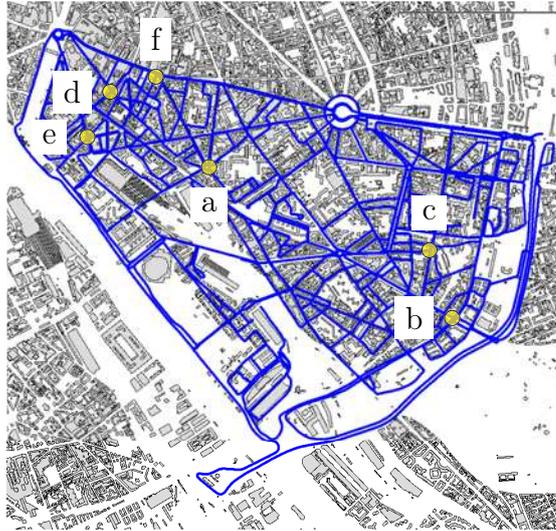


FIGURE 9.17 – Zones d'études choisies pour tester notre algorithme de recalage.

Le tableau 9.5 représente les résultats de notre algorithme sur 6 zones du XII^e qui ont été choisies parce que le véhicule est passé à de nombreuses reprises. Pour chacun des cas, notre algorithme a permis de remettre en cohérences les passages successifs sur une même zone.

9.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons non seulement présenté une méthode de recalage en relatif qui permet de mettre en cohérence aussi bien des données d'une même trajectoire que de différentes. Elle est fiable et nécessite peu de paramètres. Le choix de ceux-ci ne présente pas une grande sensibilité ce qui en fait une méthode robuste.

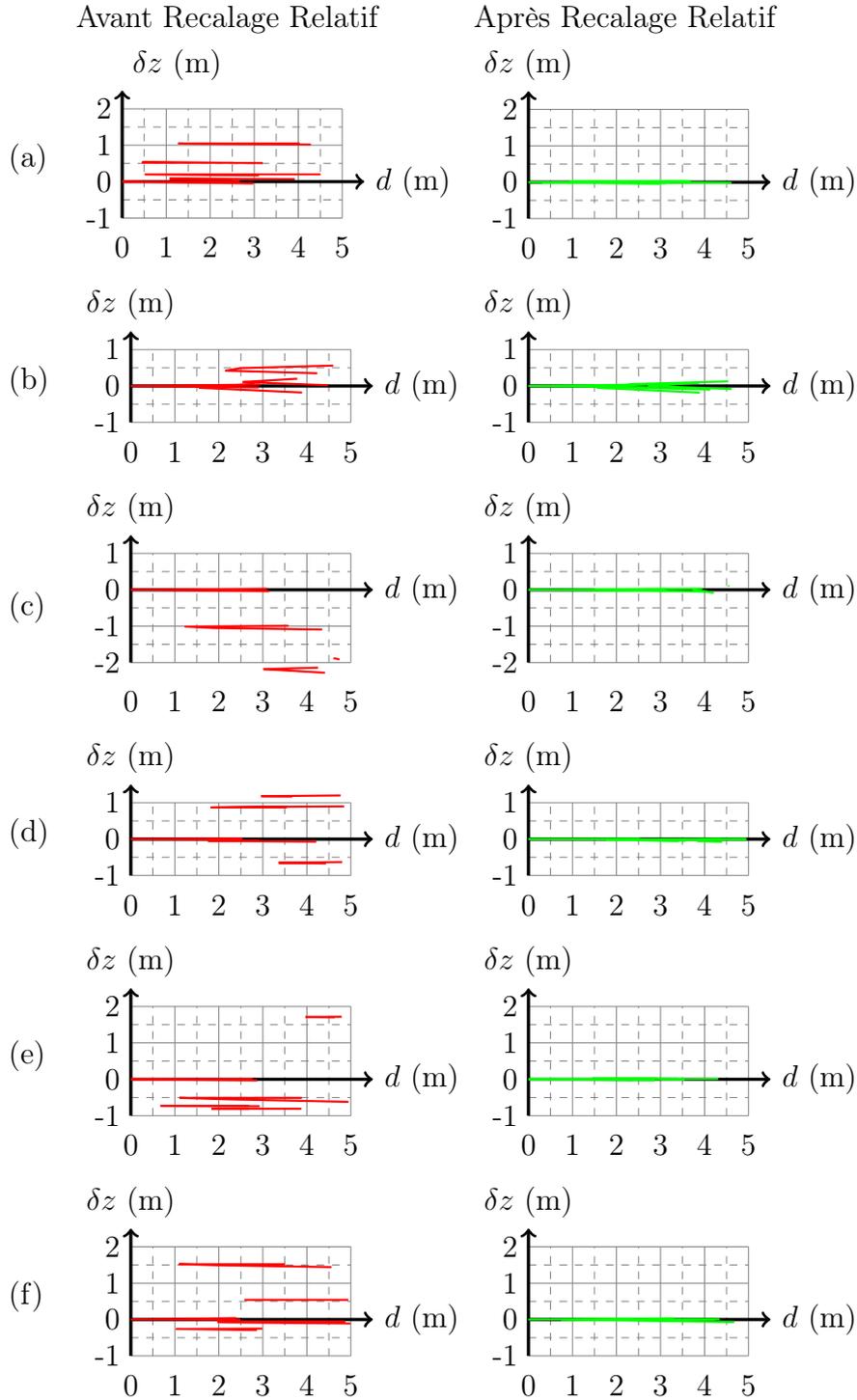


TABLE 9.5 – Écarts en altitude entre les différentes trajectoires pour chaque zone (présentée sur la figure 9.17. En abscisse : distance à la zone considérée. En ordonnée : différence d'altitude entre les passages.

Chapitre 10

Recalage interne et externe de la trajectoire

10.1 Utilisation conjointe de contraintes relatives et de relèvement

Les chapitres précédents ont présenté des méthodes de recalage soit en absolu (externe) soit interne. Nous allons maintenant voir comment combiner les différentes techniques.

10.1.a Principe

Le principe de la méthode est d'utiliser le relèvement et la gestion de trajectoire dans le même processus. Le schéma 10.2 explique cette solution.

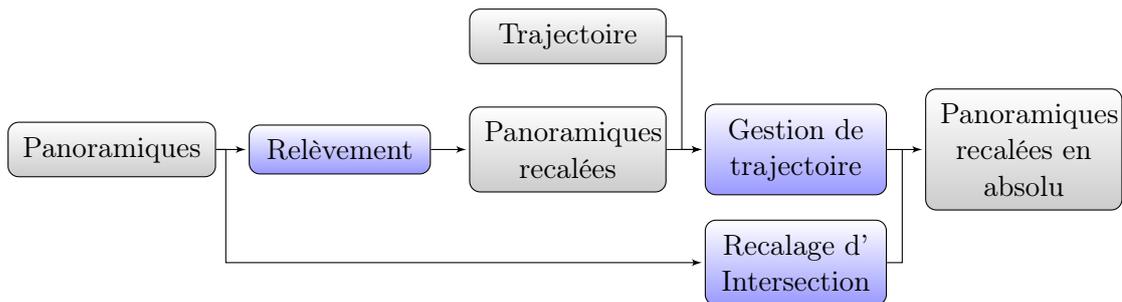


FIGURE 10.1 – Principe de l'utilisation du relèvement et de contraintes relatives pour le recalage en absolu.

10.1.b Résultats

En utilisant les mêmes données que dans la sous section 8.3.b {page 119}, nous avons utilisé notre algorithme successivement en fixant les zones en appui et en contrôle. Le tableau 8.1 présente les différents résultats sur les jeux tests. La première colonne permet de spécifier les panoramiques relevées en appui (gris) et celles utilisées en contrôle (vert).

Configuration	Écart entre la position estimée et la vraie position									
	(m)	%	(m)	%	(m)	%	(m)	%	(m)	%
• • • • •	(2,38)		(4,13)		(1,60)		(1,24)		(0,68)	
• • • • •	(0,44)	81%	(-)	-	(-)	-	(-)	-	(-)	-
• • • • •	(-)	-	(0,90)	78%	(-)	-	(-)	-	(-)	-
• • • • •	(-)	-	(-)	-	(0,33)	79%	(-)	-	(-)	-
• • • • •	(-)	-	(-)	-	(-)	-	(0,81)	34%	(-)	-
• • • • •	(-)	-	(-)	-	(-)	-	(-)	-	(0,68)	65%
• • • • •	(0,43)	81%	(0,89)	78%	(-)	-	(-)	-	(-)	-
• • • • •	(-)	-	(0,91)	77%	(0,35)	77%	(-)	-	(-)	-
• • • • •	(-)	-	(-)	-	(0,32)	79%	(0,81)	34%	(-)	-
• • • • •	(-)	-	(-)	-	(-)	-	(0,81)	34%	(0,22)	66%
• • • • •	(0,38)	83%	(0,90)	78%	(0,16)	89%	(-)	-	(-)	-
• • • • •	(-)	-	(0,88)	78%	(0,37)	76%	(0,53)	57%	(-)	-
• • • • •	(-)	-	(-)	-	(0,40)	74%	(0,81)	35%	(0,35)	48%
• • • • •	(-)	-	(0,95)	76%	(0,47)	70%	(0,56)	54%	(0,40)	40%
• • • • •	(0,95)	60%	(-)	-	(0,75)	52%	(0,95)	23%	(0,76)	-10%
• • • • •	(0,47)	79%	(0,75)	81%	(-)	-	(0,55)	55%	(0,07)	88%
• • • • •	(0,56)	76%	(0,95)	76%	(0,55)	65%	(-)	-	(0,55)	18%
• • • • •	(0,40)	82%	(0,76)	81%	(0,07)	95%	(0,55)	55%	(-)	-

TABLE 10.1 – Écarts de positions sur les points de contrôles.

Là encore, notre processus améliore le géoréférencement en absolu de nos panoramiques. On constate que le gain en précision est supérieur au processus précédent, ce qui est logique car on rajoute des contraintes de cohérence interne des données. Par contre la précision réelle est de plusieurs décimètres. Enfin, pour le relèvement nous avons besoin de 3 points d'appui sur un même site ce qui est coûteux.

10.2 Utilisation de points d'appui le long de la trajectoire

10.2.a Principe

Le principal inconvénient des méthodes précédentes est le calcul du relèvement qui nécessite au minimum 3 points par panoramique. En utilisant les mesures image plutôt que le relèvement, 3 points d'appui par panoramique ne sont plus nécessaires. Les points d'appui peuvent être répartis le long d'une ou plusieurs trajectoires et être incorporés dans la compensation. Le schéma 10.2 explicite le processus.

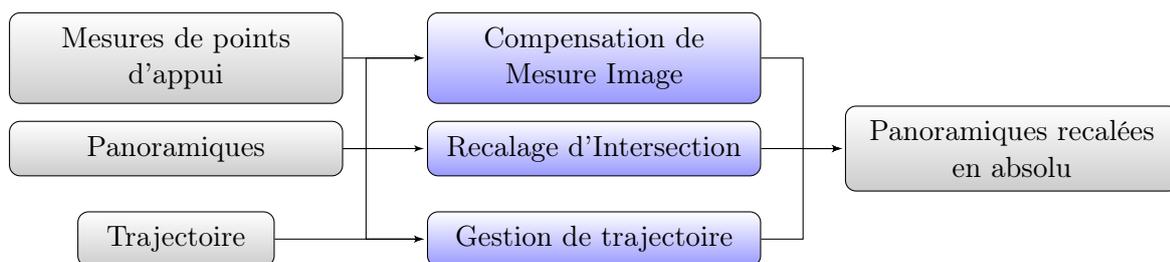


FIGURE 10.2 – Principe de l'utilisation des mesures images pour le recalage en absolu.

10.2.b Résultats

La figure 10.3 présente notre zone d'étude pour valider notre algorithme. Les points bleus représentent les 45 000 panoramiques et les sept zones de vérités terrain sont représentées en jaune. Ces zones sont des passages piétons qui ont été mesurés avec une précision centimétrique. Chaque passage piéton est constitué d'une vingtaine de points.

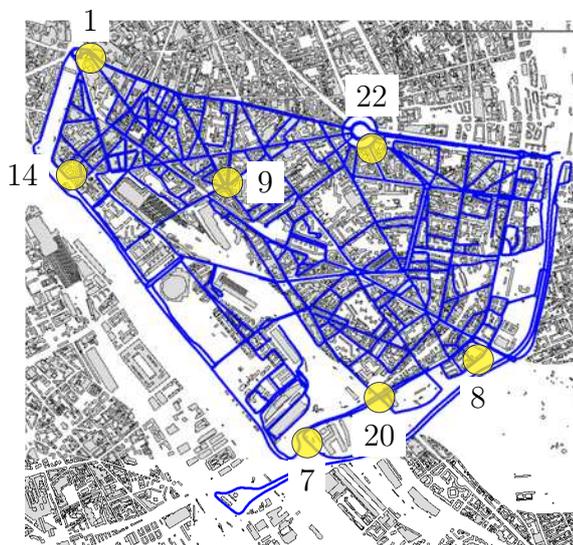


FIGURE 10.3 – Zone d'expérimentation pour l'utilisation de points d'appuis le long de la trajectoire. En bleu, les panoramiques utilisées, en jaune les zones d'intérêts.

Nous avons utilisé notre algorithme sept fois, en prenant un des passages piétons en contrôle et les six autres en appui.

Deux variantes ont été réalisées :

Variante 1 : les mesures images du passage piéton de contrôle n'interviennent pas dans la compensation et les résidus sont calculés en prenant les positions des panoramiques après compensation.

Variante 2 : les mesures images du passage piéton de contrôle interviennent dans la compensation, mais par leurs positions terrain qui sont déterminées dans le processus.

Le tableau 10.2 présente les résultats obtenus. Dans 70% des cas, nos deux algorithmes améliorent la précision de positionnement jusqu'à 40%. Par contre, pour les zones 7 et 8, nos algorithmes n'améliorent pas les résultats. En étudiant ces 2 zones, on constate qu'elles ne sont pas situées sur des intersections de trajectoires. L'algorithme de recalage n'a donc aucun effet.

La différence entre les algorithmes 1 et 2 est l'inclusion des mesures images dans la compensation. Cela se constate dans le tableau 10.2 dans la colonne résidus images : ils sont plus faibles dans la variante 2, celle où les mesures sont incluses dans la compensation. On constate aussi que cela a une influence significative sur l'écart-type en 3D. En effet, pour toutes les zones, même celles où la précision en absolu est dégradée, l'écart-type sur les points est de l'ordre du centimètre.

Dans un contexte de production (restitution et/ou extraction de données), il est tout à fait envisageable d'effectuer la saisie d'objets, puis d'effectuer une phase de compensation

Zone	Résidus 3D (m)		Résidus Images (pix)		Solution
	moyenne	écart type	moyenne	écart type	
1	0,42	0,054	12,49	7,27	Initiale
	0,22	0,072	13,76	8,03	Variante 1
	0,06	0,005	0,37	0,23	Variante 2
7	0,44	0,036	5,16	3,10	Initiale
	0,70	0,038	5,57	3,13	Variante 1
	0,59	0,007	0,43	0,27	Variante 2
8	0,23	0,055	18,46	8,77	Initiale
	0,31	0,037	10,77	6,05	Variante 1
	0,30	0,026	1,50	1,44	Variante 2
9	0,48	0,133	63,49	43,40	Initiale
	0,25	0,024	10,01	7,38	Variante 1
	0,23	0,011	0,73	0,59	Variante 2
14	0,84	0,096	7,28	5,03	Initiale
	0,61	0,076	7,03	4,83	Variante 1
	0,55	0,021	1,56	1,19	Variante 2
20	0,86	0,240	10,13	4,55	Initiale
	0,68	0,157	9,11	3,12	Variante 1
	0,31	0,017	0,37	0,25	Variante 2
22	0,83	0,218	47,22	27,7	Initiale
	0,36	0,126	9,08	3,59	Variante 1
	0,33	0,028	0,52	0,53	Variante 2

TABLE 10.2 – Résidus sur les zones de contrôle terrain et image. Les zones sont celles indiquées sur la figure 10.3.

en incluant les mesures réalisées afin d'améliorer la qualité de la saisie.

Chapitre 11

Conclusion sur l'amélioration de trajectoire

11.1 Récapitulatif des méthodes

Le tableau 11.1 présente un récapitulatif de toutes les méthodes présentées ainsi que les différentes manières de les combiner.

Par exemple, à des fins de texturation sur un modèle géoréférencé en absolu, on pourra utiliser la technique qui utilise des points d'appui le long de la trajectoire. La figure 11.1 présente une texturation avant recalage (a) et après recalage (b). La zone en pointillé illustre un écart d'altitude entre le modèle et les images : le trottoir se retrouve projeté sur la façade, tandis qu'après le recalage, la texture démarre au pied du bâtiment. La zone en trait plein illustre un problème de recalage en planimétrie : un morceau du bâtiment gauche se retrouve texturé sur la bâtiment droit.

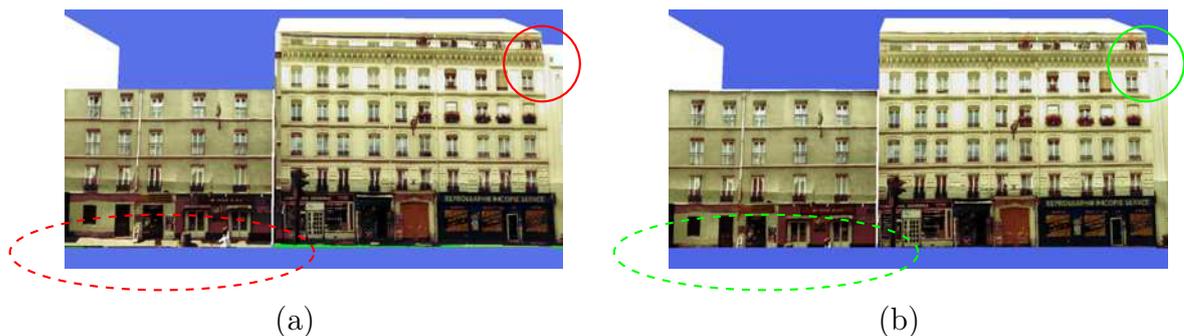


FIGURE 11.1 – Illustration de l'intérêt de recalibrer la trajectoire. (a) sans recalage et (b) avec recalage.

11.2 Bilan

La principale faiblesse de toutes les méthodes présentées précédemment est la qualité de la trajectoire fournie par le système de positionnement. En effet, malgré les spécifications constructeurs, on constate que le système peut dériver fortement. Certains de ces

Relv.	Traj.	M.Ap.	2 x 2	M.Im.	Commentaires	Précision	
						Abs.(m)	Rel.(m)
Solution Initiale						1,50	0,50
•	•				Permet de remettre les panoramiques dans la géométrie du terrain avec seulement quelques relevements	1,00	0,50
•	•		•		Idem que précédemment avec la cohérence interne assurée par le recalage intermédiaire.	0,50	0,05
	•		•		Permet de mettre les données en cohérence sans source externe de données.	-	0,05
	•	•	•		Permet de mettre les données en cohérence en relatif et en absolu avec peu de points d'appui	0,30	0,05
	•	•	•	•	Améliore la précision relative et absolue sur des objets mesurés uniquement dans l'image	0,30	0,01
•					Permet une mise en cohérence précise des données sur une toute petite zone	0,01	-

TABLE 11.1 – Récapitulatif des différentes techniques de recalages possibles. *Relv.* correspond au processus de relèvement, *Traj.* correspond à la gestion de trajectoire, *M.Ap.* correspond à la mesure image sur des points d'appui, 2×2 correspond au recalage 2×2 et *M.Im.* correspond à la mesure image sur des points homologues dont les coordonnées 3D ne sont pas connues.

problèmes, dus à l'algorithme de calcul, sur lequel nous n'avons pas la main, peuvent être détectés lors d'une phase de pré-traitement (utilisation de MNT par exemple) mais d'autres sont difficilement détectables.

A cause de problèmes de calcul de trajectoire qui empêchent d'avoir une précision centimétrique, la stratégie qui consiste à utiliser uniquement l'image présentée dans la partie III peut être utilisée.

Cinquième partie

Conclusion et perspectives

Chapitre 12

Conclusion

12.1 Contributions marquantes

Dans cette thèse, plusieurs éléments sont des contributions pour la communauté. Le premier concerne la calibration des capteurs à la fois de manière individuelle, et aussi de façon combinées. Le second concerne une succession de méthodes de recalages pouvant être utilisées de manières individuelles et/ou combinées. Le dernier concerne la gestion de gros volume de données.

Calibration des capteurs Cette thèse détaille deux processus pour calibrer un véhicule de cartographie mobile. Le premier nécessite l'intervention d'un opérateur et un site dédié tandis que le second fonctionne avec une acquisition traditionnelle. Ces processus ont des précisions équivalentes et peuvent être utilisés indifféremment ou de manière complémentaire (mesures sur points d'appui + mesures homologues). Ils ont l'avantage d'utiliser une mise en équation cohérente avec le dispositif de mesure sans approximation ni simplification.

Méthodes de recalages Dans la partie recalage, nous avons présenté différentes méthodes améliorant la précision absolue de géoréférencement et des méthodes améliorant la précision relative. Les méthodes présentées peuvent aussi se combiner dans le même processus ce qui permet de répondre à la plupart des besoins des usagers.

Gestion de gros Volumes de Données Dans la littérature, ce point est très peu abordé. Beaucoup considère le passage à l'échelle comme un point non bloquant et facile à mettre en place. On peut citer [Agarwal et al., 2009] qui fait de la compensation par faisceau avec des milliers d'images avec des ordinateurs de calculs de 32Go de RAM (en 2009). Nous avons choisi de développer des stratégies utilisables sur des ordinateurs "traditionnels", sans architecture ni configuration particulières.

12.2 Points à améliorer

A l'issue de cette thèse, il reste encore quelques points à améliorer. Le premier concerne la détection des erreurs et leurs traitements, le second concerne l'évaluation de la trajectoire.

Stratégies de détection des erreurs Lors de la compensation par faisceaux, dès qu'une erreur est détectée sur un ensemble de mesures homologues, nous éliminons le groupe parce que nous avons suffisamment de mesures. Il faudrait développer des stratégies plus fines comme par exemple subdiviser un groupe de mesures erronées en sous groupes, puis les introduire à nouveaux dans la compensation. Ainsi toutes les mesures correctes seraient conservées.

Une seconde stratégie à développer est d'utiliser des lois de pondération dans le calcul. Par exemple, si une mesure est considérée comme potentiellement fautive, un poids plus faible pourrait lui être attribué plutôt que de l'éliminer purement du calcul.

Évaluation de la trajectoire Le plus grand problème de notre travail est le calcul de la trajectoire. En effet, celui-ci est effectué par un logiciel propriétaire qui possède peu de paramètres et dont les algorithmes ne sont pas connus de manière précise. De plus, les précisions indiquées étant peu fiables, cela ne permet pas de les utiliser sereinement. Nous ne pouvons donc pas savoir à priori où sont les zones de faiblesses (i.e. zones de précisions dégradées) afin d'utiliser nos algorithmes.

Chapitre 13

Perspectives

Nous allons finir ce manuscrit avec quelques perspectives à ce travail de thèse. La première concerne l'amélioration du calcul de trajectoire en utilisant l'image. La seconde présente une méthode permettant d'utiliser des techniques de compensation à la fois locale et globale afin de réaliser les calculs sur une ville entière.

13.1 Amélioration du processus de calcul de trajectoire

A plusieurs reprises, nous avons constaté que le principal défaut du système de positionnement est de ne pas gérer les passages multiples sur une même zone. En effet les capteurs GPS, inertielle et d'odométrie ne peuvent pas mesurer cette information. Par contre, comme nous l'avons démontré dans la partie IV, l'ajout d'informations aux zones de passages multiples améliore grandement la précision de la trajectoire. Dans notre thèse, nous effectuons cette correction en utilisant la trajectoire déjà calculée, c'est à dire après une étape de fusion de données. Une perspective est d'utiliser l'image à part entière lors du calcul de trajectoire dans un algorithme de fusion de données. Certains travaux, notamment dans la robotique, utilisent en partie cette information comme [Lhuillier, 2011] et [Lhuillier, 2012]. "En partie" parce que ces travaux utilisent une trajectoire issue du post-traitement de données GPS mais pas les données brutes. Ce post-traitement filtre les erreurs dues aux multi-trajets, fixe les ambiguïtés mais peut comporter des erreurs. Une piste intéressante serait de faire de la fusion de données avec tous les capteurs (GPS, INS, odomètre et caméras) dans un seul et même processus. Cela permettrait d'évaluer les multi-trajets GPS et les fautes des autres capteurs de manière simultanée ce qui se traduit par une meilleure fiabilité des résultats. Le schéma 13.1 propose un système idéal à la fois d'estimation de pose et de calcul de trajectoire.

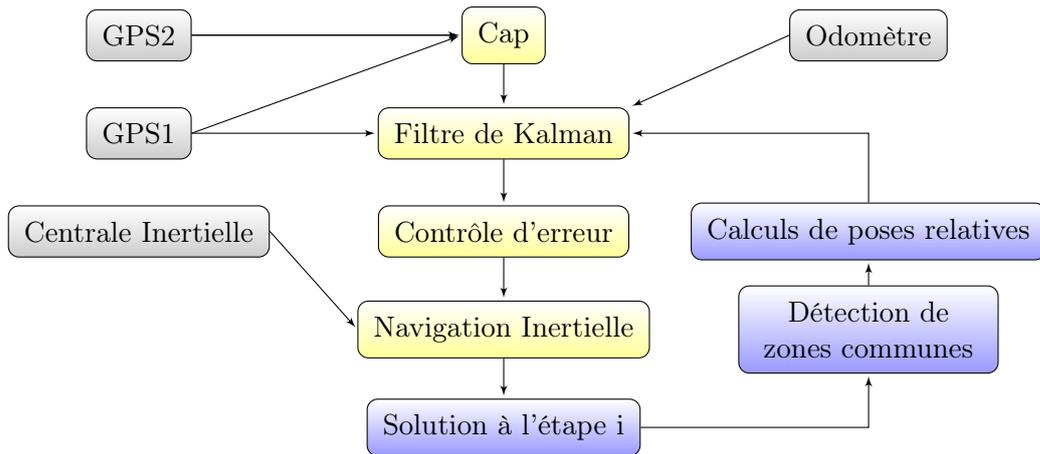


FIGURE 13.1 – Système idéal d’estimation de pose et de calcul de trajectoire.

13.2 Passage à l’échelle

Dans la partie III, nous avons présenté un ensemble de méthodes pour traiter de grands volumes de données pour faire de la compensation par faisceaux. Malheureusement, pour une ville comme Paris par exemple, le système ne pourra pas être minimisé dans un même processus parce qu’il y a trop d’inconnues (500 000 panoramiques ce qui fait 3 millions d’inconnues). En s’inspirant du travail fait dans la partie IV, on peut mettre en place des stratégies de découpages pour compenser les sous ensembles, appelés blocs, de manière séparées (cf figure 13.2). Ensuite dans une seconde étape, chaque bloc sera compensé dans un processus, avec pour objets de liaisons qui peuvent être des points, mais aussi des panoramiques communes à plusieurs blocs. L’avantage d’utiliser la panoramique comme objet de liaison est d’avoir une information d’orientation par rapport au point. La figure 13.2 présente le fonctionnement d’un tel système.

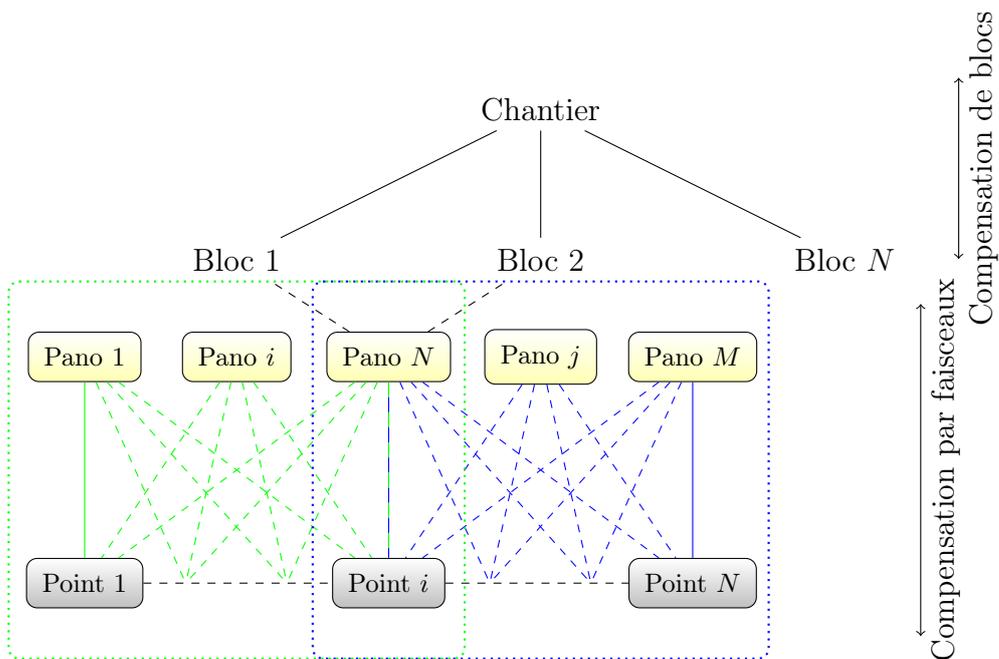


FIGURE 13.2 – Principe de la compensation par blocs.

13.3 Utilisation de primitives

Dans cette thèse nous avons seulement utilisé des points d'appui. Aujourd'hui, de plus en plus de travaux sont fait pour extraire des objets caractéristiques (passages piétons, poteaux, bords de trottoirs... cf sous section 2.2.c.ii {page 14}) à partir des données Li-DaR. On pourrait donc inclure directement ces objets extraits avec leurs précisions dans la méthode de compensation. Il y aura une amélioration de la précision interne, le processus ayant le même fonctionnement que 10.2 {page 144} : utilisation de mesures images, utilisation d'intersections et utilisation de trajectoires. On pourra également utiliser l'information géométrique issue de modèle 3D et de bases de données.

Bibliographie

- Agapito, L., Hayman, E., Reid, I., 2001. Self-Calibration of Rotating and Zooming Cameras. *International Journal of Computer Vision* 45 (2), 107–127. *Cité page 40*
- Agarwal, S., Snavely, N., Simon, I., Seitz, S. M., Szeliski, R., 2009. Building Rome in a day. In : *Proceedings of the Twelve International Conference on Computer Vision. ICCV '09*. IEEE Computer Society, pp. 72–79. *Cité page 151*
- Ahn, S., Schultes, M., 1997. A new circular coded target for the automation of photogrammetric 3D-surface measurements. In : *Optical 3-D Measurement Techniques IV : Applications in architecture, quality control, robotics, navigation, medical imaging and animation*. Zürich, Suisse, pp. 225–234. *Cité page 62*
- Alvarez, L., Gómez, L., Sendra, J. R., Sep. 2009. An Algebraic Approach to Lens Distortion by Line Rectification. *Journal of Mathematical Imaging and Vision* 35 (1), 36–50. *Cité page 39*
- Ameller, M.-A., Quan, L., Triggs, B., 2002. Le calcul de pose : de nouvelles méthodes matricielles. In : *Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle*. Vol. 1. Angers, France, pp. 39–47. *Cité page 39*
- Anguelov, D., Dulong, C., Filip, D., Frueh, C., Lafon, S., Lyon, R., Ogale, A., Vincent, L., Weaver, J., 2010. Google Street View : Capturing the World at Street Level. *Computer* 43 (6), 32–38. *Cité pages 2, 5, 10 et 129*
- Applanix, 2012. POSLV Specifications. Trimble. *Cité page 16*
- Arlicot, A., Soheilian, B., Paparoditis, N., 2009. Circular Road Sign Extraction from Street Level Images using Colour, Shape and Texture Database Maps. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVIII (Part 3/W4)*, 205–210. *Cité page 14*
- Arya, S., Mount, D. M., Netanyahu, N. S., Silverman, R., Wu, A. Y., 1994. An Optimal Algorithm for Approximate Nearest Neighbor Searching in Fixed Dimensions. In : *Proceedings of the Fifth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*. ACM, pp. 573–582. *Cité page 87*
- Barlier, F., 2008. Galileo, Un enjeu stratégique scientifique et technique. Perspectives stratégiques. L'Harmattan. *Cité page 2*
- Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T., van Gool, L., June 2008. Speeded-up Robust Features (SURF). *Computer Vision and Image Understanding* 110 (3), 346–359. *Cité pages 84 et 86*

BIBLIOGRAPHIE

- Bay, H., Tuytelaars, T., van Gool, L., 2006. Surf : Speeded up robust features. In : ECCV. pp. 404–417. *Cité page 84*
- Bayer, R., 1971. Binary B-trees for virtual memory. In : Proceedings of the 1971 ACM SIGFIDET (now SIGMOD) Workshop on Data Description, Access and Control. SIGFIDET '71. ACM, New York, NY, USA, pp. 219–235. *Cité page 97*
- Beardsley, P., Murray, D. W., 1992. Camera Calibration Using Vanishing Points. In : BMVC. Leeds, Royaume-Uni. *Cité page 40*
- Bénitez, S., Denis, E., Baillard, C., 2010. Automatic Production of Occlusion-Free Rectified Facade Textures Using Vehicle-Based Imagery. In : Proc. of the ISPRS Commission III PCVIA. Paris, France, pp. 275–280. *Cité page 2*
- Bentrah, O., Paparoditis, N., Pierrot-Deseilligny, M., 2004. Stereopolis : an image based environments modeling system. In : International Symposium on Mobile Mapping Technology. Kunming, Chine. *Cité page 8*
- Bernardini, F., Bajaj, C. L., 1997. Sampling and Reconstructing Manifolds Using Alpha-Shapes. In : Proceedings of the Ninth Canadian Conference on Computational Geometry. *Cité page 130*
- Boser, B. E., Guyon, I. M., Vapnik, V. N., 1992. A training algorithm for optimal margin classifiers. In : Proceedings of the fifth annual ACM workshop on Computational Learning Theory. ACM Press, pp. 144–152. *Cité page 93*
- Bradski, G., 2000. The OpenCV Library. Dr. Dobb's Journal of Software Tools. *Cité page 34*
- Breiman, L., 1984. Classification and regression trees. Wadsworth International Group, Belmont, États-Unis. *Cité page 93*
- Breiman, L., Oct. 2001. Random Forests. Machine Learning 45 (1), 5–32. *Cité page 93*
- Brown, D. C., 1971. Close-range camera calibration. Photogrammetric Engineering 37 (8), 855–866. *Cité pages 34 et 39*
- Cannelle, B., Paparoditis, N., Boldo, D., Sep. 2010. Panorama-based camera calibration. In : International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVIII (Part 3 A). pp. 73–78. *Cité page 41*
- Cannelle, B., Paparoditis, N., Papelard, J.-P., 2011. Calibration de caméra par acquisition de type panoramique. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection 2 (194), 16–24. *Cité page 41*
- Caprile, B., Torre, V., 1990. Using vanishing points for camera calibration. International Journal of Computer Vision 4, 127–139. *Cité page 40*
- Carto3D, 2012. Carto 3D - cartographie 3D en ligne - IGN et Virtuel City. <http://www.carto3d.fr/>, accédé le : 08/10/2012. *Cité page 2*
- CATIA, 2013. CATIA - logiciel de conception CAO 3D - Dassault Systèmes. <http://www.3ds.com/fr/products/catia/>, accédé le : 20/01/2013. *Cité page 55*

- Chang, C.-C., Lin, C.-J., May 2011. LIBSVM : A library for support vector machines. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology* 2 (3), 27 :1–27 :27. *Cité page 93*
- Clarke, T. A., Fryer, J. G., 1998. The Development of Camera Calibration Methods and Models. *The Photogrammetric Record* 16 (91), 51–66. *Cité page 31*
- Cormen, T. H., Stein, C., Rivest, R. L., Leiserson, C. E., 2001. Introduction to Algorithms, 2nd edition. McGraw-Hill Higher Education. *Cité page 89*
- Cortes, C., Vapnik, V., Sep. 1995. Support-Vector Networks. *Machine Learning* 20 (3), 273–297. *Cité page 93*
- Craciun, D., 2010. Numérisation conjointe image/laser pour modélisation 3D des environnements complexes construits ou habités. Thèse de Doctorat, Telecom Paris Tech. *Cité page 53*
- Cramer, M., Stallmann, D., 2002. System Calibration for Direct Georeferencing. In : ISPRS Comm. III Symposium ‘Photogrammetric Computer Vision. pp. 9–13. *Cité page 56*
- Crowley, J. L., Parker, A. C., Feb. 1984. A Representation for Shape Based on Peaks and Ridges in the Difference of Low-Pass Transform. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 6 (2), 156–170. *Cité pages 84 et 86*
- Cuthill, E., McKee, J., 1969. Reducing the bandwidth of sparse symmetric matrices. In : Proceedings of the 1969 24th national conference. ACM ’69. ACM, New York, NY, E.U, pp. 157–172. *Cité pages 104 et 133*
- Da, T. K. F., Yvinec, M., 2012. 3D Alpha Shapes. In : CGAL User and Reference Manual, 4.0 edition. CGAL Editorial Board. *Cité pages 130 et 131*
- Datta, A., Kim, J., Kanade, T., 2009. Accurate camera calibration using iterative refinement of control points. *International Conference on Computer Vision*, 1201–1208. *Cité page 40*
- Delaunay, B. N., 1934. Sur la sphère vide. *Bulletin of Academy of Sciences of the USSR*, 793–800. *Cité page 130*
- Demantké, J., Vallet, B., Paparoditis, N., 2012. Streamed Vertical Rectangle Detection in Terrestrial Laser Scans for Facade Database Production. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* I(3), 99–104. *Cité page 14*
- Devaux, A., Paparoditis, N., Octobre 2010. Increasing Interactivity in Street View Web Navigation Systems. In : ACM Multimedia. Florence, Italie. *Cité pages 2, 6 et 14*
- Devaux, A., Paparoditis, N., Bredif, M., 2012. A Web-Based 3D Mapping Application using WebGL allowing Interaction with Images, Point Clouds and Models. In : ACM SIGSPATIAL GIS. Redondo Beach, E.U., pp. 6–9. *Cité page 2*
- Devaux, A., Paparoditis, N., Precioso, F., Cannelle, B., may 2009. Face Blurring for Privacy in Street-level Geoviewers Combining Face, Body and Skin Detectors. In : MVA IAPR Conference on Machine Vision Applications. Yokohama, Japan. *Cité page 14*

BIBLIOGRAPHIE

- Devernay, F., Faugeras, O., 2001. Straight lines have to be straight : automatic calibration and removal of distortion from scenes of structured environments. *Machine Vision and Applications* 13 (1), 14–24. *Cité page 39*
- Duquenne, F., Botton, S., Peyret, F., Bétaille, D., Willis, P., 2005. GPS - localisation et navigation par satellites. Hermès, Paris, France. *Cité pages 2 et 16*
- Eberhardt, H., Klumpp, V., Hanebeck, U., 2010. Density trees for efficient nonlinear state estimation. In : *Information Fusion (FUSION)*, 2010 13th Conference on. pp. 1–8. *Cité page 86*
- Edelsbrunner, H., Mücke, E. P., 1994. Three-dimensional alpha shapes. *ACM Transactions on Graphics* 13 (1), 43–72. *Cité page 130*
- El-Sheimy, N., 1996. A Mobile Multi-Sensor System for GIS Applications in Urban Centers. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXI*, 95–100. *Cité pages 3 et 56*
- Ellum, C., El-Sheimy, N., 2002. Land-Based Mobile Mapping Systems. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 68 (1), 13–17. *Cité page 3*
- Esquivel, S., Woelk, F., Koch, R., 2007. Calibration of a multi-camera rig from non-overlapping views. In : *Proceedings of the 29th Deutsche Arbeitsgemeinschaft für Mustererkennung Conference on Pattern Recognition*. Berlin, Heidelberg, pp. 82–91. *Cité page 57*
- Farrell, J., Barth, M., 1999. *The Global positioning system and inertial navigation*. McGraw–Hill. *Cité page 15*
- Faugeras, O., Luong, Q., Maybank, S., 1992. Camera self-calibration : Theory and experiments. In : *European Conference on Computer Vision*. Vol. 588. Santa Margherita Ligure, Italie, pp. 321–334. *Cité page 40*
- Fraser, C., 1997. Digital camera self-calibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 52 (4), 149–159. *Cité pages 34 et 39*
- Friedman, J. H., Bentley, J. L., Finkel, R. A., Sep. 1977. An Algorithm for Finding Best Matches in Logarithmic Expected Time. *ACM Transactions on Mathematical Software* 3 (3), 209–226. *Cité pages 86 et 87*
- GALILEO, 2012. European Spacial Agency. <http://www.esa.int/esaNA/galileo.html>, accédé le : 08/10/2012. *Cité page 2*
- Gandolfi, S., Barbarella, M., Ronci, E., Burchi, A., 2008. Close photogrammetry and laser scanning using a mobile mapping system for the high detailed survey of a high density area. In : *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Pékin, Chine, pp. 909–914. *Cité page 3*
- Gauglitz, S., Höllerer, T., Turk, M., Sep. 2011. Evaluation of Interest Point Detectors and Feature Descriptors for Visual Tracking. *International Journal of Computer Vision* 94 (3), 335–360. *Cité page 84*

- Gauss, C., Bertrand, J., 1855. Méthode des moindres carrés : Mémoires sur la combinaison des observations. Mallet-Bachelier. *Cité page 24*
- Geiger, A., Lenz, P., Urtasun, R., 2012. Are we ready for Autonomous Driving? The KITTI Vision Benchmark Suite. In : Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Providence, États-Unis. *Cité pages 3 et 11*
- George, A., Gilbert, J., Liu, J., 1993. Graph theory and sparse matrix computation. IMA volumes in mathematics and its applications. Springer-Verlag. *Cité page 133*
- Gervautz, M., Purgathofer, W., 1990. Graphics gems. Academic Press Professional, Inc., San Diego, CA, USA, Ch. A simple method for color quantization : octree quantization, pp. 287–293. *Cité page 86*
- Gibbs, N. E., Poole, Jr., W. G., Stockmeyer, P. K., Dec. 1976. A Comparison of Several Bandwidth and Profile Reduction Algorithms. ACM Transactions on Mathematical Software 2 (4), 322–330. *Cité page 133*
- GLONASS, 2012. Federal Space Agency Information-analytical centre. <http://www.glonass-ianc.rsa.ru/en/>, accédé le : 08/10/2012. *Cité page 2*
- Gontran, H., Skaloud, J., Gilliéron, P.-Y., 2005. Photobus on its Way to Real-time Mapping. GIS Development Middle East 1 (1). *Cité page 3*
- Google, 2012. Street View (Google). <http://maps.google.fr/intl/fr/help/maps/streetview/>, accédé le : 08/10/2012. *Cité pages 2 et 6*
- Gouet, V., Montesinos, P., Deriche, R., Pelé, D., 2000. Evaluation de détecteurs de points d'intérêt pour la couleur. In : Reconnaissance des formes et Intelligence Artificielle (RFIA'2000). Vol. II. Paris, France, pp. 257–266. *Cité page 84*
- Goulette, F., Nashashibi, F., Abuhadrous, I., Ammoun, S., Laugeau, C., 2006. An Integrated On-Board Laser Range Sensing System for On-the-Way City and Road Modelling. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXIV. *Cité page 3*
- GPS, 2012. Official U.S. Government information about the Global Positioning System and related topics. <http://www.gps.gov/>, accédé le : 08/10/2012. *Cité page 2*
- Grejner-Brzezinska, D. A., 1996. Positioning Accuracy of the GPSVan. In : Proceedings of the 52nd Annual Meeting of The Institute of Navigation. Cambridge, E.U., pp. 657–665. *Cité page 3*
- Gressin, A., Cannelle, B., Mallet, C., Papelard, J.-P., 2012. Trajectory-based Registration of 3D LIDAR Point Clouds Acquired with a Mobile Mapping Systems. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences I(3), 117–122. *Cité page 14*
- Grossberg, M. D., Nayar, S. K., 2005. The Raxel Imaging Model and Ray-Based Calibration. International Journal of Computer Vision 61 (2), 119–137. *Cité page 33*
- Guennebaud, G., Jacob, B., et al., 2010. Eigen v3. <http://eigen.tuxfamily.org>. *Cité pages 134 et 178*

BIBLIOGRAPHIE

- Habib, A., Kersting, A. P., Bang, B., Rau, J., 2011. A Novel Single-Step Procedure for the Calibration of the Mounting Parameters of a Muti-Camera Terrestrial Mobile Mapping System. In : Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing. Vol. 22. pp. 173–195. *Cité page 57*
- Harris, C., Stephens, M., 1988. A combined corner and edge detector. In : In Proc. of Fourth Alvey Vision Conference. pp. 147–151. *Cité page 83*
- Hartley, R., 1994. Self-calibration from multiple views with a rotating camera. In : ECCV '94 : Proceedings of the third European conference on Computer vision (vol. 1). Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, E.U., pp. 471–478. *Cité page 40*
- Hartley, R. I., Trunpf, J., Dai, Y., Li, H., 2013. Rotation Averaging. International Journal of Computer Vision 103 (3), 267–305. *Cité page 57*
- Hartley, R. I., Zisserman, A., 2004. Multiple View Geometry in Computer Vision, Second edition. Cambridge University Press. *Cité page 34*
- Haugeard, J.-E., Philipp-Foliguet, S., Precioso, F., 2009. Windows and Facades Retrieval using Similarity on Graph of Contours. In : IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 09). *Cité page 14*
- Heikkilä, J., 2000. Geometric camera calibration using circular control points. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 22 (10), 1066–1077. *Cité pages 34 et 39*
- IGN, 2013. BATI-3D | IGN - Espace professionnel. <http://professionnels.ign.fr/bati-3d>, accédé le : 05/01/2013. *Cité page 7*
- Immergis, 2013. Immergis - Mettez de la réalité dans vos données. <http://www.immergis.fr/>, accédé le : 25/01/2013. *Cité page 2*
- Kalman, R. E., 1960. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. Transactions of the ASME – Journal of Basic Engineering 82, 35–45. *Cité page 15*
- Karren, R., 1968. Camera calibration by the multicollimator method. Photogrammetric Engineering, 706–719. *Cité page 39*
- Kenner, H., 1976. Geodesic Math and How to Use It. Dome Series. University of California Press. *Cité page 45*
- Kersting, A. P., Habib, A., Rau, J., 2012. New method for the calibration of multi-camera mobile mapping system. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXIX (Part B 1), 121–126. *Cité page 57*
- Knuth, D. E., 1975. Sorting and searching. Addison-Wesley Upper Saddle River, NJ [u.a.]. *Cité page 97*
- Kumar, R., Ilie, A., Frahm, J.-M., Pollefeys, M., 2008. Simple calibration of non-overlapping cameras with a mirror. In : Computer Vision and Pattern Recognition. Anchorage, États-Unis. *Cité page 57*

-
- Lavest, J.-M., Viala, M., Dhome, M., 1998. Do We Really Need an Accurate Calibration Pattern to Achieve a Reliable Camera Calibration? In : European Conference on Computer Vision. Fribourg, Allemagne, pp. 158–174. *Cité pages 34, 39 et 40*
- Lébraly, P., Ait-Aider, O., Royer, E., Dhome, M., 2011. Comment calibrer extrinsèquement des caméras à champs non-recouvrants? Application pour un robot mobile. In : ORASIS - Congrès des jeunes chercheurs en vision par ordinateur. Praz-sur-Arly, France. *Cité page 57*
- Lehman, P. L., Yao, s. B., Dec. 1981. Efficient locking for concurrent operations on B-trees. ACM Transactions on Database Systems 6 (4), 650–670. *Cité page 97*
- Levenberg, K., 1944. A method for the solution of certain problems in least squares. Quart. Applied Math. 2, 164–168. *Cité pages 63, 69 et 104*
- Lhuillier, M., 2011. Fusion of GPS and structure-from-motion using constrained bundle adjustments. In : Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011 IEEE Conference on. pp. 3025–3032. *Cité page 153*
- Lhuillier, M., 2012. Incremental Fusion of Structure-from-Motion and GPS Using Constrained Bundle Adjustments. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 34 (12), 2489–2495. *Cité page 153*
- Li, M., Lavest, J.-M., 1995. Some Aspects of Zoom-Lens Camera Calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 18, 1105–1110. *Cité pages 34 et 40*
- Liberge, S., Soheilian, B., Chehata, N., Paparoditis, N., 2010. Extraction of vertical posts in 3D laser point clouds acquired in dense urban areas by a mobile mapping system. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVIII (Part 3B), 126–130. *Cité page 14*
- Lourakis, M. I., Deriche, Rachid, D., 2000a. Camera Self-Calibration Using the Kruppa Equations and the SVD of the Fundamental Matrix : The Case of Varying Intrinsic Parameters. Rapport de recherche 3911, INRIA. *Cité page 40*
- Lourakis, M. I. A., Deriche, R., 2000b. Camera Self-Calibration Using the Singular Value Decomposition of the Fundamental Matrix : From Point Correspondences to 3D Measurements. In : Asian Conference on Computer Vision. Taipei, Taïwan, pp. 403–408. *Cité page 39*
- Lowe, D. G., 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. International Journal of Computer Vision 60 (2), 91–110. *Cité pages 50, 84, 86 et 87*
- Marquardt, D. W., 1963. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Non-linear Parameters. SIAM Journal on Applied Mathematics 11 (2), 431–441. *Cité pages 63, 69 et 104*
- Matas, J., Chum, O., Urban, M., Pajdla, T., 2004. Robust wide-baseline stereo from maximally stable extremal regions. Image and Vision Computing 22 (10), 761–767. *Cité page 84*
-

- McGlone, J., Mikhail, E., Bethel, J., Mullen, R., 2004. Manual of photogrammetry (5th Edition). American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. *Cité pages 1, 31, 32 et 58*
- Mikolajczyk, K., Schmid, C., 2002. An affine invariant interest point detector. In : Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision. pp. 0–7. *Cité page 84*
- Mikolajczyk, K., Schmid, C., 2004. Scale and affine invariant interest point detectors. International Journal of Computer Vision 60 (1), 63–86. *Cité page 84*
- Mikolajczyk, K., Schmid, C., 2005. A performance evaluation of local descriptors. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 27 (10), 1615–1630. *Cité page 86*
- Mikolajczyk, K., Tuytelaars, T., Schmid, C., Zisserman, A., Matas, J., Schaffalitzky, F., Kadir, T., van Gool, L., 2005. A comparison of affine region detectors. International Journal of Computer Vision 65, 2005. *Cité page 84*
- Monnier, F., Vallet, B., Pappadimitris, N., Papellard, J.-P., David, N., 2013. Recalage Non-Rigide de Données Laser de Cartographie Mobile sur une Base de Données 3D Géographiques. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection A paraître. *Cité page 14*
- Monnier, F., Vallet, B., Soheilian, B., 2012. Trees Detection from Laser Point Clouds Acquired in dense Urban Areas by a Mobile Mapping System. In : ISPRS Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume I-3 . Melbourne, Australie, pp. 245–250. *Cité page 14*
- Moore, E. F., 1959. The shortest path through a maze. In : Proceedings of the International Symposium on the Theory of Switching, and Annals of the Computation Laboratory of Harvard University. Harvard University Press, pp. 285–292. *Cité page 133*
- Moravec, H., 1977. Towards automatic visual obstacle avoidance. In : Proceedings of the 5th international joint conference on Artificial intelligence - Volume 2. IJCAI'77. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, pp. 584–584. *Cité page 83*
- Moravec, H., Aug. 1979. Visual Mapping by a Robot Rover. In : Proceedings of the 6th International Joint Conference on Artificial Intelligence. pp. 599–601. *Cité page 83*
- Morel, J.-M., Yu, G., Apr. 2009. ASIFT : A New Framework for Fully Affine Invariant Image Comparison. SIAM J. Img. Sci. 2 (2), 438–469. *Cité page 86*
- Mount, D. M., Arya, S., 2013. ANN. <http://www.cs.umd.edu/~mount/ANN/>, accédé le : 07/01/2013. *Cité page 87*
- Muja, M., Lowe, D. G., 2009. Fast Approximate Nearest Neighbors with Automatic Algorithm Configuration. In : International Conference on Computer Vision Theory and Application VISSAPP'09). INSTICC Press, pp. 331–340. *Cité page 87*
- Nakariakov, S., 2013. The Boost C++ Libraries : Generic Programming. CreateSpace Independent Publishing Platform. *Cité page 178*

- Paparoditis, N., Bentrach, O., Pénard, L., Tournaire, O., Soheilian, B., Deveau, M., 2005. Automatic 3D Recording and Modeling of Large Scale Cities : the Archipolis Project. In : Recording, modeling and visualization of cultural heritage. Baltasvias, M., Gruen, A., Van Gool, L., Pateraki, M., (Eds.), Modelling and Visualization of Cultural Heritage, Ascona, Suisse, pp. 227–235. *Cité pages 3 et 8*
- Paparoditis, N., Papelard, J.-P., Cannelle, B., Devaux, A., Soheilian, B., David, N., Houzay, E., 2012. Stereopolis II : A multi-purpose and multi-sensor 3D mobile mapping system for street visualisation and 3D metrology. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection* 200, 69–79. *Cité pages 3, 6 et 8*
- Paparoditis, N., Souchon, J.-P., Martinoty, G., Pierrot-Deseilligny, M., 2006. High-end aerial digital cameras and their impact on the automation and quality of the production workflow. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 60 (6), 400–412. *Cité page 39*
- Parian, J. A., Gruen, A., 2010. Sensor modeling, self-calibration and accuracy testing of panoramic cameras and laser scanners. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65 (1), 60–76. *Cité pages 34 et 40*
- Park, S.-W., Hong, K.-S., 2001. Practical ways to calculate camera lens distortion for real-time camera calibration. *Pattern Recognition* 34 (6), 1199–1206. *Cité page 40*
- Peter, K., Schwarz, P., El-sheimy, N., 2004. Mobile Mapping Systems – State Of The Art And Future Trends. In : XXXV, Part B1. p. 5. *Cité page 3*
- Petrie, G., 2009. Systematic Oblique Aerial Photography using Multiple Digital Frame Cameras. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 75 (2), 102–107. *Cité page 1*
- Petrie, G., Jan. 2010. An Introduction to the Technology Mobile Mapping Systems. *GEO-Informatics* 13, 32–43. *Cité page 4*
- Pierrot-Deseilligny, M., Cléry, I., 2011. APERO, an Open Source Bundle Adjustment Software for Automatic Calibration and Orientation of a Set of Images. In : Proc. of the ISPRS Commission V Symposium, Image Engineering and Vision Metrology. Vol. 38. Trento, Italie. *Cité pages 34 et 40*
- Pissanetzky, S., 1984. Sparse matrix technology. Academic Press. *Cité page 132*
- PostGIS, 2012. PostGIS. <http://postgis.refractions.net/>, accédé le : 20/12/2012. *Cité page 96*
- PostgreSQL, 2012. PostgreSQL. <http://www.postgresql.org/>, accédé le : 20/12/2012. *Cité page 96*
- Puente, I., González-Jorge, H., Arias, P., Armesto, J., 2011. Land-Based Mobile Laser Scanning Systems : a review. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVIII (Part 5/W12)*. *Cité page 4*
- Pénard, L., Paparoditis, N., Pierrot-Deseilligny, M., 2005. 3D building facade reconstruction under mesh form from multiple wide angle views. In : 3D ARCH. ISPRS WG V/4 workshop, Venice, Italie. *Cité page 8*

- Qi, H., Moore, J., apr 2002. Direct Kalman filtering approach for GPS/INS integration. *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on* 38 (2), 687–693. *Cité page 15*
- Rau, J., Habib, A., Kersting, A. P., Chiang, K.-W., Bang, K.-I., Tseng, Y.-H., Li, Y.-H., 2011. Direct Sensor Orientation of a Land-Based Mobile Mapping System. *Sensors* 11 (7), 7243–7261. *Cité page 57*
- Riegl, 2012. RIEGL VMX-450. <http://www.riegl.com/nc/products/mobile-scanning/produktdetail/product/scannersystem/10/>. *Cité page 5*
- Riegl, 2013. RIEGL LMS-Q120. <http://www.riegl.com>. *Cité page 4*
- Rosten, E., Drummond, T., 2006. Machine learning for high-speed corner detection. In : *In European Conference on Computer Vision*. pp. 430–443. *Cité page 84*
- Rosten, E., Porter, R., Drummond, T., 2010. FASTER and better : A machine learning approach to corner detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 32, 105–119. *Cité page 84*
- Samet, H., Webber, R. E., Jul. 1985. Storing a collection of polygons using quadtrees. *ACM Transactions on Graphics* 4 (3), 182–222. *Cité page 86*
- Schaer, P., Skaloud, J., Vallet, J., 2003. Géoréférencement direct des images par GPS/INS Approche rigoureuse pour le calibrage des excentricités angulaires (boresight calibration). *Géomatique Suisse*, 440–445. *Cité page 57*
- Schmid, H., 1959. A General Analytical Solution to the Problem of Photogrammetry. Tech. Rep. 1065, Ballistic Research Laboratories, US. *Cité pages 32 et 58*
- Scholkopf, B., Smola, A. J., 2001. *Learning with Kernels : Support Vector Machines, Regularization, Optimization, and Beyond*. MIT Press, Cambridge, MA, USA. *Cité page 93*
- Schware, K., El-Sheimy, N., Li, R., Chapman, M., Cosandier, D., 1993. VIASAT - A mobile highway survey system of high accuracy. In : *Proceedings of the IEEE-IEE, Vehicle Navigation and Information Systems Conference*. Piscataway, New Jersey, États-Unis, pp. 476–481. *Cité page 3*
- Schwarz, K., Chapman, M., Cannon, M., Gong, P., 1993. An integrated INS/GPS approach to the georeferencing of remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 59 (11), 1667–1674. *Cité page 3*
- Serna, A., Marcotegui, B., 2013. Urban accessibility diagnosis from mobile laser scanning data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 84, 23–32. *Cité page 14*
- Siek, J., Lee, L.-Q., Lumsdaine, A., Dec. 2001. *The Boost Graph Library : User Guide and Reference Manual (C++ In-Depth Series)*. Addison-Wesley Professional. *Cité page 133*
- Sillard, P., 2001. *Estimation par moindres carrés*. ENSG IGN. Hermès science publications, Paris. *Cité page 125*
- SIRADEL, 2012. SIRADEL. <http://www.siradel.com/>, accédé le : 08/10/2012. *Cité page 2*

- Siteco, 2012. Road-Scanner Mapping Mobile System. <http://www.sitecoinf.it/index.php/en/solutions/road-scanner-eng>. *Cité page 5*
- Sloan, S. W., 1986. An algorithm for profile and wavefront reduction of sparse matrices. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 23 (2), 239–251. *Cité page 133*
- Smith, S. M., Brady, J. M., 1995. SUSAN - A New Approach to Low Level Image Processing. *International Journal of Computer Vision* 23, 45–78. *Cité page 84*
- Soheilian, B., 2008. Roadmark reconstruction from stereo-images acquired by a ground-based mobile mapping system. Thèse de Doctorat, Université Paris-Est. *Cité page 14*
- Soheilian, B., Paparoditis, N., Boldo, D., 2010. 3D road marking reconstruction from street-level calibrated stereo pairs. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64 (4), 347–359. *Cité pages 8 et 14*
- Souchon, J.-P., Thom, C., Meynard, C., Martin, O., 2012. A large format camera system for national mapping purposes. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection* 200, 48–53. *Cité page 8*
- Spinello, L., Arras, K. O., Triebel, R., Siegwart, R., 2010. A Layered Approach to People Detection in 3D Range Data. In : *AAAI National Conference on Artificial Intelligence*. Atlanta, E.U. *Cité page 14*
- StreetMapper, 2012. The world's most accurate mobile laser mapping system with 360-degree vision. <http://www.streetmapper.net/streetmapper/brochure.htm>. *Cité page 5*
- Streetside, 2012. Streetside (Microsoft Bing Maps). <http://www.microsoft.com/maps/fr-FR/streetside.aspx>, accédé le : 08/10/2012. *Cité page 2*
- Sturm, P., Ramalingam, S., May 2004. A Generic Concept for Camera Calibration. In : *European Conference on Computer Vision*. Vol. 2. Springer, Prague, République Tchèque, pp. 1–13. *Cité page 33*
- Sturm, P., Ramalingam, S., Tardif, J.-P., Gasparini, S., Barreto, J., 2011. Camera Models and Fundamental Concepts Used in Geometric Computer Vision. *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision* 6 (1-2), 1–183. *Cité page 31*
- Tang, R., Fritsch, D., Cramer, M., 2012a. A novel family of mathematical self-calibration additional parameters for airborne camera systems. In : *EuroCOW 2012*. Barcelone, Espagne. *Cité page 34*
- Tang, R., Fritsch, D., Cramer, M., 2012b. New rigorous and flexible Fourier self-calibration models for airborne camera calibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 71, 76–85. *Cité page 34*
- Tang, Z., 2011. High precision camera calibration. Thèse de Doctorat, CMLA - Centre de Mathématiques et de Leurs Applications - ENS Cachan. *Cité page 39*
- Tao, C., Li, J., 2007. *Advances in Mobile Mapping Technology*. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) book series. Taylor & Francis. *Cité page 3*

- Tarel, J.-P., 1994. Calibration de caméra fondée sur les ellipses. Tech. Rep. 2200, INRIA. *Cité page 40*
- Tarjan, R. E., 1983. Data structures and network algorithms. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA, USA. *Cité page 89*
- Tewarson, R. P., 1973. Sparse Matrices. Vol. 99. Mathematics in Science and Engineering. *Cité page 132*
- The CGAL Project, 2012. CGAL User and Reference Manual, 4.1 edition. CGAL Editorial Board, http://www.cgal.org/Manual/4.1/doc_html/cgal_manual/packages.html. *Cité page 131*
- Thom, C., Souchon, J.-P., 1998. Le point sur les caméras numériques de l'IGN. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection (149), 12–20. *Cité pages 8 et 39*
- Thom, C., Souchon, J.-P., 2001. Multi-Head Digital Camera Systems. GIM International 15 (5), 33–37. *Cité pages 8 et 39*
- TopCon, 2012. High Definition 3D Mobile Mapping System. <http://www.topconpositioning.com/products/mobile-mapping>. *Cité page 5*
- Triggs, B., 1998. Autocalibration from Planar Scenes. In : Proceedings of the 5th European Conference on Computer Vision, Fribourg, Allemagne. *Cité page 39*
- Triggs, B., September 1999. Camera Pose and Calibration from 4 or 5 known 3D Points. In : Proceedings of the 7th International Conference on Computer Vision. Corfu, Grèce, pp. 278–284. *Cité page 39*
- Triggs, B., McLauchlan, P., Hartley, R., Fitzgibbon, A., 2000. Bundle Adjustment - A Modern Synthesis. In : Triggs, W., Zisserman, A., Szeliski, R. (Eds.), Vision Algorithms : Theory and Practice. LNCS. Springer Verlag, pp. 298–375. *Cité page 40*
- Trimble, 2012. Trimble MX8. <http://www.trimble.com/geospatial/Trimble-MX8.aspx?dtID=overview&>. *Cité page 5*
- TS, 2013. Les Travaux Spéciaux de l'IGN. Visible 1st February 2013. URL http://geodesie.ign.fr/index.php?p=33&page=mesures_dimensionnelles_et_geodesiques *Cité page 24*
- Tsai, R., 1986. An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision. In : Computer Vision and Pattern Recognition. Miami Beach, Floride, États-Unis, pp. 364–374. *Cité page 31*
- Tsai, R., 1987. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. IEEE Journal of Robotics and Automation 3 (4), 323–344. *Cité pages 34 et 39*
- Tuytelaars, T., Mikolajczyk, K., 2008. K. : Local invariant feature detectors : A survey. FnT Comp. Graphics and Vision, 177–280. *Cité page 84*

- Urmson, C., Anhalt, J., Bae, H., Bagnell, J. A., Baker, C. R., Bittner, R. E., Brown, T., Clark, M. N., Darms, M., Demitrish, D., Dolan, J. M., Duggins, D., Ferguson, D., Galatali, T., Geyer, C. M., Gittleman, M., Harbaugh, S., Hebert, M., Howard, T., Kolski, S., Likhachev, M., Litkouhi, B., Kelly, A., McNaughton, M., Miller, N., Nickolaou, J., Peterson, K., Pilnick, B., Rajkumar, R., Rybski, P., Sadekar, V., Salesky, B., Seo, Y.-W., Singh, S., Snider, J. M., Struble, J. C., Stentz, A., Taylor, M., Whittaker, W. L., Wolkowicki, Z., Zhang, W., Ziglar, J., June 2008. Autonomous driving in urban environments : Boss and the Urban Challenge. *Journal of Field Robotics, Special Issue on the 2007 DARPA Urban Challenge, Part I* 25 (8), 425–466. *Cité page 14*
- Ussyshkin, V., 2009. Mobile Laser Scanning Technology for Surveying Application : From Data Collection to End-Products. In : FIG Working Week 2009. Eilat, Israël. *Cité page 5*
- UTC, 2012. Plateforme Pacpus. <http://www2.hds.utc.fr/pacpus/plateforme/>. *Cité page 3*
- Vaidya, P., 1989. An $O(n \log n)$ algorithm for the all-nearest-neighbors Problem. *Discrete & Computational Geometry* 4, 101–115. *Cité page 86*
- Vallet, B., Houzay, E., 2011. Fast and Accurate Visibility computation in urban scenes. In : International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. 38 (3/W22). pp. 77–82. *Cité pages 14 et 64*
- Velodyne, 2012. Velodyne HDFL-64E. <http://www.velodynelidar.com>. *Cité page 4*
- Viametris, 2012. VIAMETRIS Numérisation et reconnaissance automatique de votre patrimoine routier : patrimoine routier, marquages au sol, panneaux... <http://viametris.fr/index.php>, accédé le : 08/10/2012. *Cité page 2*
- VirtuelCity, 2012. Virtuel City, L'expérience de la ville en 3D. <http://www.virtuelcity.com/fr/>, accédé le : 08/10/2012. *Cité page 2*
- Wang, P.-C., Tsai, P.-C., Chen, Y.-C., Tseng, Y.-H., 2012. One-step and Two-step Calibration of a portable panoramic image mapping system. In : International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. *Cité page 57*
- Willson, R. G., 1994. Modeling and calibration of automated zoom lenses. Thèse de Doctorat, Pittsburgh, PA, USA, uMI Order No. GAX94-19735. *Cité page 40*
- Won, S.-h., Melek, W., Golnaraghi, F., 2010. A Kalman/Particle Filter-Based Position and Orientation Estimation Method Using a Position Sensor/Inertial Measurement Unit Hybrid System. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 57 (5), 1787–1798. *Cité page 2*
- Zhang, Z., 1999. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. In : ICCV. Kerkyra, Corfu, Greece, pp. 666–673. *Cité page 39*

Annexes

Annexe A

Différentielle de la formule image

A.1 La formule image

La formule image permet de relier un point M à une image prise par la caméra i positionnée sur la véhicule par S_{cam_i} et $\mathcal{R}_{ste_j, cam_i}$ pour une pose du véhicule $\mathcal{T}_{ste_j, ter}$ \mathcal{R}_{ter, ste_j} . Afin de résoudre les différents systèmes d'équations présentés dans ce mémoire, cette équation doit être linéarisée en fonction des différents paramètres.

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} c \\ l \end{pmatrix}_{i,j} &= \begin{pmatrix} c_{PPA} \\ l_{PPA} \end{pmatrix}_i - p_i \frac{\mathcal{R}_{ste_j, cam_i} \mathcal{R}_{ter, ste_j} (M_{ter} - (\mathcal{R}_{cam_i, ste_j} S_{cam_i} + \mathcal{T}_{ste_j, ter}))}{\mathbf{k} \mathcal{R}_{ste_j, cam_i} \mathcal{R}_{ter, ste_j} (M_{ter} - (\mathcal{R}_{cam_i, ste_j} S_{cam_i} + \mathcal{T}_{ste_j, ter}))} \\ m &= f_{i,j}(M_{ter}) \\ m &= F - \frac{A}{B} \end{aligned}$$

avec

$$\begin{aligned} A &= \mathcal{R}_{ste_j, cam_i} \mathcal{R}_{ter, ste_j} (M_{ter} - (\mathcal{R}_{cam_i, ste_j} S_{cam_i} + \mathcal{T}_{ste_j, ter})) && \text{(vecteur en dimension 3)} \\ B &= {}^t \mathbf{k} \mathcal{R}_{ste_j, cam_i} \mathcal{R}_{ter, ste_j} (M_{ter} - (\mathcal{R}_{cam_i, ste_j} S_{cam_i} + \mathcal{T}_{ste_j, ter})) && \text{(scalaire)} \end{aligned}$$

A.2 Outils et notations

A.2.a Notations

- \mathcal{R} est une matrice rotation.
- θ est l'angle de rotation
- $\vec{\Omega} = {}^t (a, b, c)$ est l'axe de rotation (vecteur unitaire)
- $\bar{\Omega} = \begin{pmatrix} 0 & -c & b \\ c & 0 & -a \\ -b & a & 0 \end{pmatrix}$ est l'axiateur
- $I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ matrice identité

A.2.b Angle, axe et rotation

Formule de passage $\mathcal{R} \rightarrow (\theta, \vec{\Omega})$:

$$\mathcal{R} = I + \sin(\theta) \cdot \vec{\Omega} + (1 - \cos(\theta)) \cdot \vec{\Omega} \cdot \vec{\Omega}$$

A.2.c Différentielle de matrice rotation

$$dRv = \Omega$$

$$dRv = -R\tilde{v}d\Omega$$

A.3 Dérivées Partielles

A.3.a Pour un point M_{ter}

La dérivée de la fonction image en un point M_{ter} s'écrit :

$$\frac{\partial f_{i,j}(M_{ter})}{\partial M_{ter}} = \frac{p_i \cdot B \cdot \mathcal{R}_{ste_j, cam_i} \cdot \mathcal{R}_{ter, ste_j} - A \cdot ({}^t\mathbf{k} \cdot (\mathcal{R}_{ste_j, cam_i} \cdot \mathcal{R}_{ter, ste_j}))}{B^2}$$

A.3.b Pour une caméra cam_i

La dérivée de la fonction image pour une position de caméra s'écrit :

$$\frac{\partial f_{i,j}(M_{ter})}{\partial S_{cam_i}} = \frac{p_i \cdot B \cdot \mathcal{R}_{ste_j, cam_i} + A \cdot ({}^t\mathbf{k} \cdot \mathcal{R}_{ste_j, cam_i})}{B^2}$$

La dérivée de la fonction image pour une rotation de caméra s'écrit :

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_{i,j}(M_{ter})}{\partial \mathcal{R}_{ste_j, cam_i}} &= \frac{p_i \cdot B \cdot (-\mathcal{R}_{ste_j, cam_i} \cdot \mathcal{R}_{ter, ste_j} \cdot M_{ter} - \mathcal{R}_{ter, ste_j} \cdot \mathcal{T}_{ste_j, ter} - S_{cam_i})}{B^2} \\ &- \frac{A \cdot ({}^t\mathbf{k} \cdot (-\mathcal{R}_{ste_j, cam_i} \cdot \mathcal{R}_{ter, ste_j} \cdot M_{ter} - \mathcal{R}_{ter, ste_j} \cdot \mathcal{T}_{ste_j, ter} - S_{cam_i}))}{B^2} \end{aligned}$$

A.3.c Pour une pose du véhicule ste_j

La dérivée de la fonction image pour une position du véhicule s'écrit :

$$\frac{\partial f_{i,j}(M_{ter})}{\partial \mathcal{T}_{ste_j, ter}} = \frac{p_i \cdot \mathcal{R}_{ste_j, cam_i} \cdot \mathcal{R}_{ter, ste_j} \cdot B + A \cdot ({}^t\mathbf{k} \cdot (\mathcal{R}_{ste_j, cam_i} \cdot \mathcal{R}_{ter, ste_j}))}{B^2}$$

La dérivée de la fonction image pour une rotation du véhicule s'écrit :

$$\frac{\partial f_{\mathbf{i},\mathbf{j}}(M_{ter})}{\partial \mathcal{R}_{ste_j,ter}} = \frac{p_{\mathbf{i}} \cdot (-\mathcal{R}_{ste_j,cam_{\mathbf{i}}} \cdot {}^t\mathcal{R}_{ter,ste_j} \cdot \overline{(M_{ter} - \mathcal{T}_{ste_j,ter})}) \cdot B}{B^2} - \frac{A \cdot ({}^t\mathbf{k} \cdot (-\mathcal{R}_{ste_j,cam_{\mathbf{i}}} \cdot {}^t\mathcal{R}_{ter,ste_j} \cdot \overline{(M_{ter} - \mathcal{T}_{ste_j,ter})}))}{B^2}$$

Annexe B

Matrices Creuses

Les matrices creuses permettent d'optimiser la taille en mémoire de matrices de grandes tailles comportant un nombre important de coefficients nuls. Le principe est de ne stocker que les coefficients non nuls.

B.1 Méthodes de Stockage

Voici une matrice creuse M

$$M = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 3 \\ 4 & 5 & 0 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7 & 0 & 8 \end{pmatrix}$$

Nous allons étudier différentes façons de la stocker.

B.1.a Par triplets

La méthode de stockage par triplets conserve pour chaque coefficient non nul sa position dans la matrice. Un triplet correspond donc aux valeurs (c, l, v) avec c position dans la matrice en colonne, l position dans la matrice en ligne et v la valeur du coefficient. L'avantage de cette méthode est de ne garder que les coefficients non nuls. Elle permet aussi d'avoir plusieurs coefficients pour une même position¹

B.1.b Compression en colonne (Compressed sparse column [CSC] ou [CCS])

La méthode de stockage par compression en colonne permet d'optimiser le stockage en privilégiant les colonnes. Ce format de stockage nécessite trois tableaux. Le premier (a) contient les valeurs par ordre d'apparition en parcourant la matrice colonne par colonne

1. Cette situation peut se produire lors du calcul de la matrice normale.

par ligne croissante. Le second (b) contient la position (dans le vecteur de données) du premier élément non nul dans la colonne i . Le troisième (c) contient l'index des lignes de chaque élément de (a).

a	Valeurs :	2	4	3	5	7	6	3	8
b	Indice des positions de coefficients dans la colonne :	0	2	4	5	6	8		
c	Indice des positions de ligne :	1	2	0	2	4	2	1	4

B.1.c Stockage en ligne (Compressed sparse row [CSR] ou [CRS])

La méthode de stockage par compression en colonne permet d'optimiser le stockage en privilégiant les lignes. Ce format de stockage nécessite trois tableaux. Le premier (a) contient les valeurs par ordre d'apparition en parcourant la matrice ligne par ligne par colonne croissante. Le second (b) contient la position (dans le vecteur de données) du premier élément non nul dans la ligne i . Le troisième (c) contient l'index des colonnes de chaque élément de (a).

a	Valeurs :	1	2	3	4	5	6	7	8
b	Indice des positions de coefficients par ligne :	0	1	3	5	6	8		
c	Indice des positions de colonne :	1	0	4	0	1	3	2	4

B.2 Opérations

Concernant les opérations arithmétiques, les 3 formats présentés ne sont pas équivalents. Le premier est très efficace pour l'insertion d'éléments, par contre il est moins performant lors de calculs mathématiques (+, -, *,...). Les deux autres sont très performants sur les opérations mais beaucoup moins sur les insertions d'éléments.

Dans le cadre de cette thèse, l'implémentation choisie est celle d'Eigen [Guennebaud et al., 2010]. D'autres implémentations sont possibles, notamment celle de Boost [Nakariakov, 2013] qui n'a pas été testée.

Annexe C

Détermination de la position d'un point issu de plusieurs droites

A plusieurs occasions, la détermination d'un point à partir de faisceaux (i.e. de droite) est utilisée. Nous allons décrire dans cette annexe la méthode qui a été utilisée.

Différentes formulations mathématiques existent pour caractériser une droite :

- 2 points A et B
- son équation

$$\begin{cases} x = x_0 + ka \\ y = y_0 + kb \\ z = z_0 + kc \end{cases}$$

- 1 point et un vecteur A et \vec{v}

Toutes ces représentations sont équivalentes et des formules permettent de passer d'une caractérisation à l'autre.

Nous avons choisi la formulation qui permet d'écrire, pour tout point M , l'équation 1 avec \vec{v} le vecteur directeur et λ un facteur :

$$\overrightarrow{AM} = \lambda \vec{v} \tag{1}$$

Ecrite sous une autre forme, l'équation 1 peut s'écrire :

$$M - \lambda \vec{v} = A$$

Lorsque le point M appartient à plusieurs droites connues déterminées par A_i et \vec{v}_i , il suffit de résoudre le système présenté en 2 qui a pour inconnues le point M ainsi que les facteurs d'échelle propre à chaque droite λ_i

$$\begin{pmatrix}
 1 & 0 & 0 & -v_{x,1} & 0 & \cdots & 0 \\
 0 & 1 & 0 & -v_{y,1} & 0 & \cdots & \vdots \\
 0 & 0 & 1 & -v_{z,1} & 0 & \cdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\
 1 & 0 & 0 & \vdots & \cdots & 0 & -v_{xn} \\
 0 & 1 & 0 & \vdots & \cdots & 0 & -v_{yn} \\
 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & -v_{zn}
 \end{pmatrix}
 \begin{pmatrix}
 M_x \\
 M_y \\
 M_z \\
 \lambda_1 \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \lambda_n
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 A_{x1} \\
 A_{y1} \\
 A_{z1} \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 A_{xn} \\
 A_{yn} \\
 A_{zn}
 \end{pmatrix}
 \quad (2)$$

Ce système est linéaire et très simple à résoudre.

Publications

Articles de revues avec comité de lecture

N. Paparoditis, J.-P. Papelard, **B. Cannelle**, A. Devaux, B. Soheilian, N. David, E. Houzay. Stereopolis II : A multi-purpose and multi-sensor 3D mobile mapping system for street visualisation and 3D metrology. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 200, pp.69-79, 2012.

B. Cannelle, N. Paparoditis, J.-P. Papelard. Calibration de caméra par acquisition de type panoramique. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 194, pp.16-24, 2011.

Articles de conférences avec comité de lecture

B. Cannelle, N. Paparoditis, M. Pierrot-Deseilligny, J.-P. Papelard. Off-line Vs. On-line Calibration of a Panoramic-Based Mobile Mapping System. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXII Congrès ISPRS, Août-Septembre 2012, Melbourne.

A. Gressin, **B. Cannelle**, C. Mallet, J.-P. Papelard. Trajectory-based registration of 3D lidar point clouds acquired with a Mobile Mapping Systems . *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXII Congrès ISPRS, Août-Septembre 2012, Melbourne.

B. Cannelle, N. Paparoditis, O. Tournaire. Panorama-based camera calibration . *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 38, part 3A, pp. 73-78, Septembre 2010, Paris.

B. Cannelle, D. Craciun, N. Paparoditis, D. Boldo. Bundle adjustment and pose estimation of images of a multiframe panoramic camera. In *9th Conference on Optical 3-D* , Juillet 2009, Vienne.

A. Devaux, N. Paparoditis, F. Precioso, **B. Cannelle**. Face Blurring for Privacy in Street-level Geoviewers Combining Face, Body and Skin Detectors . In *IAPR Machine Vision Applications*, Mai 2009, Yokohama.

Résumé / Abstract

Titre : Estimation de pose de grands blocs d'images panoramiques issues de systèmes de numérisation mobile

Tirée par le développement et la démocratisation des globes numériques et des systèmes de géolocalisation grand public, la numérisation 3D mobile terrestre en milieux urbains s'est développée de manière très importante ces dix dernières années. Les principaux verrous résiduels de ces systèmes reste, d'une part la localisation précise des données pour certaines applications (conduite autonome urbaine, levers de géomètres, etc.) du fait des masques et multi-trajets GPS dans les canyons urbains, et, d'autre part, le passage à l'échelle du traitement de l'information vus les volumes de données considérables acquis chaque jour (plusieurs Terraoctets).

La première partie de cette thèse est consacrée à la présentation de la numérisation mobile, aussi bien du point de vue système que du point de vue usages. Une description fine du système Stéréopolis V2, véhicule de numérisation mobile multi-caméras développée au laboratoire MATIS de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière, est faite afin de présenter les données utilisées dans cette thèse. Les blocs d'images manipulés dans ces travaux sont constitués de plusieurs centaines de milliers à un million d'images.

La seconde partie est consacrée à la calibration du système : calibration intrinsèque de caméra tout d'abord, en utilisant une géométrie d'acquisition de type panoramique. Cela permet de s'affranchir de réseaux de cibles 3D métrologiques. Une calibration extrinsèque des imageurs du véhicule, ensuite, permet de déterminer de façon précise la position et l'orientation de caméras sur un dispositif de numérisation mobile. Deux procédures sont détaillées et comparées : l'une dite "off-line" nécessitant une acquisition spécifique avec un réseau de cibles métrologiques et l'autre dite "on-line" utilisant uniquement les données d'acquisition standards. Nous démontrons que la méthode "on-line" produit dans les mêmes conditions une précision comparable à celle "off-line" tout en étant plus adaptée aux variations de conditions d'acquisition in-situ.

La troisième partie détaille le processus de compensation par faisceaux appliquée aux données de numérisation mobile multi-caméras qui permet d'estimer la pose d'un grand nombre d'images. La mise en équation ainsi que différents cas d'utilisations de la méthode sont explicités. La structuration et la gestion des données dans un entrepôt est elle aussi développée car elle permet la gestion d'importants volumes et donc le passage à l'échelle tout en restant performante.

La quatrième et dernière partie propose différentes méthodes de recalage qui peuvent être utilisées aussi bien de manière individuelle que combinées afin de permettre de mettre en cohérence des séquences d'images distinctes (boucles, passage multi-dates, etc.) dans des contextes applicatifs différents.

Mots Clés : *photogrammétrie, véhicule de numérisation mobile, calibration intrinsèque de caméra, calibration de véhicule de numérisation mobile, compensation par faisceaux*

Title : Bundle adjustment of large blocks of panoramic images acquired by mobile mapping systems

Driven by the development and the democratization of digital globes and standard geolocation systems, land mobile 3D scanning in urban areas has grown very significantly over the past decade. The main existing locks of these systems remain, on the one hand, a precise location for various applications (urban autonomous driving, field surveying, etc.) due GPS masks and multipaths in urban canyons, and, on the other hand, the scalability of developed processes given the considerable volume of data acquired every day (several TerraBytes).

The first part of this thesis is devoted to the presentation of mobile mapping, both from the system point of view and from the application one. A detailed description of the Stéréopolis V2 system, the multi-camera mobile mapping system developed in the MATIS laboratory of the IGN (the French National Mapping Agency) and of the data used in this thesis will be presented. The image blocks that are handled in this work are composed of several hundred thousands up to one million images.

The second part deals with the calibration of the system : intrinsic camera calibration is first tackled using a panoramic-based acquisition geometry, which allows to discard network 3D metrology targets. Extrinsic image calibration vehicle is then performed for accurately determining the position and orientation of the cameras on a movable scanning device. Both procedures are detailed and compared : a so-called "off-line" procedure requiring specific acquisition with a network of metrology targets and another one called "on-line" using no specific acquisition. We show that the "on-line" method produces results similar to the "off-line" while being less sensitive to local environment variations.

The third section details the bundle adjustment process, specific to multi-camera mobile mapping system, to estimate the pose of a large number of images. Problem formulation and various use cases of the method are explained. Structuring and management of data in a warehouse are also developed since it allows to handle large data volumes and, consequently, a suitable solution for the problem upscaling while remaining efficient in terms of accuracy.

The fourth and final part offers different registration methods that can be used both individually and in a combined manner in order to enable to provide consistent sequences of images in various conditions (loops, different periods acquisition , etc.).

Keywords : *photogrammetry, mobile mapping system, camera calibration, system calibration, bundle adjustment*