Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz

(Fortsetzung der Publikationsreihe
«Astronomisch-geodätische Arbeiten in der Schweiz»)

herausgegeben von der

Schweizerischen Geodätischen Kommission
(Organ der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz)

Vierundsiebzigster Band
Volume 74

Cartographie Mobile en Temps Réel

Hervé Gontran

2008

Adresse der Schweizerischen Geodätischen Kommission:

Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
Eidg. Technische Hochschule Zürich
ETH Hönggerberg
CH-8093 Zürich, Switzerland

Internet: http://www.sgc.ethz.ch

ISBN 978-3-908440-18-5

Redaktion des 74. Bandes:
Dr. H. Gontran, Dr. B. Bürki, Prof. Dr. A. Geiger
Druck: Print-Atelier E. Zingg, Zürich

VORWORT

Mobilität steht immer wieder im Zentrum des öffentlichen Interesses, speziell wenn es um die Einschränkung des Verkehrs geht, sei es um die Anzahl der Unfälle zu reduzieren, um die Schadstoffemissionen zu limitieren oder um die Landschaft zu schützen. Alle wollen sich frei bewegen, jedoch niemand will den Verkehr in seiner Nähe haben. Besonders in der Schweiz wird versucht die Verkehrssituation ohne den Bau neuer Strassen zu verbessern. Dies bedingt jedoch, dass Verkehrsinformationen verbreitet werden und generell die Telematik ausgebaut wird.

Das von Herr Gontran realisierte kinematische Aufnahme- und Monitoringsystem gibt eine Antwort auf ein aktuelles und entscheidendes Anliegen bezüglich der Bewirtschaftung der Strasseninfrastruktur. Als Vermessungsingenieur hat seine Leidenschaft für die Informatik es ihm erlaubt verschiedene Technologien anzuwenden und zu kombinieren. Seine Kompetenz, die er mit viel Eigeninitiative und Selbständigkeit entwickelt hat, wurde von allen Mitarbeitern in unsrem Labor sehr geschätzt.

Der Autor hat gezeigt, dass er sowohl die Techniken der Lokalisierung und der Bildverarbeitung beherrscht, wie auch exzellente Kenntnisse im Umgang mit Hard- und Software hat. In allen relevanten Bereichen wurde eine adäquate Bibliographie erstellt, die als exzellente Basis für weitere Arbeiten dient und die sich für andere Wissenschaftler als nützlich erweisen wird. Die Liste der Akronyme und das Glossar sind besonders willkommen. Für jede Komponente des entwickelten Systems sind die theoretischen Grundlagen mit grosser Sorgfalt beschrieben worden, wie auch die Begründung für die Wahl der adaptierten Ausrüstung und der Software. Das Beherrschen der Prozesse ist unverzichtbar und das Fachgebiet profitiert von neuen detaillierten Erkenntnissen bezüglich den aktuellen Grenzen der neu eingesetzten Technologien.

In den letzten Jahren hat die Automobilindustrie einige Innovationen, wie beispielsweise das Erkennen vom Überqueren von durchgehenden weissen Linien, vermarktet. Alle diese Entwicklungen sind jedoch selten in wissenschaftliche Publikationen eingeflossen, was die Nützlichkeit dieser Arbeit noch erhöht.

Das System wurde schon auf Strassenabschnitten über mehrere Duzend Kilometer eingesetzt. Allerdings beschränken sich die hier im Detail präsentierten Experimente auf das Validieren der Konzepte. Das Hauptaugenmerk wurde bewusst auf wissenschaftliche und technische Aspekte gelegt. Die Installation und der Betrieb eines anspruchsvollen Systems sind nur bei intensivem Gebrauch gerechtfertigt. Im Kontext der Schweiz heisst das, dass kein einziger Kanton die kritische Grösse erreicht und dass weitere Bestrebungen nötig sind um deren Interessen zu bündeln.

Die SGK bedankt sich bei der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT) für die Übernahme der Druckkosten.

Prof. Dr. B. Merminod
Geodetic Engineering Laboratory
EPF Lausanne

Prof. Dr. A.Geiger
ETH Zürich
Präsident der SGK

PREFACE

La mobilité est une préoccupation majeure dans notre société, surtout lorsqu'il est question de restreindre le trafic automobile, que ce soit en raison des accidents qu'il provoque, pour limiter la pollution ou pour préserver le paysage. Chacun veut bouger librement, mais personne ne veut de trafic dans son voisinage. En Suisse particulièrement, le gouvernement espère contenir l'accroissement du trafic sans dérouler davantage de bitume. A cet effet, il s'appuie largement sur la diffusion de l'information routière et, de manière générale, sur le développement de la télématique.

Le système de lever cinématique réalisé par M. Gontran répond à une préoccupation actuelle et cruciale pour la gestion de l'infrastructure routière. Disposant d'une formation d'ingénieur géomètre, c'est une passion dévorante pour l'informatique qui lui a permis de maîtriser diverses technologies et de les assembler. Ses compétences développées avec beaucoup d'initiative et une très grande autonomie ont été très appréciées par tous les collaborateurs dans le cadre de nombreuses activités de notre laboratoire.

L'auteur a démontré une grande maîtrise des techniques de localisation et d'imagerie, et une excellente familiarité avec les subtilités du matériel et du logiciel informatiques. Dans tous les domaines abordés, une bibliographie pertinente est établie, qui constitue une excellente base pour la suite du travail et peut également servir à d'autres chercheurs. La liste des acronymes et le glossaire sont particulièrement bienvenus. Pour chaque composante du système développé, les fondements théoriques sont présentés avec soin, de même que la justification du choix de l'équipement et du logiciel adoptés. La maîtrise des procédés est indéniable et le domaine se trouve enrichi par un apport de connaissances précises quant aux limites actuelles d'utilisation de nouvelles technologies.

Au cours de ces dernières années, les constructeurs d'automobiles ont commercialisé certaines innovations, par exemple la détection du croisement d'une ligne blanche continue. Toutefois ces développements font rarement l'objet de publications scientifiques, ce qui renforce l'utilité du présent rapport.

Le système a déjà été utilisé pour des mandats sur des tronçons de route de plusieurs dizaines de kilomètres. Toutefois les expériences rapportées ici en détail se limitent à la validation des concepts. L'effort est sciemment porté sur les aspects scientifiques et techniques. D'autres institutions vont certainement procéder à une évaluation de la rentabilité. L'installation et l'opération d'un système sophistiqué ne se justifient que pour un usage intensif. Dans le contexte suisse, on peut dire d'emblée qu'aucun canton n'atteint la taille critique et qu'un effort est nécessaire pour fédérer leurs intérêts.

La Commission Suisse de Géodésie (CGS) est reconnaissante envers l'Académie Suisse des Sciences Naturelles (ASSN) pour avoir pris à sa charge les coûts d'impression du présent manuscrit.

Prof. Dr. B. Merminod
Geodetic Engineering Laboratory
EPF Lausanne

Prof. Dr. A.Geiger
ETH Zürich
Président de la CGS

FOREWORD

Mobility is a major matter of concern in our society, especially when a reduction in the road traffic is at stake, be it to limit the number of accidents, to fight against the pollution or to protect the landscape. Everyone wants to move freely, but nobody wants traffic along the own backyard. In Switzerland in particular, the government hopes to improve the traffic conditions without building more roads. To this end, it relies largely on the diffusion of road information and, in a general manner, on the development of telematics.

The kinematic survey system realised by Mr. Gontran brings an answer to a present and crucial concern associated with the management of the road infrastructure. Educated as a land surveyor, his strong passion for informatics has allowed him to master various technologies and to combine them. His competences, developed with much initiative and a large autonomy, have been very appreciated by all the collaborators in the scope of numerous activities of our laboratory.

The author has demonstrated a great command of the techniques for localization and imagery, as well as an excellent familiarity with the peculiarities of the computer hard- and software. In all the relevant domains, an adequate list of references has been established, which constitutes an excellent basis for the continuation of the work and which will prove useful to other researchers. The list of acronyms and the glossary are especially welcome. For each component of the developed system, the theoretical foundations are presented with care, as well as the justification of the choice of the adopted equipment and software. The mastering of the processes is beyond discussion and the domain benefits from an input of knew precise knowledge as to the present limits in the use of new technologies.

Over the last years, the automobile industry has commercialised certain innovations, for example the detection of the crossing of a continuous white line. All these developments are rarely included in scientific publications, and this reinforces the usefulness of the present report.

The system has already been used for production work, over road sections of several tens of kilometres. However the experiments reported in detail here are limited to the validation of the concepts. Purposely, the effort concentrates on the scientific and technical aspects. Other institutions will certainly assess the profitability. The installation and operation of a sophisticated system are justified only for an intensive use. In the Swiss context, one may say upfront that no single canton reaches the critical size and that some effort will be necessary to federate their interests.

The SGC is grateful to the Swiss Academy of Sciences (SCNAT) for covering the printing costs of this volume.

Prof. Dr. B. Merminod
Geodetic Engineering Laboratory
EPF Lausanne

Prof. Dr. A.Geiger
ETH Zürich
Président de la CGS

Résumé

Le développement de la télématique des transports routiers réclame une gestion d'une quantité sans cesse croissante de données rattachées à la fluidité du trafic, au suivi de fret et de flottes de véhicules, ainsi qu'à l'assistance à la conduite. Un tel effort s'appuie sur une profonde synergie des technologies de navigation, de télécommunication et d'information géographique pour une meilleure gestion de l'entretien et de l'exploitation de la voirie et, par-dessus tout, pour une sécurité renforcée.

Une connaissance précise de l'environnement routier et de la topologie des réseaux est donc indispensable au développement d'applications en télématique des transports. Depuis le début des années 90, avec les progrès réalisés dans les techniques de couplage GPS/INS et la mise sur le marché de caméras numériques abordables, une portion considérable de l'information routière est acquise lors du passage de véhicule équipés de tels capteurs, technique dénommée "mobile mapping". L'avantage de la collecte cinématique de données telles la géométrie de la chaussée, la qualité de son revêtement et la localisation des objets routiers réside en l'accomplissement beaucoup plus rapide du lever, d'où une excellente rentabilité. Cependant, la complexité du traitement des données de géoréférencement et leur fusion avec des séquences d'images requièrent de nombreuses heures de travail répétitif. Par ailleurs, seule l'issue de ce traitement témoigne de l'enregistrement correct des mesures de localisation : un éventuel retour sur le terrain ne s'envisage que plusieurs jours après le premier lever.

Nous proposons l'introduction du concept de "temps réel" dans le domaine du mobile mapping. L'exploitation déterministe de données capturées lors d'un lever cinématique vise à limiter l'intervention humaine dans un processus de géoréférencement complexe, tout en autorisant une diffusion de cette technique hors des milieux avertis. L'autre défi de cette thèse repose sur la fusion automatique d'informations de localisation et d'images, sous forte contrainte temporelle. Quels sont les outils et algorithmes suffisamment robustes pour assurer dans ces conditions le contrôle de la qualité du géoréférencement d'objets routiers ? Nous tentons d'apporter à ces préoccupations une solution pertinente, tout en démontrant le bien-fondé du concept via l'acquisition et l'interprétation automatiques de la géométrie routière.

Mots clés : Géométrie routière, lever cinématique, algorithmique déterministe, vidéogrammétrie, temps réel.

Abstract

The development of road telematics requires the management of ever-growing databases related to traffic fluidity, live consignment monitoring and vehicle fleet tracking, as to driver assistance. Such an effort relies on the tight synergy between navigation technology, telecommunication and geographic information, to enhance the maintenance and exploitation of the road network and, above all, to strengthen security.

Consequently, an accurate knowledge of the road environment and topology is mandatory to implement applications of transport telematics. The early nineties experienced major advances in GPS/INS coupling and the market launch of affordable digital cameras. Thus, a considerable portion of road information is captured by vehicles equipped with such sensors, a technique known as "mobile mapping". The advantage of the kinematic collection of data – such as the pavement geometry, its surfacing quality and the positioning of road objects – lies in the much faster completion of the survey, hence an excellent cost effectiveness. However, the complexity of data georeferencing and the fusion of the results with video sequences require numerous hours of repetitive labor. Moreover, only the process completion reveals the correct recording of position measurements. Any further survey can only be decided a few days later.

We propose to introduce the concept of "real time" in the field of mobile mapping. The determinist exploitation of the data captured during a kinematic survey aims at restricting human intervention in the sophisticated georeferencing process, while authorizing the dissemination of this technique outside well-informed communities. The other challenge of this thesis that lies in the automatic fusion of localization data with images, under tight time constraints. In these conditions, what are the tools and algorithms robust enough to ensure the quality control of the georeferencing of road objects? We intend to provide these concerns a pertinent answer, while demonstrating the validity of the concept via the automatic acquisition and interpretation of the road geometry.

Keywords: Road geometry, kinematic survey, deterministic algorithmics, videogrammetry, real time.

Table des matières

Résumé 1

Abstract 2

Table des matières 3

Liste des figures 9

Liste des tableaux 13

Chapitre I. Bases de données routières 15
I.1. Inventaire routier 15
1. Voirie routière 15
2. Gestion du patrimoine routier 15
3. Standard de base de données routières 16
3.1. Norme GDF 16
3.2. Producteurs d'informations routières 17
4. Mobile mapping terrestre 17
4.1. Concept 17
4.2. Système originel 17
4.3. Implémentations récentes 18
4.4. Limitations des systèmes actuels 19
I.2. Objectifs et motivations de la thèse 20
1. Contexte 20
2. Objectifs 20
3. Contribution de la recherche 20

Chapitre II. Temps réel 23
II.1. Notion de temps réel 23
1. Concept 23
1.1. Définition 23
1.2. Domaines classiques d'application 24
1.3. Niveaux de contraintes temporelles 24

2. Systèmes d'exploitation "temps réel" 25
2.1. Concept 25
2.2. Systèmes d'exploitation classiques et conformité "temps réel" 26
2.3. Tour d'horizon des systèmes d'exploitation "temps réel" 27
3. Linux comme système d'exploitation "temps réel" 28
3.1. Contexte 28
3.2. Linux : base d'un système "temps réel" 28
3.2.1. Amélioration de la préemption 28
3.2.2. Virtualisation des interruptions 29
3.3. Co-noyaux Linux 29
3.3.1. RTLinux et RTAI 29
3.3.2. Xenomai 30
4. Conclusion 30
II.2. Programmation pour le temps réel 31
1. Sémantique pour le temps réel 31
1.1. Approche traditionnelle 31
1.2. Scrutation et temps réel 31
2. Programmation concurrente 33
2.1. Les états d'un processus 33
2.2. Immersion de processus dans un noyau "temps réel" 34
2.2.1. Contexte d'un processus 34
2.2.2. Altération de contexte d'un processus 35
3. Communication interprocessus et temps réel 36
3.1. Sémaphores 36
3.1.1. Définition 36
3.1.2. Problématique de l'inversion de priorité 37
3.2. Boîte aux lettres 38
4. Conclusion 38
II.3. Chronométrie événementielle sur PC standard 40
1. Introduction 40
2. Étude chronométrique des systèmes d'exploitation 40
2.1. Protocole expérimental 40
2.1.1. Processeurs étudiées 40
2.1.2. Pseudo-code du test 40
2.2. Résultats chronométriques 41
2.2.1. Instructions classiques 41
2.2.2. Instructions avancées 43
2.3. Chronométrie et système "temps réel" 44
3. Remarques conclusives 44

Chapitre III. Traitement autonome de la localisation 47
III.1. GPS différentiel en temps réel 47
1. Des mesures GPS entachées d'erreur 47
2. Messages de correction GPS 49
2.1. Corrections de pseudo-distance (DGPS) 49
2.2. Corrections de phase (RTK) 49
2.3. Format de message 49
3. Conclusion 51
III.2. Diffusion de corrections GPS-RTK 52
1. Liaison radio 52
2. Réseau cellulaire 53
3. Internet 54
3.1. GPRS 54
3.2. Serveur GDGPS 55
3.3. Serveur NTRIP 56
4. Remarques conclusives 56
III.3. Serveur personnalisé de corrections GPS 57
1. Implémentation 57
1.1. Motivation 57
1.2. Prototypage du serveur relais 57
1.3. Serveur déployé 59
1.4. Test préliminaire 60
1.4.1. Qualité du réseau GSM 60
1.4.2. Serveur relais pour récepteurs immobiles 60
2. Test dynamique du serveur de corrections personnalisé 61
2.1. Protocole expérimental 61
2.2. Constatations 62
3. Interprétation 65
III.4. Localisation et orientation autonomes 67
1. Choix du circuit imprimé GPS 67
1.1. Contexte 67
1.2. Comparaison de circuits imprimés GPS 67
1.3. Stratégie GPS 69
2. Récepteur de référence mobile 69
2.1. Concept 69
2.2. Orientation partielle par GPS bi-antennes 70
2.3. Mise en oeuvre du récepteur JNSGyro-2 72
3. Conclusion 73

Chapitre IV. Traitement autonome de l'imagerie 75
IV.1. Imagerie numérique conventionnelle 75
1. Contexte 75

2. Image numérique monochromatique 75
2.1. Quantification spatiale 75
2.2. Quantification en amplitude 76
2.3. Bruit dans une image numérique 77
3. Capteurs d'image numérique 77
3.1. Capteurs à semi-conducteurs 77
3.2. Présentation des technologies CCD et CMOS 78
3.3. Comparaison des technologies CCD et CMOS 80
3.3.1. Rendement quantique 80
3.3.2. Consommation d'énergie 80
3.3.3. Bruits et courant noir 80
3.3.4. Vitesse 80
3.3.5. Éblouissement et marbrures 81
4. Conclusions 81
IV.2. Capteur d'images logarithmique CMOS 83
1. Capture numérique d'image en extérieur 83
2. Pixels logarithmiques 84
3. Caméra logarithmique CMOS 85
3.1. Caractéristiques de la matrice pixellaire 85
3.2. Contrôle de la matrice pixellaire 86
3.3. Coeur de la caméra 87
4. Images livrées par une caméra CMOS logarithmique 87
5. Conclusion 88
IV.3. Extraction d'axe routier en temps réel 90
1. Concept du traitement d'image 90
2. Algorithmes de pré-traitement 90
2.1. Rehaussement radiométrique 90
2.1.1. Modification d'histogrammes 90
2.1.2. Profil de ligne 91
2.2. Filtrage spatial 92
2.2.1. Accentuation de structure 92
2.2.2. Accentuation de contour 94
3. Segmentation d'image 95
4. Étude de librairies logicielles 97
4.1. Matrox Imaging Library 97
4.2. TLib 98
5. Remarques conclusives 99
IV.4. Calibrage de l'Ethercam 100
1. Contexte 100
2. Techniques de calibrage de caméra 100
3. Algorithme de Tsai 101
3.1. Présentation 101

3.2. Paramètres intrinsèques – de la caméra à l'image 102
3.2.1. Coordonnées du point principal 102
3.2.2. Distorsions géométriques 103
3.2.3. Rééchantillonnage horizontal des pixels 104
3.3. Paramètres extrinsèques – de la scène à la caméra 104
3.4. Algorithmique 105
3.4.1. Stratégie 105
3.4.2. Estimation de la rotation et d'une partie de la translation 105
3.5. Validation de la méthode 110
4. Conclusion 111

Chapitre V. Géoréférencement en temps réel 113
V.1. Conception de la plateforme de mobile mapping 113
1. Conception matérielle 113
1.1. Positionnement des capteurs 113
1.2. Synchronisation du système 115
1.2.1. Introduction 115
1.2.2. Implémentation matérielle 115
1.2.3. Test de synchronisation 115
2. Conception logicielle 116
2.1. Hiérarchisation des messages des capteurs 116
2.2. Routine de géoréférencement 117
2.2.1. Étape statique de géoréférencement 117
2.2.2. Étape dynamique de géoréférencement 119
2.3. Sauvegarde des données 120
3. Validation du géoréférencement 120
3.1. Contrôle de qualité en temps réel 120
3.2. Contrôle de qualité légèrement différé 120
3.2.1. Concept 120
3.2.2. Courbes splines cubiques 121
3.2.3. Qualité des points collectés 122
V.2. Exploitation de la plateforme de mobile mapping 123
1. Expérimentation statique 123
2. Expérimentation dynamique 124
2.1. Introduction 124
2.2. Protocole opératoire 125
2.3. Résultats 125

Conclusions et perspectives 127
1. Technique d'extraction d'axe routier clef en main 127
2. Vers une cartographie totale en temps réel 128

Annexe A. Transformation de coordonnées GPS 131
1. Introduction 131
2. Systèmes de référence géodésiques 131
3. Transformation entre datums 132
4. Conversion de coordonnées sur un ellipsoïde 133
5. Formules approchées de la projection suisse 134
5.1. Désignations et unités de mesure 134
5.2. Grandeurs auxiliaires 134
5.3. Calcul 134
6. Organigramme de la transformation des coordonnées GPS 135
7. Conversion d'azimut en gisement 135
7.1. Notion d'azimut et de gisement 135
7.2. Transformation d'azimut 136
7.3. Calcul de gisement 138

Annexe B. Extraits de code 139
1. Extraction des coordonnées pixel du barycentre du marquage routier 139
2. Géoréférencement du barycentre d'une marque de route 142

Annexe C. Intensité du signal GSM 145

Glossaire 147

Bibliographie 155

Liste des figures

Figure I-1.1 Système de repérage curviligne pour des données routières (source TOPO)

Figure I-1.2 Plateformes de mobile mapping

Figure I-2.1 Modules actifs de sécurité automobile (source Visteon)

Figure II-1.1 Concept de système "temps réel"

Figure II-1.2 Plateforme "temps réel" enfouie d'un ascenseur

Figure II-1.3 Architecture multicouche d'un système "temps réel"

Figure II-2.1 Boucle de scrutation – Pseudo-code C/C++

Figure II-2.2 Implémentation typique d'une tâche – Pseudo-code C/C++

Figure II-2.3 États d'un processus

Figure II-2.4 Changement de contexte et exploitation du noyau "temps réel"

Figure II-2.5 Partage de ressources sans et avec sémaphore

Figure II-2.6 Scénario de l'inversion de priorité

Figure II-2.7 Diagramme temporel d'exécution du scénario

Figure II-2.8 Approche "temps réel" liminaire du géoréférencement automatique

Figure II-3.1 Pseudo-code C/C++ de l'analyse d'horloge

Figure II-3.2 Performances du chronomètre clock() de Windows

Figure II-3.3 Comportement du chronomètre time() de Linux

Figure II-3.4 Performances du chronomètre QueryPerformanceTimer

Figure II-3.5 Comportement du chronomètre clock_gettime

Figure II-3.6 Notre approche finale du géoréférencement automatique

Figure III-1.1 Sources de dégradation d'une localisation par GPS

Figure III-2.1 Liaison radio au service de GPS-RTK

Figure III-2.2 Diffusion de corrections GPS via GSM

Figure III-2.3 Module GSM/GPRS GM862-PYT

Figure III-2.4 Système GDGPS de la NASA

Figure III-2.5 Architecture NTRIP

Figure III-3.1 Prototype de serveur personnalisé de corrections GPS

Figure III-3.2 Apprentissage des adresses IP routables des modules GPRS

Figure III-3.3 Stockage de coordonnées GPS dans une base de données MySQL

Figure III-3.4 Évolution de la puissance du signal GSM en milieu défavorable

Figure III-3.5 Trajectographies issues du système NTRIP et du serveur personnalisé

Figure III-3.6 Comparaison de trajectographies pour un virage serré

Figure III-3.7 Fiabilité de la trajectographie basée sur un serveur de corrections RTK

Figure III-3.8 Écart avec la distance nominale inter-antenne pour le trajet de 30 km

Figure III-4.1 Influence du choix du circuit imprimé GPS sur la poursuite du signal

Figure III-4.2 Circuit imprimé Euro-GDA

Figure III-4.3 Concepts simple et amélioré de "RTK à base mobile"

Figure III-4.4 Écarts entre attitudes théorique et calculée d'un véhicule

Figure IV-1.1 Passage d'une image analogique à une image numérique

Figure IV-1.2 Gamme dynamique d'une caméra

Figure IV-1.3 Technologies CCD et CMOS

Figure IV-1.4 Éblouissement et marbrure d'images issues d'un capteur CCD

Figure IV-1.5 Capteur CCD contre CMOS

Figure IV-2.1 Scène routière mêlant ombre et lumière solaire directe

Figure IV-2.2 Sensibilité de photodétection du capteur Pupilla

Figure IV-2.3 Schéma de principe de la caméra logarithmique CMOS

Figure IV-2.4 Interaction client/serveur entre l'Ethercam et son ordinateur hôte

Figure IV-2.5 Captures d'une scène présentant une gamme dynamique étendue

Figure IV-3.1 Histogrammes de saisies de chaussée

Figure IV-3.2 Profil de ligne pour une capture de la chaussée routière

Figure IV-3.3 Calcul du niveau de gris médian au voisinage d'un pixel

Figure IV-3.4 Application de filtres morphologiques sur une marque routière

Figure IV-3.5 Détection de contour par des filtres de noyau matriciel simple

Figure IV-3.6 Performances de la reconnaissance de motifs MIL

Figure IV-4.1 Le modèle de Tsai

Figure IV-4.2 Principaux types de distorsion

Figure IV-4.3 Détection automatique des cibles de calibrage

Figure IV-4.4 Évaluation des performances de l'algorithme de Tsai

Figure V-1.1 Trace au sol de la matrice pixellaire inclinée de 10°

Figure V-1.2 Châssis pour capteurs de mobile mapping

Figure V-1.3 Code Python d'une génération de tension créneau via DTR

Figure V-1.4 Synchronisme des signaux émergeant du module VNR-SA

Figure V-1.5 Passage des coordonnées nationales aux coordonnées bus

Figure V-1.6 Repères impliqués dans la procédure de géoréférencement

Figure V-1.7 Échantillonnage de points de contrôle et restitution optimale d'axe

Figure V-1.8 Détection des défauts de géométrie routière

Figure V-2.1 Test statique de saisie automatique sur un parking de l'EPFL

Figure V-2.2 Expérimentation cinématique au Motty

Figure V-2.3 Odomètre Alfa EZ Pulse

Figure V-2.4 Évolution des indicateurs DOP lors du test cinématique au Motty

Figure C-1 Scanner Laser SICK

Figure A-1 Système conventionnel de coordonnées

Figure A-2 Coordonnées géocentriques et ellipsoïdiques

Figure A-3 Passage des coordonnées WGS 84 aux coordonnées suisses

Figure A-4 Azimut et gisement

Figure A-5 Repère géocentrique cartésien et repère NEB

Liste des tableaux

Tableau II-1.1 Plateformes "temps réel"

Tableau II-3.1 Test de latence d'une tâche "temps réel" sur Xenomai

Tableau III-2.1 Portée des liaisons radio

Tableau III-4.1 Indice de qualité angulaire pour une distance inter-antennes de 2.915 m

Tableau IV-1.1 Les contributions à la variance du bruit dans une image numérique

Tableau IV-2.1 Caractéristiques optoélectroniques du capteur Pupilla

Tableau IV-2.2 Relation entre zone d'intérêt pixellaire et fréquence d'image

Tableau IV-3.1 Noyau matriciel du filtre moyen

Tableau IV-3.2 Noyaux matriciels de filtre gradient

Tableau IV-3.3 Noyaux matriciels de la dérivation seconde et du laplacien

Tableau IV-3.4 Méthodologie d'extraction automatique d'axe routier

Tableau A-1 Caractéristiques de l'ellipsoïde Bessel 1841

Tableau A-2 Caractéristiques de l'ellipsoïde GRS 80

Tableau B-1 Correspondance entre valeur <rssi> et intensité du signal cellulaire reçu

Chapitre I Bases de données routières

I.1 Inventaire routier

1 Voirie routière

La route assure la desserte des riverains et permet la majorité des déplacements terrestres – à pied, en deux roues, en voiture, en transport en commun – ainsi que l'acheminement des marchandises. Il s'agit donc d'un facteur de développement économique essentiel, autour duquel gravitent trois préoccupations intéressantes où la cartographie et le géoréférencement sont déterminants :

- la géométrie routière, que le concepteur de route utilise pour positionner ou reconstituer les éléments caractéristiques d'un tracé tels les alignements, les courbes et les raccordements progressifs,
- l'état structurel et fonctionnel des chaussées d'un réseau, que le gestionnaire routier consigne dans une base de données établie et maintenue par ses soins,
- l'amélioration de la circulation, que l'ingénieur routier met en oeuvre via des disciplines telles la télématique, l'assistance à la conduite et l'implémentation de véhicules intelligents au service de la sécurité.

La méthodologie proposée se concentrera sur les deux premières nécessités.

2 Gestion du patrimoine routier

Les collectivités territoriales consacrent une portion considérable de leur budget au patrimoine routier, dont la valeur actuelle atteint 40 milliards de francs pour les seules autoroutes (source OFROU$^{\diamond}$,2005). L'expérience montre que les frais d'entretien et d'exploitation tendent à croître annuellement en raison de l'augmentation du trafic, du vieillissement des routes et des installations techniques, ainsi que de l'affermissement de la loi sur la protection environnementale. Il est par conséquent nécessaire d'exploiter le réseau routier existant de manière optimale, ne serait-ce que pour des raisons de sécurité.

Dans cette optique, les gestionnaires routiers inventorient les données nécessaires dans un système de repérage curviligne dont la route constitue l'axe de mesure, approche correspondant aux habitudes et aux méthodes de travail des professionnels de la voirie (mesures à la roue d'arpentage, voire au pas). Un tel système de repérage est matérialisé

via une origine et des marques-repères peintes tous les 250 m à même la chaussée (figure I-1.1).

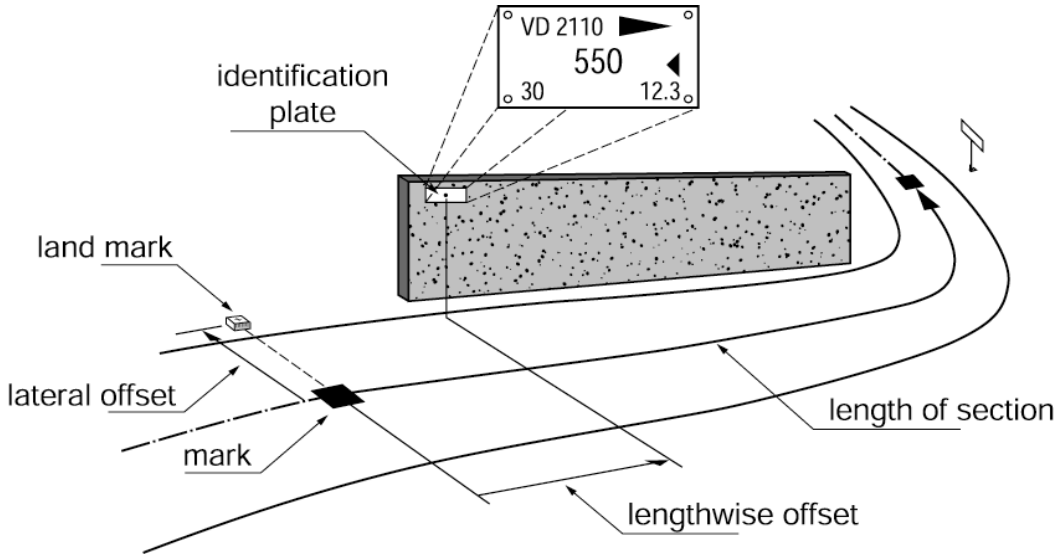


Figure I-1.1. Système de repérage curviligne pour des données routières (Source : TOPO)

Bien que les logiciels récents de système d'information géographique permettent de gérer simultanément des systèmes de coordonnées curvilignes – le long d'un axe routier – et cartésien – dans un plan de projection, une définition très précise de la géométrie des voies dans ces deux repères est nécessaire.

3 Standard de bases de données routières

3.1 Norme GDF

A l'instar de l'infrastructure américaine d'informations spatiales (NDSI◊), la norme de fichiers géographiques GDF◊ constitue un standard européen formalisant la description et le transfert de données relatives au réseau routier et à son environnement. Définissant des règles sur la capture et la caractérisation de données (ISO/TC 204, 2000), GDF s'est rapidement propagé de son univers originel de navigation pour les voitures à des applications relatives au trafic telles :

- la gestion de flotte de véhicules,
- l'organisation de la répartition de la circulation,
- et la localisation automatique de véhicules.

Ce cadre normatif appelle une appréhension pertinente de la géométrie des voies, d'autant plus que les principaux fournisseurs de données routières (Navteq et TeleAtlas) encouragent le standard GDF en bâtissant leurs propres bases de données sur ce modèle.

3.2 Producteurs d'informations routières

La mise à jour de l'inventaire routier, tout comme la popularisation des systèmes de navigation embarqués, réclame le développement d'une cartographie routière compatible avec une norme GDF facilitant l'interaction entre les différents acteurs de la communauté automobile. Or, seule une information solide permet aux gestionnaires de voirie d'évaluer la qualité de leur réseau et, actuellement, les techniques traditionnelles d'extraction routière à grande échelle ne répondent pas totalement à leurs attentes. La télédétection satellitaire et la photogrammétrie aérienne sont certes des techniques rentables (Caloz et Collet, 2001). Malheureusement, la première technique offre généralement une empreinte pixellaire au sol (GSD◊) supérieure à 5 m, insuffisante pour les applications routières. D'autre part, la seconde, atteignant une précision décimétrique, ne fournit qu'une information partielle en raison de son point de vue nadiral.

Le début des années 90 connut un progrès substantiel dans le couplage GPS/INS, suivi du lancement sur le marché de caméras numériques abordables et de qualité satisfaisante. Ceci a rendu possible l'acquisition d'une quantité significative de données routières via des véhicules équipés d'outils de navigation et d'acquisition vidéo (Ellum et El-Sheimy, 2002). Les systèmes terrestres de mobile mapping furent conceptualisés et Navteq ainsi que TeleAtlas utilisent quotidiennement cette technologie.

4 Mobile mapping terrestre

4.1 Concept

L'approche traditionnelle du lever de données routières repose sur des mesures statiques discrètes pour déterminer la position des détails d'intérêt. Dans l'approche cinématique inhérente au mobile mapping terrestre, des capteurs d'imagerie enregistrent les éléments visibles le long d'une voie à partir d'un véhicule mobile, dont la position est fournie par des capteurs de navigation. Idéalement, les enregistrements sont utilisés pour former un modèle tridimensionnel continu de la voie à partir duquel les points d'intérêt sont stockés puis extraits dans un système d'informations géographiques 3D (Schwarz et al. 1993).

4.2 Système originel

Débutant avec le développement du système mobile d'inventaire autoroutier MHIS◊ au Canada et aux États-Unis, le lever à partir d'une plateforme itinérante est devenu de plus en plus sophistiqué et arrive au point de concurrencer les méthodes topométriques classiques en précision, tout en les surpassant allègrement au niveau de la productivité. Ce système préliminaire offre des capacités embryonnaires de géoréférencement, en utilisant des gyroscopes, des accéléromètres et des odomètres pour déterminer la position du véhicule, ainsi que des caméras vidéo pour documenter les caractéristiques de la

voirie. La précision de localisation de MHIS est faible et l'imagerie n'est exploitée qu'en tant qu'enregistrement visuel des objets routiers.

4.3 Implémentations récentes

A la fin des années 80, la méthode GPS◊ est employée pour affiner la localisation d'un système de mobile mapping, tandis qu'un système inertiel fournit des paramètres précis pour l'orientation de la caméra, tout en palliant les pertes de signaux satellitaires. Dès lors, une localisation d'un véhicule roulant à 70 km/h est possible avec un écart-type de 20 cm (Lapucha, 1990).

Un autre pas majeur est accompli lorsque l'information contenue dans l'imagerie vidéo est incorporée dans le processus de mesure. L'idée naît au centre de cartographie de l'université de l'Ohio avec le GPSVan (Goad, 1991) introduisant le post-traitement d'images numérisées de données routières. Par ailleurs, l'éventuelle disponibilité d'images d'un même objet sous différents angles autorise le calcul de sa position 3D par rapport à la caméra. Tant que la distance entre l'objet et la caméra est courte, le GPSVan fournit une localisation dans le système de référence caméra avec une précision décimétrique. Malheureusement, l'utilisation de mesures GPS différentielles code ne permet qu'une précision absolue de 1 à 3 m. Les implémentations récentes de systèmes de mobile mapping telles KiSS (Sternberg, 2002), GI-EYE (Boid et al., 2001) et VISAT (El-Sheimy, 2005) utilisent des mesures GPS phase bi-fréquence, des centrales inertielles de haute précision, et des techniques de traitement sophistiquées (figure I-1.2). Certains auteurs remplacent les caméras numériques par des télémètres laser rotatifs (Li et al., 1999).

Nom	*Développeur*	*Capteurs de localisation*	*Capteurs vidéo*
GPSVan (1991)	OSU		
Visat	UofC		
KiSS	UniBw München		
GI-EYE	NAVSYS		

Récepteur GPS de navigation

Récepteur GPS géodésique L1/L2

Gyroscope bas de gamme

Odomètre

Centrale inertielle bas de gamme

Centrale inertielle haut de gamme

Caméra VHS

Caméra CCD

Figure I-1.2. Plateformes de mobile mapping

4.4 Limitations des systèmes actuels

Néanmoins, quels que soient les capteurs utilisés, la majorité des auteurs reconnaît une dégradation de la précision de leur système de mobile mapping engendrée par la latence du système d'exploitation utilisé et les problèmes de synchronisation qui en résultent. En outre, la complexité du traitement des données de géoréférencement et leur fusion avec des séquences d'images requièrent de nombreuses heures de travail répétitif. Par ailleurs, seule l'issue de ce traitement témoigne de l'enregistrement correct des mesures de localisation : un éventuel retour sur le terrain ne s'envisage que plusieurs jours après le premier lever. Les solutions de mobile mapping actuelles demeurent par conséquent l'affaire de spécialistes, et la majorité n'offre qu'une précision planimétrique d'un demi-mètre.

I.2 Motivation de la thèse

1 Contexte

Nous avons vu que les bases de données routières sont au coeur d'applications fondamentales de la télématique des transports. La géométrie de la voirie y joue un rôle prépondérant en tant que prérequis à une gestion saine de la route et à une assistance fiable à la conduite. Sa qualité requiert donc un contrôle attentif tant au niveau de l'acquisition qu'à celui de l'exploitation.

2 Objectifs

Nous souhaitons offrir aux propriétaires et exploitants d'un réseau routier une méthodologie de localisation simple et précise de la ligne centrale de la chaussée. Dans cette optique, une technique de localisation "temps réel" par GPS différentiel phase sera couplée à une reconnaissance optique de marquage routier. Nous minimiserons la sollicitation de l'alimentation électrique du véhicule embarquant les capteurs impliqués en renonçant à un éclairage artificiel de la chaussée ainsi qu'à l'utilisation de plusieurs stations de calcul. Un prototype confirmera et démontrera la faisabilité du concept.

3 Contribution de la recherche

Des systèmes de mobile mapping peuvent acquérir l'axe central de la chaussée en offrant une productivité élevée grâce à la combinaison d'outils de navigation et d'imagerie numérique. Néanmoins, de telles plateformes, dont la mise en oeuvre est une affaire de spécialistes, imposent un investissement financier considérable, aux niveaux humain et matériel. En effet, l'extraction des éléments d'intérêt des captures vidéo est majoritairement manuelle et le contrôle qualité des données issues d'un système de mobile mapping reste tributaire du post-traitement.

Idéalement, un traitement en temps réel des informations capturées par lever cinématique vise à limiter l'intervention humaine dans un processus de géoréférencement complexe, tout en autorisant une diffusion de cette technique hors des milieux avertis. Tel est le défi de cette thèse, qui repose sur la fusion automatique d'informations de localisation et d'images, sous forte contrainte temporelle. Nous évaluons des outils suffisamment robustes pour assurer le contrôle de la qualité du géoréférencement d'objets routiers dans ces conditions.

Nous répondons à ces interrogations via une démarche originale de diffusion de la cartographie mobile par une algorithmique "temps réel", au sens informatique de déterminisme et non au sens commun d'immédiateté. Dans ce cadre, nous nous efforçons d'assurer un géoréférencement des objets d'intérêt avec une précision subdécimétrique via des informations issues de capteurs standard et exploitées par des logiciels libres, ce qui facilitera un éventuel transfert de technologie. Nous démontrons le bien-fondé du concept par l'acquisition et l'interprétation automatiques de la géométrie routière. A terme, le système développé pourra servir de base à une méthode conviviale et abordable d'auscultation, et dont l'utilisation aisée serait appréciée des gestionnaires de voirie pour mener leur propre contrôle des informations géographiques qui leur sont soumises.

Notre propos s'articule donc autour des thématiques suivantes :

- la notion d'algorithmique "temps réel" et ses implications dans le choix d'un système d'exploitation optimisant le géoréférencement automatique. Une évaluation des caractéristiques des horloges logicielles disponibles nous mène à l'intégration de capteurs intelligents pour alléger la charge de calculs de l'ordinateur hébergeant un logiciel déterministe de mobile mapping.
- la localisation autonome, via l'exploitation d'un capteur GPS bi-antennes, bi-fréquences alimenté par un serveur de corrections différentielles. Cela favorise une localisation immédiate et de haute précision de la plateforme de géoréférencement mobile.
- l'adoption d'une caméra adaptée à la capture de scènes d'extérieur, assortie à des algorithmes de traitement automatique d'imagerie vidéo, pour une localisation et une identification optimales de l'axe routier.
- des tests statique et dynamique sur le terrain pour valider notre algorithmique, avec l'élaboration de contrôles qualité en temps réel et légèrement différé. Des remarques conclusives étendront le champ d'investigation de ce travail.

Chapitre II Temps réel

II.1 Notion de temps réel

1 Concept

1.1 Définition

La littérature qualifie un système de "temps réel" lorsque l'information qu'il acquiert et traite demeure fidèle à l'environnement spatio-temporel de sa capture. Cela signifie que pour des données atteignant un dispositif de calcul à un rythme régulier, les temps d'acquisition et de traitement doivent rester inférieurs à la période de rafraîchissement de ces données. Or, des capteurs de localisation et d'imagerie génèrent un tel type de flux périodiques vers l'ordinateur chargé de gérer un système de mobile mapping. Il a donc paru opportun d'étendre le champ de nos investigations aux systèmes automatiques en temps réel ou, selon Abbott (2003), à l'art de concevoir des plateformes informatiques qui satisfont de manière fiable des contraintes temporelles en présence d'événements aléatoires asynchrones (Figure II-1.1).

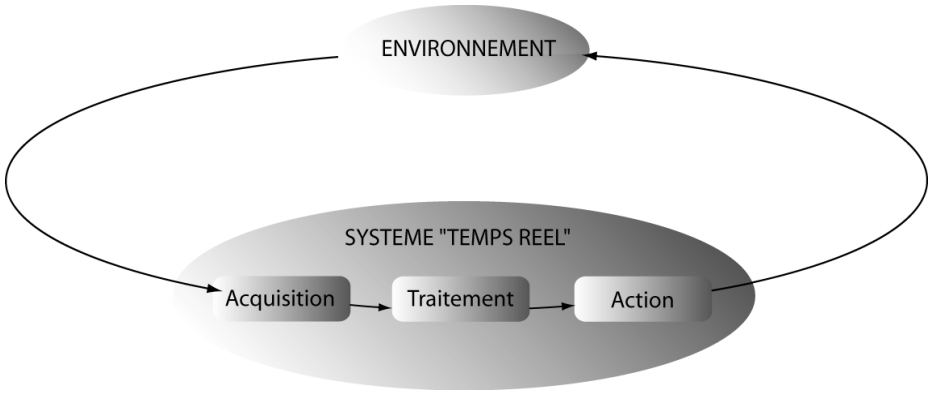


Figure II-1.1. Concept d'un système "temps réel"

Au sens strict, la programmation "temps réel" implique le développement d'un logiciel garantissant la réponse à toute sollicitation environnementale dans un délai spécifié. Un tel logiciel, dit événementiel◊, se caractérise en des termes de latence, à savoir un intervalle temporel borné par l'arrivée d'un événement et la réaction déclenchée par le système informatique. Ainsi, la puissance calculatoire d'un ordinateur ne garantit pas la fonctionnalité "temps réel" d'un programme, car la prédictibilité de la réponse à des événements importe plus que sa rapidité.

Deux contraintes caractérisent un système "temps réel", à savoir : l'exactitude logique, assurant le comportement désiré pour le système suite aux événements et aux données communiqués, l'exactitude temporelle, satisfaisant les contraintes temporelles par présentation des sorties au moment opportun.

1.2 Domaines classiques d'application

Les systèmes "temps réel", combinaisons dynamiques de capteurs et d'applicatifs logiciels, font partie intégrante de notre quotidien rythmé par le respect de contraintes temporelles sans lesquelles des risques majeurs d'accident surviendraient. Même en excluant les fonctions de contrôle-commande de processus industriels des réacteurs nucléaires, les plateformes "temps réel" veillent en permanence à notre sécurité par leur présence dans :

- le domaine des transports via le contrôle de vol, de systèmes de freinage ABS, et de circulation des trains,
- le domaine de la navigation, tous types de véhicules confondus,
- le domaine de la médecine (imagerie et traitement).

Zaffalon et Breguet (2003) isolent des processus "temps réel" omniprésents pour qui le non-respect des contraintes temporelles occasionne uniquement des désagréments mineurs, dont l'impatience de l'utilisateur. Se distinguent, entre autres,

- les procédures de relais des centraux téléphoniques et audiovisuels,
- les mécanismes de contrôle des ascenseurs et des élévateurs (Figure II-1.2),
- l'interface utilisateur des téléphones portables.

Figure II-1.2. Plateforme "temps réel" enfouie◊ d'un ascenseur

1.3 Niveaux de contraintes temporelles

Une tâche "temps réel" se différencie d'un mécanisme ordinaire par l'existence d'une échéance. La communauté de l'automatique différencie le temps réel dur ou strict du temps réel mou ou souple suivant l'importance accordée aux contraintes temporelles. La première catégorie ne tolère aucun dépassement des échéances, ce qui sous-entend une

gestion stricte du temps pour conserver l'intégrité◊ du système rendu. Elle répond à trois critères fondamentaux :

- le déterminisme logique selon lequel les mêmes entrées appliquées au système doivent produire les mêmes effets,
- le déterminisme temporel impliquant un temps maximum d'exécution pour chaque tâche,
- la disponibilité, à savoir la propriété d'un système informatique capable d'assurer ses fonctions sans interruption, délai ou dégradation, au moment même où la sollicitation en est faite.

La deuxième catégorie accepte des variations dans le traitement des données de l'ordre de la seconde et ne garantissent qu'un temps moyen d'exécution pour chaque tâche. Le respect de planification des activités y apparaît donc comme un objectif louable, non comme une exigence absolue. Lors du dépassement d'une échéance, un système "temps réel" souple voit simplement ses performances se dégrader, sans conséquences dommageables.

Nos investigations impliquent un véhicule embarquant une plateforme de cartographie pour la capture de la chaussée routière à un rythme imposé par son capteur vidéo, généralement 10 images par seconde. Sachant que la vitesse usuelle (70 km/h) implique une distance inter-images de 3.5 m, le non-géoréférencement d'une image n'altère pas significativement la modélisation de l'axe routier. En revanche, si nous souhaitons étendre les fonctionnalités du système, typiquement à la détection de la signalisation au sol ou verticale, l'information de toute image saisie devient pertinente, si bien que nous orienterons notre développement vers un applicatif "temps réel" dur.

2 Systèmes d'exploitation "temps réel"

2.1 Concept

Nous avons vu qu'un système "temps réel" associe un matériel scrutant l'environnement à une couche logicielle qui gère, entre autres, des ressources matérielles adéquates au respect des contraintes temporelles. La partie du logiciel dévolue à cette administration de ressources constitue le système d'exploitation◊ ou noyau "temps réel", offrant des services aux logiciels d'application en fonction de la disponibilité du matériel (figure II-1.3).

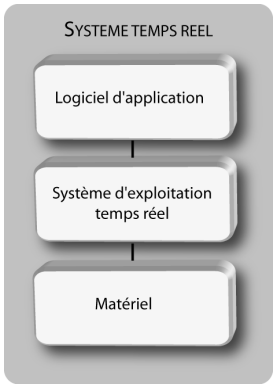


Figure II-1.3. Architecture multicouche d'un système "temps réel"

2.2 Systèmes d'exploitation classiques et conformité "temps réel"

La conception des systèmes d'exploitation (SE) classiques tels Linux◊ et Windows◊ repose sur l'adaptabilité du produit offert à des tâches diverses en environnement multiutilisateur. Elle implique une maximisation du volume moyen d'informations traitées au détriment de la latence, ce qui s'oppose aux spécifications d'une plateforme "temps réel". Voici une énumération des incompatibilités, basée sur les propositions d'Abbott (2003).

- Non-préemption◊ des tâches exécutant des instructions du noyau◊.

Un processus accaparant le cœur d'un système d'exploitation classique ne cède le temps de l'unité centrale qu'au terme de son exécution. Un événement matériel est donc traité seulement si le noyau est disponible, ce qui signifie des réactions aux signaux des périphériques généralement retardées de plusieurs dizaines de millisecondes.

- Utilisation de mémoire virtuelle.

Tout SE classique exécute en permanence un processus gérant un fichier d'échange sur le disque dur. Ce phénomène, dénommé "pagination", constitue un palliatif à l'insuffisance de mémoire vive de l'ordinateur hôte. Or, il n'existe actuellement aucun moyen de prédéterminer la durée de rapatriement du contenu de la mémoire paginée, d'où l'impossibilité de borner temporellement ce processus hautement sensible aux erreurs de lecture.

- Planification équitable.

Multiutilisateur par convention, Windows ou Linux attribuent un même poids à toutes les tâches. Aussi leur ordonnanceur peut-il accorder l'attention du processeur à une activité de faible priorité demeurée longtemps en suspens alors qu'un processus fondamental est prêt à l'exécution.

- Réorganisation des requêtes.

Un SE classique réordonnance les requêtes d'entrée-sortie afin d'optimiser les échanges avec le matériel. Par exemple, une lecture de bloc mémoire de disque dur, requise par une tâche de basse priorité, peut obtenir préséance sur un processus hautement

prioritaire. Cette organisation se justifie ici par la minimisation du mouvement des têtes de lecture du disque, voire la récupération d'une erreur.

- Traitement par lots.

Cette opération vise à l'utilisation efficace des ressources, notamment en cas de saturation de la mémoire du système. Dans ce cas, au lieu de libérer les blocs mémoires un par un, le système d'exploitation traite l'ensemble des instructions résidant dans la mémoire paginée, puis libère autant de blocs que possible : l'exécution de tous les processus s'en trouve ralentie.

2.3 Tour d'horizon des systèmes d'exploitation "temps réel"

D'après la section 2.1, un système d'exploitation "temps réel" constitue une interface périphériques/logiciels pouvant gérer une surcharge événementielle liée à un environnement matériel partiellement déterministe. Son usage requiert donc un effort conceptuel basé sur la prédictibilité de l'ordonnanceur incorporé et des messages des capteurs. La tolérance aux fautes de programmation et la facilité de maintenance constituent des arguments de choix pour la sélection du système d'exploitation dédié à notre plateforme de cartographie mobile. Le tableau II-1.1 offre un tour d'horizon de plateformes "temps réel" populaires.

Système	*Concepteur*	*Fonctionnalités*	*Remarques*
VxWorks	Wind River	Fiabilité éprouvée et faible empreinte mémoire	Large diffusion dans le milieu industriel
QNX Neutrino	QNX Software Systems	Développement accéléré d'applications	Sémantique de programmation non standard
Windows Mobile	Microsoft	Légères instabilités	Cantonnement à l'équipement d'assistants personnels
LynxOS RTOS	Lynux Works	Conformité à la norme POSIX	Compatibilité avec les exécutables Linux

Tableau II-1.1. Plateformes "temps réel"

Le laboratoire de topométrie dispose de deux systèmes d'exploitation commerciaux – VxWorks et QNX – consacrés à la collecte de données inertielles. Toutefois, leur usage s'avère réservé à des architectures spécifiques à la connectivité insuffisante pour la collecte simultanée d'informations de localisation et d'imagerie. En fait, les systèmes d'exploitation présentés dans le tableau ci-haut exhibent des défauts fort contraignants liés à leur stratégie propriétaire.

3 Linux comme système d'exploitation "temps réel"

3.1 Contexte

Un système d'exploitation "temps réel" résulte souvent des efforts d'une société de taille moyenne, qui peine à suivre l'évolution technologique (Kadionik, 2006). L'évolution du matériel informatique est rapide, la vie d'un processeur ne s'étale que sur une vingtaine de mois. Les normes logicielles suivent cette règle tandis que des appareils sans cesse plus nombreux requièrent l'intégration de composants issus de l'informatique domestique ou multimédia. Il en résulte que les coûts de licence et de redistribution des architectures "temps réel" sont parfois très élevés, car leur concepteur valorise sa position sur un marché de niche où le client estime le logiciel par sa fonction finale, non par sa valeur.

Une suite bureautique est en interaction graphique permanente avec son utilisateur, rendant celui-ci relativement sensible à la pression commerciale des mises à jour. A l'inverse, un système "temps réel" est généralement enfoui, si bien que l'usager sera moins enclin à réclamer leur modernisation. Ainsi, ce type de plateforme se caractérise par une durée de vie très élevée, induisant une compatibilité avec des composants et des processeurs obsolètes. Les outils de développements propriétaires sont donc généralement mal connus, et le nombre réduit de candidats programmeurs occasionne des offres de formation très onéreuses.

Cela implique un ensemble de spécificités guère supportables pour la gestion globale des outils informatiques d'une unité académique ou industrielle.

3.2 Linux : base d'un système "temps réel"

En tant que système d'exploitation classique, Linux n'est pas nativement un système d'exploitation déterministe et son noyau repose sur le concept de temps processeur équitablement partagé. Cependant, le code source librement accessible a permis à la communauté de l'automatique de rendre le cœur de Linux compatible avec les contraintes temporelles spécifiques aux fonctionnalités "temps réel".

3.2.1 Amélioration de la préemption

Cette approche repose sur une modification directe du noyau Linux en vue d'une réactivité accrue. L'introduction de points de préemption supplémentaires dans le noyau ainsi qu'une gestion modifiée des événements signalés par le matériel réduisent significativement la latence de la machine. Nos expériences prouvent que la gestion améliorée de la priorité des processus entraîne une diminution de 90% de l'attente des tâches fondamentales pour obtenir la réaction du processeur. Par ailleurs, les applications "temps réel" implémentées dans ce cadre partagent les mêmes interfaces et espace mémoire que les logiciels Linux standard, ce qui nous conduit à un développement dans un environnement familier.

Néanmoins, cette stratégie s'accompagne d'inconvénients majeurs :

- une modification majeure du noyau Linux ne garantit plus l'intégrité de l'ensemble des modules qui le composent,
- la latence est certes réduite, mais trop de chemins d'exécution persistent dans le noyau pour autoriser une analyse détaillée du déterminisme.

3.2.2 Virtualisation des interruptions

L'approche alternative consiste en l'établissement d'une frontière stricte entre les éléments déterministes et ordinaires d'un système "temps réel". Cette technique force l'exécution de Linux comme tâche de priorité minimale sous un noyau déterministe de faible empreinte mémoire. Dans ce cadre, les fonctions "temps réel" sont invoquées par des tâches de première importance tournant dans le nouvel espace noyau complètement préemptible, tandis que les tâches traditionnelles telles la gestion du graphisme, des fichiers et du réseau, sont confiées à Linux.

Pop (2006) qualifie une telle démarche de virtualisation des interruptions◊, dans la mesure où le noyau "temps réel" intercepte les commandes matérielles régissant le comportement du processeur, puis les propage à Linux. Significativement plus simple que le cœur Linux original, le noyau déterministe se prête à une analyse de temps d'exécution livrant des bornes supérieures fiables à la latence des processus.

L'exécution des tâches "temps réel" dans l'espace noyau garantit une réactivité accrue du système, de l'ordre de 10 microsecondes. Toutefois, l'espace mémoire du noyau ne dispose d'aucune protection, si bien qu'un processus préemptif mal programmé peut entraîner une panne de la plateforme.

3.3 Co-noyaux Linux

3.3.1 RTLinux et RTAI

Le co-noyau◊ Real-time Linux (RTLinux) représente l'implémentation originale de la virtualisation des interruptions. Développée à l'Institut Technologique des Mines du Nouveau Mexique, cette solution Linux déterministe offre une interface de programmation standardisée pour les processus "temps réel" et ordinaires, ces deux catégories de tâches se voyant attribuer des facultés d'intercommunication via une mémoire partagée FIFO◊. Maintenue par la société commerciale FSMLabs, la version propriétaire de RTLinux jouit d'une réputation de stabilité et de notoriété. En revanche, sa contrepartie libre demeure significativement en retrait, tant au niveau de la compatibilité avec les nouveaux noyaux que de la documentation.

De plus, un brevet logiciel (Yodaiken, 2001) en restreint considérablement l'exploitation hors droits par :

- l'utilisation exclusive de logiciels GNU/GPL, excluant toute interaction avec des logiciels propriétaires ou sous licence libre BSD ou Apache,
- l'usage d'une version non modifiée de RTLinux.

Le noyau auxiliaire Real-Time Application Interface (RTAI) dérive de l'adaptation des premières versions de RTLinux par le Département d'Ingénierie Aérospatiale de l'Ecole Polytechnique de Milan. Bénéficiant d'une meilleure compatibilité avec les noyaux Linux actuels, RTAI offre les mêmes fonctionnalités que son parent, et se conçoit comme une défense contre le brevet logiciel de FSMLabs.

3.3.2 Xenomai

Le projet Xenomai, en pleine expansion depuis 2005, incorpore une couche originale de virtualisation des ressources – ADEOS "Adaptive Domain Environment for Operating Systems" – pour conserver toute latitude de développement vis-à-vis de FSMLabs. Cette couche logicielle autorise une cohabitation concurrentielle entre :

- un noyau Linux récent, donc garant d'une compatibilité étendue avec la majorité des périphériques disponibles sur le marché,
- un micro-noyau déterministe, utilisant les interfaces de programmation des systèmes d'exploitation "temps réel" les plus répandus (cf. Tableau II-1.1).

Par ailleurs, Xenomai introduit un environnement de développement convivial à l'opposé de ces prédécesseurs, en garantissant une exécution performante des processus "temps réel" dans l'espace mémoire traditionnellement manipulé par l'utilisateur. Ce dernier est donc autorisé à intégrer un processus déterministe dans un programme Linux multitâche standard, si bien que la fiabilisation d'une tâche "temps réel" est désormais accessible via un débogueur classique comme GDB◊.

4 Conclusion

Un système d'exploitation "temps réel" est nécessaire à la mise en œuvre d'une application déterministe, seule implémentation logicielle satisfaisant aux contraintes temporelles liées au géoréférencement instantané d'images issues d'une caméra mobile. Les plateformes "temps réel" propriétaires se révèlent un investissement peu pertinent en milieu académique. En effet, le projet libre Xenomai en fournit les interfaces de programmation, tout en autorisant un codage Linux dans l'espace mémoire standard. Nous utiliserons donc cet environnement pour l'implémentation d'une architecture déterministe de mobile mapping, dont la section suivante présente la sémantique.

II.2 Programmation pour le temps réel

1 Sémantique pour le temps réel

1.1 Approche traditionnelle

La programmation associée au temps réel composa longtemps avec l'heuristique, une méthode de recherche empirique fondée sur l'approche progressive d'un problème donné, en vue d'en trouver la solution. La vérification a priori du respect des contraintes temporelles était utopique, vu l'absence de méthodologie et d'outil spécifiques (Jonsson, 1997). Autrement dit, seule l'expérimentation finale prouvait le fonctionnement déterministe d'une application, et la détection des défauts d'une tâche "temps réel" constituait un problème particulièrement ardu.

Par ailleurs, l'utilisation majoritaire de l'assembleur entravait considérablement l'étape de débogage◊ du code en rendant ce dernier :

- pénible à implémenter, en raison de sa dépendance au type de processeur,
- difficile à comprendre,
- et difficile à maintenir, même par son auteur.

Le langage ADA, émergeant dans les années 1980, n'a pas réellement allégé le développement de programmes déterministes, même si l'aspect "temps réel" figure explicitement dans le cahier des charges fixé par le Département de Défense américain. En effet, les primitives ADA gérant le temps n'offrent pas de contraintes strictes tandis que de nombreuses constructions n'ont pas de comportement déterministe (Barnes, 2000).

1.2 Scrutation et temps réel

Une plateforme déterministe est une architecture événementielle◊ élaborant des réponses adéquates à une pression environnementale en évolution permanente. La collecte des informations relatives au voisinage de cette plateforme génère un flux d'interruptions matérielles dont la gestion pose la problématique de la programmation "temps réel". Une stratégie de logiciel séquentiel scrutant successivement tous les équipements périphériques s'avère suffisante sous des contraintes temporelles souples.

Ainsi, après initialisation, le programme entre dans une boucle infinie et évalue la manifestation de chaque événement possible pour réagir en conséquence (Figure II-2.1).

```
int main (void)
{
sys_init();
while (true)
        {
        if (evenement_1)
                realise_tache_1();
        if (evenement_2)
                realise_tache_2();
                        ⋮
        if (evenement_n)
                realise_tache_n();
        }
}
```

Figure II-2.1. Boucle de scrutation – Pseudo-code C/C++

Cette stratégie aisément mise en pratique s'accompagne de désagréments majeurs.

- Le temps de réponse à un événement varie fortement selon l'avancement de l'exécution du programme dans la boucle. Par exemple, si le phénomène i survient immédiatement avant l'instruction chargée de le traiter, la réactivité est optimale. En cas de déclenchement postérieur à l'interprétation de sa commande associée, l'événement i requiert un tour de boucle complet pour subir un traitement.
- En corollaire, le déclenchement de plusieurs événements dans un ordre propice au traitement lors de l'itération courante de la boucle conditionne la période pendant laquelle le processeur accède aux requêtes qu'émettent les capteurs.
- Chaque tâche se voit accorder la même priorité.
- Si de nouvelles fonctionnalités étendent le système, le traitement des événements s'alourdit, d'où un accroissement simultané de la longueur de la boucle et du temps de réponse.

Nous définirons donc un programme "temps réel" comme une collection de processus séquentiels surveillant les interruptions matérielles et dont l'interaction permet d'aboutir à une application fonctionnelle. Sur une architecture simple coeur classique, cette interaction définit un cas de pseudo-parallélisme (Zaffalon et Bréguet, 2003), impliquant des tâches simultanément actives en état de concurrence sur l'attention de l'unique processeur.

2 Programmation concurrente

2.1 Les états d'un processus

La notion de processus trouve ses racines dans la division d'un problème en sous-problèmes de taille sensiblement égales afin d'en favoriser la résolution. Chaque processus émane du codage d'un de ces sous-problèmes, et ne réalise qu'une tâche unique. Son implémentation repose sur une phase d'initialisation, autorisant une saisie d'argument, suivie de l'entrée dans une boucle infinie (figure II-2.2). Cette dernière débute généralement par l'attente d'un événement particulier sans lequel le processus laisse les ressources de l'unité centrale à ses concurrents. A l'arrivée d'un message ou d'une échéance temporelle, la tâche rétablit son emprise sur le processeur, décode et traite les informations fournies, puis retourne en état d'attente. Nous noterons que le concept de pseudo-parallélisme est pertinent dans la mesure où les tâches consacrent la majorité de leur temps à l'attente d'événements à traiter.

```
void task (void *data)
{
init_task();
while (true)
        {
        Attente_gestionnaire_messages_task
        switch (message.type)
                {
                case message_type_X
                ...
                break;
                case message_type_Y
                ...
                break;
                }
        }
}
```

Figure II-2.2. Implémentation typique d'une tâche – Pseudo-code C/C++

L'ordonnanceur◊ agissant sous la supervision d'un noyau "temps réel" considère une tâche comme un automate fini, une machine abstraite passant d'état en état, suivant des transitions, à la lecture d'une information.

Les états accessibles à un processus s'articulent autour de :

- l'activité
  une seule tâche, celle en cours d'exécution, est qualifiable d'active. Elle peut volontairement atteindre un état de blocage lors de l'attente d'un événement. Sur un système préemptif, l'ordonnanceur altère l'état d'un processus en cours d'exécution à "prêt" si une tâche de plus haute priorité s'avère elle-même disponible – procédé dénommé préemption.
- la disponibilité
  toute tâche prête à l'exécution, mais de moindre importance que le processus actif, manifeste cet état. La transition des états "disponible" à "actif" survient dès l'accession au statut de tâche disponible de la plus prioritaire.
- le blocage
  une tâche bloquée attend un événement particulier, et devient disponible dès que celui-ci survient.

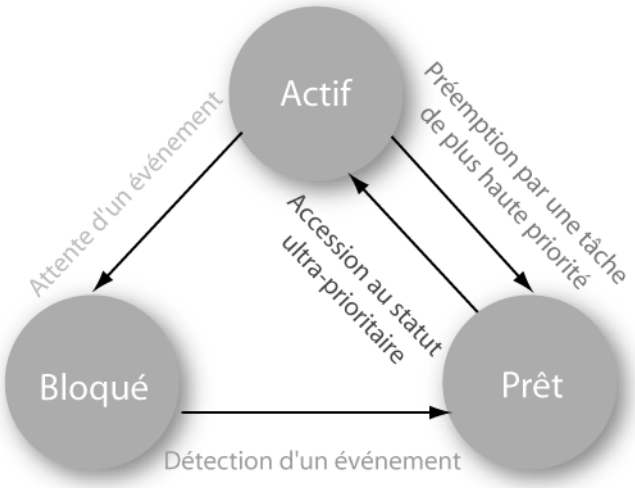


Figure II-2.3. États d'un processus

2.2 Immersion de processus dans un noyau "temps réel"

2.2.1 Contexte d'un processus

Le contexte d'une tâche désigne l'ensemble des informations nécessaires à la poursuite d'exécution de ladite tâche après arrêt. Il regroupe donc des entités telles :

- un pointeur◊ sur la totalité des variables privées et locales du processus,
- un compteur d'instructions exécutées par la tâche,
- la priorité et le statut du processus,
- le contenu des divers registres◊ de l'unité centrale lors de l'exécution de la tâche.

Dès qu'un périphérique ou l'horloge "temps réel" génère une interruption, une transition d'état peut survenir. En effet, si le processus associé à cette interruption est de priorité supérieure à la tâche actuellement exécutée, il doit être activé à la place de cette dernière, d'où un changement de contexte. Il faut donc sauver le contexte d'exécution du processus stoppé et restaurer celui de la tâche en attente.

2.2.2 Altération du contexte d'un processus

Le changement de contexte défini dans la section précédente occasionne l'exécution d'une série d'instructions distinctes, parmi lesquelles :

- l'interruption du processus actif, lequel s'ajoute à la liste des tâches bloquées ou des tâches prêtes,
- l'élection du processus le plus prioritaire,
- la restauration du contexte d'exécution du processus de plus haute priorité, et donc la recharge des registres de l'unité centrale mémorisés lors de l'exécution du processus élu,
- l'activation de la tâche ultra-prioritaire.

Zaffalon (2006) précise que le processus réactivé se comporte comme s'il n'avait jamais cessé son exécution, c'est-à-dire comme s'il disposait de son propre processeur – une parfaite illustration du concept de pseudo-parallélisme.

Une opération d'une telle envergure ne saurait être interrompue sans risque majeur de compromission de l'intégrité du système. Sa rapidité d'exécution constitue un enjeu crucial, car elle ne participe pas directement à l'application et tend à dilapider le temps processeur. C'est la raison pour laquelle les commandes liées au changement de contexte subissent un empaquetage optimisé au sein d'un noyau "temps réel" (Figure II-2.4).

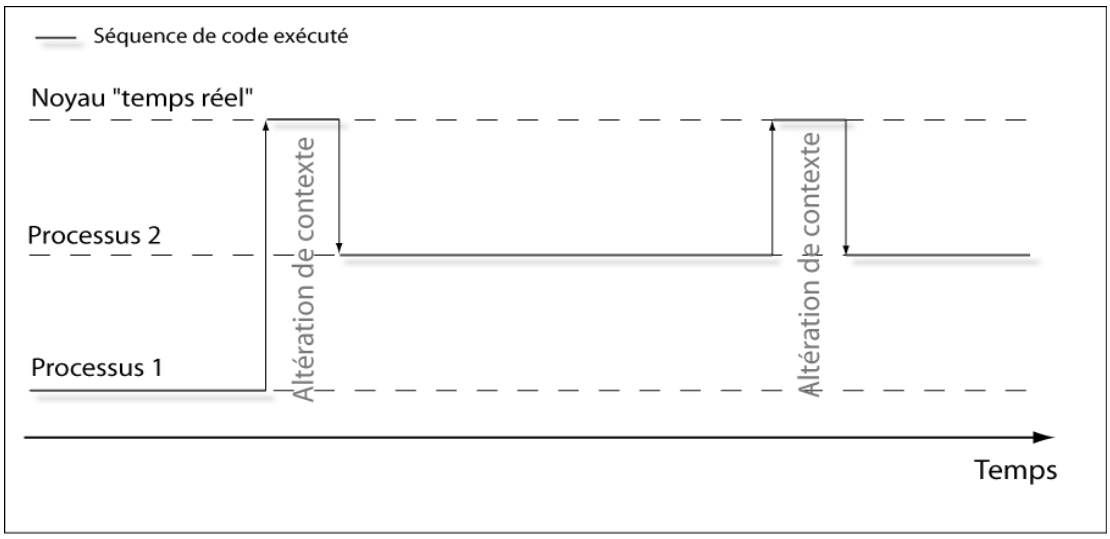


Figure II-2.4. Changement de contexte et exploitation du noyau "temps réel"

3 Communication interprocessus et temps réel

Un processus constitue une subdivision élémentaire d'un problème informatique complexe et manifeste donc une indépendance logique vis-à-vis de ses homologues. La fonctionnalité globale de l'application de cartographie mobile requiert toutefois des tâches coopératives et intercommunicantes.

3.1 Sémaphores

3.1.1 Définition

Nous coordonnerons l'accès aux ressources partagées du système à l'aide d'un artifice de programmation dénommé "sémaphore" (Downey, 2005). Constitué d'une variable et d'une file d'attente, un tel outil permet de connaître à tout instant soit le nombre de processus pouvant être pris en charge, soit le nombre de processus rangés dans la file d'attente. Nous pouvons assimiler le comportement d'un sémaphore à une clef d'accès aux composants d'une plateforme informatique. Ainsi, pour exploiter l'unité centrale ou un périphérique, toute tâche doit acquérir le sémaphore en invoquant une routine du noyau. Si cette clef et la ressource sollicitée sont disponibles, le processus s'exécute puis libère le sémaphore. Dans le cas contraire, la tâche est bloquée tant qu'une autre reste en possession de la clef. Par ailleurs, un ensemble de processus appelant simultanément un sémaphore en cours d'exploitation est bloqué dans une file d'attente selon les priorités définies par l'ordonnanceur (Figure II-2.5).

Figure II-2.5. Partage de ressources sans et avec sémaphore

Le sémaphore aide donc à maintenir l'ordre parmi les processus qui luttent pour l'accès au temps processeur. Lyons (2005) précise qu'une routine d'interruption peut aisément s'y interfacer. Dès lors, l'implémentation de la détection d'un événement par une tâche nous devient accessible.

3.1.2 Problématique de l'inversion de priorité

Notre utilisation de sémaphores pour optimiser le partage des ressources peut engendrer des situations conflictuelles. Considérons le scénario illustré sur la figure II-2.6. Les processus 1 et 2 requièrent chacun un accès à une ressource protégée par un sémaphore 1 est ultra-prioritaire, tandis que 2 est accessoire. S'y ajoute une tâche 3, sans rapport avec la ressource partagée, et de priorité intermédiaire.

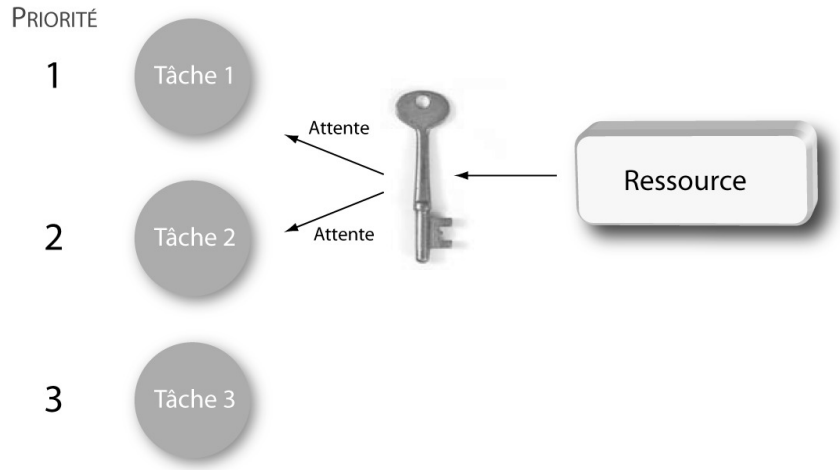


Figure II-2.6. Scénario de l'inversion de priorité

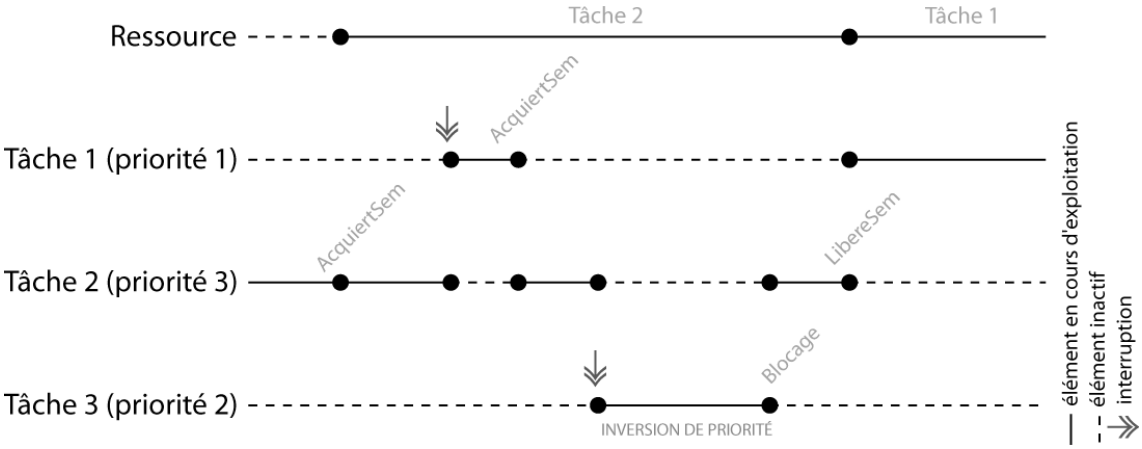


Figure II-2.7. Diagramme temporel d'exécution du scénario

La figure II-2.7 propose un diagramme temporel d'un scénario débutant par l'exécution de la tâche 2, laquelle s'empare du sémaphore. Comme la ressource associée est libre, le processus 2 l'exploite à loisir. Puis survient une interruption rendant la tâche 1 disponible. En tant qu'entité ultra-prioritaire, elle préempte le processus en cours, et s'exécute jusqu'à ce qu'une de ses instructions réclame le sémaphore.

Or, la tâche 2 détient le sémaphore, ce qui bloque l'autre routine. Le processus initial reprend donc le contrôle du système. Selon la logique décrite en 3.1.1, le processus 1 d'extrême priorité doit attendre que la tâche 2 de moindre importance libère la ressource.

Pourtant, un problème survient dès que la tâche 3 devient prête pendant que son homologue 2 exploite la ressource. Le processus 3 préempte tout simplement la tâche 2, et ce phénomène est dénommé "inversion de priorité", car la routine 3 de faible priorité entrave l'exécution de la tâche fondamentale 1.

Nous pouvons envisager deux solutions à cette problématique :

- un héritage de priorité, c'est-à-dire l'octroi temporaire à la tâche 2 du niveau de priorité de son homologue 1, dès que ce dernier réclame le sémaphore. Autrement dit, seule une routine plus prioritaire que la tâche 1 peut effectuer une préemption dans cette situation.
- un plafond de priorité, à savoir l'élévation de la priorité du processus 2 à une valeur supérieure à celle de toute tâche pouvant requérir le sémaphore alors que 2 le possède. Nous adopterons cette stratégie puisqu'elle élimine des changements inopinés de contexte.

3.2 Boîte aux lettres

Outre le rapport d'événements générés par le matériel, les processus doivent échanger des données afin de garantir la fonctionnalité de l'application finale. Cette intercommunication passe habituellement par le concept de boîte aux lettres (Abbott, 2003). Dans le but de transmettre une information, un processus, qualifié d'émetteur, poste un message dans un emplacement mémoire particulier qu'une tâche réceptrice en état de blocage scrute continûment. Cette tâche ne devient disponible, voire active, qu'à la réception dudit message. Ce dernier consiste typiquement en un pointeur dont le contenu est accessible aux deux catégories de processus impliqués. A l'instar du mécanisme de capture du sémaphore, de nombreuses tâches peuvent simultanément attendre le remplissage de la boîte aux lettres, selon une organisation régie par FIFO ou par ordre de priorité.

4 Conclusion

L'implémentation d'un système "temps réel" efficace repose sur un profond effort conceptuel concernant l'évolution logique et temporelle des processus impliqués. Le co-noyau déterministe Xenomai propose une interface de programmation autorisant une communication inter-tâches simple via des dispositifs de sémaphores et de boîtes aux lettres. La figure II-2.8 fixe la conception de notre plateforme de cartographie en temps réel, pour laquelle la visualisation de la trajectoire du véhicule est considérée comme accessoire devant le géoréférencement des images capturées, tandis que la

synchronisation des informations avec le temps GPS constitue le processus ultraprioritaire.

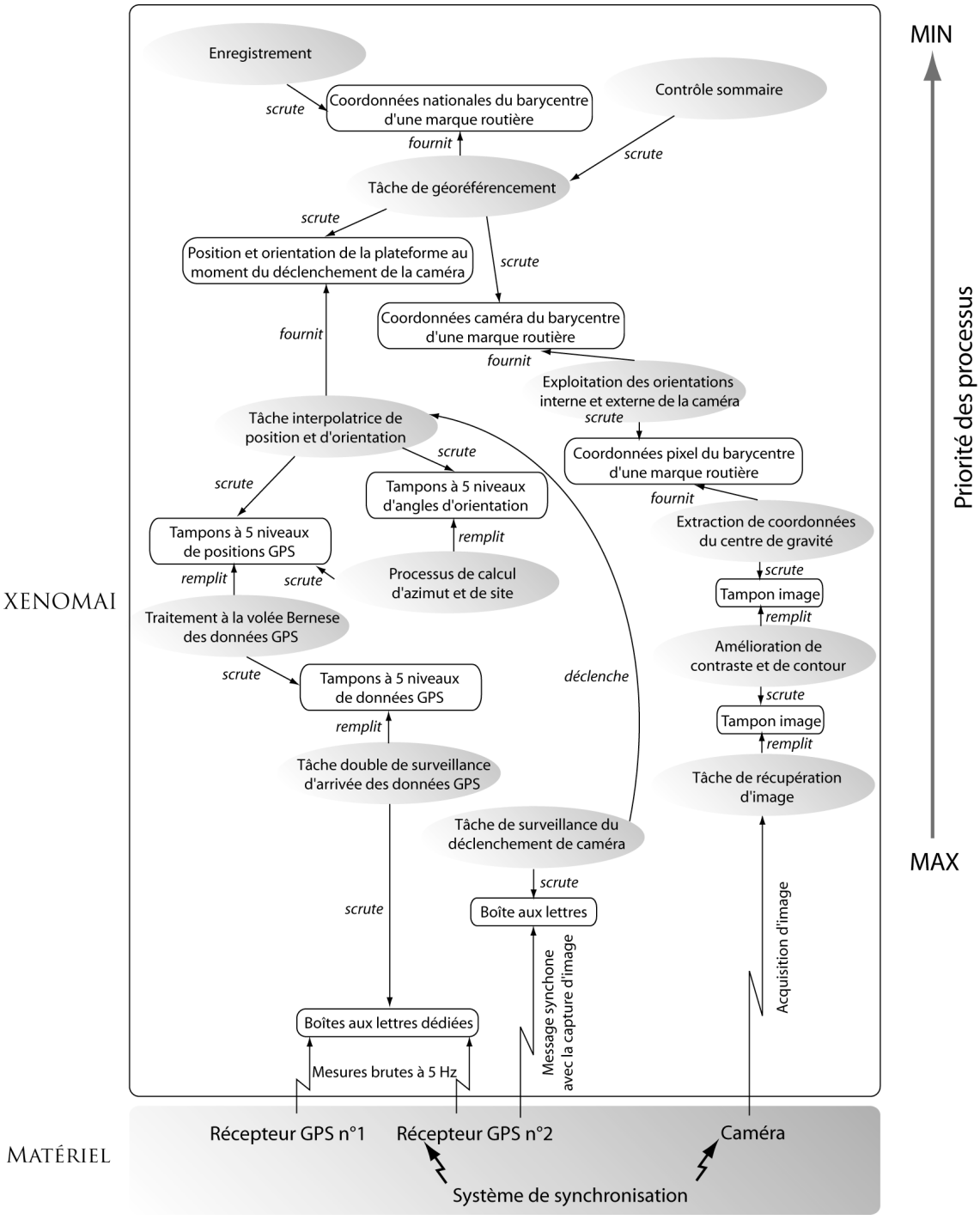


Figure II-2.8. Approche "temps réel" liminaire du géoréférencement automatique

II.3 Chronométrie événementielle sur PC standard

1 Introduction

Un véhicule embarquant une plateforme de cartographie mobile doit s'insérer dans le trafic routier sans en perturber la fluidité. Or, à la vitesse réglementaire de 80 km/h, un centième de seconde correspond à 22 cm, valeur induisant une sous-exploitation de la précision de GPS en mode cinématique. L'ordinateur hébergeant le logiciel de mobile mapping est donc tenu d'assurer une datation des événements à la milliseconde près, laquelle induit un déplacement de 22 mm compatible avec un géoréférencement ultérieur subdécimétrique de l'axe routier.

Pour un système d'exploitation en mode réel◊, l'accès à une horloge de résolution aussi élevée passait aisément par l'excitation du signal de demande d'interruption IRQ◊ 0, l'horloge de la machine. Or, une telle démarche n'opère qu'en environnement monotâche, ce qui s'oppose au déploiement des processus concurrents de l'application finale. Windows et Linux offrent des interfaces de programmation pour le chronométrage, dont les performances sont analysées dans cette section. Nous en tirerons des conclusions influençant sensiblement l'implémentation de la plateforme de mobile mapping.

2 Étude chronométrique de systèmes d'exploitation

2.1 Protocole expérimental

2.1.1 Processeurs étudiés

Nous avons réalisé une étude des horloges disponibles sur des systèmes d'exploitation conventionnels – Windows et Linux – avec :

- un ordinateur classique doté d'un processeur Intel Pentium IV cadencé à 3.2 GHz,
- un portable puissant doté d'un processeur double-coeur Intel T2500 à 2 GHz.

2.1.2 Pseudo-code du test

Notre idée d'analyse des performances de datation d'un système d'exploitation gravite autour de 100 appels d'une fonction de chronométrage dans une boucle infinie. L'arrêt de la boucle correspond à la détection d'un écart supérieur ou égal à la seconde avec la date issue de l'invocation précédente du chronomètre (figure II-3.1).

Nous affichons les résultats via une boucle séparée pour garantir la fiabilité des résultats. En effet, l'instruction "print" implique un interfaçage avec l'écran, lequel détourne le processeur de la mesure du temps écoulé.

```
void main (void)
{
for (i=100; i<=200; i++)
        {
        depart(i) = invocation_chronometre
        depart(i) = Conversion_secondes(depart(i))
        while (invocation_chronometre < depart(i)+i)
                { aucune_action }
        fin(i) = invocation_chronometre;
        fin(i) = Conversion_secondes(fin(i))
        duree(i) = fin(i) – depart(i);
        }
for (i=100; i<=200; i++)
        {
        print("Attendu: %d, Obtenu: %ld\n", i, duree(i));
        }
}
```

Figure II-3.1. Pseudo-code C/C++ de l'analyse d'horloge

2.2 Résultats chronométriques

2.2.1 Instructions classiques

Les figures II-3.2 et II-3.3 prouvent que la chronométrie issue des bibliothèques C/C++ standard Linux ou Windows n'atteint pas la résolution attendue d'une milliseconde. Ajoutons que la cyclicité des résultats est probablement liée à l'exécution d'un démon système◊.

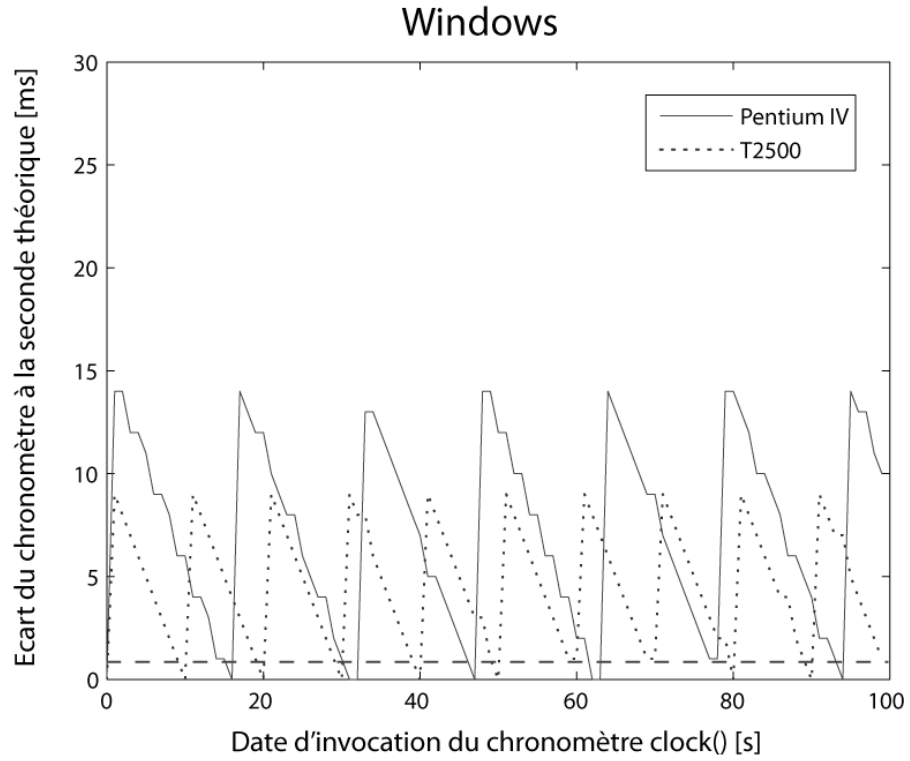


Figure II-3.2. Performances du chronomètre clock() de Windows

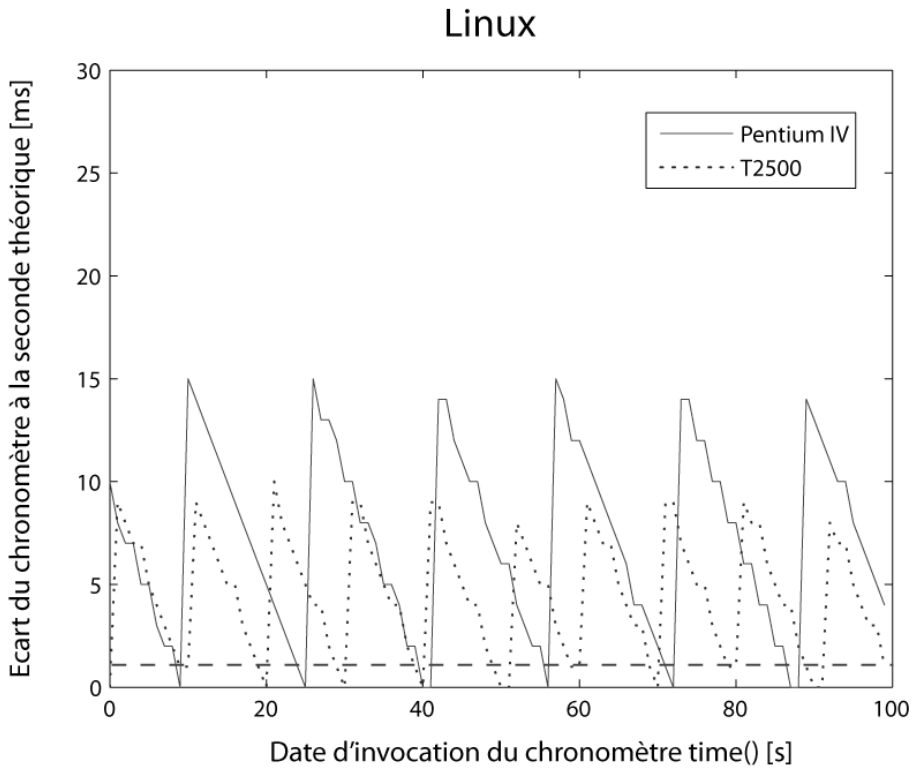


Figure II-3.3. Comportement du chronomètre time() de Linux

2.2.2 Instructions avancées

Les deux systèmes d'exploitation testés offrent des interfaces de programmation évoluées pour accéder à des chronomètres de meilleure résolution (Microsoft, 2005). Les instructions "QueryPerformanceCounter" et "clock_gettime", issues respectivement des environnements Windows et Linux, procurent une datation des événements à la milliseconde près, mais dérivent dès la mise en charge du système (cf. Figure II-3.4 et II-3.5).

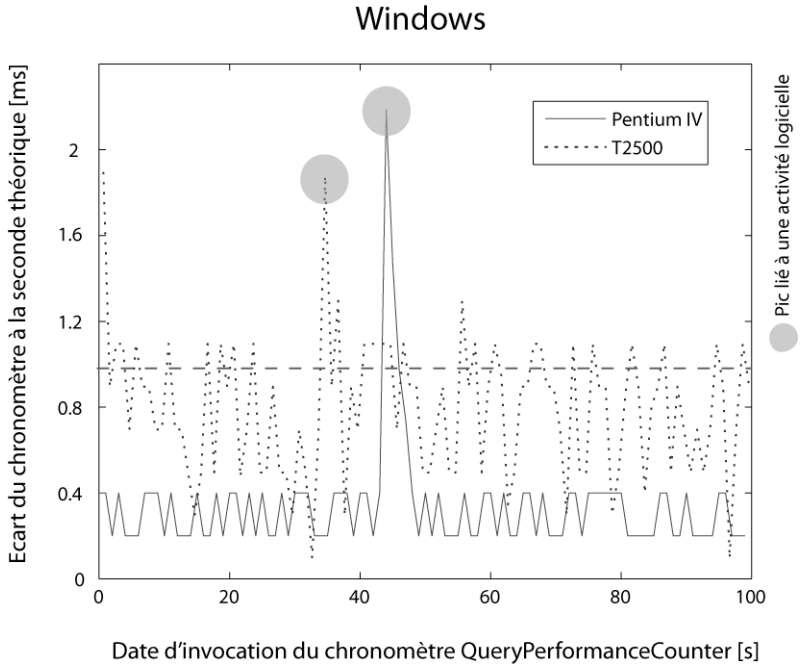


Figure II-3.4. Performances du chronomètre QueryPerformanceCounter

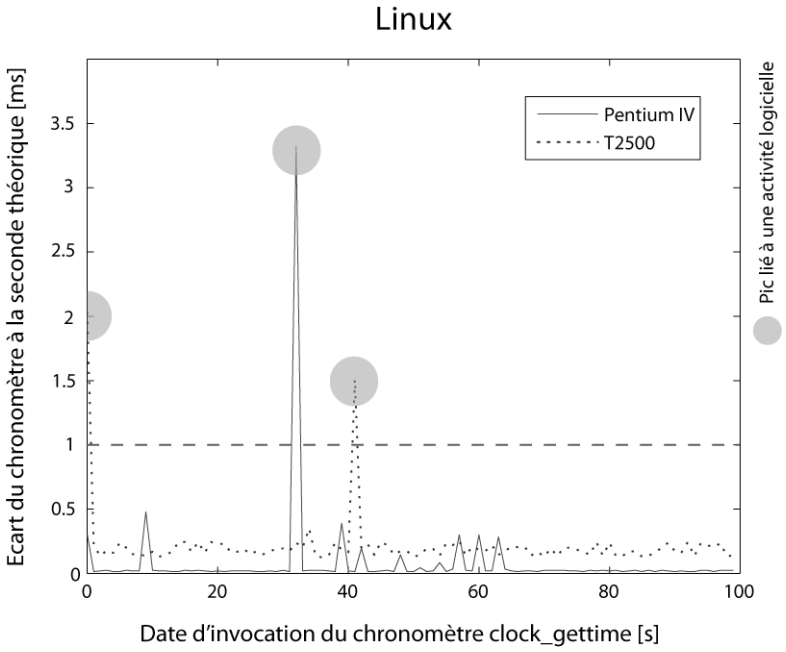


Figure II-3.5. Comportement du chronomètre clock_gettime

2.3 Chronométrie et système "temps réel"

Xenomai, co-noyau de Linux décrit dans la section II-1.3, demeure compatible avec le chronomètre "clock_gettime". Néanmoins, les programmes de démonstration livrés avec cette extension déterministe fournissent des possibilités d'expérimentation immédiates. Nous nous attardons particulièrement sur le comportement d'une routine-test liée à une tâche "temps réel" dans l'espace mémoire standard, lequel offre une interface de programmation Linux conventionnelle, d'où une certaine aisance de développement. En fait le processus déterministe affiche sa latence sur des échantillons de 100µs. Le tableau II-3.1 présente un extrait des résultats de ce test menés sur 10 mn, les valeurs négatives de latence dérivant de la planification légèrement avancée du chronomètre pour lutter contre un retard moyen.

Événement	Latence minimale (ns)	Latence maximale (ns)
Démons systèmes seuls	-923	5'718
Invocation d'un terminal	-823	5'883
Invocation de l'éditeur vi	-857	25'749
Compilation du noyau	2'407	435'934
Invocation du navigateur Mozilla	3'442	3'228'998
Ouverture de la suite Open Office	5'732	4'578'882

Tableau II-3.1. Test de latence d'une tâche "temps réel" sur Xenomai

Nous constatons qu'en cas de forte sollicitation du système, la datation des événements sous noyau "temps réel" divague. Cela prouve qu'il faut minimiser la charge d'une plateforme déterministe pour offrir à chaque instant un enchaînement optimal des tâches impliquées.

3 Remarques conclusives

Des processus aptes à respecter des échéances temporelles requièrent une chronométrie fiable et de haute résolution. S'il n'est guère surprenant qu'un environnement d'exploitation conventionnel livre une date erronée lors de l'exécution simultanée d'applications multiples, une plateforme "temps réel" tend à se comporter à l'identique dans de telles circonstances. Nous proposons donc de renforcer la disponibilité du processeur en distribuant les processus sur des systèmes auxiliaires (figure II-3.6), et les investigations liées font l'objet des deux prochains chapitres.

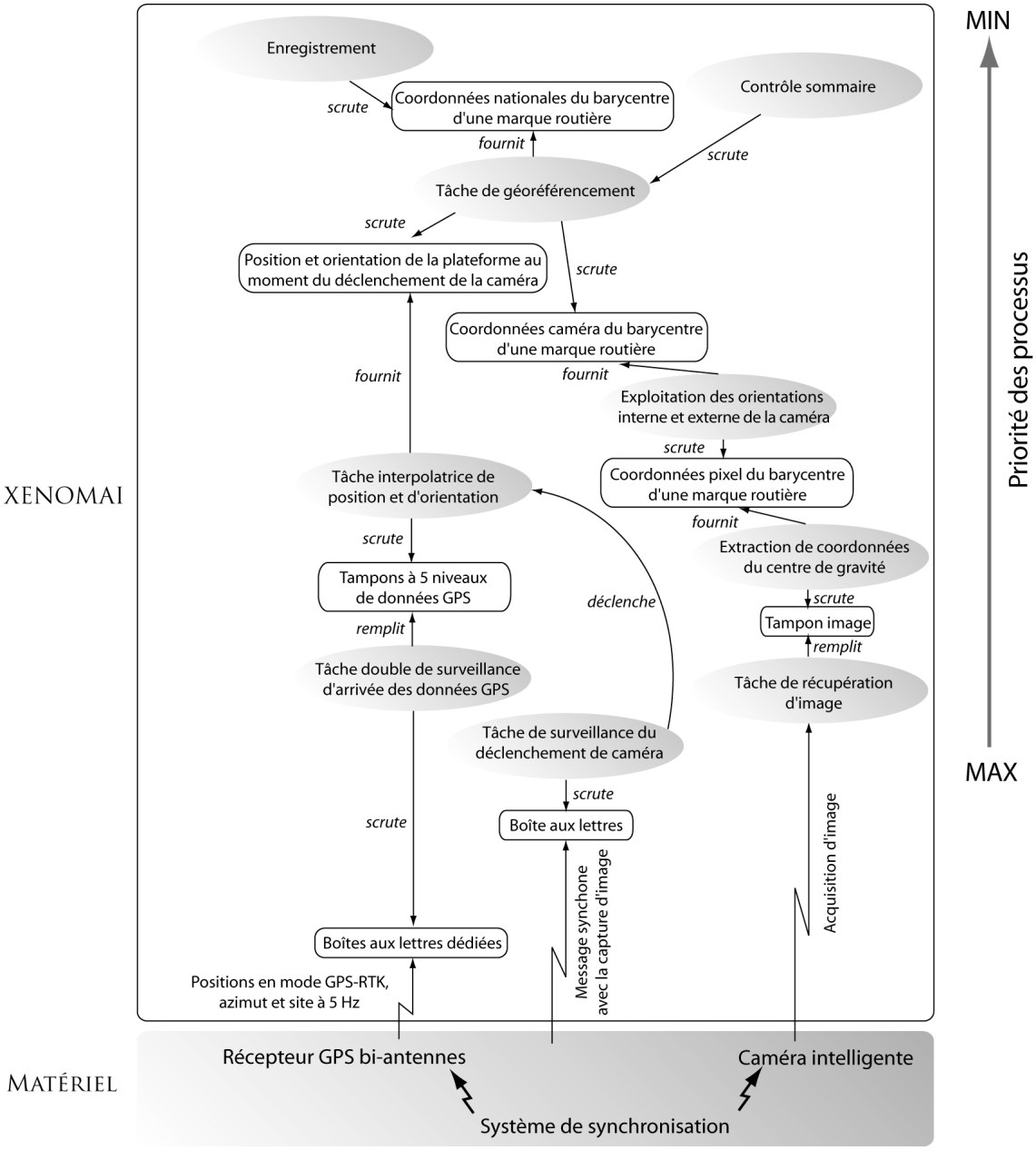


Figure II-3.6. Notre approche finale du géoréférencement automatique. Les codes de l'extraction des coordonnées pixel et de leur géoréférencement figurent dans l'annexe B.

Chapitre III Traitement autonome de la localisation

III.1 GPS différentiel en temps réel

1 Des mesures GPS entachées d'erreur

C'est un lieu commun de rappeler que la technique GPS modifie profondément les méthodes de travail du géodésien et du topographe. La palette de ses possibilités est très vaste : en localisation statique, absolue, relative, en navigation, en mode cinématique, et pour des précisions allant de la dizaine de mètres (mesure du code) au millimètre (mesure de la phase), sans oublier GPS comme instrument de la mesure du temps (Duquenne et al., 2005). Les dernières avancées technologiques conduisent à des récepteurs GPS équipés de puces miniaturisées très performantes, d'où leur utilisation récente dans la gestion d'unités mobiles telles que des véhicules, des équipements, et même des personnes. Pourtant, même dans des zones de visibilité satellitaire satisfaisante, GPS fournit une localisation dégradée par les phénomènes illustrés sur la figure III-1.

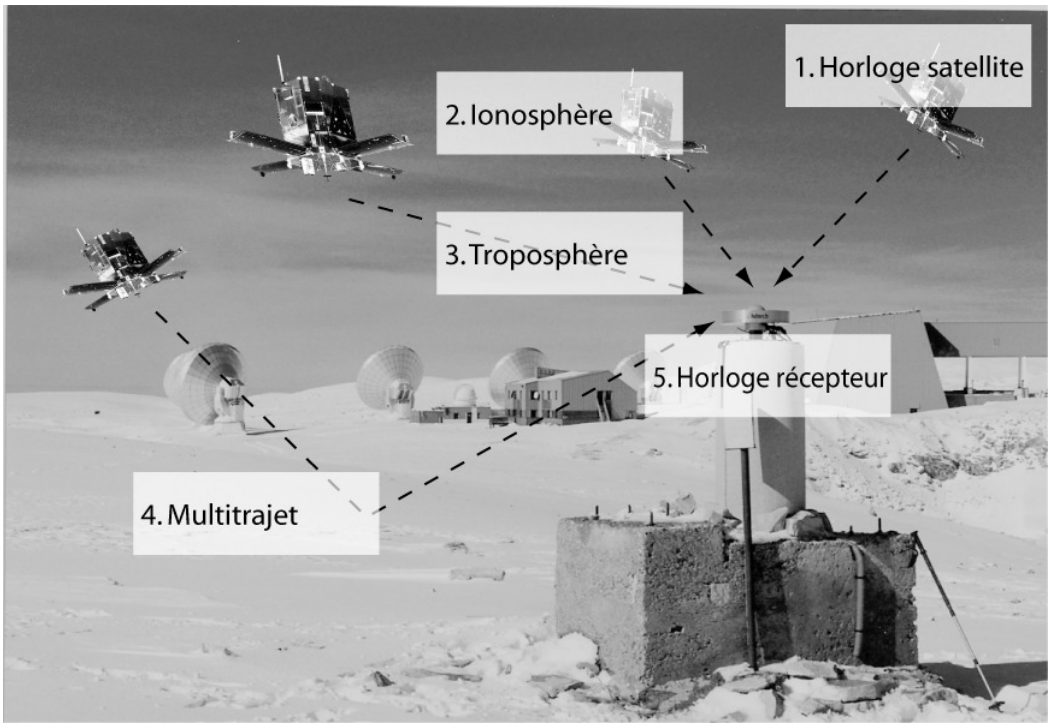


Figure III-1.1. Sources de dégradation d'une localisation par GPS

Donnons quelques précisions sur ces sources d'erreur.

- L'ionosphère

Cette couche atmosphérique située entre 50 et 1000 km d'altitude constitue un milieu dispersif, ionisé sous l'action des radiations solaires. D'après Duquenne et al. (2005), l'agitation ionosphérique dépend de la latitude (plus forte à l'équateur et aux pôles), de l'activité solaire et de la période de l'année, du jour ou de la nuit. L'effet sur la distance en GPS varie 0 à 15 mètres à la verticale et peut atteindre 45 mètres aux basses élévations.

- La troposphère

Cette couche atmosphérique s'étendant entre le sol et 7 à 14 km constitue un milieu non dispersif pour des ondes de fréquence inférieure à 30 GHz. Or, les ondes porteuses L1 et L2 de GPS ont pour fréquence respective 1575,42 MHz et 1227,60 MHz si bien que leur réfraction troposphérique est alors indépendante de la fréquence et de la mesure (code ou phase). L'écart induit est d'environ 2 mètres si le satellite est au zénith et peut atteindre 30 mètres pour une élévation de 5°. Il dépend de la température, de la pression, de l'humidité et de l'élévation du satellite.

- La relativité

De tels effets résultent de la variation de champ gravitationnel et surtout de la différence de vélocité significative entre chaque satellite GPS et un récepteur. Cela se traduit par une dilatation du temps et un décalage des fréquences induisant une modification :
  - du décalage d'horloge du satellite par rapport au temps GPS,
  - du décalage d'horloge du récepteur par rapport au temps GPS,
  - du signal satellitaire par rapport au récepteur en raison de courbures et retards dus à la gravitation terrestre (Bonnifait, 2005).

- Le multitrajet

Un multitrajet provient de la réflexion du signal avant réception. Le signal capté par l'antenne GPS apparaît comme la somme du signal direct et des multitrajets. Un allongement apparaît si l'antenne (par une analyse de polarité de l'onde) ou le corrélateur ne parviennent pas à éliminer ces multitrajets. Bonnifait note que des multitrajets éphémères ne sont pas trop problématiques car ils sont filtrés par les boucles à verrouillage de phase des corrélateurs. Ce cas se produit souvent en milieu urbain lorsqu'un récepteur GPS est en mouvement : les multitrajets apparaissent et disparaissent rapidement.

- La géométrie satellitaire

La position relative des satellites peut être qualifiée par le facteur GDOP[◊]. Il est admis que la localisation par GPS fournit des résultats satisfaisants pour un GDOP inférieur à 5 avec une élévation de coupure des satellites de 10°. Avec la constellation GPS actuelle, hormis le problème d'obstacles à la réception des signaux, cette condition est réalisée en Suisse quasiment en permanence.

Sous l'influence de ces sources d'erreur, un récepteur GPS utilisé en temps réel de manière autonome fournit une solution de localisation précise à 5 mètres environ. Un tel mode d'utilisation de GPS n'est donc pas envisageable pour une application de géoréférencement d'objets routiers à 10 centimètres près. Pour obtenir une telle précision, des techniques GPS différentielles doivent être mises en œuvre.

2 Messages de correction GPS

2.1 Corrections de pseudo-distances (DGPS)

Pour le DGPS, ces techniques différentielles corrigent les pseudo-distances◊ – affectées des erreurs susmentionnées – entre un récepteur GPS mobile et les satellites qu'il reçoit. En fait, un récepteur de référence, stationné sur un point prédéterminé, reçoit à chaque instant la position des satellites dans l'espace. Ce récepteur peut donc déterminer la distance théorique à chaque satellite et le temps de propagation des signaux correspondants. La comparaison de ces valeurs théoriques avec les valeurs mesurées permet de calculer des différences qui représentent des erreurs sur les signaux reçus. De ces différences dérivent les corrections de pseudo-distances, lesquelles sont transmises à des récepteurs mobiles, améliorant la précision de la localisation à un niveau métrique (Dupraz, 1992).

2.2 Corrections de phase (RTK)

Depuis une décennie l'algorithme Real-Time Kinematic (RTK) a gagné une large acception dans le génie civil, la topométrie et la géodésie. Cette technologie est une extension de la localisation relative basée sur l'exploitation interférométrique de mesures de phase en temps réel.

La précision atteignable est d'un niveau centimétrique, totalement compatible avec nos exigences de géoréférencement, pourvu que :

- les mesures brutes ou les corrections de la station de référence soient transmises à temps et de manière fiable aux récepteurs itinérants,
- les ambiguïtés entières◊ soient correctement résolues (Hofmann-Wellenhof et al., 2001).

2.3 Format de message

En fait, la commission RTCM◊ fut le premier organisme à édicter une norme sur le contenu des messages de corrections GPS. Son comité spécial 104 propose plus d'une quarantaine de messages standardisés pour la localisation différentielle par satellites. Chaque message préformaté comprend un nombre variable de mots de 30 bits, dont les deux premiers – l'en-tête – donnent invariablement des informations sur le type et la longueur du message transmis ainsi que sur l'identité de la référence et son état de

fonctionnement. Dans le cadre de l'implémentation courante de GPS-RTK (RTCM, 2004), les messages véhiculés sont du type :

- 3 6 mots dont les quatre derniers contiennent les coordonnées cartésiennes de la station dans le système WGS84 au centimètre près.
- 22 5 mots dont les trois derniers complètent le message de type 3 pour obtenir une précision submillimétrique sur les coordonnées de la référence.
- 18 2N+3 mots, dont le troisième contient l'instant de la mesure tandis que les suivants sont appariés. Correspondant à un satellite donné, chaque couple qualifie l'identifiant du satellite et la mesure de **phase** associée.
- 19 2N+3 mots, dont le troisième contient l'instant de la mesure alors que les suivants sont appariés. Correspondant à un satellite donné, chaque couple qualifie l'identifiant du satellite et la mesure de **pseudo-distance** associée.
- 20 2N+3 mots, dont le troisième contient l'instant de la mesure tandis que les suivants sont appariés. Correspondant à un satellite donné, chaque couple qualifie l'identifiant du satellite et la **correction** différentielle à réaliser sur la **phase** mesurée par le mobile.
- 21 2N+3 mots, dont le troisième contient l'instant de la mesure tandis que les suivants sont appariés. Correspondant à un satellite donné, chaque couple qualifie l'identifiant du satellite et la **correction** différentielle à réaliser sur la **pseudo-distance** mesurée par le mobile.

Au niveau du flux d'information, les messages 18/19 (RTK par transmission de mesures brutes) et 20/21 (RTK par transmission de corrections) contribuent à un même encombrement de la bande passante, lequel est donnée par la formule (1).

$$D = f \times 2 \times FREQ \times (2N+3) \times 5 \quad (1)$$

Où D représente le flux de données en octets par seconde
f désigne la cadence de mesures
FREQ, valant 1 ou 2, décrit le caractère mono ou bi-fréquence du récepteur
N représente le nombre de satellites.
A noter que le facteur 5, au lieu de 3.75, tient compte des recommandations du RTCM

Lors de l'utilisation des messages RTCM 18/19, les coordonnées de la station de référence sont également diffusées, à une cadence moindre que les corrections. Onze mots de 30 bits sont nécessaires pour décrire la position de la station de référence, ce qui génère un débit de pointe de :

$$D = f \times (2 \times FREQ \times (2N+3) + 11) \times 5 \quad (2)$$

Le message CMR (Compact Measurement Record), désormais approuvé pour l'usage public, fut développé par Trimble pour véhiculer des corrections via des lignes de communication de bande passante réduite (2400 bauds). Dans son implémentation la plus récente, le CMR+, la position de la station de référence est transmise suivant des trames disjointes, au lieu d'un seul bloc comme dans le message RTCM (Javad Navigation Systems, 2005). La formule donnant le débit de pointe est :

$$D = f\times(6+N\times(8+(FREQ-1)\times 7)+16) \quad (3)$$

Voici une application numérique pour fixer les idées.
Lors de la réception de 7 satellites, à une cadence de mesures de 1Hz, un récepteur de référence bi-fréquence diffuse en pointe :

- $(2\times 2\times(2\times 7+3)+11)\times 5 = 395$ octets/s = 3160 bps de messages RTCM 3/22/18/19
- $2\times 2\times(2\times 7+3)\times 5 = 340$ octets/s = 2720 bps de messages RTCM 20/21
- $6+7\times(8+(2-1)\times 7)+16 = 127$ octets/s = 1016 bps de corrections RTK-CMR+

3 Conclusion

La transmission de corrections GPS en temps réel implique une communication permanente entre une référence et des récepteurs mobiles. La limitation de la saturation de ce lien passe par des messages de taille optimisée parmi lesquels CMR+ s'avère prometteur. L'algorithmique RTK suppose une étape d'initialisation consistant en la résolution des ambiguïtés jusqu'à la prochaine obstruction satellitaire ou perte de communication. Une utilisation de la phase pour la détermination précise des pseudo-distances séparant le récepteur itinérant des satellites GPS suit cette initialisation. Si nous ne pouvons guère influer sur l'environnement des récepteurs itinérants, un choix pertinent du media de communication peut contribuer à établir une connexion fiable entre une station de référence et des récepteurs mobiles. Cette problématique représente le défi relevé dans la section suivante.

III.2 Diffusion de corrections GPS-RTK

1 Liaison radio

La figure III-2.1 illustre une implémentation traditionnelle de GPS-RTK. Ne nécessitant pas l'octroi de concession de la part de l'Office Fédéral de la Communication (OFCOM), les liens radio de faible puissance permirent l'essor du GPS cinématique de précision centimétrique en temps réel. De tels liens reposent sur le concept de bande de base, une technique de transmission directe des signaux numériques, sans modulation, via un canal de communication unique. Il en résulte qu'un seul message est transmissible à la fois (Pacific Crest, 1995).

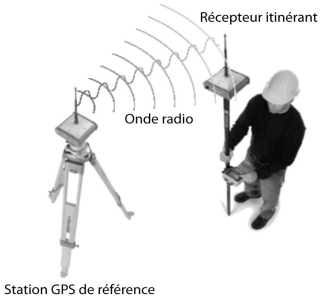


Figure III-2.1. Liaison radio au service de GPS-RTK

Si l'usage de la radio continue à jouer un rôle prépondérant dans la diffusion de corrections, ses caractéristiques engendrent les désagréments suivants :

- problème d'allocation de fréquences
- interférences intempestives
- limitation de portée inhérente à la faible puissance (cf. tableau III-2.1).

Service radio	*Portée*	*Puissance*	*Taxe de concession*
Radiocommunication à usage général (cibiste) 27 MHz	Entre 1 et 30 km	1 à 4 W	67 CHF par année
Radiocommunication à usage professionnel VHF (173 MHz)	Entre 5 et 20 km	2,5 W	130 CHF / an / appareil
PMR-446 (8 fréquences dans la bande des 446 MHz)	Entre 2 et 5 km	500 mW	Exempté de concession
SRD (short range devices) 69 canaux 433/434 MHz	Entre 1 et 2 km	10 mW	Exempté de concession
Radiocommunication à usage professionnel 430 MHz	Entre 5 et 10 km	2,5 W	50 CHF / an / appareil

Tableau III-1.1. Portée des liaisons radio (source OFCOM)

2 Réseau cellulaire

Communément employés pour le transfert de voix et de données via GSM◊, les téléphones cellulaires ont rapidement supplanté les radios en tant que véhicule de corrections GPS. La couverture assurée par les opérateurs nationaux fait du réseau cellulaire un média de choix et bon marché pour la transmission des messages RTK. Lors d'une connexion vers son homologue, un téléphone portable établit un lien tel que le réseau sans fil soit transparent aux données. Ceci simule une véritable connexion point à point, comme si le destinataire de l'appel était directement relié à l'application (ou au périphérique) contrôlant le modem◊ du portable. Ainsi, toute procédure de connexion GSM définit un canal spécifique où circule l'information échangée entre deux modems.

Dans le domaine de la topographie, les premières implémentations de la communication cellulaire impliquaient un lien direct entre une station GPS de référence et un récepteur itinérant (Figure III-2.2).

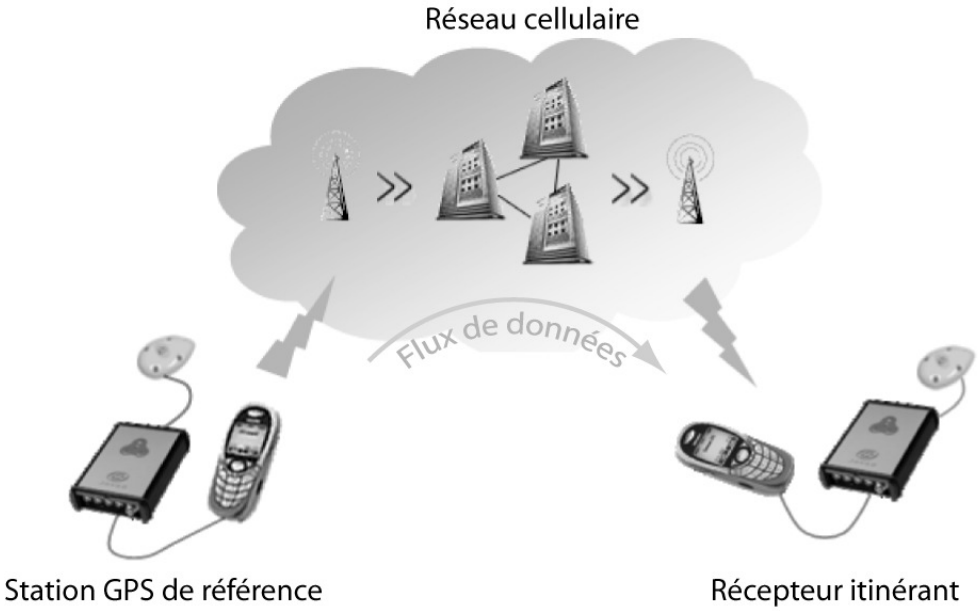


Figure III-2.2. Diffusion de corrections GPS via GSM

Nous avons pu démontrer que la bande passante associée convient au suivi d'épreuves sportives de vitesse, notamment par l'implémentation d'une méthode rigoureuse de placement de cellules chronométriques pour le kilomètre lancé (Gontran et Skaloud, 2004).

Cependant, cette expérience a mis en avant certains inconvénients liés à la communication par GSM.

- Un téléphone portable non géré par le logiciel interne d'un récepteur GPS nécessite une programmation par des commandes Hayes◊ non normalisées.
- La facturation est basée sur le temps à cause du lien réservé entre les deux postes.
- La vitesse de transfert est limitée à 9600 bps.
- L'établissement de la communication peut prendre quelques minutes.

A part attendre une hypothétique compatibilité des récepteurs GPS avec tout jeu d'instructions pour cellulaire, nous pouvons acquérir un usage flexible du réseau GSM avec des modules issus du domaine de la communication intermachines◊ (Hoelke, 2003). Ainsi, un périphérique tel que le GM862-PYT (figure III-2.3) automatise l'établissement de la composition du numéro de son homologue, puis maintient la communication en la redémarrant si nécessaire, et ce, sans intervention humaine. En outre, un tel périphérique embarque la pile de protocoles UDP◊ et TCP/IP, ce qui le rend capable d'accéder à Internet via une bande passante plus large qu'une connexion point à point via GSM.

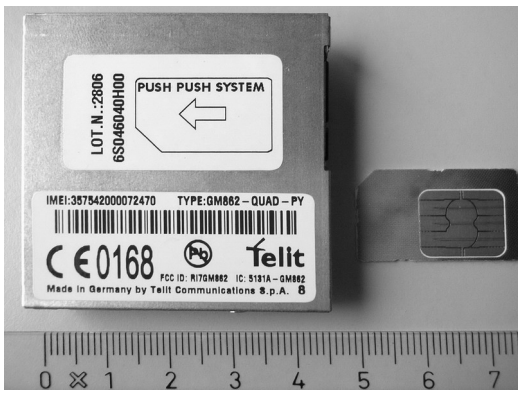


Figure III-2.3. Module GSM/GPRS GM862-PYT

3 Internet

3.1 GPRS

En raison de la densification du réseau Internet, les radios en ligne, qui débitent des flux continus de paquets IP◊, sont devenus des services bien établis. Le transfert de corrections CMR+ requiert un taux de transfert relativement faible par rapport à ces applications. Par conséquent, la dissémination de messages RTK via Internet constitue une alternative intéressante à l'usage des techniques de diffusion mentionnées précédemment. Dans le cadre du mobile mapping, l'itinérance des récepteurs recevant les corrections nécessite un accès nomade au Net. Si Wegener et Wanninger (2005) évoquent l'exploitation des technologies cellulaires de dernière génération EDGE◊ et UMTS◊ comme solution, l'Internet mobile demeure intimement lié au GPRS◊, un système radio de transmission de

données. Les données véhiculées selon cette norme sont organisées sous forme de paquets UDP ou TCP/IP dont le débit pratique atteint 50 kbps, soit le quintuple de la bande passante du GSM. Des modems spécifiques tels les GM862-PYT embarquent les piles de protocoles Internet convertissent les blocs de données TCP/IP en flux sériels. Grâce de tels périphériques, les récepteurs GPS itinérants se comportent comme s'ils étaient directement connectés à la station de référence via un câble série. Cependant, tout instrument relié au réseau GPRS subit un adressage IP dynamique par une traduction d'adresse (NAT◊) que réalise un serveur APN (Access Point Node), détenu par l'opérateur téléphonique. Une telle procédure de sécurité bloque toute connexion entrante sur les modems GPRS (Premji, 2005), rendant impossible tout lien Internet direct entre ceux-ci. Le recours à un serveur web de corrections GPS s'avère donc nécessaire.

3.2 Serveur GDGPS

Le "Jet Propulsion Laboratory" (JPL), une coentreprise fondée par la NASA◊ et Caltech – l'Institut Californien de Technologie, fut l'une des premières institutions à examiner une structure Internet de diffusion de corrections différentielles sur une surface étendue, dépassant les frontières des Etats-Unis (Muellerschoen et al., 2000). Forte d'un réseau mondial de 62 stations, cette architecture baptisée "NASA Global Differential GPS System – GDGPS" offre en temps réel des informations GPS issues de récepteurs distants. En fait, elle collecte, édite et compresse les observations brutes réalisées par ces stations périphériques. Les données en paquets IP sont ensuite acheminées via Internet vers le centre de traitement JPL qui produit des horloges et des orbites GPS précises. Ces deux types de résultats sont formatés et comprimés sous forme de corrections des éphémérides GPS diffusées. Elles sont alors accessibles sur Internet, mais seulement aux utilisateurs autorisés (Figure III-2.4). Bar-Sever et al. (2004) mentionnent que la précision de la position obtenue via GDGPS est de 10 cm en planimétrie contre 20 cm en altimétrie.

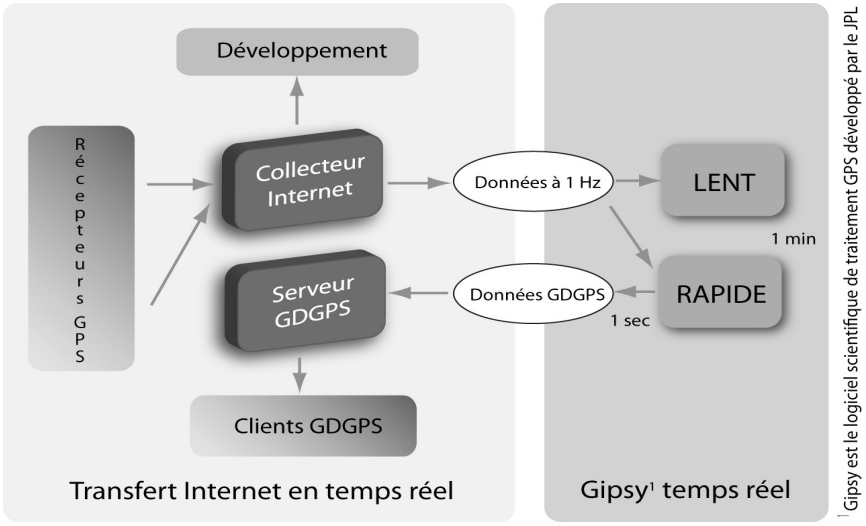


Figure III-2.4. Système GDGPS de la NASA

3.3 Serveur NTRIP

Dans le contexte du cadre de référence tridimensionnel européen ETRF◊, l'agence fédérale de cartographie et de géodésie de Francfort (*Bundesamt für Kartografie und Geodäsie*) a développé une technique d'échange de données GPS via Internet nettement plus orientée vers le public (Weber et al., 2003). Cette technologie NTRIP◊ non propriétaire, au code source ouvert, encode les corrections RTK pour une transmission hautement efficace sur le web. Elle repose sur une matrice de serveurs conséquente et qui autorise la connexion simultanée de milliers d'utilisateurs (figure III-2.5). Par ailleurs, Dammalage et al. (2006) confirment qu'une localisation GPS en temps réel basée sur NTRIP ne présente aucune dégradation de précision face aux techniques RTK reposant sur des liens de communication traditionnels (cf. Sections III-2.1 et III-2.2).

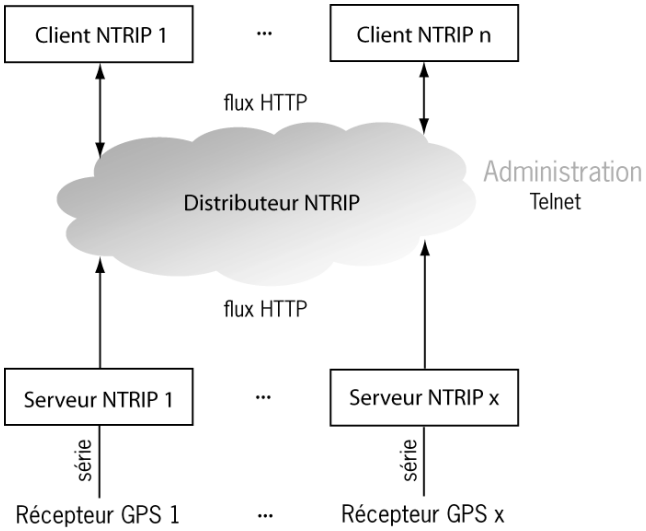


Figure III-2.5. Architecture NTRIP

4 Remarques conclusives

Des services GPS destinés aux utilisateurs généraux tels GDGPS et NTRIP exploitent l'infrastructure Internet pour la satisfaction d'une multitude de requêtes simultanées. Cependant, ils impliquent des flux de corrections RTK à 1 Hz susceptibles de transiter via GSM, de sorte que les utilisateurs ne bénéficient pas réellement de la communication haut débit offerte. En outre, l'adoption de messages au format RTCM 3.0 tend à restreindre davantage la bande passante nécessaire même si le format en question propose des informations complémentaires telles le FKP – Flächenkorrekturparameter (Wübenna et al., 2002). L'usage inefficace d'Internet, la faible cadence des corrections RTK ainsi que la difficulté d'implémenter nos propres applications sur un serveur NTRIP ont motivé la conception d'un serveur personnalisé de corrections GPS pour assurer une trajectographie en temps réel.

III.3 Serveur personnalisé de corrections GPS

1 Implémentation

1.1 Motivation

La mesure de sécurité NAT protège les appareils cellulaires d'un accès abusif à leurs données par blocage de toute connexion entrante. Par conséquent, l'établissement d'une liaison Internet directe entre deux récepteurs GPS munis de modems GPRS est impossible. Une solution réside dans la conception d'un serveur relais qui diffuse des corrections GPS depuis l'extérieur du réseau téléphonique sans fil. Cette approche offre :

- une indépendance vis-à-vis de l'opérateur cellulaire qui peut octroyer des cartes SIM◊ routables◊ mais extrêmement coûteuses,
- une multidiffusion des corrections de la station de référence vers des groupes de récepteur itinérants,
- une implémentation aisée de logiciels complémentaires sur le serveur.

1.2 Prototypage du serveur relais

Notre vision d'un serveur personnalisé de corrections GPS implique le déploiement de services minimaux avec, entre autres, la réception des messages RTK issus d'une station de base, la multidiffusion des dits messages vers des récepteurs itinérants authentifiés ainsi que l'enregistrement des solutions de localisation calculées et leur date de génération. La figure III-3.1 présente le prototype du serveur.

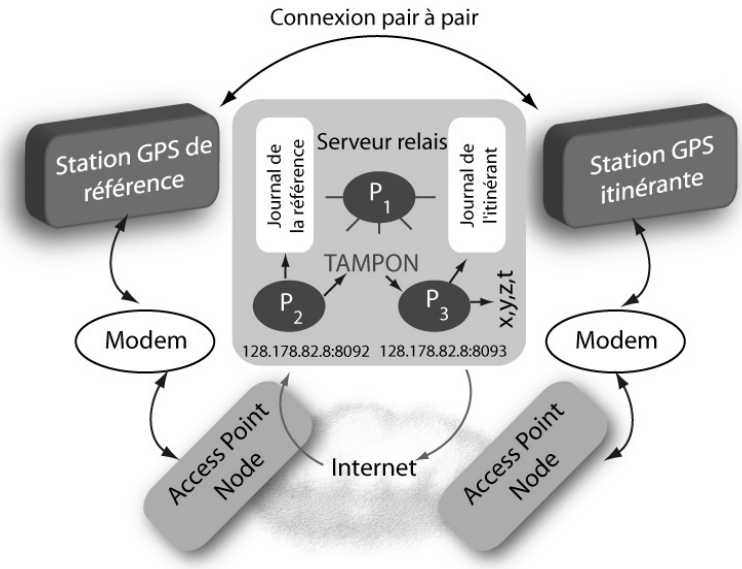


Figure III-3.1. Prototype de serveur personnalisé de corrections GPS

Les entités P_1 à P_3 se réfèrent à des processus remplissant les rôles suivants :

- P_1 le contrôleur qui initialise le serveur et surveille son fonctionnement,
- P_2 le producteur qui lit les données de la station GPS de référence et les envoie vers un tampon,
- P_3 le consommateur qui lit les données du tampon et les envoie vers un ou plusieurs récepteurs itinérants.

De tels processus établissent entre une station de base et des récepteurs itinérants une liaison pair à pair, dont le mécanisme d'établissement est détaillé sur la figure III-3.2. Dès le lancement du serveur, des interfaces de connexion – des sockets◊ – sont créées pour une liaison ultérieure avec tous les récepteurs GPS (étape 1). Suite à leur authentification, les modems connectés à ces derniers envoient un paquet Hello◊ (étape 2), les adresses IP externes de toutes cartes SIM sont récupérées. Ces adresses, véritables intermédiaires entre Internet et le réseau de l'opérateur téléphonique, sont librement routables d'où l'accession à un échange direct de messages entre tous les récepteurs.

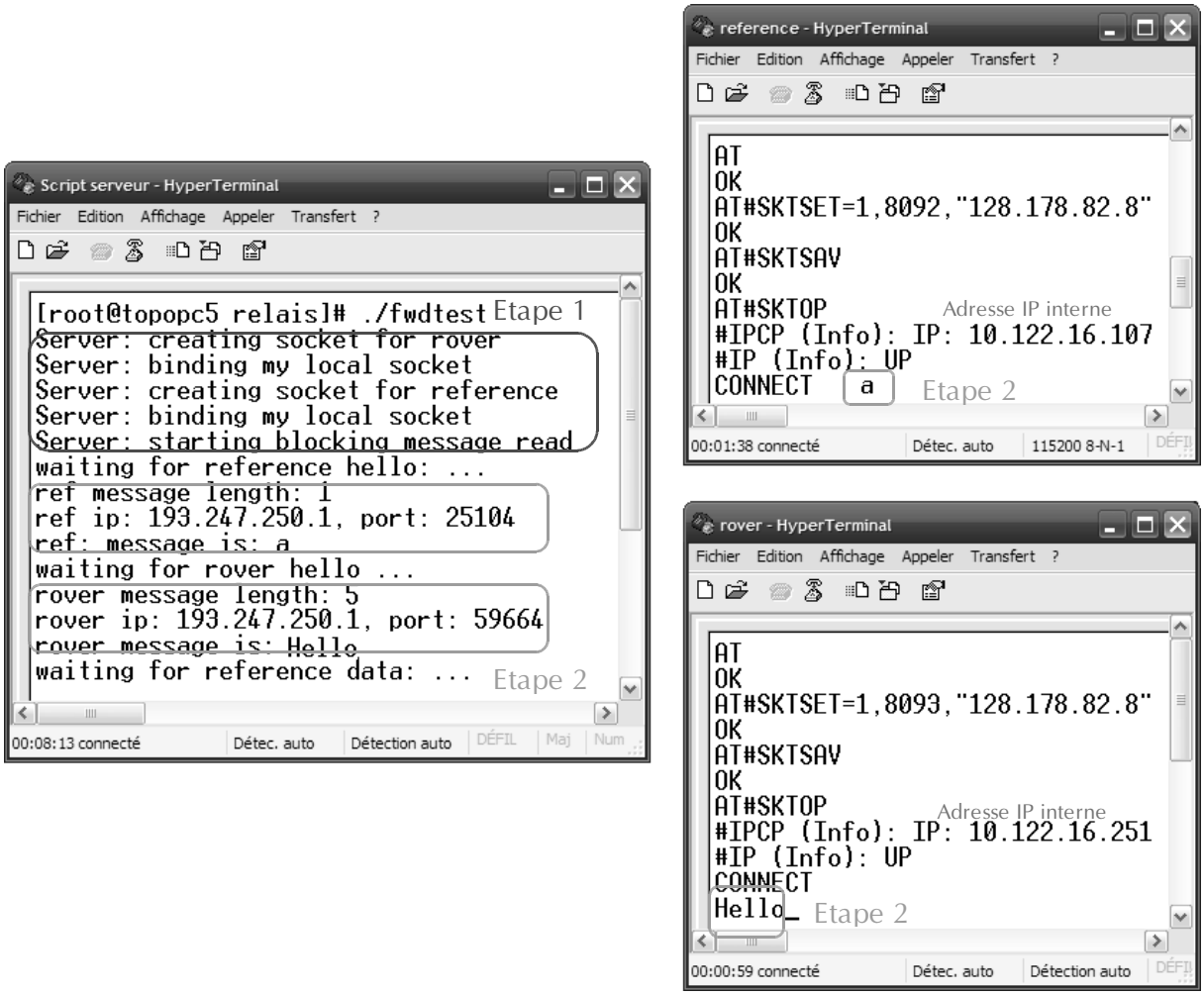


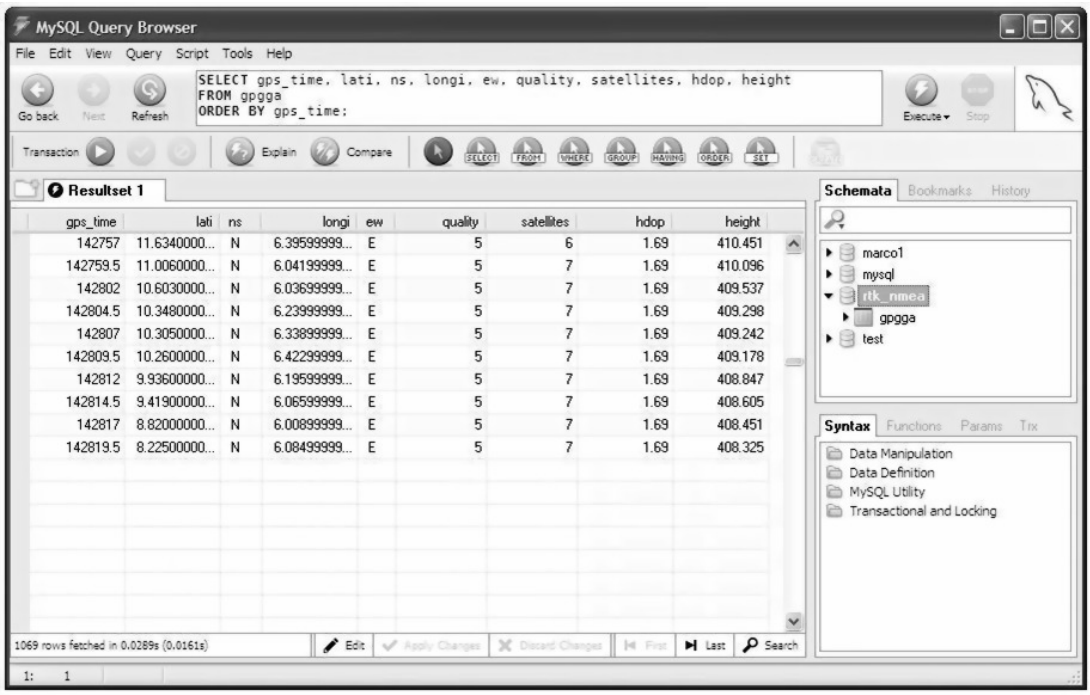
Figure III-3.2. Apprentissage des adresses IP routables des modules GPRS

1.3 Serveur déployé

L'implémentation du prototype de serveur nous permet d'identifier les modules GPRS comme éléments faibles d'une plateforme dédiée à l'Internet mobile. En effet, outre leur interface de configuration perfectible, ces modems limitent la cadence des messages GPS à 5 Hz en raison d'un processus relativement lent d'encapsulation du flux sériel d'informations en paquets IP. Par conséquent, nous avons décidé de déployer le serveur relais sans implémenter de logique chronophage sur ces périphériques. De plus, puisque nous accédons librement au code source du serveur, la bidirectionnalité de la liaison GPRS est exploitable par des logiciels additionnels. Nos premiers développements exploitant les informations des récepteurs itinérants au niveau de serveur relais proposent la récupération des coordonnées des récepteurs distants en temps réel. Une telle initiative constitue une avancée vers une trajectographie en temps réel de mobiles, assortie à une analyse position/vitesse/accélération complète et sans délai.

Pour démontrer le bien-fondé du concept, nous avons développé un logiciel Java qui offre les fonctionnalités suivantes :

- établissement d'une connexion TCP avec le serveur de corrections GPS,
- établissement d'une connexion JDBC◊ avec un serveur de bases de données MySQL,
- lecture continue des messages NMEA◊ à partir du serveur de corrections GPS,
- analyse syntaxique des messages NMEA et enregistrement des résultats dans une base de données MySQL,
- affichage en temps réel des coordonnées d'un récepteur GPS itinérant et de l'indicateur HDOP.



gps_time	lati	ns	longi	ew	quality	satellites	hdop	height
142757	11.6340000...	N	6.39599999...	E	5	6	1.69	410.451
142759.5	11.0060000...	N	6.04199999...	E	5	7	1.69	410.096
142802	10.6030000...	N	6.03699999...	E	5	7	1.69	409.537
142804.5	10.3480000...	N	6.23999999...	E	5	7	1.69	409.298
142807	10.3050000...	N	6.33899999...	E	5	7	1.69	409.242
142809.5	10.2600000...	N	6.42299999...	E	5	7	1.69	409.178
142812	9.93600000...	N	6.19599999...	E	5	7	1.69	408.847
142814.5	9.41900000...	N	6.06599999...	E	5	7	1.69	408.605
142817	8.82000000...	N	6.00899999...	E	5	7	1.69	408.451
142819.5	8.22500000...	N	6.08499999...	E	5	7	1.69	408.325

Figure III-3.3. Stockage de coordonnées GPS dans une base de données MySQL.

1.4 Test préliminaire

1.4.1 Qualité du réseau GSM

L'accessibilité par GPRS de notre serveur personnalisé de corrections RTK a subi des tests pour évaluer la qualité du lien de communication et la résolution des ambiguïtés sur de longues périodes. En effet, la constance de la bande passante associée au GPRS n'est pas une certitude étant donné que les opérateurs cellulaires ne dédient qu'une portion de leur infrastructure à cette liaison radio. De plus, chaque octet d'un message RTK est indispensable à l'interprétation de la correction sous-jacente. Or, contrairement à la diffusion de la voix, la transmission de données est particulièrement sensible à la topologie et au dimensionnement du réseau sans fil.

Il nous a donc paru pertinent de contrôler en temps réel un indicateur de disponibilité du réseau cellulaire – la mesure d'intensité du signal – issu de la recommandation GSM07.07 (ETSI, 1999). Variant de 0 (aucun signal) à 31 (excellente réception), une telle mesure s'obtient par l'exécution périodique de la commande Hayes AT+CSQ (Annexe B). Nous avons réalisé des tests de réception de signaux cellulaires à l'intérieur d'une enceinte de murs épais – l'abri antiatomique sous notre domicile. Les résultats proposés sur la figure III-3.4 illustrent clairement la constance et la fiabilité de la couverture cellulaire disponible en Suisse. Notons que l'indicateur moyen de puissance du signal GSM reçu dans la zone d'expérimentation atteint 29 unités.

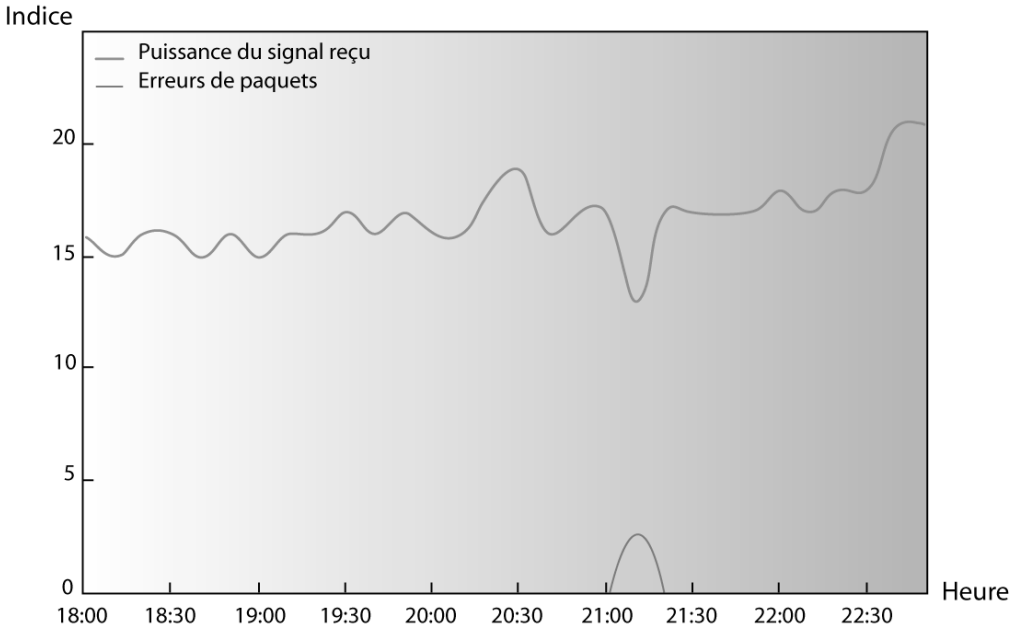


Figure III-3.4. Évolution de la puissance du signal GSM en zone défavorable

1.4.2 Serveur relais pour récepteurs immobiles

Afin de tester la stabilité temporelle de la résolution des ambiguïtés, un couple de récepteurs GPS bi-fréquence fut connecté au serveur pendant une session de 3 heures

avec un échange de données à 5 Hz sur Internet. Le récepteur itinérant, placé statiquement sur un point connu à 100 m de la station de référence, diffuse sa position et un indicateur sur l'état de fixation des ambiguïtés. Nous avons donc comptabilisé le nombre de secondes séparant les corrections différentielles, la quantité totale de messages corrects et d'informations non reconnues.

L'algorithmique RTK ne subit aucune dégradation significative de performance liée au transit des corrections via notre serveur personnalisé. En effet, lors du test statique,

- 98% des paquets reçus au niveau du récepteur itinérant furent corrects,
- des solutions de localisation avec des valeurs d'ambiguïtés fixées dans l'ensemble des réels furent obtenues après 15 secondes de flux continu de messages,
- des solutions de localisation avec des valeurs entières d'ambiguïtés furent disponibles en 40 secondes,
- la fixation des ambiguïtés en valeurs entières tolère des pertes sporadiques de données.

Par ailleurs, le tableau III-3.1 démontre que la précision de localisation obtenue est similaire à celle de l'exploitation de moyens de télécommunication classiques dans la démarche RTK. n y désigne la valeur d'ambiguïté.

Indice de qualité	*Nombre d'observations*	$\overline{\Delta E}$ [*mm*]	$\overline{\Delta N}$ [*mm*]	σ_E [*mm*]	σ_N [*mm*]	σ_H [*mm*]
n entier	29089	+1.4	–2.0	76	90	249
n réel	19546	–65	+285	153	192	386
n inconnu	5365	–387	+576	357	619	842

Tableau III-3.1. Précision de localisation obtenue avec le serveur personnalisé

2 Test dynamique du serveur de corrections personnalisé

2.1 Protocole expérimental

Les calculs RTK reposant sur le serveur de corrections personnalisé furent éprouvés en mode cinématique dans un environnement périurbain difficile, où de nombreux ponts et immeubles bloquent les signaux GPS, en plus d'une portion d'autoroute malmenant la liaison sans fil (alentours de l'EPFL, près du lac Léman). Des pertes complètes de verrouillage de phase se produisirent sur 4% d'un trajet long de 30 km.

Le scénario expérimental impliqua un véhicule dont la galerie supporte deux antennes GPS géodésiques présentant une séparation latérale de 1.54 m. Une antenne est connectée à un récepteur Leica SR530 accédant au serveur NTRIP, cadencé à la seconde, de swisstopo◊ via un lien GSM ultra-prioritaire (Oliveira-Marques et al., 2005). Le SR530 fut configuré pour enregistrer les solutions de localisation à 5 Hz avec un indicateur de

qualité meilleur que 5 m. Considérant la maturité de la technologie NTRIP, la trajectoire obtenue fut considérée comme une référence. La seconde antenne fut connectée à un récepteur Javad Legacy-GD collectant via le réseau GPRS des messages RTCM 2.3 à 5 Hz issus de notre serveur personnalisé. Le moteur RTK du Legacy-GD fonctionnait en mode extrapolé, signifiant qu'il étendait la validité de corrections échues en les calculant pour l'instant courant. La solution obtenue à chaque époque, à savoir celle que l'horloge du récepteur qualifiait d'actuelle, fut diffusée via un message NMEA à 5 Hz comportant la latence de chaque correction. La figure III-3.5 dépeint les trajectoires respectivement issues des messages NTRIP (croix) et de ceux du serveur personnalisé (cercles). Notons qu'un dispositif expérimental impliquant deux types différents de récepteurs GPS est discutable, car la comparabilité des trajectoires obtenues pourrait en pâtir. En fait, des considérations pratiques dictèrent ce choix : le Legacy GD, incompatible avec les messages RTCM 3.0 de swisstopo, n'incorporait pas de modem GSM convivial. Cependant, comme observé dans des tests précédents, la performance en mode cinématique des deux types de récepteur peut être largement considérée comme identique pour la trajectoire de test.

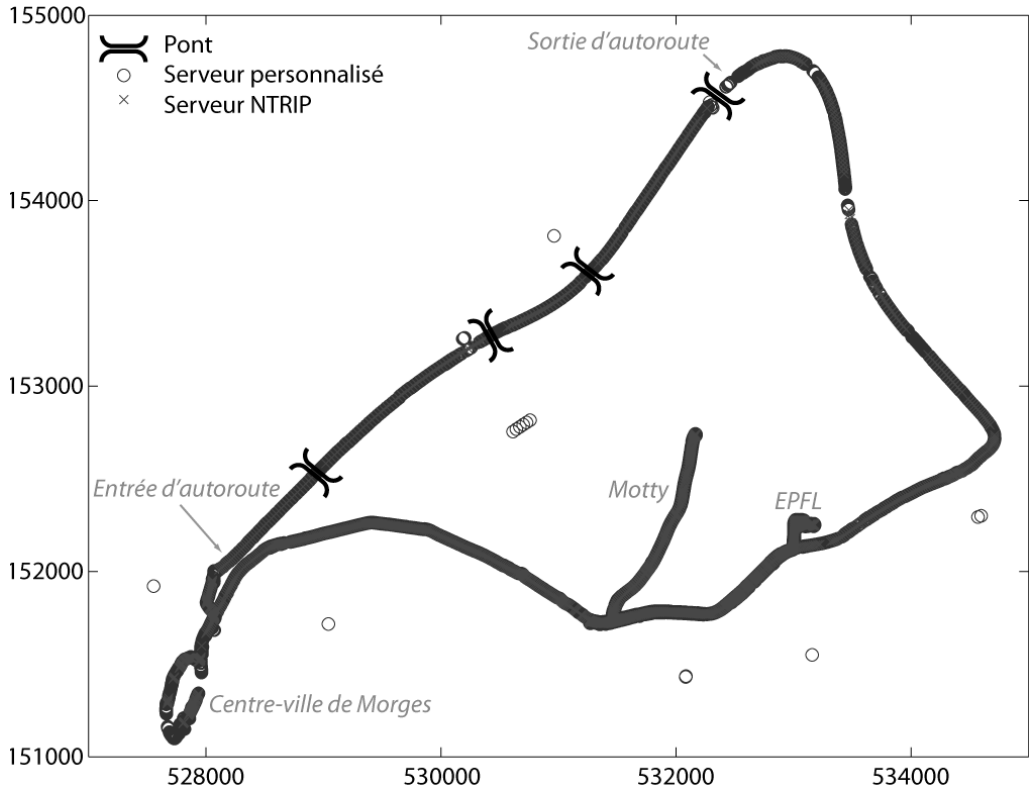


Figure III-3.5. Trajectographies issues du système NTRIP et du serveur personnalisé

2.2 Constations

La précision de la trajectoire du véhicule basée sur les corrections RTK issues du serveur personnalisé est similaire à celle obtenue avec le serveur NTRIP contacté par GSM. Des localisations aberrantes ne surviennent qu'en cas de perte totale de verrouillage, du fait

des occlusions causées par les ponts surplombant l'autoroute ou de la forte densité de constructions du centre-ville morgien. De tels artefacts sont absents des enregistrements du SR530 qui sont astreints à une qualité de localisation satisfaisante. De plus, les pourcentages de solutions de localisation associées à des valeurs entières, réelles ou inconnues d'ambiguïté (respectivement 32%, 36% et 32%) ressemblent fortement à ceux de NTRIP. Cependant, à partir d'une vitesse de 80 km/h, le lien GPRS au serveur personnalisé diffère le transfert de correction, voire échoue dans la livraison des messages RTK. Une dégradation significative de la précision de localisation survient alors.

Une des caractéristiques remarquables du serveur personnalisé consiste en la diffusion à haut début de corrections RTK forçant un récepteur GPS à calculer une solution "non prédite" à chaque époque. Sans cette contrainte, le SR530, censé consigner des positions à 5 Hz, ne réalise qu'un enregistrement par seconde. La latence des messages RTK dérive des processus que ceux-ci subissent, c'est-à-dire :

- calcul par la station de référence,
- encapsulation dans un message RTCM,
- transmission sérielle au serveur relais,
- encodage TCP/IP par le serveur,
- diffusion via le réseau GPRS,
- décodage TCP/IP par un module GPRS,
- transmission sérielle au récepteur itinérant,
- exploitation par le moteur RTK du récepteur itinérant.

En dépit de toutes ces étapes, la latence moyenne durant le test vaut seulement 1,7 s, valeur déduite des messages NMEA transmis par le Legacy GD. 10% de ces messages présentent même un âge de correction différentielle inférieur ou égal à la seconde, ce qui prouve qu'une transmission rapide de corrections RTK est efficacement exploitable. La figure III-3.6 montre la pertinence de la mise en œuvre du serveur personnalisé pour trajectographier un véhicule véloce, particulièrement lors de la négociation de virages serrés.

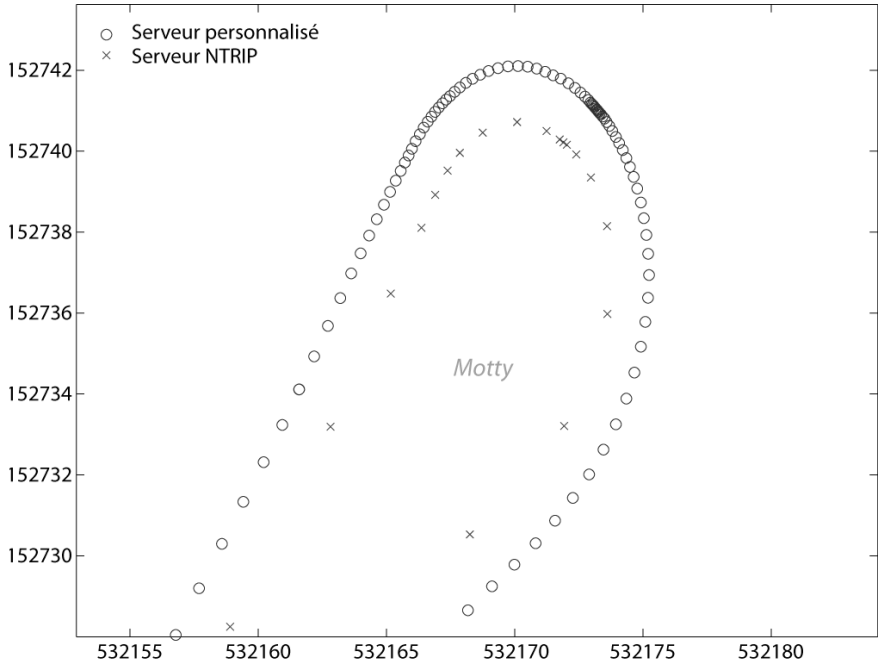


Figure III-3.6. Comparaison de trajectographies pour un virage serré

Les deux solutions de transmission RTK par Internet fournissent des résultats fiables. Dans des zones d'excellente visibilité satellitaire telles que le lieu-dit Motty près de l'EPFL, les trajectoires obtenues peuvent quasiment se déduire d'une translation de l'axe routier levé à l'aide de méthodes traditionnelles (Figure III-3.7)

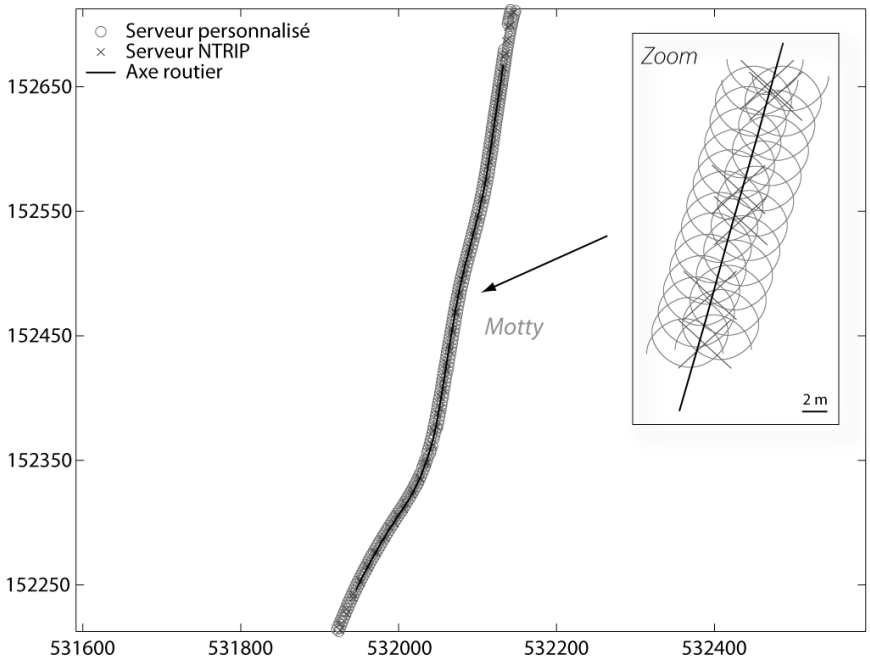


Figure III-3.7. Fiabilité de la trajectographie basée sur un serveur de corrections RTK

Bien que le réseau GPRS soit dédié à des êtres humains, donc à une utilisation piétonne, aucun blocage de transmission ou déconnexion n'arriva durant le test cinématique. Le déplacement à haute vitesse sur l'autoroute engendre une diminution de la cadence de corrections et par la suite, une dégradation de la précision de localisation. Cela explique le pic aberrant sur l'histogramme dont les classes représentent la distance inter-antennes tout au long du trajet (Figure III-3.8).

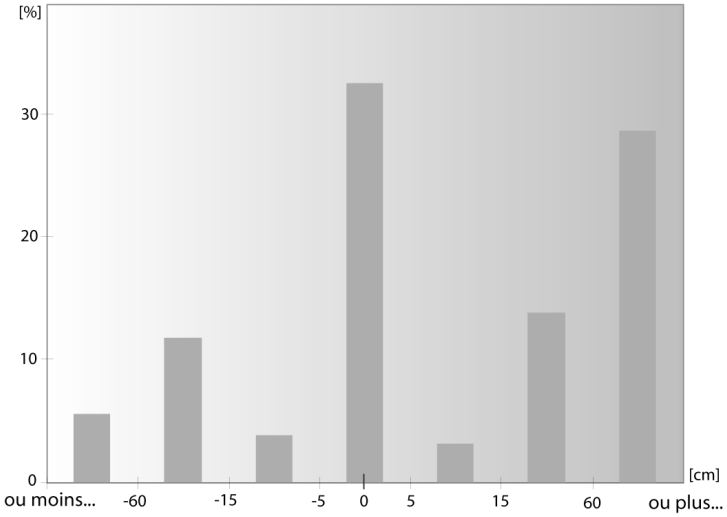


Figure III-3.8. Écart avec la distance nominale inter-antenne pour le trajet de 30 km. (0 correspond à la valeur nominale de 1.54 m)

3 Interprétation

Nous avons introduit une méthode novatrice d'acquisition GPS en temps réel pour la trajectographie de véhicules véloces. Ces avantages sont :

- l'excellente mobilité de l'approche, puisque la station de référence, accédant à l'Internet via un module GPRS de faible encombrement peut-être placée virtuellement n'importe où. Par conséquent, aucune interpolation similaire au VRS n'est requise pour la production de corrections RTK (Hu et al., 2002).
- la transparence du serveur personnalisé vis-à-vis des données échangées. Cela implique un libre choix de cadence et de format pour les corrections RTK tout en offrant un haut niveau de convivialité. De plus, aucun logiciel spécifique n'est nécessaire pour désencapsuler ces corrections, de sorte que seule une connexion des récepteurs GPS aux modules GPRS est nécessaire.
- l'implémentation aisée de logiciel complémentaire sur le serveur relais, et un applicatif Java côté serveur, alimentant une base de données MySQL avec les positions des récepteurs itinérants, nous a procuré des résultats prometteurs.

Un serveur Internet relayant des corrections RTK hautement cadencées, couplé avec des récepteurs itinérants compatibles GPRS, contribue en temps réel à la trajectographie

efficace de véhicules rapides. Des moteurs RTK évolués peuvent pleinement exploiter de corrections que le réseau GPRS parvient à transmettre en moins d'une seconde. De plus, l'appareillage d'encombrement réduit peut être aisément introduit dans d'autres domaines de la trajectographie, telles que le pistage de skieurs. De nouveaux logiciels complémentaires ôteront automatiquement les points aberrants par modélisation spline des trajectoires obtenues. Ils exploiteront également la connaissance continue de la position des récepteurs itinérants pour déplacer virtuellement la station de référence en vue de maintenir une ligne de base optimale. Cela pourrait empêcher l'obligation de réinitialiser le moteur RTK en cours de trajet. Finalement, l'arrivée imminente de la localisation satellitaire de deuxième génération (GPS3 et Galileo) ainsi que les liens de communication mobile à large bande (EDGE et UMTS) devraient remédier aux inconvénients majeurs de cette méthode.

Dans la section suivante, nous exploitons le serveur relais avec un récepteur GPS bi-antenne pour déterminer en temps réel la position et l'orientation du système cartographique, et ce, de manière fiable.

III.4 Localisation et orientation autonomes

1 Choix du circuit imprimé GPS

1.1 Contexte

Les applications actuelles de navigation et de guidage requièrent des rapports quasi-instantanés de position et de cap à plusieurs reprises par seconde. Le maintien d'une précision décimétrique tout au long d'une session de mobile mapping n'est pas actuellement réalisable à l'aide de capteurs bon marché (Shin E.-H., 2005). Par ailleurs, nos expériences avec une centrale inertielle haut de gamme Litton LN200 révèlent des écarts planimétriques d'un demi-mètre dès que les signaux satellitaires sont bloqués pendant plus de 30 secondes. Nous avons donc focalisé nos investigations sur un instrument susceptible de fournir une localisation et une orientation tant immédiates que précises de la caméra visionnant l'axe routier à cartographier. Un récepteur GPS spécifique, bi-fréquences et bi-antennes, s'avère une solution pertinente.

1.2 Comparaison de circuits imprimés GPS

Dans le cadre de nos tests de cartographie mobile, la distance séparant la station de référence des récepteurs itinérants demeure inférieure à 5 km. Le processus de résolution des ambiguïtés en temps réel implique donc des lignes de base courtes pour lesquelles la théorie algorithmique prévoit peu de difficulté si des observations GPS bi-fréquences sont utilisées (Kleusberg et Teunissen, 1998). Toutefois, la qualité de la mesure de phase demeure intimement liée au matériel, et cette dépendance est d'autant plus forte lorsque les conditions de réception satellitaire varient rapidement, voire brusquement. Les critères prépondérants pour la sélection sont :

- la précision de la mesure de phase en cas de rapport signal-bruit défavorable et de fortes accélérations,
- la vitesse de réacquisition du signal après perte de verrouillage partielle ou totale,
- la vitesse d'acquisition de L2 et la précision de la poursuite de cette onde.

Comme les fiches techniques des fabricants ne s'attardent guère sur ces considérations, nous avons mené une étude du comportement dynamique de plusieurs circuits GPS haut de gamme lors de déplacements dans des zones de faible visibilité satellitaire. La phase la plus significative du test impliquait une antenne bi-fréquence L1L24G de GPS Source simultanément connectée à un Leica System 500 (carte Toshiba TX39) et un Javad Legacy GD (carte Euro-GDA) via un diviseur de signal. La figure III-4.1 révèle des différences sensibles dans les vitesses d'acquisition du signal et les taux de succès de résolution des ambiguïtés, le tout en faveur de la carte Euro-GDA. Cela prouve que les réactions des

diverses plateformes GPS dans des conditions critiques sont nettement plus décisives pour l'obtention d'une localisation précise que les derniers développements algorithmiques sur la résolution des ambiguïtés (Limpach, 2003).

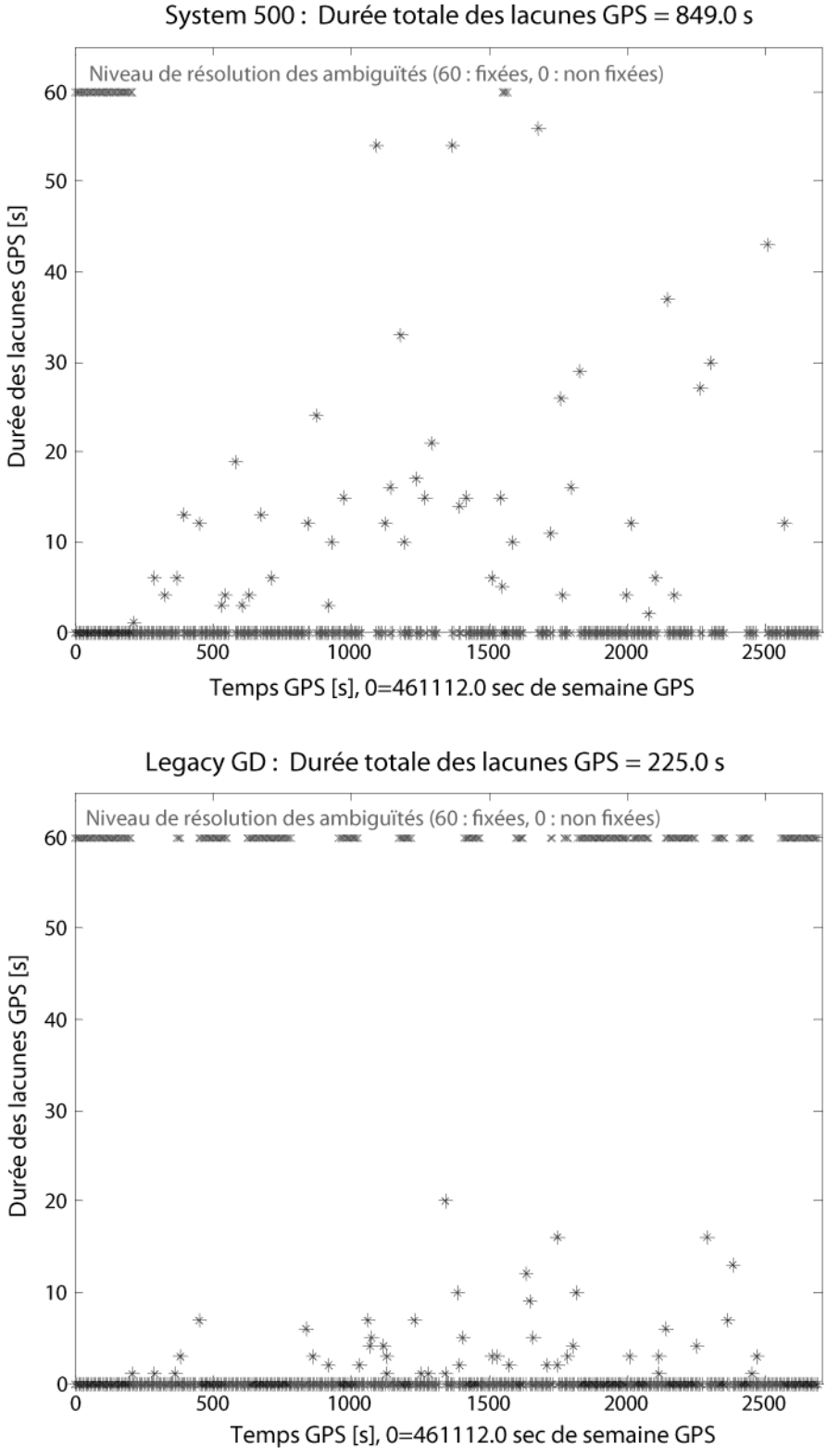


Figure III-4.1. Influence du circuit imprimé GPS sur la poursuite du signal et la résolution des ambiguïtés : comparaison entre deux récepteurs haut de gamme

1.3 Stratégie GPS

Au vu des résultats précédents, nous privilégierons naturellement l'exploitation de récepteurs GPS intégrant une carte Euro-GDA (Figure III-4.2). Cette dernière est d'ailleurs particulièrement adaptée à l'embarquement dans un véhicule, en vertu de son encombrement réduit – 100×80 mm – et de sa faible consommation, typiquement de 2.1 W. Nous avons donc retenu le récepteur Javad JNSGyro–2 incorporant deux de ces circuits pour assurer à chaque instant le géoréférencement direct◊ de la plateforme de mobile mapping. En outre, ce capteur présente une caractéristique remarquable : l'implémentation de la mobilité du récepteur GPS de référence.

Figure III-4.2. Circuit imprimé Euro-GDA

2 Récepteur de référence mobile

2.1 Concept

Dans la majorité des applications RTK, le récepteur de référence demeure immobile sur une position connue, tandis que l'itinérant est déplacé à loisir. Or, nos expériences prouvent que l'algorithmique impliquée, tout au moins celle implémentée par les entreprises phares du secteur GPS (Trimble, Topcon et Javad Navigation Systems), est insensible au mouvement de la station de référence. Une telle opportunité, dénommée RTK à base mobile, permet le calcul instantané d'un vecteur inter-antennes – une ligne de base – avec une haute précision. En effet, à chaque époque, la référence itinérante diffuse une correction CMR+ à son récepteur adjoint, si bien que la localisation relative de ce dernier est assurée à quelques centimètres près. Notons en revanche que la position absolue du vecteur inter-antennes correspond à la précision de GPS en mode autonome. L'amélioration de cette précision absolue passe par un accès de la référence à une source de corrections différentielles, typiquement le serveur de corrections personnalisées décrit dans la section III-3. La figure III-4.3 illustre les deux concepts qui sont implémentés dans le récepteur bi-fréquences et bi-antennes JNSGyro-2.

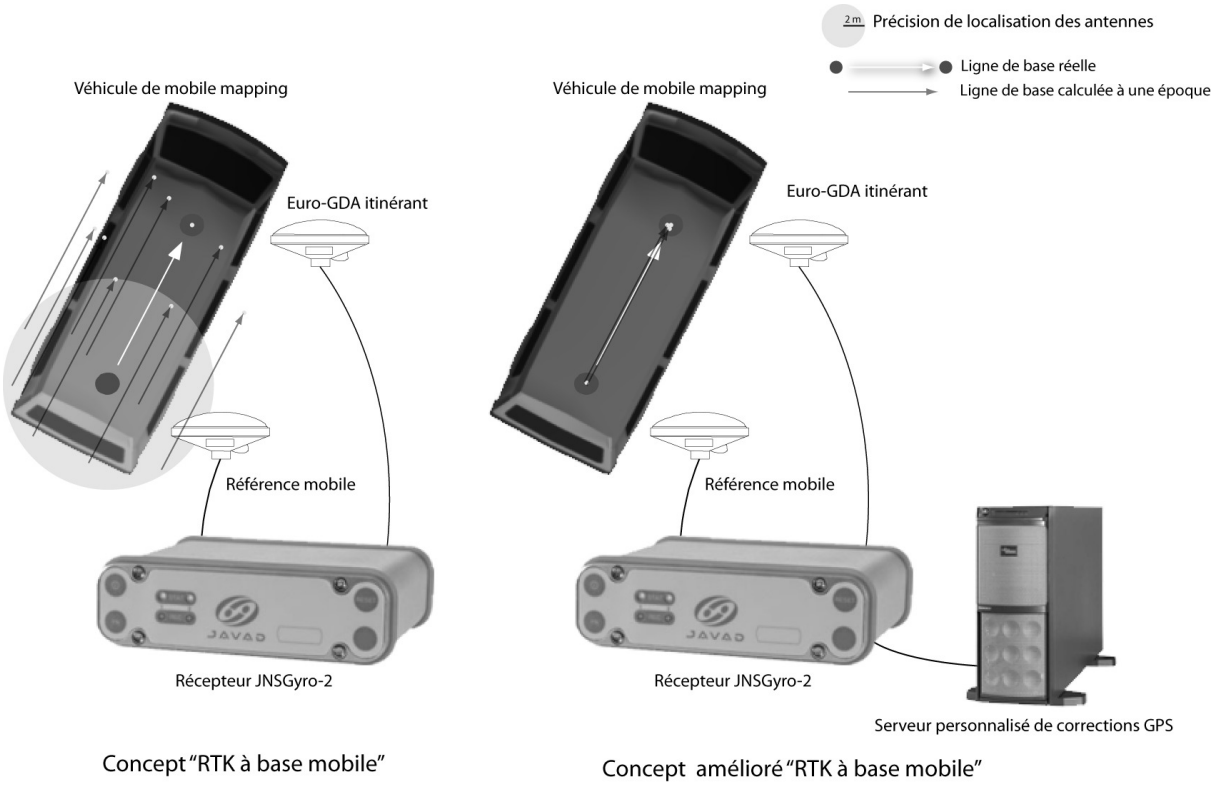


Figure III-4.3. Concepts simple et amélioré de "RTK à base mobile"

2.2 Orientation par récepteur GPS bi-antennes

L'exploitation du concept "RTK à base mobile" aboutit au calcul quasi simultané des coordonnées de la référence itinérante et de son récepteur adjoint, le tout avec une précision subdécimétrique. Si les deux antennes GPS sont disposées parallèlement à l'axe longitudinal d'un véhicule, deux angles d'attitude de ce dernier – l'azimut et le site – se déterminent aisément à chaque époque. En effet, dans un repère local Est-Nord-Haut, l'azimut Az et le site ι de la ligne de base formée par les deux antennes GPS s'expriment via les formules (1) et (2).

$$Az = \text{arctg}\frac{E_{IT} - E_{REF}}{N_{IT} - N_{REF}} \tag{1}$$

$$\iota = \text{arctg}\frac{H_{IT} - H_{REF}}{d} \tag{2}$$

où les triplets $(E_{REF}, N_{REF}, H_{REF})$ et (E_{IT}, N_{IT}, H_{IT}) désignent respectivement les coordonnées du récepteur de référence et celles du récepteur itinérant,
d désigne la distance inter-antennes.

A chaque époque, la position du récepteur auxiliaire est déduite de celle de la référence, supposée parfaitement connue (Rapoport, 2006). En outre, la distance inter-antennes d, définie au millimètre près lors de l'usinage du support, est considérée comme idéale en regard de la qualité de localisation conventionnellement attribuée à l'algorithmique RTK

en mode dynamique. C'est d'ailleurs cette qualité de localisation qui régit le modèle stochastique $\mathbf{K}_{\ell\ell}$ attribué au triplet (E_{IT}, N_{IT}, H_{IT}).

$$\mathbf{K}_{\ell\ell} = \sigma_0^2 \mathbf{Q}_{\ell\ell} = \begin{bmatrix} \sigma^2_{E_{IT}} & \sigma_{E_{IT}N_{IT}} & \sigma_{E_{IT}H_{IT}} \\ \sigma_{N_{IT}E_{IT}} & \sigma^2_{N_{IT}} & \sigma_{N_{IT}H_{IT}} \\ \sigma_{H_{IT}E_{IT}} & \sigma_{H_{IT}N_{IT}} & \sigma^2_{H_{IT}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.03^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.03^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0.06^2 \end{bmatrix} = 0.03^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

La connaissance de la longueur de la ligne de base invite naturellement à corriger la position du récepteur itinérant. L'expression (4) présente l'égalité obtenue si (E_{IT}, N_{IT}, H_{IT}) était parfaitement connue.

$$f\left(\check{\ell}\right) = d - \sqrt{\left(\check{E}_{IT} - E_{REF}\right)^2 + \left(\check{N}_{IT} - N_{REF}\right)^2 + \left(\check{H}_{IT} - H_{REF}\right)^2} = 0 \quad (4)$$

En considérant des observations réelles, nous avons $f(\ell) = w$, écart de fermeture supprimé par application d'une compensation conditionnelle. Cette dernière aboutit à la détermination de résidus compensés $\hat{\mathbf{v}}$ tels que $f\left(\ell - \hat{\mathbf{v}}\right) = 0$ avec :

$$\hat{\mathbf{v}} = \mathbf{Q}_{\ell\ell}\mathbf{B}^{\mathbf{T}}\left(\mathbf{B}\mathbf{Q}_{\ell\ell}\mathbf{B}^{\mathbf{T}}\right)^{-1} w \quad (5)$$

où $\mathbf{B} = \left[\frac{E_{REF} - E_{IT}}{s} \quad \frac{N_{REF} - N_{IT}}{s} \quad \frac{H_{REF} - H_{IT}}{s}\right]$

et $s = \sqrt{(E_{IT} - E_{REF})^2 + (N_{IT} - N_{REF})^2 + (H_{IT} - H_{REF})^2}$

Les observations compensées $\hat{\ell} = \ell - \hat{\mathbf{v}}$ sont affectées d'une matrice de covariance $\mathbf{Q}_{\hat{\ell}\hat{\ell}}$.

$$\mathbf{Q}_{\hat{\ell}\hat{\ell}} = \mathbf{Q}_{\ell\ell} - \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{v}}\hat{\mathbf{v}}} = \mathbf{Q}_{\ell\ell} - \mathbf{Q}_{\ell\ell}\mathbf{B}^{\mathbf{T}}\left(\mathbf{B}\mathbf{Q}_{\ell\ell}\mathbf{B}^{\mathbf{T}}\right)^{-1}\mathbf{B}\mathbf{Q}_{\ell\ell}$$

L'utilisation de ces valeurs compensées pour une propagation de variance dans les formules (1) et (2) permet de fournir un écart-type pour l'azimut et le site formés par les deux antennes GPS. Ainsi :

$$\sigma^2_{Az} = \mathbf{F}\begin{bmatrix} \sigma^2_{\hat{E}_{IT}} & \sigma_{\hat{E}_{IT}\hat{N}_{IT}} \\ \sigma_{\hat{N}_{IT}\hat{E}_{IT}} & \sigma^2_{\hat{N}_{IT}} \end{bmatrix}\mathbf{F}^{\mathbf{T}} \text{ et } \sigma^2_{\iota} = G \cdot \sigma^2_{\hat{H}_{IT}} \cdot G^{\mathbf{T}} \quad (6)$$

avec $\mathbf{F} = \left[\frac{\partial Az}{\partial E_{IT}} \quad \frac{\partial Az}{\partial N_{IT}}\right] = \left[\frac{N_{IT} - N_{REF}}{u} \quad \frac{-E_{IT} + E_{REF}}{u}\right]$

$$G = \left[\frac{\partial \iota}{\partial H_{IT}}\right] = \left[\frac{d}{d^2 + (H_{IT} - H_{REF})^2}\right]$$

$$u = (N_{IT} - N_{REF})^2 + (E_{IT} - E_{REF})^2$$

2.3 Mise en œuvre du récepteur JNSGyro-2

Nous avons vu que les cartes Euro-GDA intégrées dans le capteur JNSGyro-2 se caractérisent par des mesures de phase performantes sur L1 et L2, assorties à une vitesse satisfaisante de réacquisition du signal GPS après perte. De plus, elles peuvent gérer le mode amélioré "RTK à base mobile" en utilisant la distance inter-antennes comme contrainte (formule 4). Cette fonctionnalité nécessite toutefois un recours aux commandes associées à Gril$^{\lozenge}$, le langage d'interface spécifique aux instruments Javad Navigation Systems, pour :

- configurer une station de référence fixe, en vue de diffuser des messages CMR+ sur Internet via notre serveur relais et ce, à une cadence de 5 Hz,
- paramétrer une carte Euro-GDA comme référence itinérante, de sorte qu'elle affine sa précision de localisation à un niveau subdécimétrique par exploitation des messages du serveur relais, et qu'elle produise elle-même des corrections CMR+ à 5 Hz.
- définir l'autre carte comme récepteur auxiliaire, autrement dit comme exploitant des messages issus de la référence itinérante,
- assurer un processus de compensation fiable de l'azimut et du site via l'activation explicite de leur calcul ainsi que la donnée numérique de la distance inter-antennes.

Enfin, nous configurons le capteur JNSGyro-2 pour émettre par ligne sérielle une succession de messages binaires autorisant le géoréférencement direct de la plateforme de mobile mapping, parmi lesquels :

`[RT]`	début d'une époque
`[GT]`	temps exprimé en ms de semaine GPS
`[PV]`	position et vitesse exprimées dans le référentiel géocentrique Bessel 1840
`[SP]`	matrice de covariance de la position pour Bessel 1840
`[ha]`	azimut géographique et site de la ligne de base exprimés dans un repère Nord-Est-Bas (NEB_A^{BES}) tangent à la surface de l'ellipsoïde Bessel 1840
`[XA]`	date d'un événement détecté par le capteur JNSGyro-2
`[EE]`	fin de l'époque

La conversion des coordonnées, des angles et de leur précision respective dans le système de référence national constitue la matière d'un développement théorique proposé dans l'annexe A. Son intégration au sein d'un logiciel de mobile mapping en temps réel repose sur l'exploitation de la librairie matricielle newmat (Davies, 1994). Depuis sa création, cette collection de fonctions demeure largement répandue dans le milieu académique en raison de sa vitesse d'exécution, inhérente à son écriture en C/C++, et de sa convivialité (Eddelbuettel, 1996).

Nous avons testé le capteur JNSGyro-2 en mode amélioré "RTK à base mobile" et nos algorithmes lors d'une session de trajectographie en zone d'excellente réception GPS

(lieu-dit Le Motty, présenté dans la Section III-3.2). Afin d'analyser la précision de l'azimut et du site déterminés par les antennes distantes de 2.915 m l'une de l'autre, nous avons enregistré les coordonnées des deux cartes Euro-GDA ainsi que les matrices de covariance associées. Des valeurs de référence de ces angles sont obtenues par détermination du vecteur tangent à la trajectoire en chaque point par lequel est passé l'antenne de la référence mobile.

La figure III-4.4 révèle qu'un récepteur GPS bi-antenne et bi-fréquence est apte à déterminer l'attitude d'une plateforme mobile routière avec une haute précision, la non-détermination de l'angle de roulis étant compensée par la faiblesse du dévers maximal de la chaussée (exceptionnellement 7% soit 4 gons). Par ailleurs, les résultats obtenus prouvent que les écarts-types respectifs de l'azimut et du site, dérivant de la formule (6), sont compatibles avec l'expression empirique fournie par le constructeur – 0.002/d [rad] – bien que nous soupçonnions ce dernier d'avoir réalisé des tests uniquement en mode statique (précision a priori centimétrique des coordonnées des deux antennes GPS).

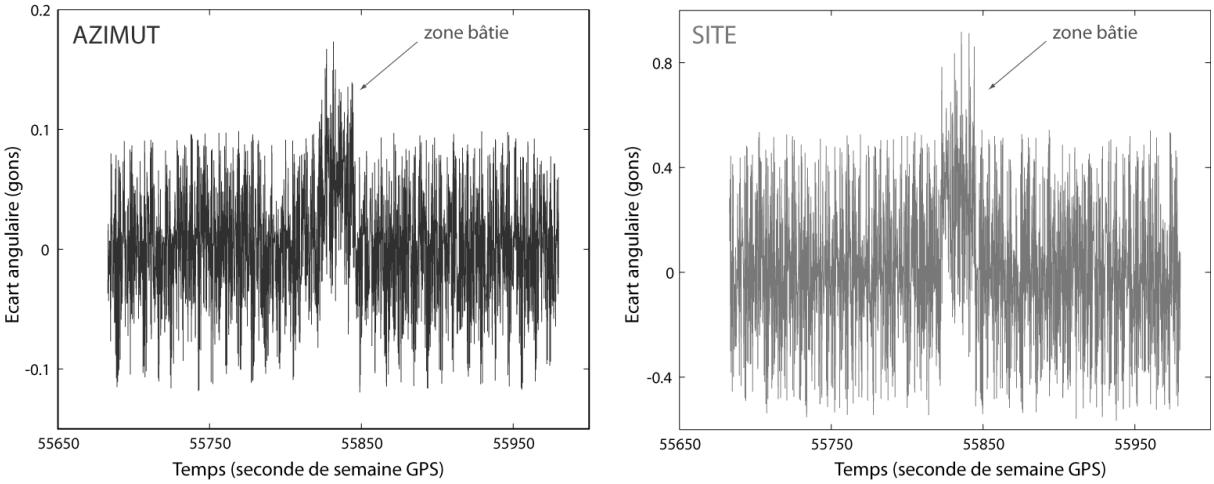


Figure III-4.4. Ecarts entre attitudes théorique et calculée d'un véhicule circulant en zone de réception GPS optimale

3 Conclusion

Le capteur JNSGyro-2 est susceptible d'autonomiser efficacement la localisation et l'orientation d'une plateforme cartographique mobile, pourvu qu'il reçoive des corrections RTK à haute cadence dans des zones de bonne couverture satellitaire. Néanmoins, il ne fournit pas la précision des angles obtenus, calcul que nous pouvons réaliser à chaque époque via les coordonnées issues des deux cartes GPS intégrées. Mais l'utilisation de ces coordonnées peut également aboutir à la détermination de l'azimut et du site formés par les deux antennes GPS. Cela remet donc totalement en question l'exploitation d'un périphérique dédié à la livraison en temps réel de l'attitude d'un système. Nous préférons donc qualifier cette précision à l'aide d'un indicateur de qualité basé sur le mode de localisation de la référence mobile (Tableau III-4.1).

Mode de localisation	*Précision associée*		*Qualité angulaire*	*Précision de l'azimut*	*Précision du site*
	Plani	*Alti*			
RTK, n appart N	4 cm	8 cm	A	0.44 gons	0.72 gons
RTK, n appart R	40 cm	80 cm	B	4.38 gons	7.19 gons
DGPS code	1 m	2 m	C	10.95 gons	17.98 gons
Autonome	5 m	10 m	D	54.78 gons	89.91 gons

Tableau III-4.1. Indice de qualité angulaire pour une distance inter-antennes de 2.915 m. n, N et R désignent respectivement les ambiguïtés, l'ensemble des entiers naturels et l'ensemble des réels.

Chapitre IV Traitement autonome de l'imagerie

IV.1 Imagerie numérique conventionnelle

1 Contexte

Un concept d'extraction en temps réel de géométrie de la route sous-entend le lever automatique de sa ligne centrale au rythme d'un point tous les 15 m (cf. Section I-4). Sachant que le véhicule cartographiant la chaussée se déplace à une vitesse moyenne de 60 km/h, autrement dit à 17 m/s, la prise de vue et son exploitation doivent être réalisées dans un intervalle temporel inférieur à la seconde. Le recours à la capture numérique de l'image s'avère donc indispensable. Répondant à cette problématique, les caméras à semi-conducteurs intègrent derrière leur objectif une matrice d'éléments photosensibles – des pixels – qui convertissent la lumière reçue en différence de potentiel. Après un rappel succinct sur l'image numérique monochromatique, nous comparerons deux principales catégories de matrices pixellaires et en tirerons des conclusions sur le choix d'un capteur d'image optimal pour la saisie de données en extérieur.

2 Image numérique monochromatique

2.1 Quantification spatiale

Une image numérique est une grille de valeurs de gris distinctes selon les coordonnées bidimensionnelles de ses éléments. Ces derniers, dénommés "pixels" (*picture elements*), présentent des dimensions homogènes et souvent égales $\Delta x \times \Delta y$ qui définissent un pas d'échantillonnage spatial. En effet, nous pouvons aisément observer de la figure IV-1.1 qu'un segment de droite continu d'une image analogique est représenté par une suite discontinue de pixels sur l'image numérique. Si la taille du pixel est diminuée, il est clair que la ligne prend un aspect plus continu mais nécessite davantage de pixels pour sa représentation. La qualité de l'échantillonnage spatial est donc directement assujettie à la taille du pixel, et Wang (1990) démontre que son optimisation repose sur une analyse de Fourier.

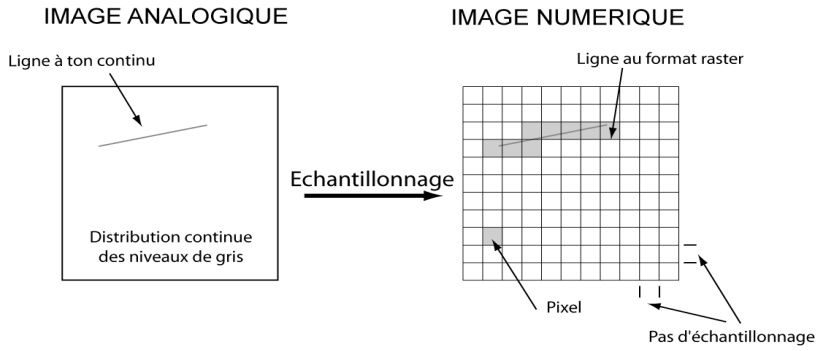


Figure IV-1.1. Passage d'une image analogique à une image numérique

2.2 Quantification en amplitude

Le niveau de gris, grandeur continue pour une image analogique, subit une quantification lors de la numérisation, en prenant une valeur comprise entre 0 et 255 dans le cas d'un encodage sur 8 bits. Cette valeur de 8 bits est usuellement considérée comme le seuil minimal nécessaire à la conservation de l'information contenue dans l'image analogique, mais contribue toutefois à l'émergence d'un bruit (Grossberg et Nayar, 2003). La figure IV-1.2 dépeint le processus de quantification en niveaux de gris que subit un signal atteignant les cellules photosensibles d'une caméra à semi-conducteurs. Le capteur ne fournira aucune réponse dans la zone inférieure du signal d'entrée (sous-saturation) ainsi que dans sa partie supérieure (sursaturation). Le reste de la courbe, caractérisé par une relation quasi-linéaire entre les signaux en entrée et en sortie, représente la gamme dynamique (GD) de la caméra, définie comme le rapport, exprimé en décibels, de la tension de saturation V_{sat} sur l'écart-type du bruit induit par le courant d'obscurité σ_{Vnoir}, ce courant mesuré à la sortie de la matrice de photodétecteurs en l'absence de rayonnement incident.

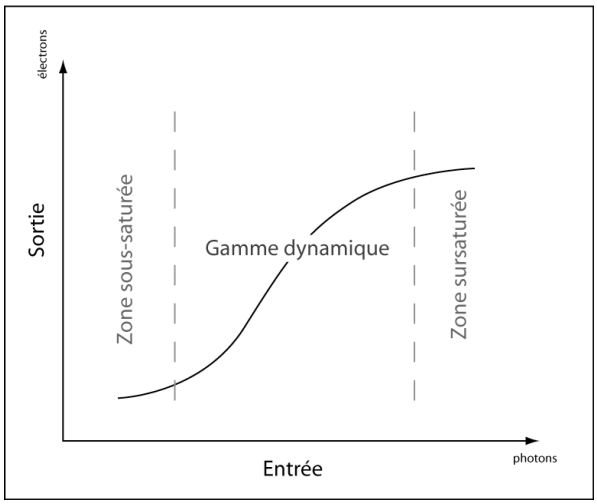


Figure IV-1.2. Gamme dynamique d'une caméra

2.3 Bruit dans une image numérique

La quantification du niveau de gris n'est qu'une source mineure de bruit dans une image numérique Elle est d'ailleurs généralement englobée dans le bruit de lecture d'une caméra, qui prend en compte les charges parasites liées à la réinitialisation approximative des pixels et l'amplification de tension. C'est le courant d'obscurité et plus particulièrement sa variation spatiale sur la matrice pixellaire, le "bruit spatial fixe" invariant dans le temps, qui dégrade principalement une image numérique (Reibel et al., 2002). Enfin, mentionnons que le bruit de grenaille, lié à la nature discrète des photons et des électrons, et la non-uniformité de réponse des pixels sous illumination contribuent marginalement à l'altération des informations contenues dans une image numérique (cf. tableau IV-1.1, inspiré de Reibel et al. et dont les valeurs numériques sont exprimées en unités analogique-numérique (ADU), une mesure de la luminosité pixellaire).

Source de bruit	*Contribution à la variance (en ADU²)*
Bruit spatial fixe	3.66
Bruit de lecture	0.56
Bruit de grenaille	$0.0023\times\overline{N}_{PE}$
Non-uniformité de la réponse pixellaire	$0.0006\times\overline{N}_{PE}^{\,2}$
Variance du bruit total	$4.22+0.0023\times\overline{N}_{PE}+0.0006\times\overline{N}_{PE}^{\,2}$

Tableau IV-1.1. Les contributions à la variance du bruit dans une image numérique. $\overline{N}_{PE}$ représente le nombre moyen d'électron par pixel rapporté à l'ADU.

3 Capteurs d'image numérique

3.1 Caméras à semi-conducteurs

Les capteurs d'image à semi-conducteurs représentent les dispositifs les plus répandus pour la saisie numérique de scènes d'intérieur ou d'extérieur. Ces circuits imprimés de faible encombrement sont placés directement derrière l'objectif des caméras pour assurer la conversion de toute lumière incidente en différence de potentiel, avec les limitations vues dans la section 2.3. Parmi les applications qui les mettent en oeuvre se distinguent :

- celles qui tentent de mimer la perception de la vision humaine (surveillance, photographie, fax, vidéoconférence, ...),
- celles qui surpassent la vision humaine (analyse optique ultrarapide, métrologie, exploration microscopique, perception dans l'infrarouge ou l'ultraviolet, fonctionnement dans des conditions extrêmes de température, ...)

En fait, la comparaison des caméras à semi-conducteurs avec l'œil humain présente des avantages et inconvénients similaires à celle d'un ordinateur avec le cerveau humain.

Idéalement, un capteur d'image à semi-conducteur devrait posséder les propriétés suivantes (Theuwissen, 2003) :

- rapport du nombre d'électrons contenus dans le courant photoélectrique au nombre de photons contenus dans le rayonnement incident supérieur à 1,
- courant d'obscurité nul,
- gamme dynamique infinie,
- sans bruit spatial fixe,
- rythme d'acquisition d'image très élevé,
- résolution d'image très élevée,
- grande densité de convertisseurs analogique vers numérique,
- consommation d'énergie très faible.

La confrontation des deux principales catégories de caméras à semi-conducteurs, à savoir CCD (Charge-Coupled Device ou dispositif à transfert de charge) et CMOS (Complementary Metal Oxide Semi-conductor ou semi-conducteur à oxyde métallique complémentaire), va nous permettre de prouver que le capteur d'image idéal demeure hors de portée de la technologie actuelle.

3.2 Présentation des technologies CCD et CMOS

Les technologies CCD et CMOS reposent sur le principe physique de l'effet photoélectrique pour lequel l'incidence de photons sur un semi-conducteur engendre des charges électriques. Nous limiterons notre étude capteurs de vision équipés de pixels actifs, c'est-à-dire dont chaque cellule photosensible intègre une amplification de charge.

Un dispositif à transfert de charges (CCD) se définit comme un circuit intégré photosensible, originellement conçu en 1969 par les laboratoires Bell aux Etats-Unis comme moyen de stockage novateur dédié aux ordinateurs. Au début des années septante, les propriétés opto-électriques du circuit – interaction avec la lumière suivie d'un transfert de charge – se sont révélées prédestinées à d'autres exploitations scientifiques et industrielles. Depuis, des composants électroniques aux applications nombreuses dans les domaines de l'acquisition d'image et du traitement du signal se sont largement développés à partir de ce simple circuit de stockage. Un capteur CCD comprend une matrice de photosites incorporant une photodiode adjointe à un condensateur isolé de la lumière. Ces photodiodes convertissent tout éclairage incident (photons) en charge (électrons), le nombre d'électrons collectés étant proportionnel à l'intensité lumineuse. Ainsi, durant un certain temps d'exposition, les photons sont recueillis simultanément sur la totalité de la matrice de photodiodes, et les charges générées, collectées dans le condensateur associé à chaque pixel, puis transférées de pixel en pixel. Après amplification et conversion en différence de potentiel au niveau d'une sortie commune, les charges sont lues au niveau des lignes de photosites, dans

l'ordre d'agencement dans la matrice pixellaire (Figure IV-1.3). Une telle architecture produit un capteur d'image très performant et peu sensible au bruit. Néanmoins, la mise en œuvre de CCD requiert la comparaison de nombreux signaux d'horloge et de voltage, ce qui complique considérablement le processus de fabrication tout en augmentant la consommation d'énergie, la taille du capteur et le coût (Fossum, 1993).

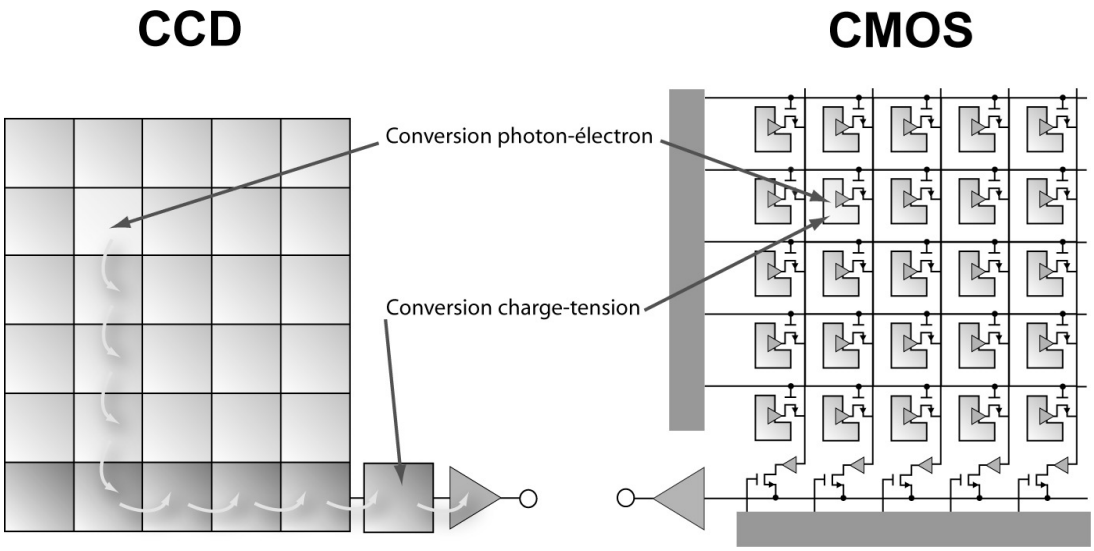


Figure IV-1.3. Technologies CCD et CMOS

En 1966, la société Westinghouse Electric conçoit le premier capteur CMOS, sous la forme d'une matrice pixellaire de 50×50 phototransistors. Néanmoins, les techniques lithographiques de l'époque se révèlent insuffisantes pour assurer une structuration optimale des couches de silicium. Ce n'est qu'au cours des cinq dernières années que s'est amplifié l'intérêt de l'industrie de l'imagerie et de la communauté scientifique envers les dispositifs CMOS implémentant désormais une amplification de charge au niveau pixellaire. Ces nouveaux pixels, qualifiés d'actif, intègrent de manière fiable l'électronique complétant le photosite – à savoir la logique embarquée, les horloges, et les convertisseurs analogique-numérique – de sorte que la conversion des photons en tension peut s'y effectuer directement. Les pixels renseignent donc en permanence sur l'intensité lumineuse, si bien que les photosites de la matrice entière, de sous-sections, ou même d'un unique pixel, sont consultables par une simple technique d'adressage XY.

Il convient de noter que la technologie CMOS est basée sur un processus de fabrication mature et banalisé, identique à celui employé pour l'usinage des circuits intégrés. Ceci permet d'envisager l'ajout à moindre coût de circuits logiques et de mémoire au niveau du capteur, dans le but, par exemple, de se débarrasser du besoin d'utiliser un numériseur vidéo◊. En revanche, un capteur CCD requiert une chaîne de production spécifique dont le coût a une inévitable répercussion sur le prix de vente des capteurs.

3.3 Comparaison des technologies CCD et CMOS

3.3.1 Rendement quantique

Le rendement quantique, défini dans la section 3.1, dépend de la réponse spectrale du substrat de silicone d'un photosite, influencée par l'épaisseur et la densité d'atomes dopés dans le silicium des différentes couches du pixel concerné. S'il est proche de 90% dans le spectre visible pour les deux technologies, la sensibilité de photodétection des capteurs CMOS est supérieure à celle des CCD car les amplificateurs de charge sont plus aisément positionnables dans leur matrice pixellaire (Danov et al., 2004).

3.3.2 Consommation d'énergie

Alors qu'une matrice pixellaire CCD requiert divers circuits intégrés spécifiques pour la conversion photon-électron, le transport et le traitement des signaux, la technologie CMOS repose sur des cellules de capture d'image conçues de manière monolithique. Le nombre réduit de composants nécessaires a un impact positif sur la consommation d'énergie, tout en réduisant la taille du système et sa complexité (Cho et al., 2001). Theuwissen (2003) ajoute qu'en général, les tensions d'exploitation sont respectivement de 3,3 V pour CMOS contre 10 V, voire plus, pour la matrice pixellaire CCD.

3.3.3 Bruits et courant noir

Le bruit spatial fixe et le bruit temporel aléatoire, décrits dans la section 2.3, limitent la performance des capteurs de vision. Le premier provient d'un défaut d'appariement des composants lié au procédé de fabrication, si bien qu'il est invariant dans le temps. Il s'agit donc du seul bruit de caméra susceptible d'être sensiblement atténué, voire supprimé, par calibrage ou par l'adjonction d'une électronique adéquate (Ortiz et Oliver, 2004). En fait, la qualité d'une image CCD est généralement supérieure à celle d'une image CMOS grâce au recours à des substrats multicouches de semi-conducteurs et à des amplificateurs de plus grande taille, ce qui limite l'émergence de signaux parasites. Par ailleurs, la technologie CMOS induit une fuite notable de courant au niveau du photorécepteur qui se décharge même dans l'obscurité (Shcherback et al., 2001), ce qui limite son utilisation à de faibles temps d'exposition – une contrainte non rédhibitoire pour la saisie d'images à partir d'un véhicule en mouvement.

3.3.4 Vitesse

L'accès aléatoire aux pixels CMOS permet d'accroître significativement la cadence d'acquisition des images, en restreignant la lecture des photosites à une zone restreinte, communément qualifiée de "région d'intérêt", voire de lignes individuelles (balayage linéaire) au lieu de la totalité de la matrice pixellaire. En outre, la technologie CMOS dispose intrinsèquement d'un net avantage sur les capteurs CCD étant donné que la majorité des fonctionnalités inhérentes à la création d'un signal vidéo utilisable sont logées dans chaque pixel. De ces trajets de signal plus courts résulte une minimisation des délais affectant l'acheminement des signaux, si bien que les caméras CMOS

disposant d'un obturateur global sont susceptibles d'assurer une cadence d'acquisition d'image sensiblement supérieure à celle des caméras CCD. Aussi, les fabricants de pointe proposent-ils désormais des caméras CCD capturant une image de 640×480 pixels (format VGA) à un rythme de 10 000 images (CPLab, 2006) par seconde contre 250 000 images par seconde pour des caméras CMOS 512×512 pixels (Bridges, 2006). Cette disparité des cadences d'acquisition se manifeste également dans la communauté scientifique, la fréquence ultime d'enregistrement *en continu* s'élevant à 10^6 images par seconde pour un capteur CCD VGA (Maruyama et al., 2005), et à 10^7 images par seconde pour une matrice CMOS de 1288×1032 pixels (Fillipov, 2002).

3.3.5 Éblouissement et marbrures

L'éblouissement, ou perte soudaine du contraste dans des zones surexposées de l'image, affecte particulièrement les pixels CCD qui, une fois saturés, disséminent leurs charges excédentaires dans leurs voisins. En outre, lorsque l'objet observé reflète une vive lumière, par exemple dans le cas d'un revêtement routier humide, les bascules à registre récupérant les charges de chaque ligne ou colonne de pixels reçoivent un signal parasite générant des marbrures sur l'image (cf. Figure IV-1.4). Les cellules CMOS sont exemptes de ces sources de dégradation vidéo en raison de l'absence de transfert de charge inter-pixellaire, et par extension, de l'absence de bascules à registre.

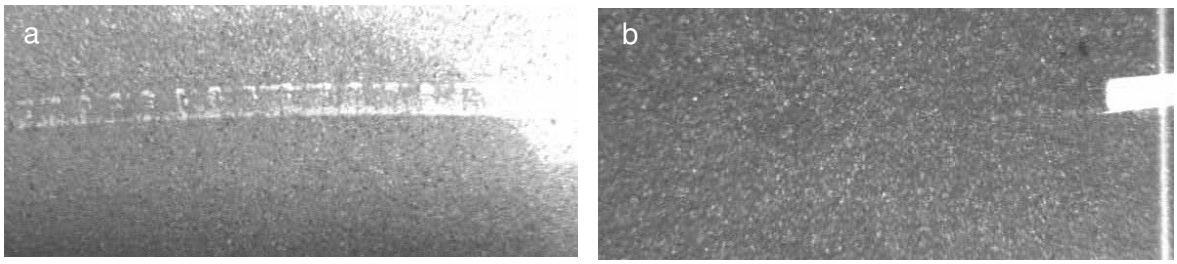


Figure IV-1.4. Éblouissement (a) et marbrure (b) sur des images issues d'un capteur CCD

4 Conclusions

Depuis plusieurs décennies, la technologie CCD est largement utilisée dans les capteurs d'image numérique en raison de sa haute photosensibilité, de son bruit spatial fixe faible, et de ses matrices pixellaires de grande taille. Cependant, ces cinq dernières années, les caméras CMOS connaissent une popularité croissante parmi les communautés scientifiques et industrielles grâce à leur dissipation énergétique modérée, leur coût faible, ainsi que leur possibilité calculatoire au niveau du pixel, comme illustré sur la figure IV-1.5. C'est d'ailleurs cette faculté que nous exploitons pour la capture optimale de scènes en extérieur à l'aide d'une caméra CMOS intelligente (cf. section IV-2).

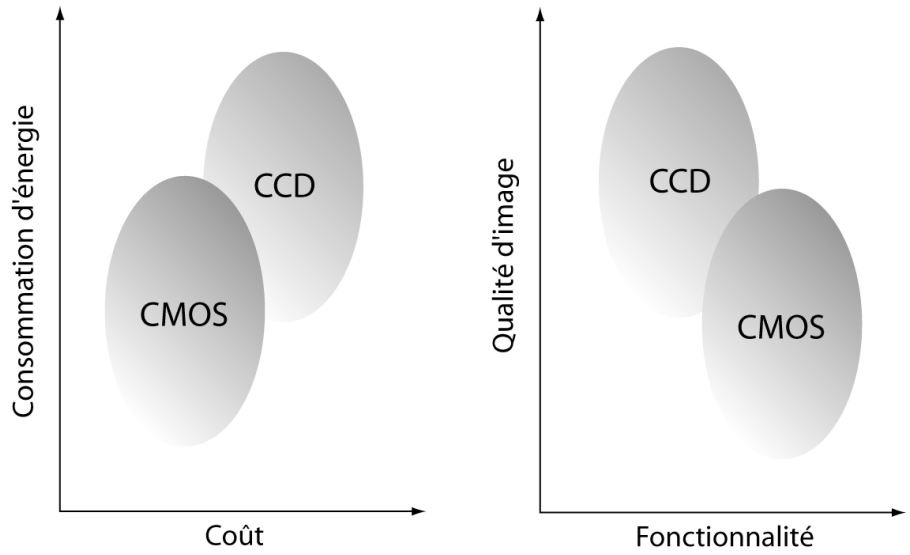


Figure IV-1.5 : Capteur CCD contre CMOS

IV.2 Capteur d'images logarithmique CMOS

1 Capture numérique d'image en extérieur

En l'absence d'éclairage artificiel, l'amplitude intrascène des luminances◊ en environnement extérieur couvre typiquement cinq ordres de magnitude, de 1 lux pour les zones d'ombre à 10^5 lux pour celles directement exposées au soleil (cf. figure IV-2.1). Or, les caméras standard CCD et CMOS qui dominent actuellement le marché des capteurs d'image numérique disposent d'une gamme dynamique inférieure à trois ordres de magnitude (Theuwissen, 2003). Bien que ces capteurs puissent s'adapter à un éclairage intrascène hétérogène par ajustement de leur diaphragme ou un contrôle global de leur temps d'intégration, des taches liées à la saturation des pixels apparaissent lors de la capture de scènes d'extérieur. Or, ces altérations d'image sont susceptibles de leurrer des algorithmes de détection automatique du marquage de l'axe de la route, typiquement la binarisation, qui rejette les pixels sous-exposés des zones ombragées tout en promouvant ceux sursaturés par un éclairage solaire direct.

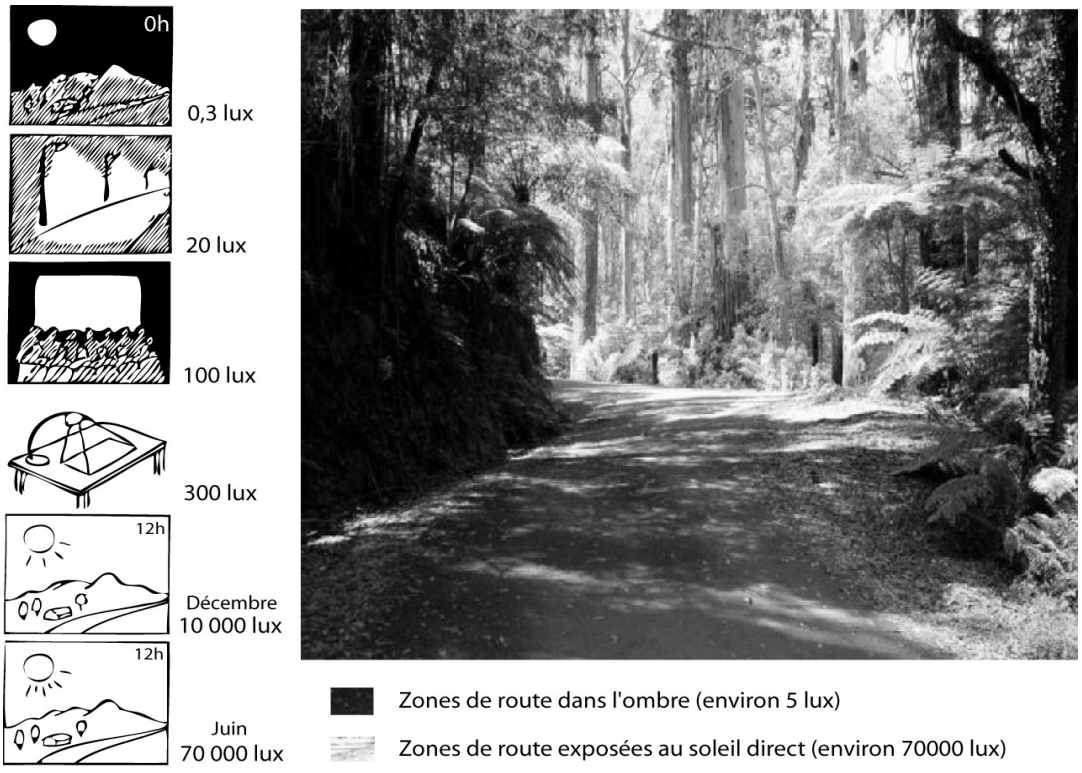


Figure IV-2.1. Scène routière mêlant ombre et lumière solaire directe

Nous proposons ici une solution à cette problématique via le couplage d'une matrice de pixels CMOS logarithmiques avec une unité de traitement embarquée, optimisée par Linux◊.

2 Pixels logarithmiques

La communauté scientifique gravitant autour de la vision numérique propose diverses approches pour étendre la gamme dynamique des caméras, mais la plupart occasionnent soit une réduction du facteur de remplissage, autrement dit une diminution de la surface photosensible de chaque pixel, soit une augmentation drastique de la taille et du coût de chaque pixel (Yadid-Pecht, 1999). La fusion automatique d'images de la même scène prises avec des temps d'exposition variables constitue un axe de recherche prometteur (Castorina et al., 2005), dans la mesure où :

- la linéarité du signal est préservée,
- une matrice pixellaire CCD ou CMOS standard suffit,
- les pixels CCD ou CMOS standard exhibent un faible bruit de lecture.

Une telle méthodologie n'est cependant pas applicable aux images capturées par une caméra en mouvement rapide. La solution que nous avons retenue consiste en l'exploitation des possibilités calculatoires du pixel CMOS, par modification de microcomposants au niveau de chaque cellule photosensible. Aussi le mécanisme de remise à zéro du pixel CMOS conventionnel est-il remplacé par un transistor MOS connecté en diode, si bien que le courant délivré par le photodétecteur est désormais converti en une tension logarithmiquement proportionnelle (Matou et Ni, 2002). Or, le défaut d'appariement des composants pixellaires engendre une fuite de courant saturant le capteur sous un faible éclairement, phénomène répertorié sous la dénomination de courant d'obscurité (cf. Section IV-1.3). Un tel comportement nous incite à modéliser la réponse r d'un pixel logarithmique à un photocourant i en présence d'un courant noir n par :

$$r = d + g \cdot \log(i + n) \tag{1}$$

où d désigne la tension de décalage du pixel et g, son gain.

Cette formule, attestée par Choubey et al. (2006), permet d'affirmer que le pixel ne peut réagir que si le courant induit par la lumière incidente dépasse la valeur du courant noir. Il en résulte une sensibilité particulière de tout capteur logarithmique CMOS au bruit spatial fixe.

3 Caméra logarithmique CMOS

3.1 Caractéristiques de la matrice pixellaire

Actuellement, la complexité de l'intégration de microcomposants dans un pixel réserve le développement industriel de matrices de cellules logarithmiques CMOS à l'Américain Cypress, au Suisse Photonfocus et à l'Italien Neuricam. Il nous a paru judicieux de bénéficier de l'ancienneté sur le marché de ce dernier pour acquérir un capteur de vision logarithmique Pupilla (marque déposée), dont la matrice de 640×480 pixels monochromes offre une étendue dynamique de 120 dB assortie d'une réponse de sortie encodée sur 10 bits, soit 1024 niveaux de gris (cf. Figure IV-2.2).

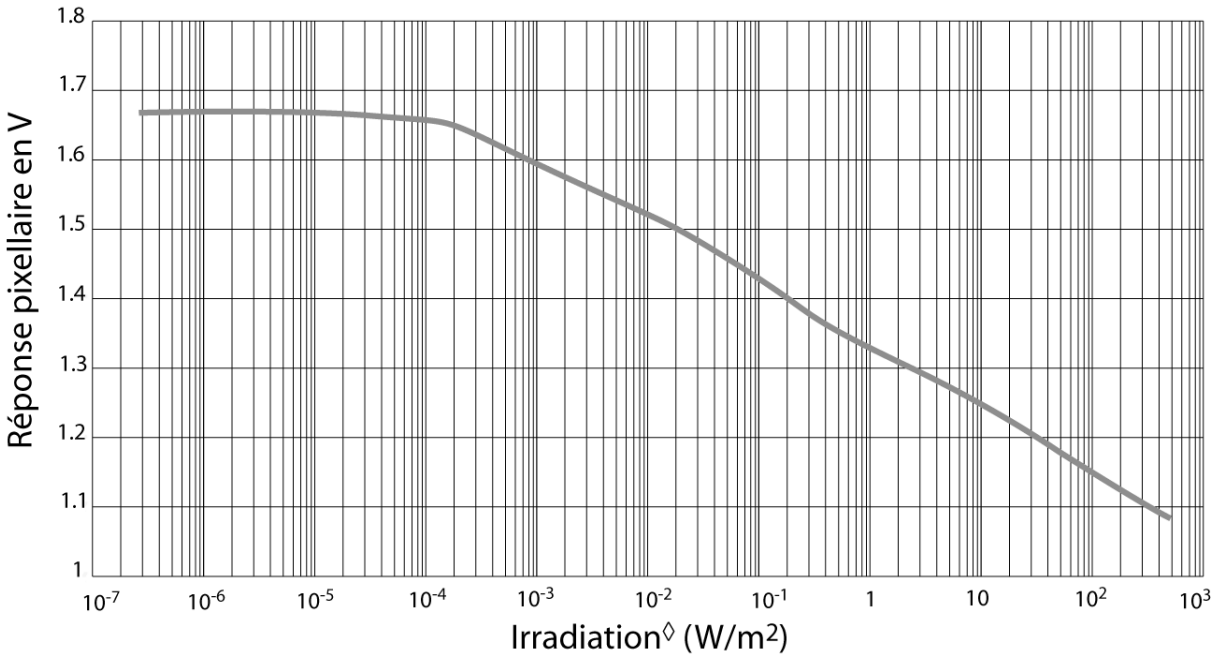


Figure IV-2.2. Sensibilité de photodétection du capteur Pupilla

La cadence d'acquisition de Pupilla, de 24 images par seconde en mode VGA, est susceptible d'augmenter par définition d'une zone d'intérêt sur la matrice pixellaire. Ses caractéristiques détaillées figurent sur le tableau IV-2.1.

Au contraire de ses concurrents plus récents, le capteur de Neuricam ne bénéficie pas d'une circuiterie assurant un double échantillonnage corrélé, à savoir une technique de réduction de bruit spatial fixe par soustraction d'une charge de référence, liée à l'état (ré)-initialisé d'un pixel, à la charge engendrée par l'illumination du même pixel et ce, pour la totalité de la matrice photosensible et pour chaque saisie d'image. Dans le cas de Pupilla, l'atténuation de cette source d'altération vidéo requiert un traitement numérique embarqué.

Caractéristique électro-optique	*Valeur numérique*
Résolution de la matrice	640×480
Pas de pixel	8 µm×8 µm
Taille de la matrice	5.120 mm×3.840 mm
Facteur de remplissage	40%
Convertisseur analogique/numérique	10 bits
Courant noir	6,45 fA à 27°C
Sensibilité (lumière blanche)	< 1 mW/m^2 (environ 0,2 lux)
Bruit spatial fixe	12 mV
Gamme dynamique	120 dB

Tableau IV-2.1. Caractéristiques optoélectroniques du capteur Pupilla.

3.2 Contrôle de la matrice pixellaire

La correction du bruit spatial fixe, ainsi que l'exploitation du capteur Pupilla, sont gérées numériquement par un réseau de portes programmables – un FPGA◊ Xilinx. La mémoire Flash◊ de ce dernier renferme une image de correction par défaut, contribuant à l'atténuation du bruit spatial fixe par soustraction de valeurs de gris de référence à chaque lecture pixellaire en temps réel. Le stockage de cette correction repose sur l'algorithmique suivante, laquelle appartient au processus de calibrage de la caméra :

- capture d'une image plein cadre d'un support uniformément blanc, sous une lumière comparable à celle des conditions d'exploitation,
- calcul de la réponse moyenne des pixels, laquelle est considérée comme représentative du comportement optimal des cellules photosensibles sous un tel éclairement,
- calcul de la différence entre les réponses moyenne et individuelle des pixels, l'image issue de la traduction en niveaux de gris de ces différences constitue l'image de correction,
- stockage de l'image de correction dans la mémoire Flash gérée par le FPGA.

Le réseau de portes programmable Xilinx décharge également l'unité centrale de la caméra de l'adressage aléatoire des pixels, c'est-à-dire qu'il peut autoriser la capture d'un sous-ensemble rectangulaire de la matrice pixellaire en vue d'optimiser la cadence d'acquisition vidéo. Notons que cette dernière est limitée par la bande passante du réseau Ethernet – 10 Mbits/s – assurant le transfert d'images de la caméra à son ordinateur client (cf. tableau IV-2.2 et figure IV-2.3). Le FPGA régule aussi la conversion analogique-numérique du signal pixellaire par définition de tensions de contrôle, et gère

des lignes opto-isolées◊ pour synchroniser la capture vidéo avec des événements extérieurs.

Taille de la zone d'intérêt	*Poids en bits*	*Fréquence d'image*
1 pixel×1 pixel	10	10^6 Hz
640 pixels×1 pixel	6400	1562,5 Hz
320 pixels×240 pixels	768000	13 Hz
480 pixels×300 pixels	1440000	7 Hz
640 pixels×480 pixels	3072000	3,3 Hz

Tableau IV-2.2. Relation entre zone d'intérêt pixellaire et fréquence d'image

3.3 Coeur de la caméra

Neuricam intègre son capteur CMOS logarithmique dans une caméra de faible encombrement, l'Ethercam, de telle sorte que le FPGA étudié joue le rôle d'intermédiaire entre la matrice pixellaire et un micro-processeur ARM7◊ dédié à l'informatique embarquée (cf. figure IV-2.3). Cela permet au processeur de consacrer sa puissance de calcul au traitement éventuel des images saisies et à leur diffusion.

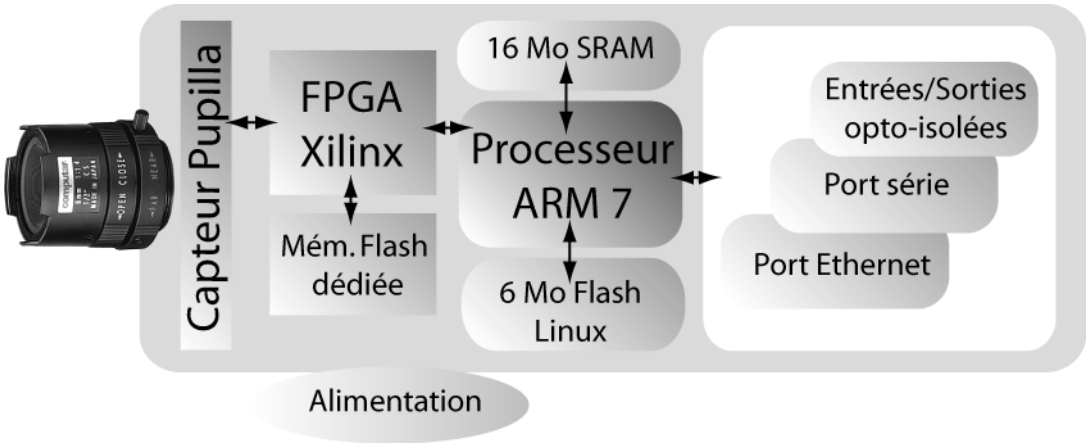


Figure IV-2.3. Schéma de principe de la caméra logarithmique CMOS

Nous exécutons ces fonctionnalités via l'implémentation de logiciels spécifiques qui sont exécutés par un système d'exploitation embarqué Linux◊ résidant dans la mémoire non volatile du processeur. Si nous avons renoncé à tout traitement embarqué de l'image pour optimiser la fréquence d'acquisition des scènes routières (cf. Section IV-3), le transfert d'images est organisé selon une architecture client/serveur.

4 Images livrées par une caméra CMOS logarithmique

L'Ethercam, périphérique conçu pour les applications embarquées, présente une contrainte de mémoire évidente avec ses 6 Mo de mémoire volatile, dont 2 sont consacrés à l'hébergement du système d'exploitation Linux et à nos programmes personnalisés. Puisque cette caméra dispose d'un port Ethernet, il est légitime d'implémenter une transmission des images capturées via TCP/IP◊ vers un ordinateur hôte pour assurer un stockage et un traitement numérique poussé. Comme Linux inclut probablement la pile de protocoles de communication satisfaisant au mieux la documentation RFC◊, ce système d'exploitation libre fut également le choix naturel pour gérer le PC◊ collectant les images. Ses librairies de communication bien documentées et publiées sous licence GPL◊ facilitent considérablement l'implémentation de la structure client/serveur (Gay, 2000).

L'application serveur, exécutée par l'Ethercam, vérifie en premier lieu la connexion Internet de son client, puis somme le FPGA d'attendre une impulsion sur son entrée opto-isolée pour lancer le processus de capture d'image, à savoir la lecture des pixels de la région d'intérêt corrigée du bruit spatial fixe. Finalement, une matrice de niveaux de gris est prête à l'envoi sous forme de paquets TCP/IP. Le logiciel client sur PC alloue de la mémoire pour les images entrantes, ajoute l'entête adéquat pour une reconnaissance ultérieure par nos programmes personnalisés de traitement d'images. L'image est finalement stockée sur un disque dur de grande capacité, pour contrôle éventuel des coordonnées de l'axe central de la route obtenues en temps réel (Figure IV-2.4).

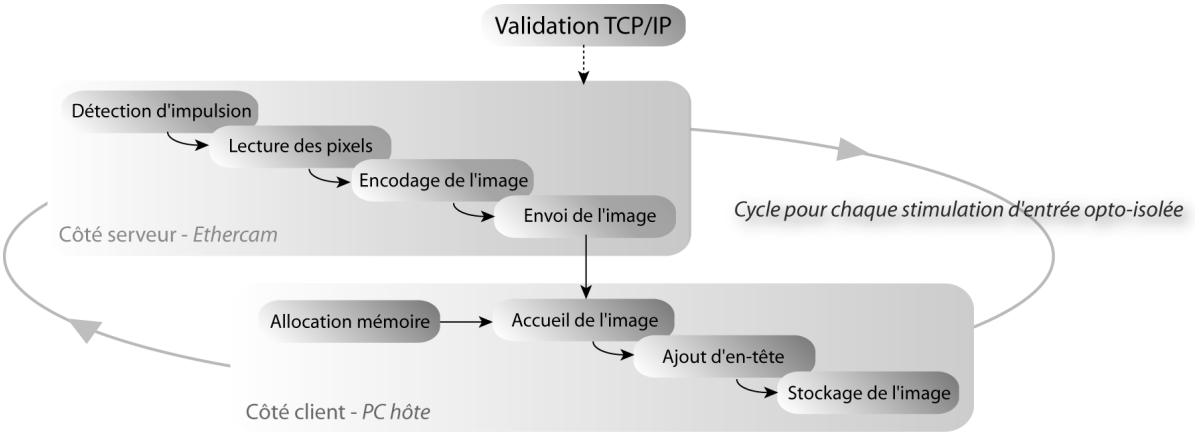


Figure IV-2.4. Interaction client/serveur entre l'Ethercam et son ordinateur hôte

5 Conclusion

L'adoption d'une caméra logarithmique CMOS comme module vidéo d'un système de mobile mapping s'avère particulièrement prometteuse. Embarquée dans une plateforme mobile de saisie d'image d'extérieur, donc de gamme dynamique étendue, cette caméra

s'avère apte à la capture simultanée de zones d'illumination disparate, sans perte notable d'information moyennant une correction *on-chip* de son bruit spatial fixe (cf. Figure IV-2.5). Même si l'Ethercam étudiée intègre des fonctionnalités de traitement d'image, l'optimisation de la cadence d'acquisition vidéo nous contraint à extraire les coordonnées de l'axe routier sur un ordinateur hôte. Les concepts et l'algorithmique sous-jacents font l'objet de la section suivante.

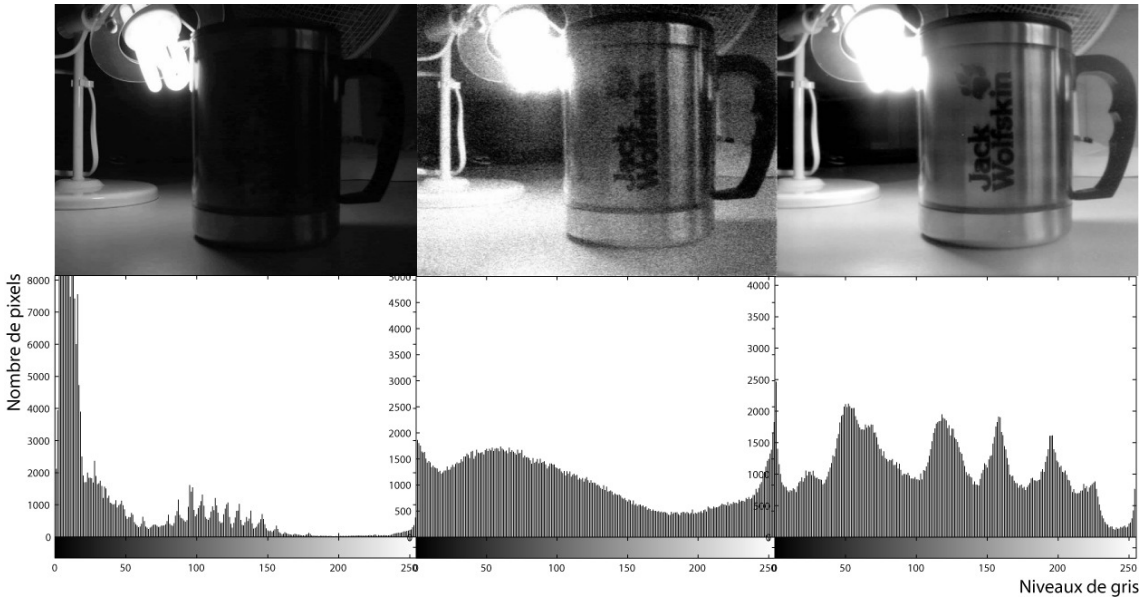


Figure IV-2.5. Capture d'une scène présentant une gamme dynamique étendue par une caméra CCD (a), une caméra logarithmique CMOS sans correction du bruit spatial fixe (b), une caméra logarithmique CMOS avec correction du bruit spatial fixe (c)

IV.3 Extraction d'axe routier en temps réel

1 Concept du traitement d'image

Les images constituent une source importante d'informations pour l'interprétation et l'analyse de notre environnement. L'intervention humaine dans un tel processus se heurte au caractère chronophage de l'inspection visuelle, laquelle est sujette à des interprétations et des estimations peu cohérentes de scène en scène. Usant de critères bien définis, l'intelligence artificielle constitue la candidate idéale pour s'acquitter de ces tâches sur des images préalablement numérisées. Le traitement d'image repose sur des algorithmes exploitant des statistiques et des mesures sur les niveaux de gris des pixels, et la diversité des outils d'inspection offerts couvrent un vaste spectre de domaines, de la médecine à la métrologie industrielle.

L'extraction de marquages au sol via le post-traitement d'images aériennes ou terrestres est largement décrite dans la littérature (Heipke et al., 1995 ; Ruskoné, 1996 ; Boichis, 2000 ; Hu et al., 2004 ; Tournaire et al., 2006). Toutefois, la capture "temps réel" d'axes routiers demeure peu abordée, et nous présenterons une méthodologie déterministe reposant sur une succession optimale d'algorithmes légers de pré-traitement et de segmentation d'images (National Instruments, 2006). Enfin, nous préciserons les modalités de l'intégration de cette algorithmique au sein d'une plateforme logicielle dédiée au mobile mapping.

2 Algorithmes de pré-traitement

2.1 Rehaussement radiométrique

Le rehaussement radiométrique concerne les pixels d'une image numérique dans leur individualité, sans tenir compte des éventuelles relations de voisinage. Elle permet d'appréhender le contenu d'une scène numérique pour la définition ultérieure des méthodes d'inspection satisfaisant à l'application souhaitée.

2.1.1 Modification d'histogrammes

Un histogramme représente la répartition de l'intensité lumineuse d'une image où sont portées en abscisse, le numéro des niveaux de gris et, en ordonnée pour chaque niveau, le nombre de points ayant l'intensité correspondant à ce niveau. A la base des statistiques des niveaux de gris, un tel graphique permet de repérer une exposition déficiente d'un capteur d'imagerie. En effet, un pic pour les classes caractéristiques des niveaux de gris

faibles révèle une sous-exposition de l'image, tandis qu'un grand nombre de pixels pour les classes se rapprochant du blanc traduit une saturation. En outre, l'histogramme peut contribuer à séparer les objets d'intérêt de leur fond en révélant des populations de pixels bien distinctes (Figure IV-3.1).

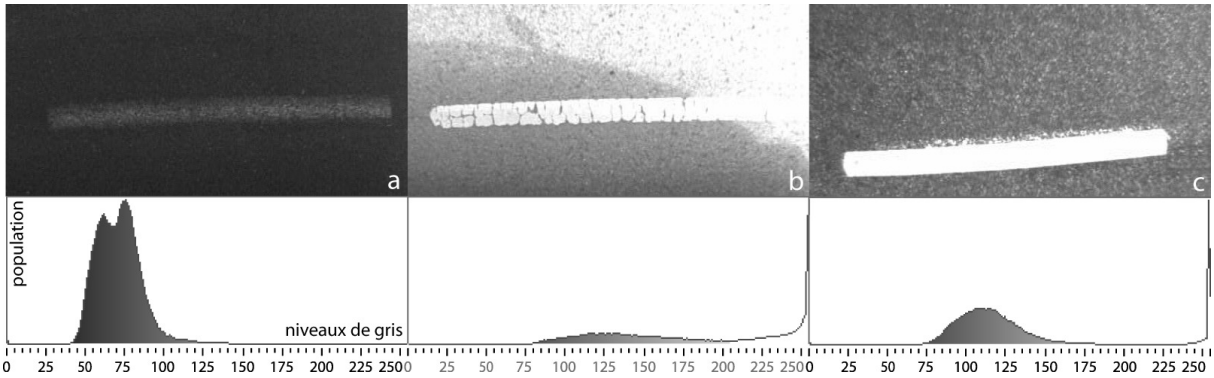


Figure IV-3.1. Histogrammes de saisies de chaussée. En cas de sous-exposition (a) ou de sursaturation (b), le marquage routier est difficilement identifiable par isolation de populations pixellaires. L'exemple (c) présente un cas favorable d'extraction de l'axe routier correspondant à des pixels au niveau de gris supérieur à 230.

Dans le cas d'une image de saturation déficiente, une modification d'histogramme peut contribuer à accentuer le contraste de la scène. Néanmoins, une telle correction renforce des détails dans des zones jugées offrir une information significative au détriment d'autres régions de l'image. Toutefois, l'adoption d'une caméra logarithmique CMOS livre directement des images de contraste convenable, même lors de la saisie simultanée de zones d'ombre et de lumière.

2.1.2 Profil de ligne

Outil courant du rehaussement radiométrique, le profil de ligne représente la variation de niveaux de gris le long d'un alignement de pixels. Il permet donc de quantifier l'amplitude des variations des réponses des cellules photosensibles et de détecter des motifs répétitifs ou des frontières entre les éléments d'une image. Les ondulations de la courbe des intensités de gris reflètent la taille et la luminosité des objets capturés et leur pente traduit le contraste entre ces objets et leur environnement. Par ailleurs, des pixels sont caractéristiques d'un bruit si leur représentation graphique présente une succession de pics étroits (cf. Malkush, 2002 et figure IV-3.2). Le profil de ligne nécessite l'intervention d'un opérateur ou d'un algorithme complexe pour définir un segment, d'où une incompatibilité avec notre concept de détection automatique des marques routières.

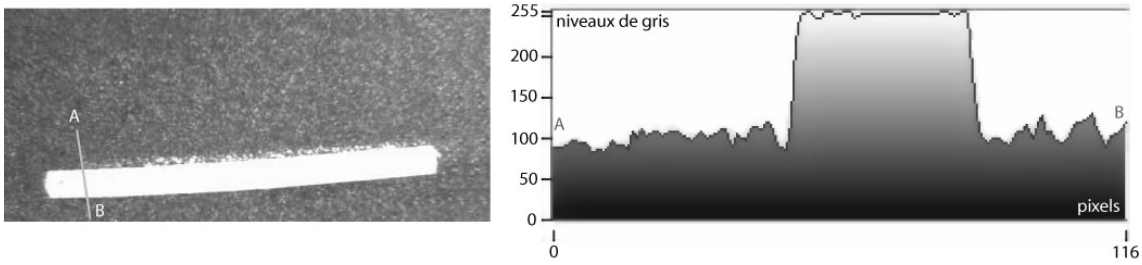


Figure IV-3.2. Profil de ligne pour une capture de la chaussée routière. Le marquage routier se caractérise par une série continue de pixels de valeur de gris supérieure à 230.

2.2 Filtrage spatial

Si le rehaussement radiométrique répond essentiellement à une logique visuelle, le filtrage spatial valorise ou estompe des éléments pertinents de l'image en fonction de la problématique (Caloz et Collet, 2001). L'accentuation sous-jacente porte donc sur des structures et des contours.

2.2.1 Accentuation de structure

Le filtrage spatial fournit une méthode efficace d'atténuation du bruit affectant une image. Il consiste à déplacer, le long des colonnes et des lignes de la scène numérisée, une matrice carrée de taille impaire au-dessus des pixels de l'image, puis de réaliser une opération mathématique sur les niveaux de gris des pixels recouverts par la matrice. Le résultat de cette opération devient la nouvelle valeur de gris du pixel central de la zone affectée.

Un filtre spatial passe-bas fait ressortir l'homogénéité des structures présentes sur une image tout en réduisant le bruit gaussien, pourvu que la fréquence de ce dernier diffère de la fréquence spatiale des données significatives de l'image (Prieto et Cagigal, 1995). Ses implémentations communes sont le filtre moyen, dont les coefficients matriciels pour une fenêtre de 3×3 pixels sont donnés dans le tableau IV-3.1, et le filtre médian, illustré par la figure IV-3.3. Ce dernier peut en outre réduire efficacement le bruit spatial fixe, puisque, contrairement à la moyenne, la médiane n'est pas affectée par une valeur de gris atypique liée à un pixel du voisinage considéré.

$$\begin{bmatrix} 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ 1/9 & 1/9 & 1/9 \end{bmatrix}$$

Tableau IV-3.1. Noyau matriciel du filtre moyen

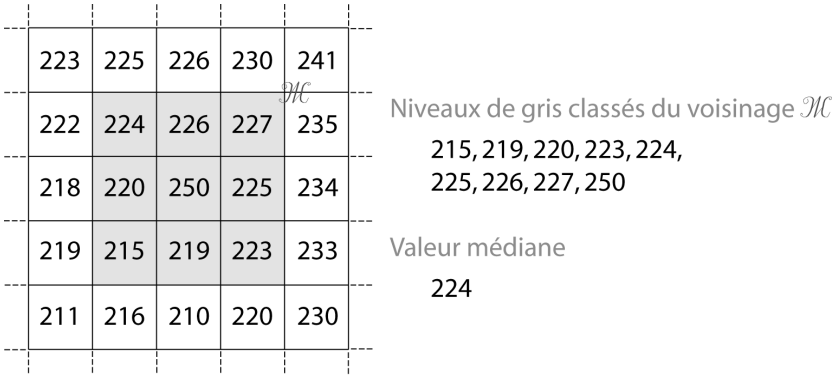


Figure IV-3.3. Calcul du niveau de gris médian au voisinage d'un pixel (ici le 250)

Si un filtre spatial passe-bas tend à réduire les détails fins d'une image par lissage, un filtre passe-haut rehausse à l'inverse de tels détails, car il est conçu pour mettre en évidence les zones de changements abrupts. Néanmoins, sachant que les scènes capturées via un capteur logarithmique CMOS sont entachées d'un bruit spatial fixe fort, l'usage d'un filtre accentuant les zones hétérogènes d'une image n'est guère pertinent.

Le filtrage morphologique repose sur des opérations de voisinage qui déterminent la valeur de chaque pixel selon ses relations géométriques avec les pixels environnants. Ses opérateurs élémentaires, recourant à un élément géométrique structurant, sont :

- l'érosion◊ qui retire des pixels de la zone externe des objets ainsi que les petits agglomérats de particules solitaires,
- la dilatation◊ qui développe toute particule d'une scène numérique.

L'ouverture et la fermeture, combinaisons de ces opérateurs contribuent respectivement à la rupture des isthmes pixellaires◊ entre objets en contact, et à la connexion d'entités pixellaires proches. L'ouverture tend à amoindrir le nombre de particules solitaires en vertu de la propriété de l'érosion, tandis que la fermeture comble les trous dans les objets. Cette caractéristique de la fermeture est particulièrement intéressante pour améliorer l'aspect d'un marquage au sol dégradé par l'usure (Figure IV-3.4) alors que l'ouverture tend à fondre ces objets d'intérêt dans leur environnement.

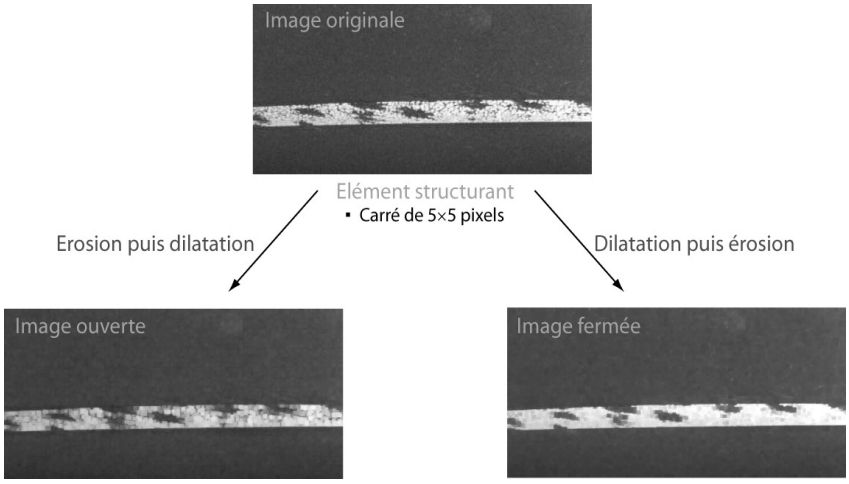


Figure IV-3.4. Application de filtres morphologiques sur une capture de marque routière. La fermeture comble partiellement les lacunes issues de l'usure de la peinture, ce qui accentue la distinction entre le marquage au sol et le revêtement bitumineux.

2.2.2 Accentuation de contour

Le rehaussement de contour des objets d'une image permet d'accroître la lisibilité de la scène et de mieux en appréhender les éléments pertinents. Un contour se caractérise par un saut marqué de niveau de gris d'un pixel à un autre dans une direction privilégiée. Résumer l'information d'une image aux limites des objets y figurant optimise la quantité de pixels à traiter tout en préservant les structures essentielles de la scène capturée. Si les filtres de détection de contour sont nombreux, deux grandes familles se distinguent : le gradient et le laplacien.

Le filtre gradient décèle des contours en révélant les extrema de la dérivée première des niveaux de gris d'une capture numérique. Sachant que la dérivée d'une fonction f en un point x_0 est approximable par l'équation (1), cet opérateur mathématique appliqué à une image est défini par un filtre matriciel de taille 3×3 pixels dont les coefficients varient selon les contours à renforcer (cf. Tableau IV-3.2).

$$f'(x_0) \approx \frac{1}{2}\left[f(x_0+1) + f(x_0-1)\right] \tag{1}$$

Détection de contours verticaux	Détection de contours horizontaux
$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$

Tableau IV-3.2. Noyaux matriciels de filtre gradient

Or, lorsque la dérivée première d'une fonction atteint un extremum, sa dérivée seconde s'annule. Ainsi, la détection des contours d'un objet peut passer par des recherches de

racines de dérivées secondes, qu'approxime l'équation (2). Le filtre laplacien – approximation directe de la somme des dérivées secondes – est donc couramment utilisé pour détecter les contours. Le tableau IV-3.3 traduit les opérateurs de dérivation seconde et de Laplace sous forme de filtres matriciels.

$$f'(x_0) \approx f(x_0 + 1) + f(x_0 - 1) - 2f(x_0) \quad (2)$$

Dérivation 2nde horizontale	Dérivation 2nde verticale	Opérateur laplacien
$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$

Tableau IV-3.3. Noyaux matriciels de la dérivation seconde et du laplacien

La détection de contour via des filtres de noyau matriciel simple assure un temps de calcul réduit, ce qui est compatible avec la notion de temps réel. Or, leur application à des captures du revêtement de la chaussée livre des résultats quasiment inexploitables. En effet, les filtres gradients, mêmes combinés, ne promeuvent que certaines arêtes alors que le filtre laplacien valorise une multitude d'artefacts compromettant l'interprétation automatique de la scène (figure IV-3.5).

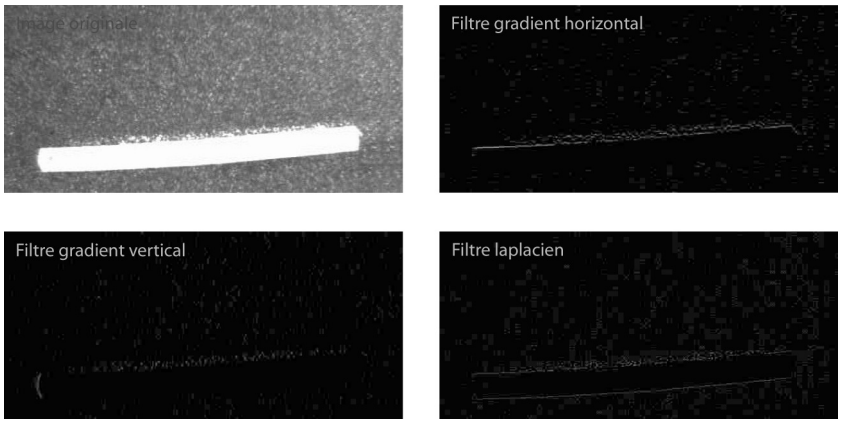


Figure IV-3.5. Détection de contour par des filtres de noyau matriciel simple

3 Segmentation d'image

La segmentation est une opération de traitement d'image groupant des pixels selon des critères prédéfinis (Bonn et Rochon, 1992). Nous limiterons notre propos à la segmentation par approche "région", technique assignant un numéro à des nuées (blobs◊) de pixels groupés par niveaux de gris similaires. Chaque numéro est donc associé à un amas pixellaire déterminé, ce qui permet de construire une carte des régions représentant visuellement la segmentation de l'image. Un ensemble de régions peut ainsi définir un objet dont la détection est automatisable en exploitant des critères de surface et de rugosité.

Par ailleurs, les objets auxquels se rattache notre étude sont des marques peintes sur la chaussée qui exhibent :

- une forte variabilité de forme et d'orientation, rendant la reconnaissance de motifs ardue,
- une couleur homogène, traduite par des pixels contigus de même intensité,
- des contours lisses dans des conditions d'usure normale.

Il en résulte qu'une analyse de nuée impliquant des amas pixellaires de valeur de gris élevée et de faible rugosité est bien adaptée à l'extraction du marquage routier. Comme l'utilisation d'une caméra CMOS logarithmique nous prémunit des désagréments rencontrés par Sookman (2006), la méthodologie décrite dans le tableau IV-3.4 est retenue, puis implémentée selon les considérations de la section suivante.

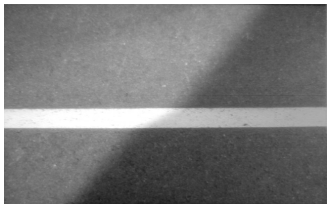
Etape	Illustration
1. Acquisition de l'image[1] dans les meilleures conditions possibles pour minimiser le pré-traitement	
2. Exploitation d'un seuil pixellaire fixe pour distinguer les blobs de l'arrière-plan (binarisation). Nous l'avons fixée à une valeur de gris de 230 suite à l'exploitation de l'histogramme moyen de captures de marquage routier.	
3. Segmentation de l'image par région : attribution d'un numéro à tout amas pixellaire. Isolation des nuées de surface supérieure à 100 pixels[2] (en vert sur l'illustration) sachant que la largeur de l'axe central est d'environ 30 pixels pour une capture VGA prise à 2 m de la route.	
4. Détermination et localisation du centre de gravité G des divers blobs via l'exploitation des coordonnées des points de leur contour.	

Tableau IV-3.4. Méthodologie d'extraction automatique d'axe routier

[1] L'image étudiée est une scène routière dont l'alternance ombre/lumière se prête bien à la capture par caméra logarithmique CMOS.

4 Étude de librairies logicielles

4.1 Matrox Imaging Library

Le groupe Matrox Imaging est un chef de file dans la conception et la mise au point de matériel et de logiciel dédiés à la vision industrielle, l'analyse d'image et l'imagerie médicale. Sa librairie éponyme, la "Matrox Imaging Library (MIL)", offre un panel de fonctions optimisées pour l'acquisition et le traitement d'images, sous forme d'instructions C++◊ ou ActiveX◊. En particulier, un outil évolué de reconnaissance de formes géométriques aide à la détection précise et rapide d'objets, indifféremment de leur position et rotation, et pour une échelle comprise entre 50 et 200 pour cent (Matrox Ltd, 2001). Notre implémentation de ces fonctionnalités au sein d'un exécutable Windows prouve que les algorithmes MIL demeurent opérationnels pour un motif simple, telle une marque-repère◊, en cas d'occlusion de contours ou de variation brutale de contraste (Figure IV-3.6).

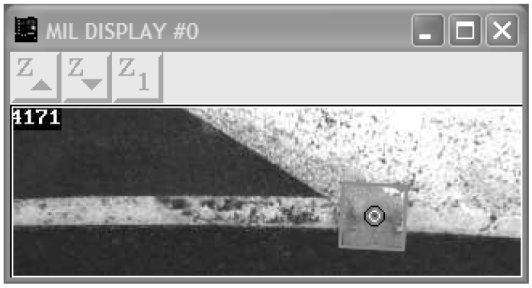
Détection dans un cas simple	Détection dans un cas complexe
	

Figure IV-3.6. Performances de la reconnaissance de motifs MIL

En outre, une bibliothèque de métrologie dote MIL d'une fonctionnalité de reconstruction de blobs chevauchant des images adjacentes, ce qui autorise une étude approfondie de la signalétique routière au sol. Toutefois, l'usage de ce puissant outil de vision artificielle se heurte à :

- un frein logiciel, MIL n'est compatible qu'avec des systèmes d'exploitation classiques n'offrant aucune garantie de respect des contraintes temporelles,
- un frein matériel, MIL gère uniquement des périphériques de la marque Matrox, ce qui exclut d'emblée l'utilisation de la caméra logarithmique CMOS de Neuricam.

Confronté à ces entraves qui limitent la mise en œuvre et la diffusion de notre procédé d'extraction automatique d'axe routier, nous avons évalué des solutions logicielles dont la liberté de modifier le code source autorise l'intégration aisée d'un système spécifique de vision au sein d'une plateforme "temps réel" (Tableau IV-3.5). Notre évaluation s'est limitée à la communauté de la vision robotique, dont les membres sont familiers avec la

problématique de la géolocalisation de mobiles (Martinelli et al., 2006). Deux critères nous ont paru pertinents dans le cadre de cette étude :

- l'aptitude au temps réel, à savoir une implémentation algorithmique d'exécution très rapide, offrant idéalement une encapsulation de routines Assembleur,
- la convivialité, à savoir la mise à disposition de fonctions surchargées – des routines de même nom, mais d'arguments différents, ce qui réduit les efforts de mémorisation du développeur. En outre, une librairie que nous qualifions de "conviviale" fournit des fonctions aux arguments simples.

Librairie libre[2]	Plateforme dédiée	Aptitude au temps réel	Convivialité	Remarques
Open CV	Multiplateforme	😐	😐	Développement C++ d'Intel
Structure and Motion toolkit	Matlab	☹	☺	Algorithmes clairs
Generic Image Library	Multiplateforme	☹	😐	Développement C++ d'Adobe
Gandalf	Multiplateforme	😐	☹	Développement en C pur
LTI-Lib	Linux / Windows NT	😐	☺	Interface de haut niveau en C++
CIMG Library	Multiplateforme	☹	☺	Développement C++ de l'INRIA
TLib	Multiplateforme	☺	☺	Développement C++ de l'EPFL

Tableau IV-3.5. Évaluation de librairies libres de vision

4.2 TLib

Encapsulant des commandes Assembleur au sein de fonctions surchargées, TLib est une librairie de traitement d'image écrite à l'EPFL pour la poursuite d'objets en temps réel (Grange et al., 2003). Sa forte vitesse d'exécution autorise une exploitation au sein de notre architecture logicielle déterministe, et la disponibilité bienveillante de son auteur nous ont conduit à l'intégrer dans notre logiciel de mobile mapping. Par ailleurs, implémentées pour des novices en programmation orientée objet, les routines offertes visent à satisfaire les besoins suivants :

[2] Liens web respectifs :
http://www.intel.com/technology/computing/opencv/index.htm
http://cms.brookes.ac.uk/staff/PhilipTorr/Code/code.htm
http://opensource.adobe.com/gil/index.html
http://gandalf-library.sourceforge.net/
http://ltilib.sourceforge.net/doc/homepage/index.shtml
http://cimg.sourceforge.net/
http://imtsg14.epfl.ch/tlib/

- Efficacité
  La poursuite d'objets en temps réel nécessite un code sophistiqué dont l'écriture est une tâche non triviale que TLib supprime en offrant une synthèse accessible de fonctions optimisées de bas niveau.
- Portabilité
  TLib est implémenté en C++ standard et seules l'acquisition et l'affichage d'images repose sur des bibliothèques associées à un système d'exploitation, à savoir Linux dans notre problématique.
- Ouverture
  TLib gère de nombreux périphériques de vision artificielle et des images de format varié, interaction que l'utilisateur peut enrichir à volonté sachant que le code est librement accessible. Nous avons profité de cette opportunité pour y intégrer le logiciel client de l'Ethercam décrit dans la section IV-2.4.

5 Remarques conclusives

La distribution du code de TLib sous licence GPL[◊] et la disponibilité de ses auteurs nous ont permis :

- d'une part, d'implémenter un pilote spécifique pour la caméra logarithmique CMOS,
- d'autre part, de modifier l'algorithme de calcul du barycentre des blobs.

Le logiciel libre constitue donc une alternative attrayante pour le développement d'applications exigeantes et l'intégration efficace de capteurs émergeant sur le marché. Ses aptitudes sont particulièrement exploitées pour le calibrage de l'Ethercam présentée dans la section suivante.

IV.4 Calibrage de l'Ethercam

1 Contexte

Le calibrage d'une caméra est une tâche fondamentale dans le domaine de la vision assistée par ordinateur dès qu'une interprétation métrique des images doit être obtenue. Son objectif est de déterminer :

- les paramètres d'orientation externe décrivant la position de la caméra dans l'espace, à savoir les trois coordonnées du centre de projection du capteur vidéo, ainsi que les angles de rotation autour des trois axes du repère tridimensionnel associé à ce dernier,
- les paramètres d'orientation interne modélisant la géométrie et la physique de la caméra, de sorte que la direction d'un rayon lumineux vers un point objet soit déductible du point image correspondant et de l'orientation externe.

Le calibrage plan consiste à calculer les paramètres intrinsèques et extrinsèques d'une caméra à partir des images d'une figure plane. Gurdjos et Payrissat (2002) précisent que les motivations pour l'utiliser sont doubles. D'une part, les supports impliqués sont économiques et aisément produits : un traceur est amplement suffisant pour imprimer des plans de calibrage pour des applications ne requérant pas une précision submillimétrique. D'autre part, les motifs surfaciques plans constituent vraisemblablement les entités bidimensionnelles les plus importantes : ils abondent, au moins en environnement bâti et, si leur géométrie est connue, ils fournissent suffisamment d'informations pour déterminer la position et l'attitude d'une caméra les capturant en peu de prises de vue (Sturm et Maybank, 1999).

Cette opération de calibrage est relativement aisée lorsque l'objet scruté est la chaussée routière considérée comme un plan incliné. Elle consiste en l'estimation d'un modèle approprié à une Ethercam presque nadirale observant la route d'une hauteur d'approximativement 2 mètres.

2 Techniques de calibrage de caméra

L'appréhension métrique d'une scène sur la seule base de ses images capturées par une caméra repose sur une modélisation pertinente de la dite caméra. L'importance de cette tâche fut rapidement perçue en photogrammétrie (Brown, 1971) et, depuis une dizaine d'années, la communauté associée à la vision robotique s'attelle activement à cette problématique (Chatterjee et Roychowdhury, 2000). Aussi, deux approches de calibrage

de caméra tendent-elles à se distinguer. La première, qualifiable de "photogrammétrique", repose sur l'observation vidéo d'un objet de calibrage dont la géométrie est connue. Elle délivre des informations fiables sur l'orientation interne et externe d'une caméra, car elle repose sur une gamme d'information vaste issue à la fois de la scène et de l'image (Atkinson, 2001). Néanmoins, cette méthode requiert la conception d'un support de calibrage précis. La seconde, connue sous la dénomination d'auto-étalonnage, se réfère à la détermination des paramètres intrinsèques de la caméra en n'utilisant que les informations contenues dans les images capturées. En effet, lorsqu'une scène est examinée sous différentes perspectives, la géométrie des vues contraint la position dans l'image des points observés. Hartley (1994) montre que si des images sont prises à l'aide d'une caméra dont l'orientation interne est fixe, les correspondances entre trois images sont suffisantes pour définir les paramètres intrinsèques et extrinsèques d'un capteur vidéo.

Des algorithmes de calibrage largement éprouvés par la communauté scientifique sont publiquement accessibles, citons parmi les principaux ceux implémentés par Zhang (2000), Heikillä (2000) et Bouguet (2004) que nous avons fructueusement exploités lors de la mise au point d'un système de stéréovision mobile CMOS (Janvier, 2005). Néanmoins, l'algorithme de Tsai (1986) ne requiert aucune connaissance a priori des paramètres de la caméra et offre un calibrage précis (cf. section 3.5) à partir de l'exploitation de sept points seulement. Sa vitesse d'exécution et son haut degré d'automatisation respecte parfaitement notre volonté de minimiser les interventions humaines dans notre système de lever topométrique en temps réel.

3 Algorithme de Tsai

3.1 Présentation

La méthode de Tsai, fréquemment utilisée en vision robotique, permet de définir de manière quasi automatique les orientations interne et externe d'une caméra, auxquelles s'ajoute la détermination d'un facteur d'échelle relatif à l'échantillonnage horizontal des pixels. En effet, les lignes balayées par la caméra sont généralement rééchantillonnées par un numériseur vidéo adjoint, si bien que les pixels de la caméra ne correspondent pas à ceux discrétisés par le numériseur vidéo.

Cette démarche repose sur le calcul préliminaire – par moindres carrés – de certains paramètres qui sont ensuite utilisés pour une optimisation itérative non-linéaire de l'ensemble des paramètres impliqués (cf. Figure IV-4.1), à savoir :

- r_x, r_y, r_z – angles d'Euler caractérisant la matrice de rotation $\mathbf{R}_{TER}^{CAM}$ entre le repère associé au terrain et celui adjoint au capteur, respectivement désignés par "repère terrain" et "repère caméra",

- t_x, t_y, t_z – composantes de la translation $\mathbf{T}_{TER}^{CAM}$ traduisant la différence d'origine entre les repères terrain et caméra,
- s_x – facteur d'échelle lié à l'incertitude sur le rééchantillonnage horizontal des pixels,
- f – distance focale d'une caméra idéale (modèle du sténopé, cf. 3.2.2),
- κ – coefficient de distorsion radiale du premier ordre,
- x_{PP}^{IM}, y_{PP}^{IM} – coordonnées du point principal (PP), Tsai assimilant le point principal d'autocollimation, à savoir pied de la perpendiculaire au plan image abaissée sur ce plan depuis le centre optique de la caméra, au point principal de symétrie, à savoir le centre du modèle de distorsion radiale.

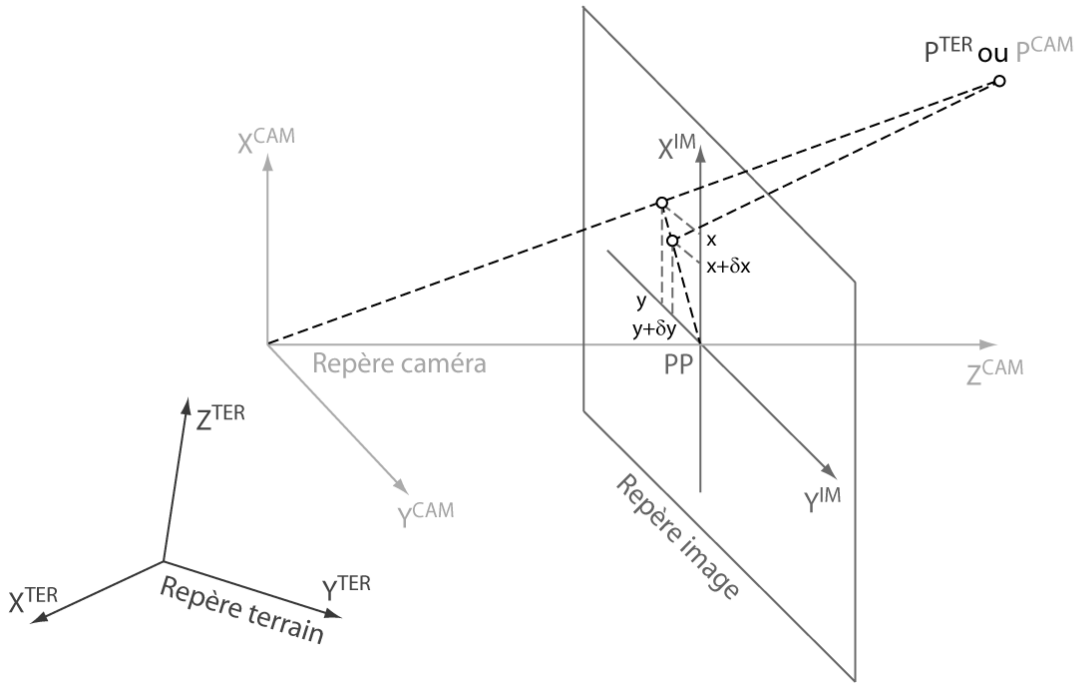


Figure IV-4.1. Le modèle de Tsai

3.2 Paramètres intrinsèques – de la caméra à l'image

3.2.1 Coordonnées du point principal

L'orientation interne établit la relation entre les repères caméra et image, sachant que le repère caméra possède son origine au centre de projection, son axe Z^{CAM} suivant l'axe optique du capteur vidéo, et ses axes X^{CAM} et Y^{CAM} étant supposés parallèles aux axes X^{IM} et Y^{IM} du repère image. Idéalement, les coordonnées caméra et image d'un point P sont liées par les équations de la projection perspective (1).

$$\frac{x_P^{IM} - x_{PP}^{IM}}{f} = \frac{x_P^{CAM}}{z_P^{CAM}} \text{ et } \frac{y_P^{IM} - y_{PP}^{IM}}{f} = \frac{y_P^{CAM}}{z_P^{CAM}} \quad (1)$$

où x_{PP}^{IM}, y_{PP}^{IM} représentent, dans le repère image, les coordonnées du point principal, qui sont à déterminer lors du processus de calibrage.

3.2.2 Distorsions géométriques

Pour une caméra idéale, la projection perspective est régie par le modèle du sténopé (Devernay, 1997). En revanche, les systèmes optiques réels présentent des distorsions géométriques inévitables, parmi lesquelles la distorsion radiale prédomine (Cucchiara et al., 2003). Un point objet peut ainsi être capturé à une distance au PP supérieure (distorsion en coussinet) ou inférieure (distorsion en barillet) à celle prédite par les équations de la projection perspective, la déformation augmentant avec la distance au PP (Figure IV–4.2). Les déformations induites par la distorsion radiale sont modélisables selon les équations (2).

$$\begin{aligned} \delta x &= x\left(\kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4 + \kappa_3 r^6 + \ldots\right) \\ \delta y &= y\left(\kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4 + \kappa_3 r^6 + \ldots\right) \end{aligned} \quad \text{avec } r = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{2}$$

où x et y sont mesurés dans le repère image à partir du PP considéré comme centre de distorsion.

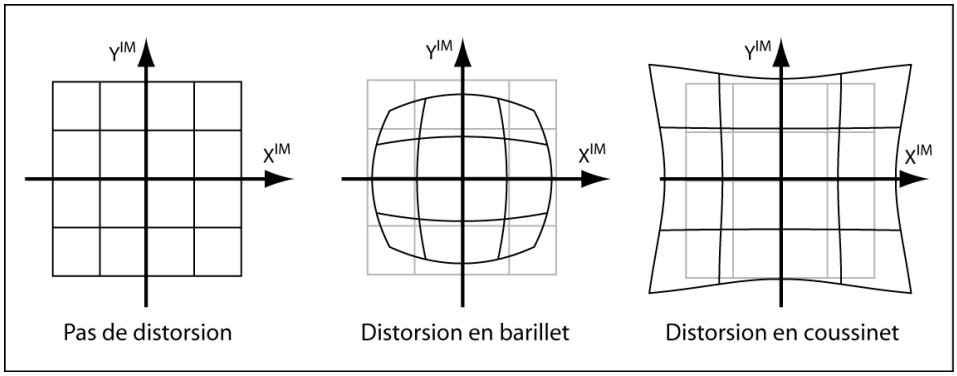


Figure IV–4.2. Principaux types de distorsion radiale

Les systèmes optiques réels présentent également une distorsion tangentielle déformant l'image selon une direction perpendiculaire aux demi-droites issues du point principal, et décrite par les équations (3).

$$\begin{aligned} \delta x &= -y\left(\nu_1 r^2 + \nu_2 r^4 + \nu_3 r^6 + \ldots\right) \\ \delta y &= +x\left(\nu_1 r^2 + \nu_2 r^4 + \nu_3 r^6 + \ldots\right) \end{aligned} \quad \text{avec } r = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{3}$$

où x et y sont mesurés dans le repère image à partir du PP considéré comme centre de distorsion.

La distorsion tangentielle est négligée par la méthode de Tsai, ce qui confine le modèle utilisé à la photogrammétrie très rapprochée (Devernay et Faugeras, 2001).

3.2.3 Rééchantillonnage horizontal des pixels

Pour la majorité des caméras CCD et CMOS, le signal analogique◊ discret, initialement produit par leur matrice pixellaire, transite par un filtre passe-bas afin de produire un signal vidéo lissé, masquant les transitions entre les cellules du capteur. Le signal obtenu est par la suite traité par un numériseur vidéo. Or, l'échantillonnage horizontal de ce dernier ne traduit généralement pas l'écartement des pixels de la caméra, et n'est pas connu avec précision. Il en résulte que l'espacement horizontal entre les pixels de l'image numérisée ne correspond pas à celui entre les pixels de la caméra. En revanche, l'échantillonnage vertical des pixels de l'image numérisée est directement dicté par l'écartement des rangées des cellules de la caméra (Tsai, 1986).

Ainsi, le rapport entre les dimensions horizontale et verticale d'un pixel de l'image numérisée ne se déduit pas a priori des dimensions des pixels de la caméra. Son calcul peut reposer sur une analyse fréquentielle exploitant le crénelage induit par les limitations du filtre passe-bas. Tsai propose de le récupérer lors du processus de calibrage de la caméra. D'où l'introduction de s_x, rapport des espacements selon les directions X^{IM} et Y^{IM}, dans l'équation (2), ce qui conduit à la formule (4).

$$\frac{x_P^{IM} - x_{PP}^{IM}}{f} = s_x \frac{x_P^{CAM}}{z_P^{CAM}} \tag{4}$$

3.3 Paramètres extrinsèques – de la scène à la caméra

L'orientation externe établit la relation entre les repères terrain et caméra, laquelle implique une rotation et une translation. La transformation sous-jacente a donc six degrés de liberté, trois pour la rotation et trois pour la translation. Le repère terrain est choisi selon le support de calibrage, si bien que dans le cas d'une feuille de calibrage, l'axe Z^{TER} est choisi perpendiculaire au plan impliqué, avec $z_P^{TER} = 0$ pour tout point de ce plan. Si un point P a pour coordonnées $\left(x_P^{TER}, y_P^{TER}, z_P^{TER}\right)$ dans le repère terrain, alors ses coordonnées dans le repère caméra sont :

$$\begin{bmatrix} x_P^{CAM} \\ y_P^{CAM} \\ z_P^{CAM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_P^{TER} \\ y_P^{TER} \\ z_P^{TER} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \tag{5}$$

avec les coefficients r_{ij} caractérisant la matrice orthogonale $\mathbf{R}_{TER}^{CAM}$ obtenue par produit des matrices de rotation élémentaires d'angles r_x, r_y, r_z et les coefficients t_i composant le vecteur $\mathbf{T}_{TER}^{CAM}$, translation de l'origine du repère terrain vers l'origine du repère caméra.

3.4 Algorithmique

3.4.1 Stratégie

Lors de la procédure de calibrage, une caméra acquiert des cibles dont la connaissance de la disposition et de la géométrie permet de déterminer la correspondance entre les objets visualisés et leur représentation sur une image. Cette correspondance constitue l'information de base sur laquelle le calibrage repose.

La méthode de Tsai vise tout d'abord à la détermination d'un maximum de paramètres à l'aide d'un ajustement par moindres carrés. Le problème sous-jacent est bien adapté à l'automatisation, car sa résolution ne nécessite que l'usage d'une matrice pseudo-inverse. Il est notable que lors de cette étape préliminaire, les contraintes entre les paramètres (telle que l'orthogonalité de la matrice $\mathbf{R}_{TER}^{CAM}$) ne sont pas respectées, et que la quantité minimisée lors de l'ajustement n'est pas l'erreur dans le plan image, mais une grandeur simplificatrice menant à des équations linéaires. Néanmoins, un tel raisonnement n'affecte pas le résultat ultime car les valeurs estimées des paramètres sont utilisées comme approximation pour l'optimisation finale.

Cette optimisation finale, non linéaire, permet d'obtenir le reste des paramètres en trouvant la meilleure correspondance entre les points de l'image observée et ceux prédits. Les paramètres estimés lors de la première phase sont affinés par ce processus. Les détails de la méthode de calibrage varient selon la planéité du support utilisé. Des cibles planes et précises sont certes plus simples à mettre en œuvre que des cibles tridimensionnelles, mais peuvent limiter la précision du calibrage. Nous présenterons dans un premier temps les équations liées à des cibles couvrant le cas général d'un support tridimensionnel, puis traiterons le cas particulier du calibrage plan.

3.4.2 Estimation de la rotation et d'une partie de la translation

Nous supposons disposer d'une estimation raisonnable des coordonnées x_{PP}^{IM}, x_{PP}^{IM} du point principal de la caméra en approximant ce dernier au centre de la matrice pixellaire. En utilisant le point principal comme origine du repère image, et en dénommant δx et δy les influences respectives de la distorsion radiale sur l'abscisse et l'ordonnée, les coordonnées d'un point P deviennent :

$$\mathring{x}'^{IM}_{P} + \delta x = x^{IM}_{P} + \delta x - \mathring{x}^{IM}_{PP} \quad \text{et} \quad \mathring{y}'^{IM}_{P} + \delta y = y^{IM}_{P} + \delta y - \mathring{y}^{IM}_{PP}, \tag{6}$$

si bien que l'équation (1) s'écrit désormais

$$\frac{\mathring{x}'^{IM}_{P} + \delta x}{f} = s_x \frac{x^{CAM}_{P}}{z^{CAM}_{P}} \quad \text{et} \quad \frac{\mathring{y}'^{IM}_{P} + \delta y}{f} = \frac{y^{CAM}_{P}}{z^{CAM}_{P}}. \tag{7}$$

Considérons uniquement la direction d'un point P mesurée dans le repère image par rapport au point principal. Cela aboutit à la formule (8) qui est indépendante de la distance focale f et de la distorsion radiale.

Nous avons $\dfrac{\overset{\circ}{x}'^{IM}_P + \delta x}{\overset{\circ}{y}'^{IM}_P + \delta y} = s_x \dfrac{x_P^{CAM}}{y_P^{CAM}}$, soit $\dfrac{\overset{\circ}{x}'^{IM}_P + \overset{\circ}{x}'^{IM}_P \left(\kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4 + \kappa_3 r^6 + \ldots\right)}{\overset{\circ}{y}'^{IM}_P + \overset{\circ}{y}'^{IM}_P \left(\kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4 + \kappa_3 r^6 + \ldots\right)} = s_x \dfrac{x_P^{CAM}}{y_P^{CAM}}.$

Ainsi, $\dfrac{\overset{\circ}{x}'^{IM}_P}{\overset{\circ}{y}'^{IM}_P} = s_x \dfrac{x_P^{CAM}}{y_P^{CAM}}$ (8)

En développant d'après l'équation (5), nous avons

$$\frac{\overset{\circ}{x}'^{IM}_P}{\overset{\circ}{y}'^{IM}_P} = s_x \frac{r_{11} x_P^{TER} + r_{12} y_P^{TER} + r_{13} z_P^{TER} + t_x}{r_{21} x_P^{TER} + r_{22} y_P^{TER} + r_{23} z_P^{TER} + t_y}. \tag{9}$$

Par produit croisé,

$$\begin{aligned} &\left(x_P^{TER}\, \overset{\circ}{y}'^{IM}_P\right) s_x r_{11} + \left(y_P^{TER}\, \overset{\circ}{y}'^{IM}_P\right) s_x r_{12} + \left(z_P^{TER}\, \overset{\circ}{y}'^{IM}_P\right) s_x r_{13} + \overset{\circ}{y}'^{IM}_P\, s_x t_x \ldots \\ &- \left(x_P^{TER}\, \overset{\circ}{x}'^{IM}_P\right) r_{21} - \left(y_P^{TER}\, \overset{\circ}{x}'^{IM}_P\right) r_{22} - \left(z_P^{TER}\, \overset{\circ}{x}'^{IM}_P\right) r_{23} - \overset{\circ}{x}'^{IM}_P\, t_y = 0. \end{aligned} \tag{10}$$

Nous obtenons une équation (10), homogène et linéaire, avec pour coefficients des produits des coordonnées de P dans les repères terrain et image, et avec pour inconnues :

$$s_x r_{11},\ s_x r_{12},\ s_x r_{13},\ r_{21},\ r_{22},\ r_{23},\ s_x t_x \text{ et } t_y. \tag{11}$$

Or comme l'équation (10) est homogène, si nous obtenons une solution pour les 8 inconnues impliquées, alors tout multiple de cette solution vérifiera la relation (10). Tsai préconise de rendre inhomogène cette équation (10) en attribuant à une inconnue, t_y, la valeur unité. Nous devons alors calculer les sept inconnues grâce à un minimum de sept équations traduisant la correspondance entre les coordonnées terrain et image de points du support de calibrage.

Une fois déterminée la meilleure solution, au sens des moindres carrés, du système d'équations impliqué, à savoir $s_x \tilde{r}_{11},\ s_x \tilde{r}_{12},\ s_x \tilde{r}_{13},\ \tilde{r}_{21},\ \tilde{r}_{22},\ \tilde{r}_{23},\ s_x \tilde{t}_x$ et $\tilde{t}_y = 1$, nous devons lui appliquer un coefficient multiplicatif j tel que les lignes de la matrice de rotation soient de norme unité, c'est-à-dire qu'elles doivent vérifier l'équation (12).

$$r_{11}^2 + r_{12}^2 + r_{13}^2 = 1 \text{ et } r_{21}^2 + r_{22}^2 + r_{23}^2 = 1 \tag{12}$$

Il est clair que j et j/s_x doivent respectivement vérifier les relations (13)

$$\begin{aligned} j &= 1 \Big/ \sqrt{\tilde{r}_{21}^2 + \tilde{r}_{22}^2 + \tilde{r}_{23}^2} \\ j/s_x &= 1 \Big/ \sqrt{\left(s_x \tilde{r}_{11}\right)^2 + \left(s_x \tilde{r}_{12}\right)^2 + \left(s_x \tilde{r}_{13}\right)^2} \end{aligned} \tag{13}$$

Nous sommes donc parvenu à obtenir le facteur d'échelle j affectant la solution de l'équation (10) qui permet de déterminer une première approximation de $\mathbf{R}_{TER}^{CAM}$, pour laquelle le produit vectoriel des deux premières lignes permet d'obtenir les éléments manquants, des deux premiers éléments de $\mathbf{T}_{TER}^{CAM}$, ainsi que de s_x, facteur d'échelle lié à l'incertitude sur le rééchantillonnage horizontal des pixels.

Cas du calibrage plan

Lorsque le support de calibrage est plan, il s'avère que s_x n'est pas récupérable (Tsai, 1987), si bien que nous supposons que les coordonnées image tiennent déjà compte des différences d'échelle dans les directions X^{IM} et Y^{IM}, par exemple, suite à l'utilisation de la méthode de Tsai avec un support tridimensionnel. L'hypothèse selon laquelle le repère terrain peut être défini de telle sorte que $z_P^{TER} = 0$ pour tout point P du plan de calibrage. Cela signifie que l'équation (9) se simplifie selon :

$$\frac{\overset{\circ}{x}'^{IM}_P}{\overset{\circ}{y}'^{IM}_P} = s_x \frac{r_{11}x_P^{TER} + r_{12}y_P^{TER} + t_x}{r_{21}x_P^{TER} + r_{22}y_P^{TER} + t_y}. \quad (14)$$

Par produit croisé, nous obtenons l'équation linéaire homogène (15), valable pour tout point P du plan de calibrage, et dont les inconnues sont r_{11}, r_{12}, r_{21}, r_{22}, t_x et t_y.

$$\left(x_P^{TER}\,\overset{\circ}{y}'^{IM}_P\right)r_{11} + \left(y_P^{TER}\,\overset{\circ}{y}'^{IM}_P\right)r_{12} + \overset{\circ}{y}'^{IM}_P\,t_x - \left(x_P^{TER}\,\overset{\circ}{x}'^{IM}_P\right)r_{21} - \left(y_P^{TER}\,\overset{\circ}{x}'^{IM}_P\right)r_{22} - \overset{\circ}{x}'^{IM}_P\,t_y = 0. \quad (15)$$

Comme dans le cas non-coplanaire, il existe un facteur d'échelle inconnu du fait de l'homogénéité des équations. L'attribution arbitraire de la valeur unité à t_y permet de rendre inhomogène l'équation (15) et en utilisant un minimum de cinq points, nous pouvons proposer les valeurs $\tilde{r}_{11}$, $\tilde{r}_{12}$, $\tilde{r}_{21}$, $\tilde{r}_{22}$, $\tilde{t}_x$, et $\tilde{t}_y = 1$ comme meilleure solution (au sens des moindres carrés) du système d'équations impliqué. Ces valeurs sont, comme pour la section 2.4.2, affectées d'un coefficient multiplicatif k à déterminer, sachant que nous devons reconstituer une matrice de rotation de taille 3×3 à partir de sa sous-matrice supérieure gauche de taille 2×2.

Détermination de $\mathbf{R}_{SITE}^{CAM}$ dans le cas d'un calibrage plan

Lors d'un calibrage réalisé avec un support plan, $z_P^{TER} = 0$ si bien que l'équation (9) n'est plus utilisable pour la détermination de $\mathbf{R}_{TER}^{CAM}$. L'hypothèse d'orthogonalité de $\mathbf{R}_{TER}^{CAM}$ permet néanmoins d'utiliser la relation (12), ainsi que d'écrire l'équation (16).

$$r_{11}r_{21} + r_{12}r_{22} + r_{13}r_{23} = 0 \quad (16)$$

Il en résulte que :

$$\tilde{r}_{11}^2 + \tilde{r}_{12}^2 + \tilde{r}_{13}^2 = k^2, \quad (17)$$

$$\tilde{r}_{21}^2 + \tilde{r}_{22}^2 + \tilde{r}_{23}^2 = k^2, \quad (18)$$

$$\tilde{r}_{11}\tilde{r}_{21} + \tilde{r}_{12}\tilde{r}_{22} + \tilde{r}_{13}\tilde{r}_{23} = 0. \quad (19)$$

Les équations (17) et (18) permettent d'écrire :

$$\left(\tilde{r}_{11}^2+r'^2_{12}\right)\left(\tilde{r}_{21}^2+\tilde{r}_{22}^2\right)=\left(k^2-\tilde{r}_{13}^2\right)\left(k^2-\tilde{r}_{23}^2\right). \quad (20)$$

De l'équation (19), découle :

$$\left(\tilde{r}_{11}\tilde{r}_{22}-\tilde{r}_{12}\tilde{r}_{22}\right)^2=\left(\tilde{r}_{13}\tilde{r}_{23}\right)^2. \quad (21)$$

Par soustraction, nous obtenons :

$$\left(\tilde{r}_{11}\tilde{r}_{22}-\tilde{r}_{12}\tilde{r}_{22}\right)^2=k^4-k^2\left(\tilde{r}_{13}^2+\tilde{r}_{23}^2\right). \quad (22)$$

Et comme $\left(\tilde{r}_{13}^2+\tilde{r}_{23}^2\right)=2k^2-\left(\tilde{r}_{11}^2+\tilde{r}_{12}^2+\tilde{r}_{21}^2+\tilde{r}_{22}^2\right)$, nous obtenons la relation (23).

$$k^4-k^2\left(\tilde{r}_{11}^2+\tilde{r}_{12}^2+\tilde{r}_{21}^2+\tilde{r}_{22}^2\right)+\left(\tilde{r}_{11}\tilde{r}_{22}-\tilde{r}_{12}\tilde{r}_{21}\right)^2=0 \quad (23)$$

La résolution de cette équation du second degré en k^2 nous permet de calculer les coefficients manquants $\tilde{r}_{13}$ et $\tilde{r}_{23}$ de la matrice de rotation $\mathbf{R}_{TER}^{CAM}$ en effectuant une substitution dans les équations (17) et (18). Nous trouvons :

$$k^2=\frac{1}{2}\left(\left(\tilde{r}_{11}^2+\tilde{r}_{12}^2+\tilde{r}_{21}^2+\tilde{r}_{22}^2\right)\pm\sqrt{\left(\left(\tilde{r}_{11}-\tilde{r}_{22}\right)^2+\left(\tilde{r}_{12}+\tilde{r}_{21}\right)^2\right)\left(\left(\tilde{r}_{11}+\tilde{r}_{22}\right)^2+\left(\tilde{r}_{12}-\tilde{r}_{21}\right)^2\right)}\right) \quad (24)$$

Nous pouvons montrer que seule la plus grande des racines de l'équation (23) rend possible la détermination de $\tilde{r}_{13}$ et $\tilde{r}_{23}$. Ainsi, il est possible de normaliser les deux premières lignes de la matrice $\mathbf{R}_{SITE}^{CAM}$ en divisant chacun de leurs éléments par k, puis d'obtenir la troisième ligne en utilisant un produit vectoriel. Cela dit, une ambiguïté demeure sur le signe de ces deux quantités, bien que nous puissions obtenir le signe de leur produit d'après la relation (19), selon laquelle :

$$r_{13}r_{23}=-\left(r_{11}r_{21}+r_{12}r_{22}\right) \quad (25)$$

Nous proposons de sélectionner les signes corrects pour r_{13} et r_{23} en testant la transformation obtenue pour projeter les points de la cible vers l'image. Si les signes sont corrects, les coordonnées image prédites sont proches des coordonnées image observées. Notons que si les signes de r_{13} et de r_{23} sont erronés, alors r_{31} et r_{32}, issus du produit vectoriel impliquant ces premiers éléments, seront faux.

Estimation de la distance focale et de t_z

La section précédente nous a permis d'estimer la matrice de rotation $\mathbf{R}_{TER}^{CAM}$ ainsi que les deux premières composantes de la translation $\mathbf{T}_{TER}^{CAM}$. Seules la composante t_z de la translation et la distance focale restent à déterminer.

De plus, $\frac{\mathring{x}'^{IM}_P}{f}=s_x\frac{r_{11}x_P^{TER}+r_{12}y_P^{TER}+r_{13}z_P^{TER}+t_x}{r_{31}x_P^{TER}+r_{32}y_P^{TER}+r_{33}z_P^{TER}+t_z}$ et $\frac{\mathring{y}'^{IM}_P}{f}=\frac{r_{21}x_P^{TER}+r_{22}y_P^{TER}+r_{23}z_P^{TER}+t_y}{r_{31}x_P^{TER}+r_{32}y_P^{TER}+r_{33}z_P^{TER}+t_z}$

Cette expression ci-dessous permet de déduire que:

$$s_x\left(r_{11}x_P^{TER}+r_{12}y_P^{TER}+r_{13}z_P^{TER}+t_x\right)f-\mathring{x}'^{IM}_P t_z=\left(r_{31}x_P^{TER}+r_{32}y_P^{TER}+r_{33}z_P^{TER}\right)\mathring{x}'^{IM}_P \quad (26)$$

$$\left(r_{21}x_P^{TER} + r_{22}y_P^{TER} + r_{23}z_P^{TER} + t_y\right) f - \overset{\circ}{y}'^{IM}_P t_z = \left(r_{31}x_P^{TER} + r_{32}y_P^{TER} + r_{33}z_P^{TER}\right) \overset{\circ}{y}'^{IM}_P \quad (27)$$

Comme nous disposons de valeurs estimées pour les r_{ij}, nous pouvons considérer les relations ci-dessus comme deux équations linéaires avec pour inconnues t_z et f. Deux points au minimum sont nécessaires pour en assurer la résolution.

Notons que lorsque le facteur d'échelle s_x n'est pas connu avec précision, f peut être estimé à l'aide de la seule équation (27). Par ailleurs, si nous considérons un support de calibrage plan parallèle au plan image de la caméra, les valeurs de r_{31}, r_{31}, r_{31}, r_{31} et t_z sont nulles. Les équations (26) et (27) deviennent linéairement dépendantes, et en les réarrangeant, nous obtenons :

$$\frac{f}{t_z} = s_x \frac{\overset{\circ}{x}'^{IM}_P}{r_{11}x_P^{SITE} + r_{12}y_P^{SITE} + t_x} \quad \text{et} \quad \frac{f}{t_z} = \frac{\overset{\circ}{y}'^{IM}_P}{r_{21}x_P^{SITE} + r_{22}y_P^{SITE} + t_y} \quad (28)$$

Ainsi, les inconnues f et t_z ne sont plus exprimées indépendamment l'une de l'autre, et leur détermination individuelle n'est pas possible. Nous en concluons qu'il faut éviter ce cas de parallélisme, même si McCullagh et Shevlin (2004) suggèrent d'utiliser la défocalisation pour remédier à ce problème.

Optimisation des paramètres intrinsèques et extrinsèques

A ce stade de l'algorithmique, nous disposons d'une estimation de $\mathbf{R}_{TER}^{CAM}$, $\mathbf{T}_{TER}^{CAM}$ et de f. Les coordonnées du point principal ainsi que les coefficients de distorsion radiale restent à déterminer. En outre, les éléments de $\mathbf{R}_{TER}^{CAM}$, $\mathbf{T}_{TER}^{CAM}$ et f doivent être affinés, car ils sont issus d'équations linéaires simplificatrices et ne minimisent donc pas les erreurs dans le plan image, à savoir la différence entre les positions observées dans l'image $(\check{x}_{P_i}^{IM}, \check{y}_{P_i}^{IM})$ et les positions $(\hat{x}_{P_i}^{IM}, \hat{y}_{P_i}^{IM})$ prédites sur la base des coordonnées connues des cibles $(\check{x}_{P_i}^{TER}, \check{y}_{P_i}^{TER}, \check{z}_{P_i}^{TER})$. L'ensemble des paramètres relatifs à l'orientation interne et externe doivent être ajustés de manière à minimiser la relation (29).

$$\sum_{i=1}^{n}\left(\check{x}_{P_i}^{IM} - \hat{x}_{P_i}^{IM}\right)^2 + \sum_{i=1}^{n}\left(\check{y}_{P_i}^{IM} - \hat{y}_{P_i}^{IM}\right)^2 \quad (29)$$

Une technique d'optimisation itérative comme l'algorithme du gradient (Nash et Sofer, 1996) permet de déterminer les valeurs finales de tous les paramètres.

Précision attendue

Tsai (1986) montre que si des coordonnées pixel d'un point P sont utilisées pour déterminer les coordonnées caméra à l'aide de sa méthode, alors l'erreur v_{TER} commise sur chacune de ces dernières est majorée par la quantité (30).

$$v_{TER} \leq \left(\left(1 + \frac{1}{\sqrt{6N_0 N_f}} \right) \frac{z_P^{CAM}}{f} + \frac{\overline{z}_P^{CAM}}{L\sqrt{6N_0}} \left(1 + \frac{1}{N_f} \right) + \frac{1}{2\sqrt{6N_0}} + \frac{1}{2\sqrt{6N_0}} \frac{z_P^{CAM}}{f} \right) \frac{z_P^{CAM}}{\overline{z}_P^{CAM}} \cdot \delta \qquad (30)$$

où N_0 nombre total de points utilisés pour le calibrage

N_f nombre de prises de vue utilisées pour le calibrage

δ erreur sur la mesure de l'abscisse ou de l'ordonnée d'un point dans le repère image (en m)

L longueur de la matrice pixellaire (en m)

f distance focale de la caméra (en m)

$\overline{z}_P^{CAM}$ moyenne des z^{CAM} des points utilisés pour le calibrage (en m)

3.5 Validation de la méthode

L'algorithme de Tsai est implémenté dans TLIB, cette librairie logicielle dédiée au suivi d'objets en temps réel, que nous avons enrichie d'un pilote pour l'Ethercam (cf. section IV-2) dans le cadre de notre recherche. Le pilote et la librairie furent testés lors d'une expérience impliquant la capture d'un plan de calibrage de 2 m par 1.7 m par une Ethercam inclinée d'environ 10°. Ce plan de calibrage présente un maillage rectangulaire de disques monochromes de 3 cm de rayon et distants de 15 cm les uns des autres. Le centre de chacune de ces cibles, clairement identifié par un disque de 3 mm de diamètre, est déterminé en coordonnées terrain selon une méthodologie éprouvée. Le lever des disques voisins des quatre coins du plan à l'aide de la méthode GPS-RTK garantit une précision centimétrique de localisation dans le système de coordonnées nationales, système de coordonnées terrain par excellence (Diep Dao et al., 2004). La position de toutes les autres cibles se déduit mathématiquement de leur équirépartition sur le plan de calibrage. Par ailleurs, les coordonnées image de ces mêmes cibles sont extraites automatiquement par une analyse de nuée◊ basée sur TLIB (cf. Figure IV-4.3). Notons au passage que la position de la structure supportant les antennes GPS fut également définie lors de ce lever afin de définir un repère associé au véhicule, dénommé par la suite "repère véhicule".

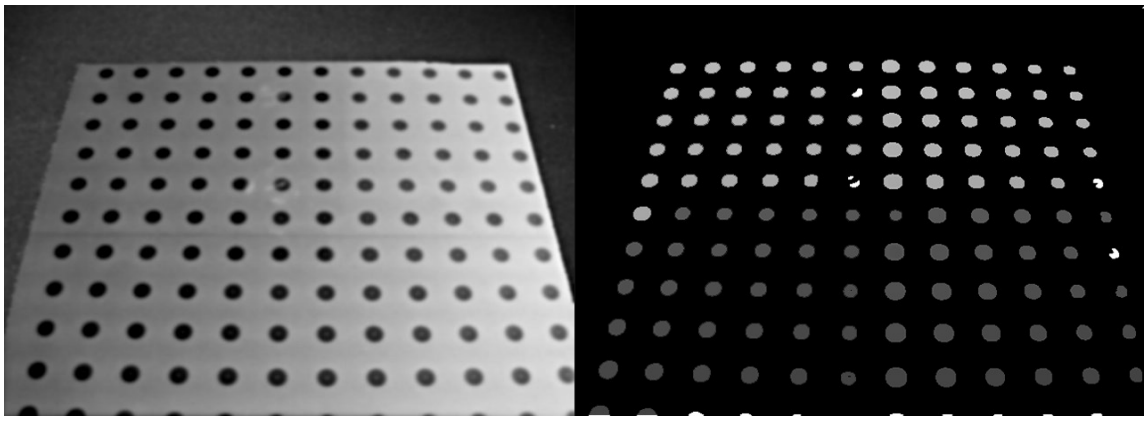


Figure IV-4.3. Détection automatique des cibles de calibrage ; à droite, la détection est validée par des couleurs, les taches blanches révèlent des cibles non détectées à cause de reflets.

L'algorithme de Tsai fut appliqué aux jeux de coordonnées de 30 points répartis le long des côtés et du centre de la feuille de calibrage. En prenant $N_0 = 30$, $N_f = 1$, $\delta = 0.5 \times 8 \cdot 10^{-6} m$, $L = 640 \times 8 \cdot 10^{-6} m$, $f = 6 \cdot 10^{-3} m$, $\overline{z}_P^{CAM} = 2.153 m$ et $z_P^{CAM} = 2.121 m$, la relation (34) nous permet d'écrire qu'en théorie, $v_{TER} \leq 1.8 mm$. Nous proposons de vérifier la qualité des paramètres de caméra obtenus en utilisant le reste des cibles comme points de contrôle. La comparaison des coordonnées terrain prédites et mesurées des cibles s'avère très satisfaisante et valide la formule empirique, car le décalage moyen s'élève à 2.0 mm tandis que son écart-type est de 1.3 mm, ce qui correspond à 0.3 pixel (cf. Figure IV-4.4).

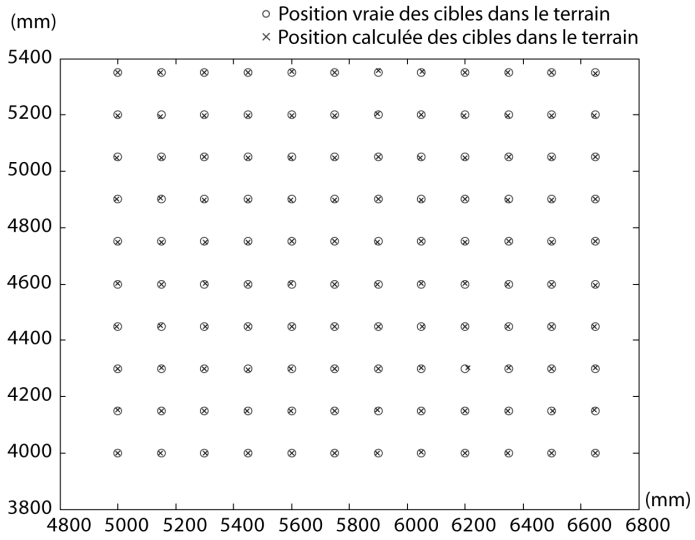


Figure IV-4.4. Évaluation des performances de l'algorithme de Tsai.

4 Conclusion

L'algorithme de Tsai est considéré comme l'un des outils classiques de calibrage de caméra pour la vision robotique. Il permet une détermination précise des orientations interne et externe d'une caméra capturant un réseau de cibles coplanaires, en une seule prise. Son autonomie vis-à-vis d'un opérateur non infaillible, acquise suite à notre implémentation de détection automatique de cibles, satisfait à notre volonté de limiter l'intervention humaine sur le système. En outre, l'optimisation possible du modèle obtenu via l'adoption des paramètres intrinsèques compensés comme approximation lors des calibrages suivants, constitue également un argument de choix face à des méthodes de calibrage rapide telles que la méthode des éléments finis dont les résultats ne sont exploitables que pour une seule session de cartographie mobile.

Chapitre V Géoréférencement en temps réel

V.1 Conception de la plateforme de mobile mapping

1 Conception matérielle

1.1 Positionnement des capteurs

Par sa surface généreuse et son exposition optimale aux signaux GPS, le toit d'un véhicule s'avère un emplacement de choix pour agencer les capteurs de notre plateforme de mobile mapping. La hauteur de 2 m du véhicule disponible – un fourgon Volkswagen Transporter – conditionne le choix de l'objectif adjoint à l'Ethercam. En effet, la trace au sol t d'un pixel de 8 µm se déduit de l'élévation h de la caméra et de la focale f via le théorème de Thalès (équation 1).

$$t = \frac{pix \cdot h}{f} = \frac{8 \cdot 10^{-6} \times 2}{f} \qquad (1)$$

Ainsi, une focale de 6 mm aboutit à une empreinte au sol de 2.7 mm en adéquation totale avec la précision des coordonnées pixellaires issues de la méthode de Tsai. En outre, l'inclinaison du capteur vidéo est nécessaire pour exploiter efficacement notre technique de calibrage tout en évitant la capture de la carrosserie du véhicule. Nous choisirons un angle de 10°, lequel limite la dégradation de l'image par distorsion. La figure V-1.1 illustre la projection au sol de la matrice pixellaire dans ce contexte.

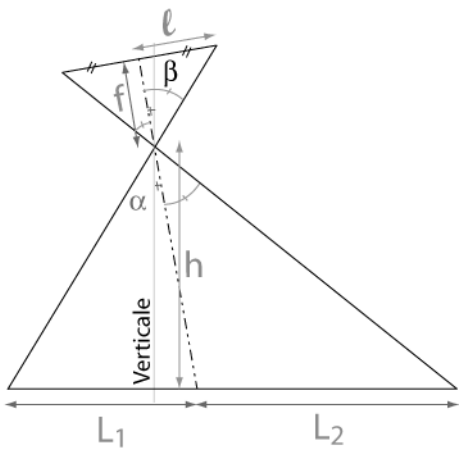


Figure V-1.1. Trace au sol de la matrice pixellaire inclinée de 10°

Les dimensions de l'emprise de cette projection découlent des formules ci-dessous.

$$\cos\beta = \frac{f}{\sqrt{\ell^2 + f^2}}$$
$$L_1 = h\left(\tan(\beta - \alpha) + \tan\alpha\right) \quad (2)$$
$$L_2 = h\left(\tan(\beta + \alpha) - \tan\alpha\right)$$

L'exploitation de 480×300 pixels, nécessaire à la capture d'images à 7Hz via l'Ethercam, induit une empreinte au sol de superficie 1.280×1.658 m. Une telle surface autorise une saisie aisée du marquage routier, en n'imposant aucune manoeuvre contraignante au conducteur de la plateforme.

Par ailleurs, un châssis rigide doit garantir la stabilité du placement relatif et de l'alignement des capteurs, ce qui est un prérequis à l'application de la méthodologie du géoréférencement direct. En vertu de la loi fédérale RS 741.01 sur la circulation routière, nous avons conçu l'assemblage en T de la figure V-1.2, aisément arrimable à tout véhicule, et groupant :

- un profilé inox de 3.4 m de long, assurant un écart latéral de 2.915 m entre les deux antennes GPS. Des ailettes d'amortissement vibratoire, longues de 0.6 m, renforcent son maintien à la galerie de toit.
- un profilé transversal en aluminium de 1.65 m de long, assurant la scrutation de l'axe routier par l'Ethercam. Deux plaques épaisses en aluminium anodisé de 60×30 cm assurent sa fixation solide au profilé inox.

La résistance des matériaux (Bohuon, 1998) dicte l'adoption pour chaque profilé d'une section carrée de 60 mm et de 3 mm d'épaisseur. Ceci assure le soutien à terme d'une centrale inertielle et d'un scanner laser d'une masse totale de 20 kg afin d'assurer l'extension des fonctionnalités de notre système de mobile mapping automatique.

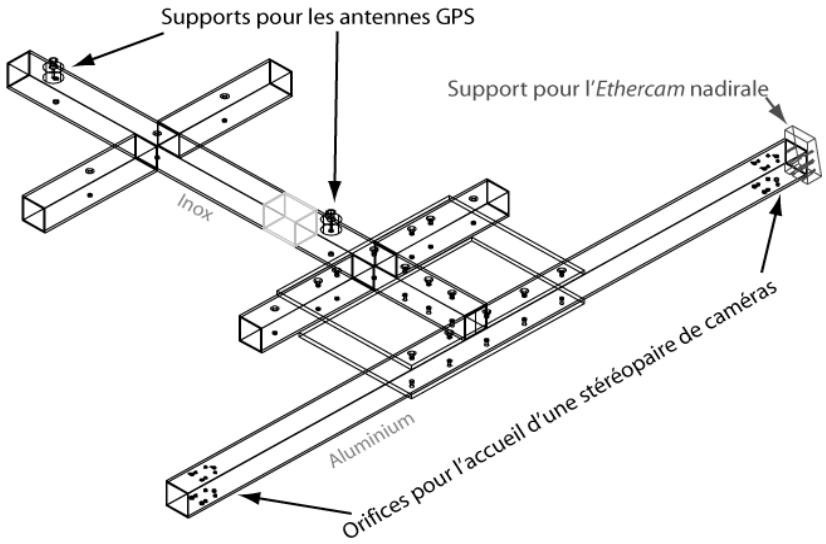


Figure V-1.2. Châssis pour capteurs de mobile mapping

1.2 Synchronisation du système

1.2.1 Introduction

Nous avons vu à la section II-3.1 qu'une datation de la capture vidéo à la milliseconde près conditionne le géoréférencement correct d'images issues d'une caméra susceptible de se déplacer à 80 km/h. Or, le matériel équipant notre plateforme cartographique est compatible avec la logique transistor-transistor (TTL◊), une technologie véhiculant une impulsion créneau de 0 à 5 V claire en un laps de temps inférieur à 50 µs. De plus, le capteur JNSGyro-2, comme tout récepteur GPS, accède à une échelle de temps universel coordonné à 100 ns près, précision sans commune mesure avec celle de l'horloge du système d'exploitation "temps réel" (10 µs). Il nous a donc paru judicieux de stimuler le déclencheur TTL de l'Ethercam par un signal sériel issu d'un ordinateur et devant subir une datation par le JNSGyro-2. Nous sommes dorénavant confronté une problématique double :

- assurer la cohérence des niveaux de voltage des signaux échangés,
- réaliser un programme forçant un port sériel à émettre une tension créneau

1.2.2 Implémentation matérielle

Une liaison sérielle transporte l'information en exploitant un intervalle de tensions généralement compris entre +3 et +15V pour signifier un 0 logique, tandis que l'intervalle opposé s'interprète comme 1 logique. Or la logique TTL ne réagit qu'à des impulsions de 0 à 5 V, si bien qu'une adaptation de voltage s'avère nécessaire. La combinaison d'un régulateur de tension (78L05) et d'un "trigger" de Schmitt◊ (74HCT14) assure efficacement cette tâche, tout en réalisant une division synchrone du signal vers la caméra et le récepteur GPS avec une latence minime, de l'ordre de la microseconde. La société VNR-SA à Lausanne nous a aidé à intégrer ces divers composants dans un boîtier renforcé.

1.2.3 Test de synchronisation

Puisque le JNSGyro-2 se charge de la chronométrie des déclenchements successifs de l'Ethercam, la routine générant la tension créneau ne requiert pas de capacité "temps réel". Un simple ordinateur portable suffit donc à son exécution. En outre, la communauté informatique exploite fréquemment le signal Data Terminal Ready (DTR) pour interagir avec des périphériques externes. De nombreux langages de programmation en assurent donc une gestion directe. Nous avons néanmoins privilégié une implémentation sous Python, un langage de script orienté objet (Figure V-1.3). De syntaxe claire, il présente le double avantage d'une publication sous licence libre et d'une fervente communauté de développeurs.

```
import serial                # chargement des librairies...
import time                  # gérant le port série et le temps
ser = serial.Serial(0)       # ouverture du port série COM1
print ser.portstr            # affichage du port série utilisé
while True:                  # boucle infinie
        ser.setDTR(1)        # émission du signal DTR...
        time.sleep(0.030)    # pendant 30 ms
        ser.setDTR(0)        # pas de signal DTR...
        time.sleep(0.170)    # pendant 170 ms
ser.close()                  # fermeture du port
```

Figure V-1.3. Code Python d'une génération de tension créneau via DTR

Nous testons la routine ci-dessus sur un portable connecté au boîtier VNR-SA dont les sorties caméra et GPS sont observées à l'aide d'un oscilloscope. En dévoilant une superposition des signaux issus des fiches susmentionnées, la figure V-1.4 prouve que notre association matériel/logiciel garantit une synchronisation de haute qualité entre le déclenchement d'une prise de vue par l'Ethercam et sa datation par le module JNSGyro-2.

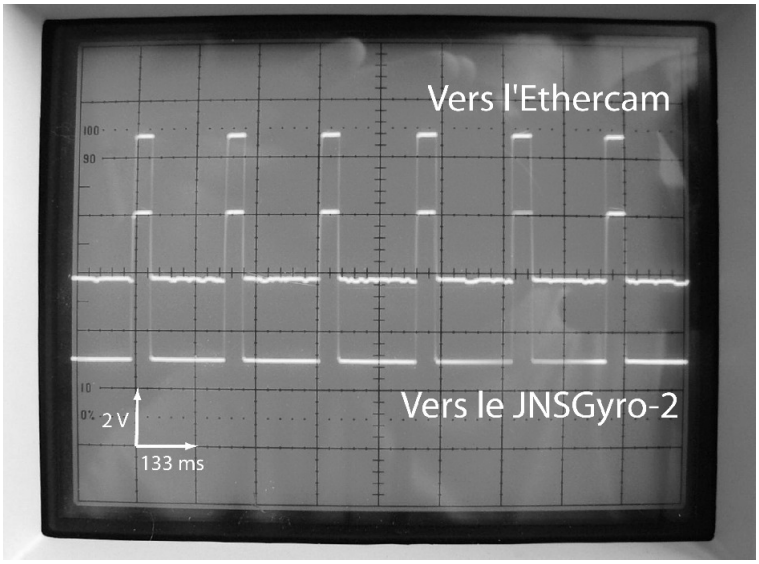


Figure V-1.4. Synchronisme des signaux émergeant du module VNR-SA

2 Conception logicielle

2.1 Hiérarchisation des messages des capteurs

Connecté au serveur personnalisé de corrections RTK via GPRS, le capteur JNSGyro-2 diffuse à 5 Hz les messages sériels concernant les déterminations datées de localisation et d'azimut. Par ailleurs, le module bi-antennes réagit aux impulsions issues du dédoubleur de signal TTL en élaborant une annonce événementielle [XA] contenant la date de

réception desdites impulsions à 100 ns près, ce qui sous-entend une chronométrie du déclenchement de la caméra de même précision. L'ensemble de ces messages remplissent une boîte à lettre surveillée par deux processus concurrents.

- Le premier, de priorité moyenne mais préemptant toute tâche sauf l'ultra-prioritaire, s'active à chaque signalement de nouvelle époque, et libère le processeur après réception des localisation et orientation GPS de cette époque. Elle en conserve 5 jeux successifs dans un tampon tournant.
- Le second, ultra-prioritaire, scrute la boîte aux lettres à la recherche du message [XA]. En cas de détection positive, il cède le temps processeur à une tâche de récupération des images.

Celle-ci passe de l'état "inactif" à "disponible" en 20 ms, lesquelles correspondent à la lecture des 480×300 pixels à 8 MHz. Ensuite, le récupérateur d'image dispose pleinement des ressources réseau afin de saisir l'image, action s'étendant sur 115 ms conditionnées par le débit de la liaison Ethernet à 10 Mbps. Une fois l'image capturée, ce processus accède au statut inactif. 50 ms plus tard, la tâche ultra-prioritaire est réactivée.

Lors de la pause simultanée de la tâche ultra-prioritaire et de la capture Internet de l'image, un processus rapatrie les positions et orientations encadrant immédiatement le déclenchement de la caméra, et les interpole pour ce moment. Ensuite, notre routine TLIB extrait les coordonnées pixel du centre de gravité de l'éventuelle marque routière, lesquelles subissent une transformation dans le système de coordonnées nationales via le processus de géoréférencement décrit dans la section suivante.

2.2 Routine de géoréférencement

La procédure de géoréférencement se décompose en une phase statique, établie une fois par montage de la plateforme cartographique, et en une phase dynamique, réalisée à chaque saisie d'image.

2.2.1 Étape statique du géoréférencement

Cette étape permet de déterminer les paramètres d'une transformation de similitude indépendante du temps – l'expression de coordonnées image dans un repère lié au véhicule – pourvu que le châssis de capteurs demeure solidement arrimé au toit du fourgon. Nous préconisons sa réalisation en parallèle au calibrage de l'Ethercam.

Le géoréférencement repose tout d'abord sur la détermination du passage des coordonnées nationales aux coordonnées "véhicule" des antennes GPS fixées au châssis. Le repère sous-jacent se caractérise par :

- une origine O^{BUS} confondue avec le centre de phase de l'antenne à l'arrière du fourgon, et dont est issu un axe X^{BUS} passant par l'antenne avant A^{BUS},

- des axes complémentaires Y^{BUS} et Z^{BUS} tels que le plan $O^{BUS}X^{BUS}Y^{BUS}$ soit parallèle à l'horizontale, et que le trièdre $O^{BUS}X^{BUS}Y^{BUS}Z^{BUS}$ soit direct (Figure V-1.5).

Une transformation de similitude (équation 3) régit un tel changement de coordonnées, avec un facteur d'échelle unitaire,

$$\mathbf{X}^{BUS} = \mathbf{R}_{NAT}^{BUS} \cdot \mathbf{X}^{NAT} + \mathbf{T} \tag{3}$$

avec $\mathbf{R}_{NAT}^{BUS}$: matrice de rotation ; $\mathbf{T}$: vecteur des translations
$\mathbf{X}^{BUS}$: vecteur des coordonnées exprimées dans le repère véhicule
$\mathbf{X}^{NAT}$: vecteur des coordonnées exprimées dans le cadre national

De plus, l'hypothèse d'horizontalité du plan $O^{BUS}X^{BUS}Y^{BUS}$ impose la nullité de α et β, angles de rotation respectivement autour des axes X^{BUS} et Y^{BUS}.

$$\mathbf{R}_{GPS}^{BES} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

Une compensation paramétrique impliquant les 2 jeux de 3 équations liées à l'expression des coordonnées des antennes GPS dans les deux systèmes fournit aisément le contenu du vecteur $\mathbf{T}$ et l'angle γ. Il s'agit d'une version simple du cas traité dans l'annexe A.

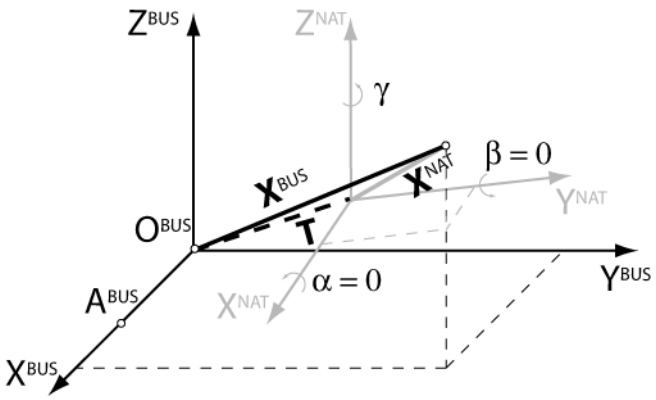


Figure V-1.5. Passage des coordonnées nationales aux coordonnées bus

Dans un second temps, rappelons que la méthode de Tsai fournit les coordonnées métriques de pixels observés dans le repère caméra, pourvu qu'une procédure de calibrage ait impliqué des cibles simultanément connues en coordonnées image et terrain (cf. section IV-4.3.5). Si, lors de la validation de cette technique, nous assimilons le repère terrain au système de coordonnées nationales, l'équation 3 aboutit à l'expression des coordonnées des cibles dans le repère véhicule. De nouveau, une transformation de Helmert suffit à l'établissement du passage des repères bus à caméra (Figure V-1.6). Ses paramètres, compensés par moindres carrés, demeurent fixes tant que le châssis de capteurs n'est pas démonté. Notons que les écarts-types faibles de ces paramètres compensés, d'au maximum 3 mm pour les composantes de translation et 4 mgon pour

l'angle γ, promettent un géoréférencement subdécimétrique du marquage routier. Par ailleurs, la comparaison de ces paramètres avec les valeurs grossières de translation et de rotation se déduisant de la conformation du châssis ne révèle aucune discordance.

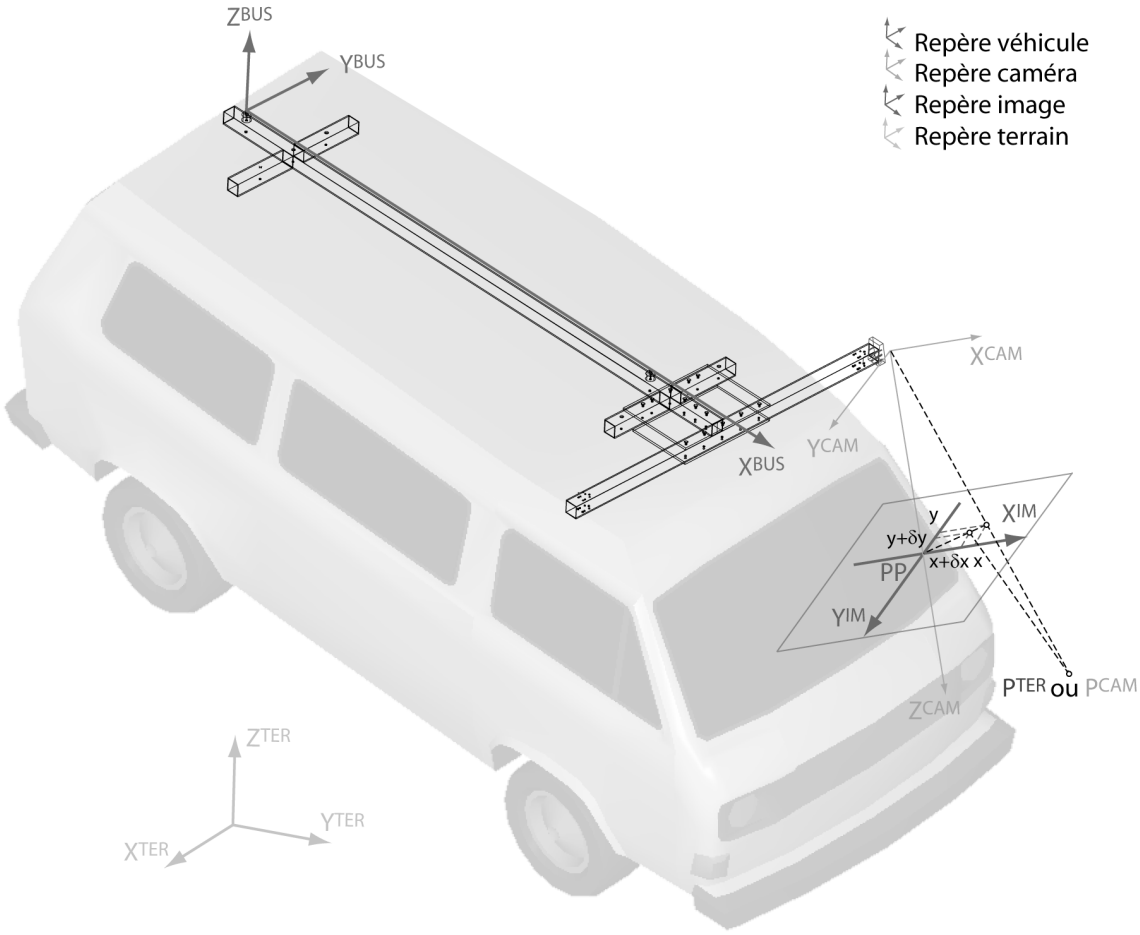


Figure V-1.6. Repères impliqués dans la procédure de géoréférencement

2.2.2 Étape dynamique du géoréférencement

Cette étape du géoréférencement dépend de la position du véhicule dans l'espace, si bien qu'elle est implémentée dans notre algorithmique déterministe. Basée sur la bibliothèque C/C++ "newmat", elle permet la conversion instantanée de coordonnées caméra dans le système de référence national. Ce processus débute par l'exploitation des paramètres statiques définis ci-dessus pour exprimer les coordonnées caméra du centre de gravité d'une marque routière dans le repère véhicule. Il collecte ensuite les interpolations de la position de l'antenne GPS arrière et l'azimut corrigé (cf Annexe A) de l'axe X_{BUS} pour réaliser le passage des coordonnées véhicule aux coordonnées nationales de l'axe routier.

2.3 Sauvegarde des données

A l'issue de l'algorithmique de géoréférencement, un processus se charge d'enregistrer les coordonnées datées de l'axe routier. Cela répond à la problématique de l'extraction automatique de la géométrie de la chaussée, tout en limitant des accès chronophages au disque dur du système (9 ms en moyenne).

3 Validation du géoréférencement

3.1 Contrôle de qualité en temps réel

Bien que nous n'offrions pas de détermination redondante de la géométrie routière, nous pouvons émettre un avis pertinent sur la qualité de localisation de l'axe de la chaussée via des informations de surveillance accessibles en temps réel.

- Matrice de covariance de la position de l'antenne GPS arrière, dont les éléments diagonaux – bien qu'optimistes – renseignent sur la précision du géoréférencement. Une covariance altimétrique inférieure à une covariance planimétrique révèle une anomalie, laquelle est signalée à l'utilisateur.
- Indicateur de qualité du signal GSM reçu, dont les fluctuations sont fortement corrélées avec la latence des corrections GPS. L'opérateur est informé de l'exploitation de corrections GPS dépassées et dégradant la qualité de la localisation.
- Compteur incrémental des images capturées, avec calcul de l'écart temporel entre chaque saisie. Un écart supérieur à 170 ms (dépassant l'intervalle temporel séparant deux déclenchements successifs de caméra) est systématiquement rapporté à l'utilisateur.
- Statistiques sur l'activité système de l'ordinateur exécutant le logiciel de mobile mapping. L'invocation périodique de la commande Linux 'sar', révélant les occupations du processeur, des mémoires et du contrôleur d'interruptions, permet une détection aisée d'un gel préjudiciable de ressources essentielles.

3.2 Contrôle de qualité légèrement différé

3.2.1 Concept

Une procédure de contrôle exclue d'un mécanisme déterministe peut exploiter intensivement le processeur via une algorithmique complexe. Nous proposons donc d'analyser l'axe routier cartographié à l'aide d'une modélisation par des polynômes interpolateurs aux coefficients contrôlés par les points levés.

3.2.2 Courbes splines cubiques

Au sens mathématique du terme, une courbe continue tridimensionnelle est une fonction différentiable $\mathscr{C}$ de $\mathbb{R}$ vers $\mathbb{R}^3$ telle que :

$\mathscr{C}(t) = (X(t), Y(t), Z(t))$ pour tout paramètre t réel
$X(t), Y(t), Z(t)$ étant les composantes euclidiennes de $\mathscr{C}$

Dans le contexte de la modélisation de l'axe routier, t est assimilé au temps GPS, tandis que $X(t)$, $Y(t)$ et $Z(t)$ se rapportent respectivement aux coordonnées Est, Nord et hauteur des points levés. Nous avons choisi des splines cubiques pour définir les composantes de $\mathcal{C}$. De telles fonctions constituent une interpolation continue par morceaux de la géométrie routière via des trinômes s'appuyant sur les points recueillis. Par conséquent, elles respectent la morphologie de l'axe routier tout en remplissant des conditions de continuité sur la position, la vitesse et l'accélération en chaque point de contrôle. En outre, McLeod et al. (1998) démontrent que, parmi toutes les fonctions interpolatrices, les splines cubiques minimisent l'accélération sur la courbe. Pour toutes ces raisons, nous modélisons l'axe de la chaussée par l'équation (5).

$$\mathcal{C}(t) = \bigcup_{i=1}^{n} \{E_i(t), N_i(t), H_i(t)\} = \bigcup_{i=1}^{n} \left\{ a_i t^3 + b_i t^2 + c_i t + d_i,\ e_i t^3 + f_i t^2 + g_i t + h_i,\ j_i t^3 + k_i t^2 + l_i t + m_i \right\} \quad (5)$$

où $(a_i, b_i, c_i, d_i), (e_i, f_i, g_i, h_i)$ et (j_i, k_i, l_i, m_i) sont les coefficients respectifs de la $i^{ème}$ spline cubique selon la direction Est, la direction Nord et la verticale,
n représente le nombre de points de contrôle.

En outre, notre campagne d'acquisition des axes pour la maintenance routière du canton de Vaud prouve que des points de contrôle équidistants de 15 m suffisent à la construction de splines cubiques reflétant idéalement la géométrie routière. La figure V-1.7 illustre cette aptitude en présentant une modélisation par diverses splines d'un virage de 160 m de rayon. Or, lorsque notre système de mobile mapping parcourt ce dernier à une vitesse conseillée de 60km/h, il saisit une image tous les 2.75 m. Dans ce cas, la cadence de capture de l'Ethercam est amplement suffisante pour l'extraction de la géométrie routière.

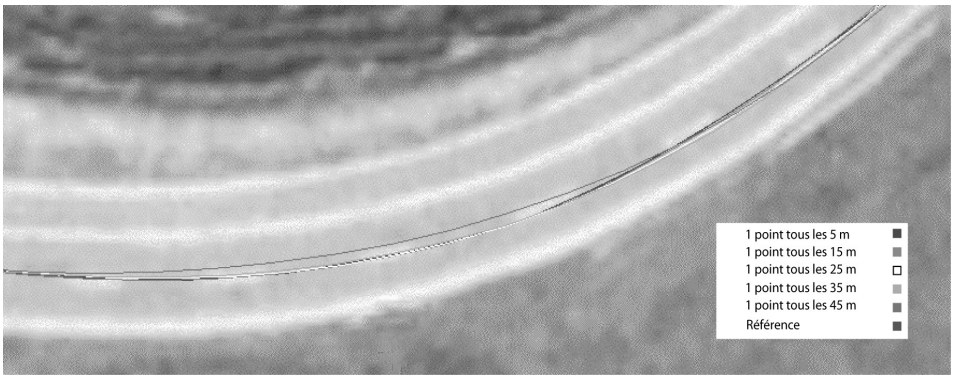


Figure V-1.7. Échantillonnage de points de contrôle et restitution optimale d'axe

3.2.3 Qualité des points collectés

Nous proposons une modélisation de l'axe routier par une courbe tridimensionnelle définie via un triplet de splines cubiques. Une telle paramétrisation autorise la détermination en tout point d'un rayon de courbure 3D selon la formule 6, inspirée de O'Neill (1997).

$$R_{3D} = \frac{\left(E'^2 + N'^2 + H'^2\right)^{3/2}}{\sqrt{\left(H''N' - H'N''\right)^2 + \left(E''H' - E'H''\right)^2 + \left(N''E' - N'E''\right)^2}} \quad (6)$$

Or, un projet routier doit minimiser les variations de virage, ceci pour offrir un certain confort de conduite. Il en résulte que des défauts de géométrie routière peuvent être détectés et localisés par le système d'acquisition, dans des zones de visibilité satellitaire satisfaisante. A ce stade, une analyse complémentaire de l'ingénieur routier est souhaitable.

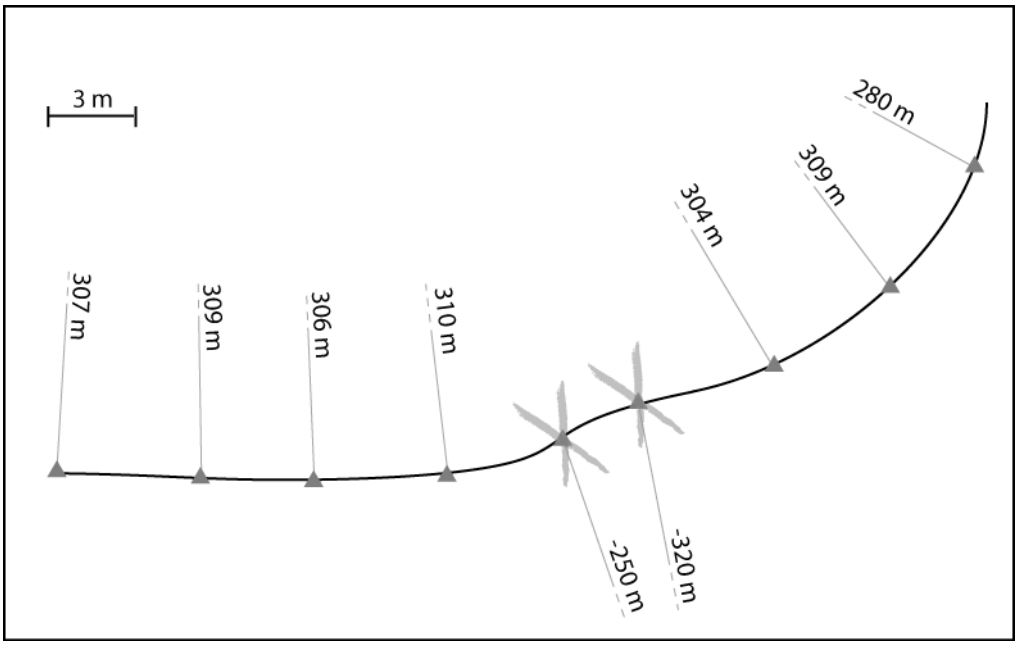


Figure V-1.8. Détection des défauts de géométrie routière

V.2 Exploitation de la plateforme de mobile mapping

1 Expérimentation statique

Nous avons élaboré un protocole expérimental impliquant la saisie d'images par la plateforme de mobile mapping laissée immobile. La méthodologie définie vise la validation de l'enchaînement des processus successifs du géoréférencement automatique, ainsi que la détermination de la précision du système en l'absence du déplacement et sous une visibilité satellitaire excellente (Figure V-2.1). Plus précisément, il s'agit de comparer les résultats obtenus lors de 30 minutes de mesures avec les coordonnées d'un point P capturé au Sud de l'EPFL et de coordonnées E=533103.27 m, N=152244.31 m, H=394.72 m.

Figure V-2.1. Test statique de saisie automatique sur un parking de l'EPFL

Lors du calibrage de l'Ethercam, les jeux de coordonnées impliqués permettent le calcul des paramètres caractérisant le passage du repère caméra au repère véhicule. L'exploitation des équations de la section V-1.2.2 conduit aux matrices $\mathbf{T}_{CAM}^{BUS}$ et $\mathbf{R}_{CAM}^{BUS}$ (équations 1) que nous introduisons dans le code du processus de géoréférencement dynamique pour le temps du montage.

$$\mathbf{T}_{CAM}^{BUS} = \begin{bmatrix} -1969 \\ -927 \\ 132 \end{bmatrix} [\text{mm}] \quad \text{et} \quad \mathrm{R}_{CAM}^{BUS} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0.976 & 0.217 \\ 0 & -0.217 & -0.976 \end{bmatrix} \tag{1}$$

Une fois le capteur JNSGyro-2 connecté au serveur de corrections GPS via Internet et le diviseur de signal, à une source de tension créneau, l'exécution du logiciel de mobile mapping se déroule sans heurt. Le réalisme des dates d'échéance prévues des tâches se confirme et quelques millisecondes de temps processeur demeurent même disponibles à l'issue du traitement d'une image. Par ailleurs, les déterminations successives du point P exhibent des coordonnées moyennes de E=533103.24 m, N=152244.33 m, H=394.76 m avec des écarts-types respectifs $\sigma_E = 3.1\text{cm}, \sigma_N = 2.6\,\text{cm}, \sigma_H = 4.1\text{cm}$. De tels résultats sont prometteurs pour l'exploitation du géoréférencement automatique en temps réel.

2 Expérimentation dynamique

2.1 Introduction

Après notre validation de la coordination des différents processus impliqués dans le géoréférencement en temps réel, un test cinématique doit prouver le bien-fondé d'une méthode de lever sans intervention humaine. Considérant l'état embryonnaire de nos algorithmes déterministes de navigation à l'estime, nous réalisons l'expérimentation dans un emplacement particulièrement propice à la réception des signaux GPS : le lieu-dit Le Motty, déjà mis en exergue dans la section III-3.2.2 (figure V-2.2).

Figure V-2.2. Expérimentation cinématique au Motty

2.2 Protocole opératoire

Dans le cadre de ce test, le Volkswagen Transporter de l'Unité de topométrie embarque un matériel identique à celui de l'expérience statique, même si le générateur de tension créneau commandant la caméra se voit asservi à un odomètre Alfa EZ-Pulse fixé à une roue (figure V-2.3). Ce capteur additionnel, émettant deux impulsions par tour complet du moyeu, évite le déclenchement de l'Ethercam en cas d'immobilité du véhicule. Cela ménage les ressources du système "temps réel" pour l'extraction d'informations redondantes lors d'arrêts induits par les règles de circulation routière ou un encombrement de la chaussée. En outre, la tâche d'extraction des coordonnées image subit une modification pour extraire non le centre de gravité des marques routières, mais le milieu de leurs extrémités aisément identifiables.

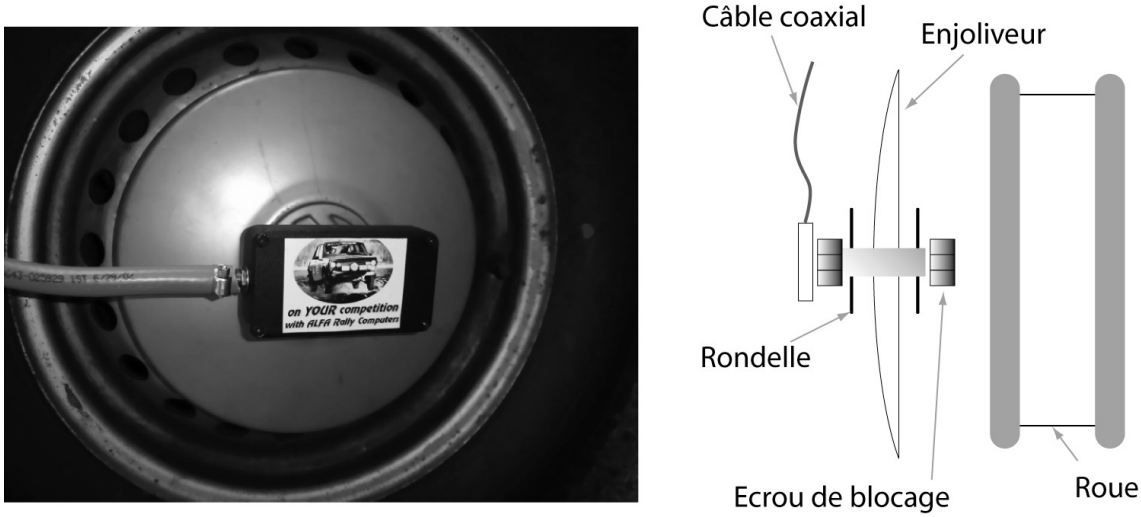


Figure V-2.3. Odomètre Alfa EZ-pulse

2.3 Résultats

Aucune faille de l'ordonnancement de tâches n'advient lors de l'exécution de trois allers-retours au Motty. La qualité de la localisation GPS est sans surprise dans cette zone dégagée, comme en témoignent les indicateurs de dilution de précision (figure V-2.4). Enfin, la comparaison des coordonnées des extrémités des marques déterminées automatiquement avec celles levées par tachéométrie laser est particulièrement encourageante (figure V-2.5) et remplit nos exigences de lever de précision subdécimétrique. L'extraction automatique d'axe routier s'avère un concept réalisable et susceptible de fournir à l'ingénieur routier un contrôle simple et fiable de ses bases de données.

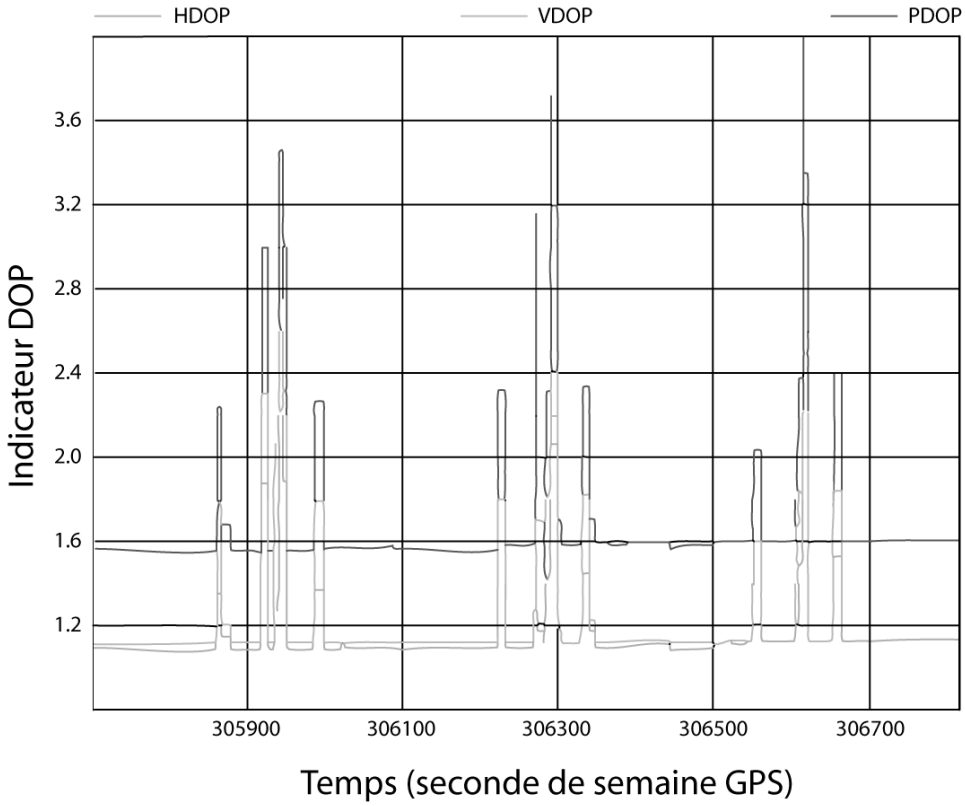


Figure V-2.4. Évolution des indicateurs DOP lors du test cinématique au Motty

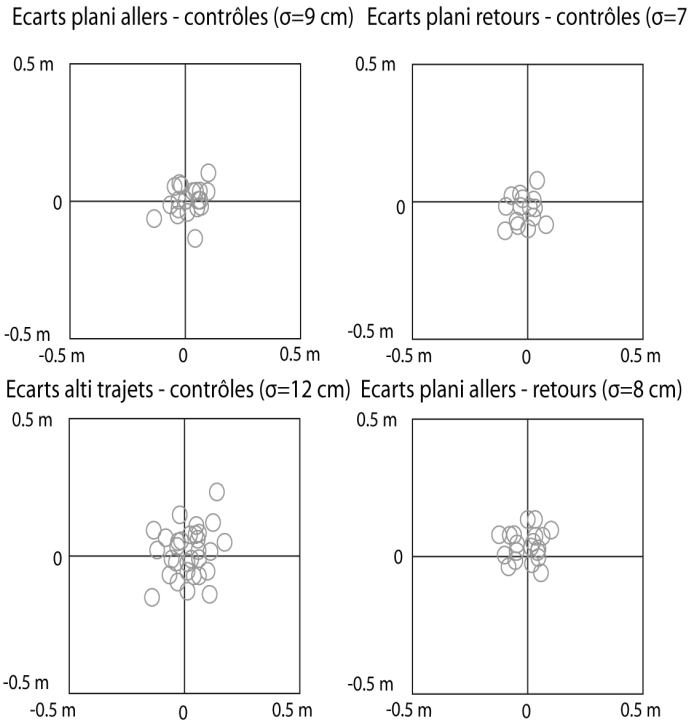


Figure V-2.5. Performances du lever cinématique de marques routières. Les contrôles représentent les coordonnées des extrémités de marque de route par tachéométrie laser.

Conclusions et perspectives

1 Extraction d'axe routier clef en main

Nous avons relevé le défi de la détermination d'une géométrie routière en temps réel via du matériel standard exploité par des routines de géoréférencement basées sur des librairies logicielles libres.

La garantie de contraintes temporelles strictes n'est pas assurée sur une station de travail ordinaire, mais une adaptation de l'algorithmique déterministe remédie à ce souci. Ainsi, nous avons distribué autant que possible des tâches sur des capteurs intelligents. D'une part, un capteur GPS bi-antennes, bi-fréquences, alimenté par un serveur de corrections GPS à haute cadence fournit à chaque époque une position de précision subdécimétrique, assortie d'un azimut et d'un site au centième de gon près. D'autre part, une caméra logarithmique CMOS capture l'environnement routier avec une acuité telle qu'aucun traitement de contraste et de luminosité de l'image n'est nécessaire en vue d'extraire les marques routières.

Un calibrage à l'aide d'un algorithme simple comme celui de Tsai convient parfaitement pour déterminer les orientations interne et externe d'une caméra quasi nadirale suspendue à 2 m du sol. Une analyse de nuée permet d'isoler aisément les marques routières tandis que deux transformations de Helmert successives déterminent les coordonnées nationales de leur centre de gravité.

En outre, nous avons prouvé qu'un générateur logiciel de tension créneau suffit à garantir la chronométrie de la capture d'image dans l'échelle de temps GPS, à la microseconde près, pourvu que les capteurs de mobile mapping disposent d'une connectique compatible avec la logique transistor-transistor.

Notre effort de hiérarchisation des processus constituant un logiciel de géoréférencement automatique porte ses fruits dans la mesure où toutes les échéances temporelles envisagées sont parfaitement respectées lors d'un test statique prolongé. Notre algorithmique "temps réel" est dès lors diffusable au public pour le géoréférencement automatique de marques routières.

Un test dynamique sommaire prouve que notre plateforme de géoréférencement déteministe peut atteindre une précision subdécimétrique satisfaisant aux exigences des systèmes d'assistance à la conduite, même si un trajet plus long aurait validé l'enchaînement correct des processus à long terme et la non-saturation de la mémoire vive.

Enfin, notre contrôle qualité en deux phases permet d'attribuer immédiatement un niveau de confiance aux calculs réalisés et de valider, a posteriori, les points supposés appartenir à l'axe de la chaussée en les reliant par une spline cubique dont l'évolution du rayon de courbure autorise un filtrage efficace.

L'une des clefs de cette performance réside en l'exploitation d'une librairie logicielle à code source libre permettant d'une part, l'intégration efficace de la vidéo dans la boucle de géoréférencement et d'autre part, un traitement mathématique rigoureux et rapide des résultats.

2 Vers une cartographie totale en temps réel

Bien que nos résultats de lever automatique de la géométrie routière soient particulièrement satisfaisants, la définition déterministe à chaque instant de l'axe central la route nécessite un effort de recherche soutenu. Si la capture de lignes doubles ne soulève qu'une problématique de pondération des splines modélisatrices, l'absence de marquage ou, à l'opposé, une signalisation au sol complexe, requiert une vision totale de la largeur de la chaussée. Cette aptitude est en outre nécessaire à l'extension des fonctionnalités de lever de notre plateforme pour satisfaire au mieux les besoins des gestionnaires de voirie. Nous pensons particulièrement à la détermination, en tout point de la route, du nombre et de la taille des voies, ainsi qu'à une meilleure qualification de la nature et de l'usure du revêtement pour constituer des bases de données routières optimales.

Deux voies d'investigation dérivent de la saisie cinématique de scènes de grande profondeur de champ. La première induit le concept d'une photogrammétrie rapprochée, à savoir la capture de la route par un couple stéréoscopique de caméras frontales. L'exploitation "temps réel" des flux d'image paraît irréaliste, vu que nos expériences liminaires de stéréoscopie mobile CMOS (Janvier, 2005) révèlent un problème de stockage d'images capturées simultanément par deux Ethercams. La seconde piste de recherche repose sur la télémétrie par le biais d'un scanner laser rotatif (Figure C-1) dont l'amplitude de l'onde en retour permet de déterminer les limites de la chaussée. Les coordonnées polaires obtenues à l'issue d'une scrutation de l'environnement routier par un tel capteur sont aisément intégrables dans un logiciel de géoréférencement déterministe, et peuvent même servir à la localisation du mobilier de voirie tels les panneaux de signalisation et les lampadaires.

Figure C-1. Laser scanner SICK

Par ailleurs, l'utilisation des réseaux cellulaires de dernière génération (EDGE et UMTS) peut favoriser la transmission de corrections RTK à 10, voire 20 Hz, entraînant une densification de la trajectographie du véhicule. Il en résulte une limitation des effets d'interpolation des position et orientation de la caméra au moment de la saisie vidéo. Toutefois, seule une centrale à inertie peut garantir un géoréférencement pertinent dans des zones de visibilité GPS faible voire nulle. L'exploitation en temps réel des mesures issues de la navigation inertielle demeure un défi pour la recherche. Rappelons cependant que le châssis conçu lors de ce travail peut accueillir des capteurs associés à une telle technique...

Annexe A Transformation des coordonnées GPS

1 Introduction

Le développement de la méthode de localisation par satellites GPS a rapidement confronté les utilisateurs à des problèmes de transformation de coordonnées. En effet, le système GPS est un outil de navigation mondial qui s'appuie sur une référence géodésique globale : le système WGS 84. La mise en correspondance de coordonnées issues du GPS sur une carte nationale n'est pas une opération banale et doit tenir compte de la définition du système géodésique national ainsi que de ses particularités.

2 Systèmes de référence géodésiques

En choisissant un point fondamental (λ_0, φ_0) où la déviation de la verticale est hypothétiquement nulle, un demi-grand axe **a et** une excentricité e^2, on définit "géométriquement" un ellipsoïde comme système de référence "local". Pour la Suisse, il s'agit de l'ellipsoïde de Bessel dont les caractéristiques figurent dans le tableau A-1.

Grandeur	*Description*	*Valeur*
λ_0	Latitude géographique de l'origine à Berne	7°26'22.50"
φ_0	Longitude géographique de l'origine à Berne	46°57'08.66"
a	Demi-grand axe de l'ellipsoïde de Bessel	6377397.155 m
e^2	Carré de la première excentricité	0.006674372230614

Tableau A-1 : Caractéristiques de l'ellipsoïde Bessel 1841

Un ellipsoïde de révolution est également le deuxième terme d'une équation complexe modélisant, au sens physique du terme, une surface équipotentielle terrestre (le géoïde). Cette équation tente de prendre en considération la Terre dans son ensemble, définissant ainsi un système "global". C'est le cas pour le système WGS 84 dont l'ellipsoïde associé est caractérisé par les grandeurs physiques (Geiger, 1985) figurant dans le tableau A-2.

Grandeur	*Description*	*Valeur*
a	Demi-grand axe de l'ellipsoïde WGS 84	6378137.000 m
GM	Constante géocentrique de la gravitation	$3986004.7\times10^{8} m^3 s^{-2}$
J_2	Harmonique sphérique dans le géopotentiel	1082.63×10^{-6}
ω^2	Vitesse angulaire de la Terre	7292115×10^{-11} rad/sec

Tableau A-2 : Grandeurs physiques définissant l'ellipsoïde GRS 80

Nous pouvons cependant attribuer des caractéristiques géométriques à cet ellipsoïde :

- un demi-grand axe $a = 6378137.000\ m$
- un carré de première excentricité $e^2 = 0.00669437990197$

Sur cet ellipsoïde, nous définissons également un système conventionnel de coordonnées X,Y,Z (Figure A-1) avec :

- une origine au centre des masses de la Terre,
- un axe Z passant par l'origine internationale conventionnelle (CIO),
- un axe X perpendiculaire à Z et contenant le méridien de Greenwich,
- un axe Y perpendiculaire aux deux autres et choisi de telle sorte que le système soir orthogonal.

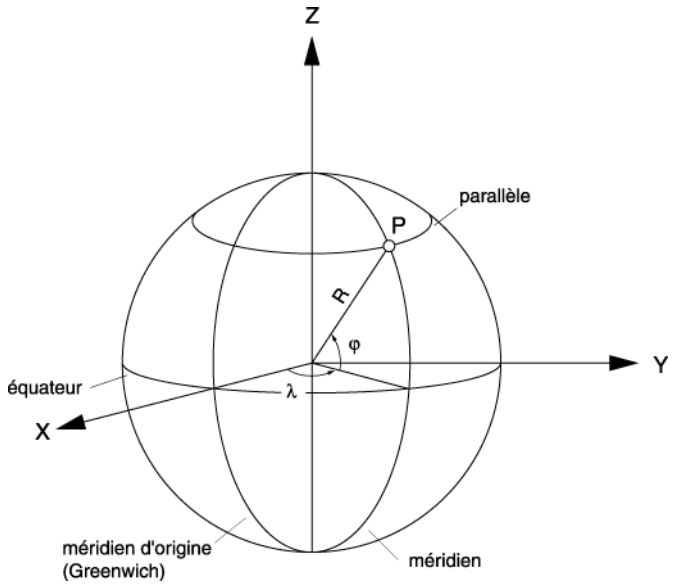


Figure A-1 : Système conventionnel de coordonnées

3 Transformation entre datums

Cette opération s'effectue à l'aide d'une transformation de similitude dans l'espace. Connaissant les paramètres (3 rotations, 3 translations et 1 facteur d'échelle) de cette transformation, on peut écrire :

$$\mathbf{X}^{BES} = s \cdot \mathbf{R}_{GPS}^{BES} \cdot \mathbf{X}^{GPS} + \mathbf{T} \tag{1}$$

avec s : facteur d'échelle ; $\mathbf{R}_{GPS}^{BES}$: matrice de rotation ; $\mathbf{T}$: vecteur des translations
$\mathbf{X}^{BES}$: vecteur des coordonnées exprimées dans le système local Bessel 1841
$\mathbf{X}^{GPS}$: vecteur des coordonnées exprimées dans le système global WGS 84

s, $\mathbf{R}_{GPS}^{BES}$ et $\mathbf{T}$ se déduisent de la résolution du problème inverse : trouver les rotations, les translations et le facteur d'échelle connaissant les coordonnées d'un certain nombre de points en Suisse, à la fois dans le système Bessel 1841 et dans le système WGS84.

Ainsi, selon Marti (2001),

$$s = (1 - 5.66 \cdot 10^{-6})\ \text{ppm},$$

$$\mathbf{R}_{GPS}^{BES} = \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\gamma & \cos\alpha\sin\gamma + \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma & \sin\alpha\sin\gamma - \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma \\ -\cos\beta\sin\gamma & \cos\alpha\cos\gamma - \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma & \sin\alpha\cos\gamma + \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma \\ \sin\beta & -\sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix},$$

$$\text{avec} \quad \begin{aligned} \alpha &= r_X = -2.4844\ \text{cc} \\ \beta &= r_Y = -1.7834\ \text{cc} \\ \gamma &= r_Z = -2.9394\ \text{cc} \end{aligned}$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} -660.0743 \\ -13.5526 \\ -369.3401 \end{bmatrix} \text{m}.$$

4 Conversion de coordonnées sur un ellipsoïde

Connaissant les coordonnées ellipsoïdiques (λ,φ,h) d'un point **P** (figure A-2), ses coordonnées géocentriques (X,Y,Z) sont déterminées à l'aide des formules ci-dessous.

$$\begin{aligned} X &= (N+h)\cos\varphi\cos\lambda \\ Y &= (N+h)\cos\varphi\sin\lambda \\ Z &= \left(\frac{b^2}{a^2}N + h\right)\sin\varphi \end{aligned} \quad \text{, avec } N = \frac{a^2}{\sqrt{a^2\cos^2\varphi + b^2\sin^2\varphi}} \quad \text{et} \quad e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \tag{2}$$

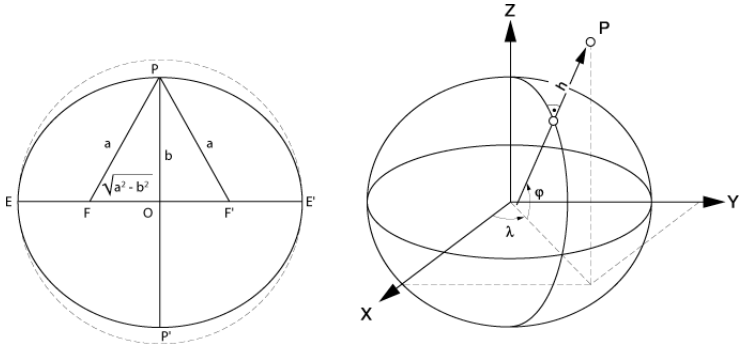


Figure A-2 : Coordonnées géocentriques et ellipsoïdiques

Résoudre le problème inverse (c'est-à-dire calculer λ,φ,h connaissant X,Y,Z) est aussi fort utile, notamment pour l'utilisation des formules approchées de la projection suisse. Pour ce faire, on peut utiliser une procédure non itérative (Hofmann-Wellenhof et al., 2001) qui implique le calcul de :

$$\lambda = \text{arctg}\frac{Y}{X}; \quad \varphi = \text{arctg}\frac{Z + e'^2 b\sin^3\theta}{p - e^2 a\cos^3\theta}; \quad h = \frac{p}{\cos\varphi} - N \tag{3}$$

$$\text{avec} \quad p = \sqrt{X^2 + Y^2}; \quad \theta = \text{arctg}\frac{Z\,a}{p\,b}; \quad e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2}$$

Voici un exemple numérique permettant de qualifier la précision de la méthode. Soit un point P tel que $\lambda = 6.66667°$, $\varphi = 46.53333°$ et $h = 600$ m par rapport à l'ellipsoïde WGS 84. L'application des formules (2) permet de calculer :

$X = 4366173.599$ m ; $Y = 510332.760$ m ; $Z = 4606665.442$ m

Des relations (2) découlent les coordonnées ellipsoïdiques suivantes :

$\lambda = 6.6666700°$; $\varphi = 46.5333300°$; $h = 600.000$ m

avec un écart de $\Delta\lambda = -2.8 \cdot 10^{-14}$ °; $\Delta\varphi = 8.9 \cdot 10^{-16}$ °; $\Delta h = -2.8 \cdot 10^{-9}$ m par rapport aux coordonnées initiales.

5 Formules approchées de la projection suisse

Les formules simplifiées ci-dessous sont tirées de Marti, 2001.

5.1 Désignations et unités de mesure

λ,φ Latitude et longitude géographiques par rapport à Greenwich en [10 000″]
E,N Coordonnées civiles dans le système de projection suisse en [1000 km]
e,n Coordonnées nationales ou militaires Bessel CH1903 en [1000 km]

5.2 Grandeurs auxiliaires

$\Lambda = \lambda - 2.67825''$
$\Phi = \varphi - 16.902866''$

5.3 Calcul

$E = e_1 \times \Lambda + e_3 \times \Lambda^3 + e_5 \times \Lambda^5$ avec

$$\begin{aligned} e_1 = {} & 0.2114285339 \\ & - 0.010939608 \times \Phi \\ & - 0.000002658 \times \Phi^2 \\ & - 0.00000853 \times \Phi^3 \end{aligned} \qquad \begin{aligned} e_3 = {} & - 0.0000442327 \\ & + 0.000004291 \times \Phi \\ & - 0.000000309 \times \Phi^2 \end{aligned} \qquad e_5 = 0.0000000197$$

$N = n_0 \times \Lambda + n_2 \times \Lambda^2 + n_4 \times \Lambda^4$ avec

$$\begin{aligned} n_0 = {} & 0 \\ & + 0.3087707463 \times \Phi \\ & + 0.000075028 \times \Phi^2 \\ & + 0.000120435 \times \Phi^3 \\ & + 0 \times \Phi^4 \\ & + 0.00000007 \times \Phi^5 \end{aligned} \qquad \begin{aligned} n_2 = {} & 0.0037454089 \\ & - 0.0001937927 \times \Phi \\ & + 0.000004340 \times \Phi^2 \\ & - 0.000000376 \times \Phi^2 \end{aligned} \qquad \begin{aligned} n_4 = {} & - 0.0000007346 \\ & + 0.0000001444 \times \Phi \end{aligned}$$

$e = E + 0.6$ et $n = N + 0.2$

L'erreur d'approximation commise pour $|\Lambda|<1.0"$ et $|\Phi|<0.316"$ est inférieure à 0.001 m pour ΔE et à 0.0007 m pour ΔN.

6 Organigramme de la transformation des coordonnées GPS

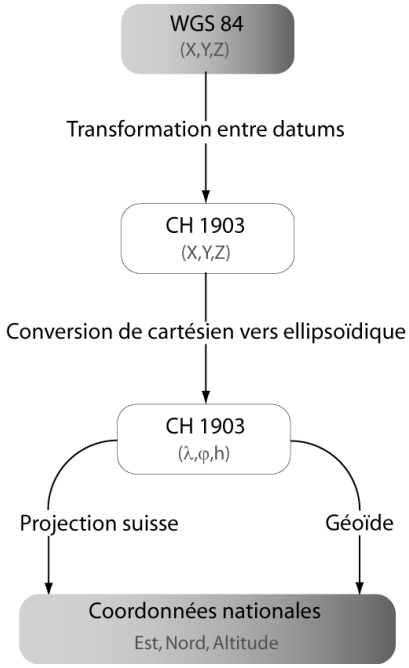


Figure A-3 : Passage des coordonnées WGS 84 aux coordonnées suisses

7 Conversion d'azimut en gisement

7.1 Notion d'azimut et de gisement

L'azimut α_{AB} du côté AB est l'angle que font entre elles, au point A, les tangentes à l'arc AB et au méridien. Dans le système de coordonnées rectangulaires planes associé à une projection, l'orientation du segment AB est définie par le gisement G_{AB}, à savoir l'angle que fait AB avec une parallèle au Nord de la carte. On appelle convergence du méridien μ l'angle compris entre la direction du méridien et le nord de la carte (Figure A-4). Un message NMEA fournit l'azimut (pour l'ellipsoïde WGS 84) défini par les deux antennes A et B auxquelles est connecté le récepteur GPS JNS-Gyro2. Il s'agit de déterminer le gisement correspondant après avoir réalisé la projection suisse.

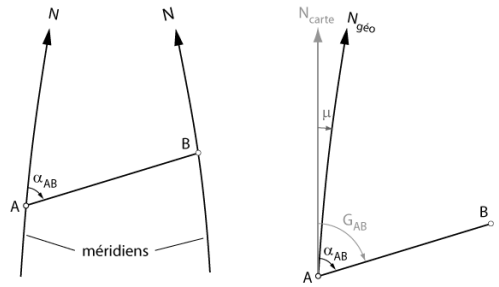


Figure A-4 : Azimut et gisement

7.2 Transformation d'azimut

Soit **A** un point dont les coordonnées cartésiennes géocentriques $\left(X_A^{GPS}, Y_A^{GPS}, Z_A^{GPS}\right)$ sont données par le récepteur GPS JNS-Gyro2 pour l'ellipsoïde WGS 84. La série de formules (3) permet de déterminer les coordonnées ellipsoïdiques $\left(\lambda_A^{GPS}, \varphi_A^{GPS}, h_A^{GPS}\right)$.

Soit un repère Nord-Est-Bas (NEB_A^{GPS}) tangent en **A** à la surface de l'ellipsoïde WGS 84, et orthonormé direct tels que ses axes $\left(\vec{n}_A^{LL\,GPS}, \vec{e}_A^{LL\,GPS}, \vec{b}_A^{LL\,GPS}\right)$ soient respectivement portés par les directions locales Nord, Est et verticale descendante. NEB_A^{GPS} est donc un "Local Level (LL) Frame" selon la terminologie anglo-saxonne. Ces axes se déduisent du système global par les relations ci-après (Figure A-5).

$$\mathbf{n}_A^{LL\,GPS} = \begin{bmatrix} -\sin\varphi_A^{GPS}\cos\lambda_A^{GPS} \\ -\sin\varphi_A^{GPS}\sin\lambda_A^{GPS} \\ \cos\varphi_A^{GPS} \end{bmatrix},\ \mathbf{e}_A^{LL\,GPS} = \begin{bmatrix} -\sin\lambda_A^{GPS} \\ \cos\lambda_A^{GPS} \\ 0 \end{bmatrix}\ \text{et}\ \mathbf{b}_A^{LL\,GPS} = \begin{bmatrix} -\cos\varphi_A^{GPS}\cos\lambda_A^{GPS} \\ -\cos\varphi_A^{GPS}\sin\lambda_A^{GPS} \\ -\sin\varphi_A^{GPS} \end{bmatrix} \quad (4)$$

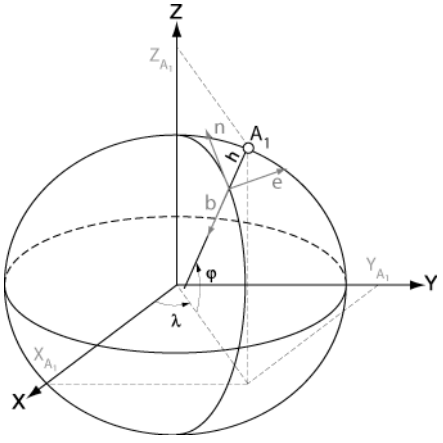


Figure A-5. Repère géocentrique cartésien et repère NEB

Hofmann-Wellenhof (2001) montre que la matrice de passage des coordonnées globales aux coordonnées dans le repère NEB_A^{GPS} est définie par :

$$\mathbf{R}_{GPS}^{LL\,GPS} = \left[\mathbf{n}_A^{LL\,GPS} \quad \mathbf{e}_A^{LL\,GPS} \quad \mathbf{b}_A^{LL\,GPS}\right] = \begin{bmatrix} -\sin\varphi_A^{GPS}\cos\lambda_A^{GPS} & -\sin\lambda_A^{GPS} & -\cos\varphi_A^{GPS}\cos\lambda_A^{GPS} \\ -\sin\varphi_A^{GPS}\sin\lambda_A^{GPS} & \cos\lambda_A^{GPS} & -\cos\varphi_A^{GPS}\sin\lambda_A^{GPS} \\ \cos\varphi_A^{GPS} & 0 & -\sin\varphi_A^{GPS} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

De même, la matrice de passage des coordonnées exprimées dans un repère géocentrique associé à l'ellipsoïde Bessel aux coordonnées dans le repère NEB_A^{BES} associé au même ellipsoïde via:

$$\mathbf{R}_{BES}^{LL\,BES} = \left[\mathbf{n}_A^{LL\,BES} \quad \mathbf{e}_A^{LL\,BES} \quad \mathbf{b}_A^{LL\,BES}\right] = \begin{bmatrix} -\sin\varphi_A^{BES}\cos\lambda_A^{BES} & -\sin\lambda_A^{BES} & -\cos\varphi_A^{BES}\cos\lambda_A^{BES} \\ -\sin\varphi_A^{BES}\sin\lambda_A^{BES} & \cos\lambda_A^{BES} & -\cos\varphi_A^{BES}\sin\lambda_A^{BES} \\ \cos\varphi_A^{BES} & 0 & -\sin\varphi_A^{BES} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Considérons un point B dans le système global, distant de $d_{AB}^{LL\,GPS}$ de A et formant un azimut Az_{AB}^{GPS} avec ce point. Les coordonnées du vecteur $\overrightarrow{AB}$ dans le repère local NEB_A^{GPS} sont :

$$\mathbf{AB}_A^{LL\,GPS} = \begin{bmatrix} \cos Az_{AB}^{GPS} \\ \sin Az_{AB}^{GPS} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot d_{AB}^{LL\,GPS} \quad (7)$$

Dans le repère local NEB_A^{BES}, les coordonnées de $\overrightarrow{AB}$ s'obtiennent via la relation (Legat, 2006) :

$$\mathbf{AB}_A^{LL\,BES} = \mathbf{R}_{BES}^{LL\,BES}\,\mathbf{R}_{GPS}^{BES}\,\mathbf{R}_{LL\,GPS}^{GPS}\,\mathbf{AB}_A^{LL\,GPS} = \mathbf{R}_{BES}^{LL\,BES}\,\mathbf{R}_{GPS}^{BES}\,{}^{t}\left(\mathbf{R}_{GPS}^{LL\,GPS}\right)\mathbf{AB}_A^{LL\,GPS}. \quad (8)$$

Ainsi, l'azimut Az_{AB}^{BES} entre A et B et exprimé pour l'ellipsoïde Bessel vaut :

$$Az_{AB}^{BES} = \operatorname{arctg}\frac{Y_{\mathbf{AB}_A^{LL\,BES}}}{X_{\mathbf{AB}_A^{LL\,BES}}} \quad (9)$$

Application numérique

Soit A un point de la terrasse du Laboratoire de Topométrie, et de coordonnées :

$$\begin{bmatrix} X_A^{GPS} \\ Y_A^{GPS} \\ Z_A^{GPS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4367912.932 \\ 502901.384 \\ 4605646.730 \end{bmatrix} \text{m. Ainsi, } \begin{bmatrix} \lambda_A^{GPS} \\ \varphi_A^{GPS} \\ h_A^{GPS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1146306532 \\ 0.8119505072 \\ 460.235 \end{bmatrix} \text{rad.}$$

$$\text{Nous en déduisons que } \mathbf{R}_{GPS}^{LL\,GPS} = \begin{bmatrix} -0.7208684244 & -0.1143797734 & -0.6835685644 \\ -0.0829974713 & 0.9934370979 & -0.0787029372 \\ 0.6880843949 & 0 & -0.7256306674 \end{bmatrix}$$

$$\text{En outre, } \begin{bmatrix} X_A^{BES} \\ Y_A^{BES} \\ Z_A^{BES} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4367238.715 \\ 502887.179 \\ 4605241.048 \end{bmatrix} \text{m, d'où } \begin{bmatrix} \lambda_A^{BES} \\ \varphi_A^{BES} \\ h_A^{BES} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1146449853 \\ 0.8119727478 \\ 408.759 \end{bmatrix} \text{rad.}$$

Il en résulte que $\mathbf{R}_{BES}^{LL\,BES} = \begin{bmatrix} -0.7208824376 & -0.1143940114 & -0.6835514036 \\ -0.0830095534 & 0.9934354585 & -0.0787108879 \\ 0.6880682563 & 0 & -0.7256459707 \end{bmatrix}$

Soit B un point fictif tel que $d_{AB}^{LL\,GPS} = 100\ m$ et $Az_{AB}^{GPS} = 25^{\circ}$.

$\mathbf{AB}_{A}^{LL\,GPS} = \begin{bmatrix} 90.631 \\ 42.262 \\ 0 \end{bmatrix}$ m, si bien que $\mathbf{AB}_{A}^{LL\,BES} = \begin{bmatrix} 90.630 \\ 42.263 \\ 0.002 \end{bmatrix}$ m.

$Az_{AB}^{BES} = 25.0008^{\circ}$, ce qui implique que $Az_{AB}^{BES} - Az_{AB}^{GPS} = 0.0008^{\circ}$.

Or, la précision de l'azimut donnée par le récepteur JNS-Gyro2 peut être approximée par la formule σ_{Az} ; $0.229^{\circ}/L = 0.1^{\circ}$? 0.0008° car L, distance séparant les centres de phase des deux antennes, vaut ici 2.195 m. Nous en concluons qu'une correction d'azimut due au changement d'ellipsoïde n'est pas nécessaire compte tenu du niveau de précision atteignable par le capteur.

7.3 Calcul de gisement

La valeur du gisement G_{AB} se déduit de l'azimut Az_{AB}^{BES} par ajout de la convergence du méridien μ_A. Dupraz et Merminod (2002) proposent une formule permettant de calculer μ_A au millième de degré près si les coordonnées nationales de A (E_A, N_A) sont connues à 10 m près.

$$\mu_A^{\circ} = 0.9\left(1.06680 \cdot 10^{-5} \cdot E_A + 1.788 \cdot 10^{-12} \cdot E_A N_A - 1.4 \cdot 10^{-19} \cdot E_A^3 + 4.3 \cdot 10^{-19} \cdot E_A N_A^2\right)$$

Application numérique

Pour A de coordonnées $\begin{bmatrix} X_A^{GPS} \\ Y_A^{GPS} \\ Z_A^{GPS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4367912.932 \\ 502901.384 \\ 4605646.730 \end{bmatrix}$ m, tel que $Az_{AB}^{GPS} = 25^{\circ}$,

Nous avons : $\begin{bmatrix} E_A \\ N_A \\ h_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 533182.059 \\ 152597.657 \\ 408.760 \end{bmatrix}$ et $G_{AB} = Az_{AB}^{BES} + \mu_A = 25.001^{\circ} - 0.637^{\circ} = 24.364^{\circ}$

Annexe B Extraits de code

1. Extraction des coordonnées pixel du barycentre du marquage routier

```
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
//  This file is part of the TLIB image processing for computer vision library.
//  Copyright (C) 2003-2004 Sebastien Grange
//  EPFL - Swiss Federal Institute of Technology
//  All rights reserved.
//
//  This library is free software; you can redistribute it and/or modify
//  it under the terms of the GNU General Public License("GPL") version 2
//  as published by the Free Software Foundation.
//
//  \authors    Sebastien Grange, Hervé Gontran
//  \version    1.0
//  \date       04/2006
//  <http://vrai-group.epfl.ch/tlib> <http://topo.epfl.ch>
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////

#include "tlDigitizer.h"
#include "tlDisplay.h"
#include "tlVision.h"
#include "tlCameraTSAI.h"

// only used if calibration is computed with -c, -w or -n option
  char                  inputfile[255];
  char                  outputfile[255];

int
main(int  argc,
     char **argv)
{
  int           i;
  bool          done                  = false;
  tlDisplay     *window               = new tlDisplay    ();
  tlImage       *imageNB              = new tlImage      ();
  tlImage        *InvertImageNB       = new tlImage        ();
  tlImage        *grayImage    = new tlImage     ();
  tlBlobs       *blobs                = new tlBlobs      ();
  tlCameraTSAI *camera                = new tlCameraTSAI ();
  tlPoint             *point                  = new tlPoint        ();
  double px,py,pw,ph, pcx, pcy;
```

```
  // initialize TLIB
  tl_init_lib (argc, argv);
  tl_set_verbose (1);

  // process arguments
  for (i=1;i<argc;i++)
  {
        strcpy (inputfile, argv[i]);
  }

  // load calibration parameters
  printf("loading calibration parameters\n");
  if (0!= camera->readConfig ("tsai.ini")) {
         TL_ERROR_MSG ("cannot find 'tsai.ini' file\n");
         return TL_ERROR;
  }

  // initialize objects
  window->show ();
  // prepare to load BMP file, as provided by the Ethercam server
  printf ("loading image %s\n", inputfile);
  FILE *fp = fopen (inputfile, "r");
       InvertImageNB->readFromBMP (inputfile);
//  imageNB->readFromBMP (inputfile);
// obtain a negative of the picture, so that brigh blobs may qualify
//  imageNB->invert(InvertImageNB);
  // binarization & display
  InvertImageNB->toBin(230,grayImage);
  window->display(grayImage);
  // draw requires colour channels
  InvertImageNB->putChannel (grayImage, 0);  // replace R channel
  InvertImageNB->putChannel (grayImage, 1);  // replace G channel
  InvertImageNB->putChannel (grayImage, 2);  // replace B channel
  window->display(InvertImageNB);
  // pause for testing purposes
  Sleep(1000);
  // extract blobs of saturated areas bigger than 100 sq pixels
  blobs->extract (grayImage, 5000);
  // draw blobs
  for (i=0; i<blobs->getCount (); i++) {
       InvertImageNB->drawMask (blobs->getBlob (i), 128+i*255/blobs->getCount (), 255-
i*255/blobs->getCount (), i*255/blobs->getCount ());
  // obtient un pointeur sur le i-ième blob
  tlMask *blob = blobs->getBlob (i);
  // position en coordonnées calibrées
  point->x  = blob->cx;
  point->y  = blob->cy;
  point->wz = 0.0;
```

```
  camera -> toWorld (point);

    printf  ("%d\t%d\t%d\t%d\t%d\t%d\t%d\t%d\n",  blob->x,  blob->y,  blob->width,  blob-
>height, blob->cx, blob->cy, point->wx, point->wy);
  }
  while (!done)
  {
  // display image
  window->display(InvertImageNB);
  // event management
     if (tlDisplay::queryEvent ()) {
       switch (tlDisplay::event ()) {
       case TL_EVENT_EXIT:
         done = true;
         break;
       case TL_EVENT_KEYUP:
         switch (tlDisplay::getKeyUp ()) {
         case 'h':
           window->hide ();
           break;
         case 'q':
         case 'Q':
           done = true;
           break;
         }
       }
     }

  }
  // cleanup
  fclose (fp);
  delete InvertImageNB;
 // delete imageNB;
  delete grayImage;
  delete blobs;
  delete window;
  printf("done.\n");

  return 0;
}
```

Géoréférencement du barycentre d'une marque de route

```
// Georeferencer.cpp by Hervé Gontran 5 avril 2006
// Double transformation pour le référencement direct de points extraits par un TLIB software
// -> De l'image métrique calibrée vers     le cadre antennes
// -> Du cadre antennes vers le système national
// GNU GPL License

// Implémentation

#define WANT_STREAM                  // include.h will get stream fns
#define WANT_MATH                    // include.h will get math fns
                                     // newmatap.h will get include.h
#include "newmatap.h"                // need matrix applications
#include "newmatio.h"                // need matrix output routines
#ifdef use_namespace
using namespace NEWMAT;              // access NEWMAT namespace
#endif

#include <iostream.h>
#include <stdio.h>
#include "convert.h"

int main()

{
FILE *parametres;                    // Fichier contenant les paramètres de transformation entre le cadre 'image métrique calibrée' et
                                     // le cadre 'antennes'
FILE *blobcoor;                      // Fichier contenant les coordonnées d'une marque dans le cadre 'image métrique calibrée'

FILE *gisement;                      // Fichier contenant le gisement à un instant donné

FILE *gpsrear;                       // Fichier contenant les coordonnées de l'origine du cadre antennes à un instant donné

FILE *blobnat;                       // Fichier de récupération des coordonnées nationales des blobs

Matrix Par(6,1);
Matrix Xi(3,1);
Matrix Xa(3,1);
Matrix Xnat(3,1);

char omega[12], phi[12], kappa[12], TX[12], TY[12], TZ[12];
char blobX[12], blobY[12], blobZ[12];
```

```
// Récupération des paramètres de la transformation du cadre 'image métrique calibrée'
vers le cadre antenne
if( (parametres  = fopen( "myparhelmert.txt", "r" )) == NULL )
      printf( "The file 'myparhelmert.txt' was not opened.\n" );
else
      printf( "The file 'myparhelmert.txt' was opened successfully.\n" );
fscanf(parametres, "%s\t%s\t%s\t%s\t%s\t%s", &omega, &phi, &kappa, &TX, &TY, &TZ);
Par(1,1) = atof (omega);
Par(2,1) = atof (phi);
Par(3,1) = atof (kappa);
Par(4,1) = atof (TX);
Par(5,1) = atof (TY);
Par(6,1) = atof (TZ);
// Check
//                                                              printf("%f\t%f\t%f\t%f\t%f\t
%f",Par(1,1),Par(2,1),Par(3,1),Par(4,1),Par(5,1),Par(6,1));
fclose(parametres);

// Récupération des coordonnées 'image métrique calibrée' du blob
// Solution temporaire par lecture de fichier
if( (blobcoor  = fopen( "myblob.txt", "r" )) == NULL )
      printf( "The file 'myblob.txt' was not opened.\n" );
else
      printf( "The file 'myblob.txt' was opened successfully.\n" );
fscanf(blobcoor, "%s\t%s\t%s", &blobX, &blobY, &blobZ);
Xi(1,1) = atof (blobX);
Xi(2,1) = atof (blobY);
Xi(3,1) = atof (blobZ);

// Calcul des coordonnées 'antennes' du blob
Xa(1,1)        =        cos(Par(2,1))*cos(Par(3,1))*Xi(1,1)+(cos(Par(1,1))*sin(Par(3,1))
+sin(Par(1,1))*sin(Par(2,1))*cos(Par(3,1)))*Xi(2,1)+(sin(Par(1,1))*sin(Par(3,1))-
cos(Par(1,1))*sin(Par(2,1))*cos(Par(3,1)))*Xi(3,1)+Par(4,1);
Xa(2,1)       =       -cos(Par(2,1))*sin(Par(3,1))*Xi(1,1)+(cos(Par(1,1))*cos(Par(3,1))-
sin(Par(1,1))*sin(Par(2,1))*sin(Par(3,1)))*Xi(2,1)+(sin(Par(1,1))*cos(Par(3,1))
+cos(Par(1,1))*sin(Par(2,1))*sin(Par(3,1)))*Xi(3,1)+Par(5,1);
Xa(3,1)                              =                              sin(Par(2,1))*Xi(1,1)-
sin(Par(1,1))*cos(Par(2,1))*Xi(2,1)+cos(Par(1,1))*cos(Par(2,1))*Xi(3,1)+Par(6,1);

cout << setw(10) << setprecision(5) << Xa;

// Calcul des coordonnées nationales du blob
// Récupération du gisement
// Solution temporaire par lecture de fichier
if( (gisement  = fopen( "mygisement.txt", "r" )) == NULL )
      printf( "The file 'mygisement.txt' was not opened.\n" );
else
```

```
      printf( "The file 'mygisement.txt' was opened successfully.\n" );
fscanf(gisement, "%s", &kappa);
// Récupération des coordonnées de l'antenne GPS arrière (id. l'origine du cadre an-
tenne)
if( (gpsrear  = fopen( "mygpsrear.txt", "r" )) == NULL )
      printf( "The file 'mygpsrear.txt' was not opened.\n" );
else
      printf( "The file 'mygpsrear.txt' was opened successfully.\n" );
fscanf(gpsrear, "%s\t%s\t%s", &TX, &TY, &TZ);
// Réinitialisation de la matrice des paramètres
Par = 0.0;
Par(3,1) = atof (kappa);
Par(4,1) = atof (TX);
Par(5,1) = atof (TY);
Par(6,1) = atof (TZ);

// Calcul des coordonnées nationales du blob
Xnat(1,1)       =       cos(Par(2,1))*cos(Par(3,1))*Xa(1,1)+(cos(Par(1,1))*sin(Par(3,1))
+sin(Par(1,1))*sin(Par(2,1))*cos(Par(3,1)))*Xa(2,1)+(sin(Par(1,1))*sin(Par(3,1))-
cos(Par(1,1))*sin(Par(2,1))*cos(Par(3,1)))*Xa(3,1)+Par(4,1);
Xnat(2,1)      =      -cos(Par(2,1))*sin(Par(3,1))*Xa(1,1)+(cos(Par(1,1))*cos(Par(3,1))-
sin(Par(1,1))*sin(Par(2,1))*sin(Par(3,1)))*Xa(2,1)+(sin(Par(1,1))*cos(Par(3,1))
+cos(Par(1,1))*sin(Par(2,1))*sin(Par(3,1)))*Xa(3,1)+Par(5,1);
Xnat(3,1)                              =                              sin(Par(2,1))*Xa(1,1)-
sin(Par(1,1))*cos(Par(2,1))*Xa(2,1)+cos(Par(1,1))*cos(Par(2,1))*Xa(3,1)+Par(6,1);

if( (blobnat  = fopen( "myblobnat.txt", "a+" )) == NULL )
      printf( "The file 'myblobnat.txt' was not opened.\n" );
else
      printf( "The file 'myblobnat.txt' was opened successfully.\n" );

fprintf(blobnat, "%f\t%f\t%f",Xnat(1,1), Xnat(2,1), Xnat(3,1));

return(0);


}
```

Annexe C Intensité du signal GSM

Dès qu'un téléphone mobile est enregistré sur le réseau, l'invocation de la commande Hayes **AT+CSQ** offre la connaissance de l'intensité du signal cellulaire reçu. Le modem interrogé y répond par une sentence de type **+CSQ: <rssi>,<ber>** où :

- **<rssi>** est un entier compris entre 0 et 99 indiquant la puissance du signal reçu
- **<ber>** est un entier compris entre 0 et 99 inversement proportionnel à la qualité des transmissions vocales

Valeur <rssi>	*Intensité du signal*	*Recommandation*
0	-113 dBm◊ ou moins	Signal excessivement faible
1	-111 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **1** sur l'IHM◊
2	-109 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **1** sur l'IHM
3	-107 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **1** sur l'IHM
4	-105 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **1** sur l'IHM
5	-103 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **1** sur l'IHM
6	-101 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **2** sur l'IHM
7	-99 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **2** sur l'IHM
8	-97 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **2** sur l'IHM
9	-95 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **2** sur l'IHM
10	-93 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **3** sur l'IHM
11	-91 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **3** sur l'IHM
12	-89 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **3** sur l'IHM
13	-87 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **3** sur l'IHM
14	-85 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **3** sur l'IHM
15	-83 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **4** sur l'IHM
16	-81 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **4** sur l'IHM
17	-79 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **4** sur l'IHM
18	-77 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **4** sur l'IHM
19	-75 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **4** sur l'IHM
20	-73 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **4** sur l'IHM
21	-71 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **4** sur l'IHM
22	-69 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **4** sur l'IHM
23	-67 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **4** sur l'IHM
24	-65 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **4** sur l'IHM
25	-63 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **4** sur l'IHM
26	-61 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **4** sur l'IHM
27	-59 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **4** sur l'IHM
28	-57 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **4** sur l'IHM
29	-55 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **4** sur l'IHM
30	-53 dBm	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **4** sur l'IHM
31	-51 dBm ou plus	Indicateur de puissance du signal cellulaire au niveau **4** sur l'IHM
99	Non détecté	Indicateur de puissance du signal cellulaire clignotant

Tableau B-1. Correspondance entre valeur <rssi> et intensité du signal cellulaire reçu[1]

[1] Source: G M862-P YT Software User Guide Rev. 1– 20/10/06

Glossaire

ActiveX

Technologie de Microsoft permettant la création de composants logiciels réutilisables par d'autres applications.

Adresse IP

Adresse unique affectée à chaque station connectée sur Internet et plus généralement à tout équipement informatique utilisant le protocole IP. Elle est généralement représentée par 4 octets séparés par des points.

Ambiguïté entière

Nombre entier de cycles relatif à une mesure de phase. Ce nombre est inconnu car on ne peut mesurer, à un instant donné, que la partie décimale de la phase et le nombre entier de cycles écoulés depuis la mesure précédente.

Analyse de nuée

Analyse de groupe de pixels impliquant un ensemble de traitements qui renseigne sur les caractéristiques de toute forme bidimensionnelle présente sur une image.

Blob

Binary large object, dénomination de la nuée dans la littérature anglo-saxonne.

Carte SIM

Subscriber Identity Module – module d'identification d'abonné. Puce électronique scellée dans une carte en plastique qui permet l'identification d'un utilisateur du réseau cellulaire tout en offrant des informations complémentaires de sécurité.

C++

Un des langages de programmation orienté objet les plus populaires dans l'industrie informatique.

Commandes Hayes

Langage de programmation spécifique aux modems, utilisé pour l'établissement de connexions optimales.

Communication intermachines

Protocole autorisant des machines fixes ou mobiles à communiquer entre elles, par le biais d'un serveur qui reçoit d'elles ou qui leur transmet des données relatives à leur fonctionnement.

Co-noyau

Extension du noyau d'un système d'exploitation correspondant à l'apport de fonctionnalités "temps réel".

dBm

Puissance en dB par rapport au niveau de référence d'un milliwatt.
(P en dBm=10×log[P en mW])

Démon système

Programme constamment actif et chargé de tâches de maintenance du système. Ces dernières sont exécutées en arrière-plan, sans que l'utilisateur ait à intervenir.

Dilatation

Reconstruction de contours par adjonction de formes géométriques simples telles le cercle ou le rectangle, dans les limites définies par l'image initiale.

Enfoui

Qualifie un système informatique totalement intégré au système qu'il contrôle et donc dissimulé à l'utilisateur.

Érosion

Suppression progressive des pixels les plus périphériques des objets dans une image via un filtre morphologique correspondant à une forme géométrique simple comme le cercle ou le rectangle.

Événementiel

Se dit de tout programme déclenché par une instruction envoyée par un utilisateur ou un périphérique.

Géoréférencement direct

Détermination de la position et de l'orientation d'un capteur vidéo ou laser via un système livrant directement ces informations, typiquement une plateforme GPS/INS.

Intégrité

Propriété associée aux données qui, lors de leur traitement ou de leur transmission, ne subissent aucune altération volontaire ou accidentelle, et conservent un format permettant leur utilisation.

Interruption

Commande indiquant au processeur d'interrompre le programme en cours au profit d'une fonction à exécuter. L'interruption peut être déclenchée par un événement prévu ou aléatoire, qui peut provenir soit du matériel, soit du processeur. A son issue, le système d'exploitation décide de l'action qui doit être entreprise.

Irradiation

Énergie reçue par unité de surface d'un récepteur pendant un intervalle de temps déterminé.

Isthme pixellaire

Bande étroite de pixels reliant deux objets d'une image numérique.

Linux

Système d'exploitation dérivé de la famille Unix, gratuit, au code source librement diffusable, et fonctionnant sur tout type de micro-ordinateur.

Luminance

Quotient de l'intensité lumineuse réfléchie par la surface apparente de cet élément dans la même direction.

Marque-repère

Carré ou cercle jaune peint à même la chaussée et qui donne la position de l'axe routier.

Mémoire Flash

Mémoire à semi-conducteurs, réinscriptible et non volatile, dont les données restent conservées en mémoire lors de sa mise hors tension.

Mode réel

Type de gestion de la mémoire vive dans lequel tous les adressages correspondent à un emplacement parmi les 640 premiers Ko. Le mode réel accepte l'exécution d'un seul programme à la fois et n'offre ni la protection de la mémoire étendue ni la gestion de la mémoire virtuelle.

Modem

Contraction de modulateur-démodulateur, périphérique assurant la conversion de données numériques en information analogique compréhensible par une ligne téléphonique classique et inversement.

Noyau

Principale composante d'un système d'exploitation, qui demeure en permanence en mémoire et exécute des tâches fondamentales et essentielles au bon fonctionnement d'un ordinateur, telles la gestion de la mémoire et la gestion des échanges avec les périphériques, ainsi que l'exécution des applications et l'attribution des ressources.

Numériseur vidéo

Dispositif assurant la capture des signaux analogiques (images et/ou sons) à l'aide d'une caméra vidéo et leur transformation en informations numériques à des fins d'enregistrement.

Opto-isolé

Protégé contre les boucles de terre, les surtensions et le bruit.

Ordonnanceur

Programme se chargeant de la distribution du temps de calcul aux diverses routines concurrentes.

Paquet Hello

Paquet de diffusion multiplexé utilisé par les routeurs dans le but de découvrir et de récupérer des nœuds voisins.

Pointeur

Élément de données indiquant la position d'un autre élément de données dans la mémoire vive.

Préemption

Suspension d’un processus exécutant des instructions du noyau en faveur d’un autre, de plus haute priorité.

Pseudo-distance

Mesure indirecte de distance par la mesure de l'instant de réception d'un signal daté à l'émission, imprécise en raison du décalage entre les horloges de l'émetteur et du récepteur.

Registre

Zone de mémoire vive contenue dans le microprocesseur et affectée au stockage temporaire de certaines informations.

Routable

Dont l'adresse IP constitue une arrivée valide pour un message circulant sur Internet.

Signal analogique

Signal issu d'un calculateur électronique sous forme de grandeurs électriques ayant une analogie avec le phénomène étudié.

Socket

Communication logique entre deux systèmes reliés au réseau Internet.

swisstopo

Office Fédéral de Topographie suisse.

"Trigger" de Schmitt

Composant électronique transformant des signaux en entrée bruités et de variation lente en signaux en sortie stables et de variation clairement définie.

Windows

Windows est une gamme de systèmes d'exploitation propriétaires 32 ou 64 bits pour ordinateurs personnels. Si ses versions les plus récentes sont des plateformes complètes multiutilisateurs, multitâches, et parfois même multipostes, Windows a commencé par être une simple interface graphique fonctionnant sous DOS.

Abréviations

ARM Acorn Risc Machine, micro-processeur dédié à l'informatique embarquée, et dont le nombre d'instructions est limité pour une exécution très rapide.

CIO Conventional International Origin, position moyenne du Pôle Nord entre 1900 et 1905.

EDGE Enhanced Data Rates for Global Evolution, norme de téléphonie mobile offrant un accès rapide à l'Internet via un portable sans obliger les opérateurs cellulaires à moderniser leur réseau.

ETRF European Terrestrial Reference Frame, cadre de référence tridimensionnel basé sur le réseau GPS de référence européen.

FIFO First In – First Out, mode de traitement informatique selon lequel les données entrées en premier sont les premières à être traitées.

FPGA Field Programmable Gate Array, réseau prédiffusé de portes logiques qui est destiné à une programmation *in situ*, avant d'être utilisé pour une fonction particulière.

GDB GNU Debugger, débogueur standard, distribué sous licence GPL et compatible avec de nombreux langages tels le C, le C++ et le Fortran.

GDF Geographic Data Files, standard européen de format de fichier géographique.

GDOP Geometric Dilution of Precision, coefficient d'affaiblissement de la précision du résultat de localisation instantanée et de synchronisation.

GPL General Public License, accord qui réglemente la distribution des logiciels libres afin que les programmes ainsi que tous les travaux dérivés soient distribués avec le code source.

GPRS General Packet Radio Service, système de commutation de données par paquets permettant d'améliorer les débits fournis par les réseaux GSM.

GPS Global Positioning System, système de localisation par satellites mis en place par le Département de la Défense des États-Unis.

GRIL GPS Receiver Interface Language, langage d'interface autorisant l'utilisateur d'un instrument Javad Navigation Systems d'accéder à toutes ses fonctionnalités.

GSD Ground Sampling Distance, surface minimale au sol représentée par un pixel.

GSM Global System for Mobile communications, norme de transmission pour la téléphonie numérique sans fil très répandue en Europe.

IHM Interface Homme/Machine, ensemble des outils développés et mis à la disposition de l'utilisateur pour dialoguer avec l'ordinateur.

IP Protocole de communication qui régit la circulation des paquets de données sur Internet.

IRQ Interrupt Request, signal de demande d'interruption.

JDBC Java Database Connectivity, interface standardisée d'accès aux bases de données pour les programmes écrits en langage Java.

MEMS Micro-Electro-Mechanical Systems, microsystème électromécanique qui intègre sur une seule puce, à l'échelle micrométrique, des composants mécaniques et électroniques servant à remplir une fonction déterminée, ici, la navigation à l'estime.

MHIS Mobile Highway Inventory System, système originel de mobile mapping.

NASA National Aeronautics and Space Administration, administration gouvernementale responsable du programme spatial des États-Unis.

NAT Network Address Translation, technique qui permet à un routeur de remplacer un ensemble d'adresses IP, destinées à la communication interne entre les postes d'un réseau local, en une seule adresse IP externe utilisable dans Internet.

NSDI National Spatial Data Infrastructure, procédé cohérent de partage d'informations géographiques en vue de rationaliser les frais liés à leur collecte et à leur exploitation.

NMEA National Marine Electronics Association, groupement définissant des standards pour la communication entre équipements marins ainsi que pour les équipements GPS.

NTRIP Networked Transport of RTCM via Internet Protocol, standard de diffusion de données GPS sur Internet.

OFROU Office Fédéral des Routes, autorité suisse compétente pour l'infrastrucutre routière et le trafic individuel.

PC Personal Computer, micro-ordinateur d'usage individuel destiné à être utilisé dans un cadre professionnel ou domestique.

RFC Request for Comment, publication de référence portant sur le réseau Internet et rédigée par des experts de ce domaine.

RTCM Radio Technical Commission for Maritime Services, organisme radiotechnique dont le comité spécial 104 fixe une norme de transmission de corrections GPS.

TCP/IP Transmission Control Protocol / Internet Protocol, ensemble des protocoles de communication qui sont utilisés dans Internet et qui permettent de gérer la

circulation des données dans le réseau, tout en garantissant un échange fiable de ces données entre deux points du réseau.

TTL Transistor-transistor Logic, technologie bipolaire qui utilise des transistors connectés l'un à l'autre, soit directement, soit par des résistances.

UDP User Datagram Protocol, protocole de transport de données rapide qui s'appuie sur le protocole IP. Non fiable, il ne garantit ni le bon acheminement des paquets, ni leur ordre d'arrivée.

UMTS Universal Mobile Telecommunications System, nouvelle génération de téléphonie mobile intégrant des fonctions multimédia permettant la circulation à haut débit de données autre que la voix.

VGA Video Graphics Array, mode d'affichage de 640×480 pixels.

Notations

Algèbre linéaire et statistique

s	scalaire, élément d'un vecteur ou d'une matrice
$\vec{s}$	vecteur
$\mathbf{S}$	matrice
$\mathbf{Id}_n$	matrice identité, de taille n
σ^2, σ	variance, écart-type
ρ	corrélation

État d'une variable

s	valeur mesurée
$\check{s}$	valeur vraie
$\mathring{s}$	valeur approchée
$\tilde{s}$	valeur affectée d'un coefficient multiplicatif
$\overline{s}$	valeur moyenne
$\hat{s}$	valeur compensée, estimée

Bibliographie

Abbott, D., 2003. Linux for Embedded and Real-Time Applications. Newnes, Elsevier Science, USA.

Atkinson, K. B, 2001. *Close Range Photogrammetry and Machine Vision.* 2nd Edition, Whittles Publishing, pp. 156–167.

Bar-Sever, Y., Young, L., Stocklin, F, Heffernan, P., Rush, J., 2004. *Status of the NASA GDGPS System and the Newly Developed TDRSS Augmentation Service for Satellites (TASS), with Focus on Space Applications*. Proceedings of the ESA 2nd Workshop on navigation equipment, Noordwijk, The Netherlands.

Barnes, J., 2000. *Programmer en ADA 95 2nd édition*. Vuibert.

Bishop, R., 2005. *Intelligent Vehicle Technology and Trends*. Artech House Editor, p. 191.

Bohuon, Y., 1998. *Résistance des matériaux*. Support de cours de l'Ecole Spéciale des Travaux Publics.

Boichis, N., 2000. *Extraction Automatique des Carrefours Routiers par Interprétation d'Images Aériennes guidée par une Base de Données Cartographiques*. Thèse de doctorat de l'Université de Cergy-Pontoise, 147 pp.

Boid, D., Brown, A., Nyulund, M., Sullivan, D., 2001. *GI-Eye II: GPS/Inertial System for Target Geo-Location and Image Geo-Referencing.* White Paper Navsys.

Bonn, F. et Rochon, G., 1992. *Précis de Télédétection. Volume 1 : Principes et méthodes.* Universités Francophones, UREF, Presses de l'Université du Québec/AUPELF, Sillery, Québec, 485 p.

Bonnifait, Ph, 2005. *Contribution à la localisation dynamique d'automobiles, application à l'aide à la conduite*. Synthèse scientifique présentée pour l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université de Technologie de Compiègne.

Bouguet, J.-Y., 2004. *Camera Calibration Toolbox for Matlab*. Dernière mise à jour le 24 juillet 2006 sur <http://www.vision. caltech.edu/bouguetj/calib_doc/>

Bridges, A., 2006. *High-Speed Video : Selecting a Slow-Motion Imaging System*. Photonics Handbook, Laurin Publishing Co.

Brown, D. C., 1971. *Close Range Camera Calibration*. Journal of Photogrammetric Engineering, Vol. 37, pp. 855–866.

Caloz, R. et Collet, C., 2001. *Traitements numériques d'images de télédétection, Précis de télédétection Vol. 3*. Presses de l'Université du Québec.

Castorina, A., Capra, A., et Curti, S., 2005. *Automatic Image Enhancement by Picture Fusion*. Proceedings of SPIE, Vol. 5678, pp. 230–238.

Chanteloup, G., 1998. *Tracés de routes et terrassements*. Support de cours de l'Ecole Spéciale des Travaux Publics.

Chatterjee. C., Roychowdhury, V. P., 2000. *Algorithms for Coplanar Camera Calibration*. Journal of Machine Vision and Applications, Vol. 12, pp. 84–97.

Choubey, B, Joseph, D., Aoyama, S, Collins, S., 2006. *Dark Current Reduction Techniques for Wide Dynamic Range Logarithmic CMOS Pixels.* Proceedings of the International Congress of Imaging Science, Rochester, USA, May 7–11.

Cho, K. B., Krymski, A., Fossum, E., 2001. *A Micropower Self-Clocked Camera-on-chip*. Extended programme of the IEEE CCD & Advanced Image Sensors Workshop, Lake Tahoe, USA, June 7–9.

CPLab, 2006. *Mega Speed Slow Motion CCD & CMOS Cameras*. Canadian Photonic Labs Inc. Disponible sur Internet : <http://www.cplab.com/subpages/lcol/highccd/highccd.htm>.

Cucchiara, R., Grana, C., Prati, A., Vezzani, R., 2003. *A Hough-Transform Based Method for Radial Lens Distortion Correction*. Proceedings of the 12th International Conference on Image Analysis and Processing, Mantova, Italy, September 17–19.

Dammalage, T. L., Srinuandee, P., Samarakoon, L., Susaki, J., Srisahakit, T., 2006. *Potential Accuracy and Practical Benefits of NTRIP Protocol over Conventional RTK and DGPS Observation Methods*. Proceedings of the 5th Annual International Conference and Exhibition on Geographical Information Technology and Applications, Bangkok, Thailand, 29 August–1 September.

Danov, T., Shcherback I., Yadid-Pecht, O., 2004. *Ring-Shaped N+/P-Well Photodiode: Study of Responsivity Enhancement*. Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, Tel-Aviv, Israel, December 13–15.

Davies, R., 1994. *Writing a Matrix Package in C++*. Proceedings of the 2nd Annual Object-Oriented Numerics Conference, pp. 207–213.

Devernay, F., 1997. *Vision stéréoscopique et propriétés différentielles des surfaces*. Thèse de Doctorat de l'Ecole Polytechnique, France, pp. 14–16.

Devernay, F et Faugeras, O., 2001. *Straight Lines Have to Be Straight – Automatic Calibration and Removal of Distortion from Scenes of Structured Environments.* Machine Vision and Applications, Vol. 13, Springer-Verlag, pp. 14–24.

Diep Dao, T. H., Alves, P., Lachapelle, G., 2004. *Performance Evaluation of Multiple Reference Station GPS RTK for a Medium Scale Network*. Journal of Global Positioning Systems, Vol. 3, No. 1–2, pp. 173–182.

Dileepan, J., 2002. *Modelling and Calibration of Logarithmic CMOS Image Sensors*. Thèse de doctorat de l'Université d'Oxford.

Downey, A. B., 2005. *The Little Book of Semaphores*. Green Tea Press Editions.

Dupraz, H. et Merminod, B., 2002. *Topométrie I : principes et applications*. Support de cours de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Duquenne, F., Botton, S., Peyret, F., Bétaille, D., Willis, P., 2005. *GPS : localisation et navigation par satellites, 2e édition revue et augmentée*. Hermes Science Publications.

Eddelbuettel, D., 1996. *Object-oriented econometrics: matrix programming in C++ using GCC and Newmat*. Journal of Applied Econometrics, Vol. 11, No 2, pp 199–209

Ellum, C. et El-Sheimy, N., 2002. *Land-based Integrated Systems for Mapping and GIS Applications*. Survey Review, 36 (283), pp. 323–339.

El-Sheimy, N., 2005. *3D GIS Data Acquisition Using VISAT – A Mobile Mapping System*. Proceedings of the Map Middle East Conference, Dubai, UAE, April 23–25.

European Telecommunications Standard Institute (ETSI), 1999. *Digital Cellular Telecommunications System (Phase2+): AT Command Set for GSM Mobile Equipment (GSM 07.07 version 7.4.0 Release 1998)*. Technical specification 100 916.

Filippov, A. N., 2002. *Using Embedded Linux in a High Speed Gated Intensified Camera*. Linux Devices. Disponible sur l'internet : <http://www.linuxdevices.com/articles/AT2171151224.html>

Flament, M., 2005. *ActMAP Final Report*. IST-2001-34141, Deliverable D1.2.

Fossum, E., 1993. *Active Pixel Image Sensors – Are CCDs Dinosaurs?* Proceedings SPIE, Vol. 1900, pp. 2–14.

Gay, W., 2000. *Linux Socket Programming by Example*. Que/Sams Publishing.

Geiger, A., 1985. *Rappels de géodésie géométrique et physique*. Support de cours de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich.

Goad, C. C., 1991. *The Ohio State University Mapping System: the Positioning Component*. Proceedings of the 47th Annual Meeting. The Institute of Navigation (ION). June 10–12.

Gontran, H. et Skaloud, J., 2004. *Techniques GPS-RTK appliquées à la trajectographie*. Revue XYZ, Vol. 99, pp. 25–30.

Grange, S., Fong, T., Baur, C., 2003. *TLIB: a Real-Time Computer Vision Library for HCI*. Proceedings of the 7th Digital Image Computing: Techniques and Applications Conference, Sydney, Australia, pp. 1017-1026.

Grossberg, M. D., Nayar, S., K., 2003. *Determining the Camera Response from Images: What is Knowable?* IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 25, No. 11, pp. 1455, 1467.

Gurdjos, P. et Payrissat, R., 2002. *Calibrage plan d'une caméra en mouvement à focale variable*. Actes du 13e congrès de reconnaissance des formes et intelligence artificielle, Angers, France, 8–10 janvier.

Hartley, R. I., (1994). *An Algorithm for Self Calibration from Several Views*. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Seattle, USA, pp. 908–912.

Heikillä, J., 2000. *Geometric Camera Calibration Using Circular Control Points*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22, pp. 1066–1077.

Heipke, C., Steger, C., Multhammer, R., 1995. *A Hierarchical Approach to Automatic Road Extraction from Aerial Imagery*. Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision II.

Hoelke, B, 2003. *Embedded Internet mit Easy GPRS*. Technical reference by Round Solutions.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., et Collins, J., 2001. *GPS, Theory and Practice*, 5e édition, Springer-Verlag.

Hu, G. R., Khoo, H. S., Goh, P. C., Law, C. L., 2002. *Internet-based GPS VRS RTK Positioning with a Multiple Reference Station Network*. Journal of Global Positioning Systems, Vol. 1, No. 2, pp. 113–120.

Hu, X., Tao, V., Hu, Y., 2004. *Automatic Road Extraction from Dense Urban Area by Integrated Processing of High Resolution Imagery and Lidar Data*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXV, Part B, Commission 3.

ISO Technical Committee 204, Working Group 3, 2000. *ISO/TR 14825 GDF – Geographic Data Files – version 4.0*. ISO/TC 204 NB29, 12th October.

Janvier, N., 2005. *Identification des caractéristiques d'une route par stéréovision mobile CMOS*. Disponible sur l'internet : <http://www.esgt.cnam.fr/fr/tfe/memoires/2005/05_janvier_mem.pdf>

Javad Navigation Systems, 2005. *GPS Receiver Interface Language (GRIL)*. Reference Guide.

Javad Navigation Systems, 2006. *JNSGyro-2/2T Application Notes*. Technical Guide.

Jonnson, J., 1997. *Exploring the Importance of Preprocessing Operations in Real-Time Multiprocessor Scheduling*. Proceedings of the IEEE Real-Time Systems Symposiums, San Francisco, USA, December 2–5.

Kadionik, P., 2006. *Linux embarqué : le pari réussi d'une PME bordelaise.* RTS Embedded Systems, Paris, France, 5–7 avril 2006.

Kleusberg, A. et Teunissen, P. J. G., 1998. *GPS for Geodesy, 2nd Edition*. Springer Verlag.

Lapucha, D., 1990. *Precise GPS/INS positioning for Highway Inventory System*. M.Sc. Thesis, Department of Geomatics Engineering. Calgary, Canada.

Legat, K. C., 2006. *Approximate Direct Georeferencing in National Coordinates*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 60, pp. 239–255

Limpach, P., 2003. *Trajectographie de courses de ski alpin avec GPS*. Rapport de travail de diplôme réalisé à l'EPFL.

Louwerse, W. J. R. et Hoogendoorn, S. P., 2004. *ADAS Safety Impacts on Rural and Urban Highways*. Proceedings of the IEEE Vehicles Symposium, Parma, Italy, June 14–17.

Lyons, W., 2005. *Meeting the Embedded Design Needs of Automative Applications*. Proceedings of the Design, Automation and Test in Europe Conference (DATE ´05), Munich, Germany, March 3–7.

Malkush, W., 2002. *Quantitative Image Analysis, Methods and Limitations.* Tools and Techniques for Life Science Researchers, Vol. 27, No. 2.

Marti, U., 2001. *Formules et constantes pour le calcul pour la projection cylindrique conforme à axe oblique et pour la transformation entre des systèmes de référence*. Instructions de la direction fédérale des mensurations cadastrales, swisstopo, Wabern.

Martinelli, A., Tomatis, N., Siegwart, R., 2006. *Simultaneous Localization and Odometry Self Calibration for Mobile Robot*. Autonomous Robitsm in press.

Maruyama, H., Ohtake, H., Hayashida, T., Yamada, M., Kitamura, K., Arai, T., Tanioka, K., 2005. *Color Video Camera Capable of 1,000,000 fps with Triple Ultrahigh-Speed Image Sensors*. Proceedings of the 26th International Congress on High-Speed Photography and Photonics, Vol. 5580, pp. 244–249.

Matou, K et Ni, Y., 2002. *Capteur d'images logarithmique CMOS avec compensation analogique du BSF*. Actes du 3e colloque sur le Traitement Analogique de l'Information, du Signal et de ses Applications, Paris, France, 12–13 septembre.

Matrox Electronic Systems Ltd., 2001. *Matrox Imaging Library version 7.0, User Guide*. Manual no. 10513-301-0700.

McCullagh, B., Shevlin, F., 2004. *Coplanar Camera Calibration with Small Depth of Field Lens*. Proceedings of the Irish Machine Vision and Image Processing Conference, Dublin, Ireland, September 1–3.

Mendis, S., Kemeny, S., Gee, R., Pain, B., Kim, Q., Fossum, E., 1994. *Progress in CMOS Active Pixel Sensors*. Proceedings SPIE, Vol. 2172, pp. 19–29.

Microsoft, 2005. *How to Use QueryPerformanceCounter to Time Code*. Note technique disponible sur Internet : <http://support.microsoft.com/kb/172338/en-us>.

Muellerschoen, R. J., Bertiger, W. I., Lough, M. F., Stowers, D., Dong, D., 2000. *An Internet-based Global Differential GPS System, Initial Results*. ION National Technical Meeting, Anaheim, USA.

Mugnier. C. J., Förstner, W., Wrobel, B., Paderes, F., Munjy, R., 2004. *The Mathematics of Photogrammetry*. Manual of Photogrammetry, Fifth Edition, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, USA, pp. 215–216.

Nash, S. et Sefer, A., 1996. *Linear and Non-linear Programming*. McGraw–Hill series in Industrial Engineering and Management Science.

National Center for Statistics and Analysis, 2004. *2003 Early Assessment Estimates of Motor Vehicle Crashes*. U.S. National Highway Traffic Safety Administration Report, May.

National Instruments, 2006. *Image Analysis and Processing*. Tutoriel technique disponible sur Internet : <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3470>.

O'Neill, B. 1997. *Elementary Differential Geometry, 2nd Edition.* Academic Press.

Oliveira-Marques, M., Bonatti, I. S., 2005. *Wireless Link dimensioning: Priority versus Sharing*. Advanced Industrial Conference on Telecommunications/Service Assurance with Partial and Intermittent Resources Conference/E-Learning on Telecommunications Workshop, 17-12 July, Lisbon, Portugal.

Ortiz, A., Oliver, G., 2004. *Radiometric Calibration of CCD Sensors: Dark Current and Fixed Pattern Noise Estimation*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, New Orleans, USA, April 26 – May 1.

Pacific Crest, 1995. *The Guide to Wireless GPS Data Links*. Technical guide.

Pop, S., 2006. *Panorama des temps réel sous GNU/Linux*. Conférence "Solutions Linux", 2 février, Paris, France.

Premji, A., 2005. *Deploying Enhanced NAT Services in GPRS Networks*. Application note Juniper Networks Inc., USA.

Prieto, P., Cagigal, M. P., 1995. *Low-pass Filtering Applied to Photon-limited Images: Improvement by Histogram Specification*. Journal of Pure and Applied Optics, Vol. 4, pp. 74–87.

Rapoport, L., 2006. Communication privée en qualité de responsable du développement des logiciels internes Javad.

Reibel, Y., Jung, M., Bouhifd, M., Cunin, B., Draman, C., 2003. *CCD or CMOS Camera Noise Characterisation.* European Physical Journal – Applied Physics, Vol. 21, pp. 75–80.

RTCM, 2004. *RTCM Recommended Standards for Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Service, Version 3.0*. February 10.

Ruskoné, R, 1996. E*xtraction automatique du réseau routier par interprétation locale du contexte: application à la production de données cartographiques.* Thèse de doctorat de l'université de Marne-la-Vallée, 1996, 162 pp.

Schwarz, K. P., Martell, H., El-Sheimy, N., Li, R., Chapman, M., Cosandier, D., 1993. *VISAT, a Mobile Highway Survey System of High Accuracy*. VNIS Conference, Ottawa, Canada, October 12–15.

Shcherback, I, Belenky, A., Yadid-Pecht, O., 2001. *Empirical Dark Current Modelling for Complementary Metal Oxide Semiconductor Active Pixel Sensor*. Journal of Optical Engineering, Vol. 41, pp. 1216–1279.

Shin, E.-H., 2005. *Estimation Techniques for Low-cost Inertial Navigation*. Thèse de Doctorat de l'Université de Calgary, Canada.

Sookman, S., 2006. *Blob Analysis and Edge Detection in the Real World*. Evaluation Engineering Magazine, August Issue.

Sternberg, H., 2002. *Entwicklung des kinematischen Vermessungssystems KiSS.* Beiträge anlässlich des 65. Geburtstages von Wilhelm Caspary. Institut für Geodäsie, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, pp. 127–132.

Sturm, P. F., Maybank, S. J., 1999. *On Plane-Based Camera Calibration : A General Algorithm, Singularities, Applications*. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 432–437.

Theuwissen, A., 2003. *CMOS Image Devices*. Support de cours de l'Université de Technologie de Delft, Pays-Bas.

Tournaire, O., Soheilian, B., Paparoditis, N., 2006. *Towards a Sub-decimeter Georeferencing of Ground-based Mobile Mapping Systems in Urban Areas: MatchingGround-Based and Aerial-Based Imagery Using Roadmarks*. ISPRS Commission I Symposium, Paris, France, 3–6 juillet

Tsai, R. Y., 1986. A*n Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision*. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami Beach, USA, pp. 364–374.

Tsai, R. Y., 1987. *A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-shelf TV Cameras and Lenses.* The IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No 4, pp. 323–344.

Wang, Z., 1990. *Principles of Photogrammetry with Remote Sensing*. Publishing House of Surveying and Mapping, Beijing, China.

Weber, G., Dettmering, D., Gebhard, H., 2003. *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*. International Union of Geophysics and Geodesy General Assembly, 30 June–11 July, Sapporo, Japan.

Wegener, V., et Wanninger, L., 2005. *Communication Options for Network RTK*. IAG-Working Group 4.5.1: Network RTK. Disponible sur Internet: <http://www.network-rtk.info>.

Wübenna, G., Bagge, A., 2002. *RTCM Message Type 59-FKP for Transmission of FKP*. Geo++ White Paper Nr. 2002.0, 17 April.

Yadid-Pecht, O., 1999. *Wide-dynamic-range Sensors*. Optical Engineering, Vol. 38, No. 10, pp. 1650-1660.

Yodaiken, V., 2001. *Open RTLinux Patent License*. Brevet logiciel disponible sur Internet : < http://www.rtlinuxfree.com/content/view/19/29/> consulté le 14 août 2006.

Zaffalon, L., 2006. *Programmation concurrente et temps réel avec Java*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.

Zaffalon, L., Breguet, P., 2003. *Programmation concurrente et temps réel avec ADA 95*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.

Zhang, Z., 2000. *A Flexible New Technique for Camera Calibration*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22, pp. 1330–1334.

“Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz”

(Fortsetzung der Publikationsreihe ”Astronomisch-geodätische Arbeiten in der Schweiz”) der Schweizerischen Geodätischen Kommission (ab Bd. 51):

51 1995 Dreidimensionales Testnetz Turtmann 1985-1993, Teil II (GPS-Netz). F. Jeanrichard (Hrsg.) Autoren: G. Beutler, A. Geiger, M. Rothacher, Stefan Schaer, D. Schneider, A. Wiget, 173 Seiten.

52 1995 High Precision GPS Processing in Kinematic Mode: M. Cocard. 139 Seiten.

53 1995 Ambiguity Resolution Techniques in Geodetic and Geodynamic Applications of the Global Positioning System. L. Mervart. 155 Seiten.

54 1997 SG 95: Das neue Schweregrundnetz der Schweiz: F. Arnet und E. Klingelé. 37 Seiten.

55 1997 Combination of Solutions for Geodetic and Geodynamic Applications of the Global Positioning System (GPS). Elmar Brockmann, 211 Seiten.

56 1997 Geoid der Schweiz 1997. Urs Marti, 140 Seiten.

57 1998 Astrometry and Satellite Orbits: Theoretical Considerations and Typical Applications. Urs Hugentobler, 209 Seiten.

58 1998 Systematic Investigations of Error- and System-Modelling of Satellite Based Flight Approaches and Landings in Switzerland. Maurizio Scaramuzza, 165 Seiten.

59 1999 Mapping and Predicting the Earth’s Ionosphere Using the Global Positioning System. Stefan Schaer, 205 Seiten.

60 2000 Modeling and Validating Orbits and Clocks Using the Global Positioning System. Timon Anton Springer, 154 Seiten.

61 2001 Spatial and Temporal Distribution of Atmospheric Water Vapor using Space Geodetic Techniques. Lars Peter Kruse, 128 Seiten.

62 2001 Solar Spectrometry for Determination of Tropospheric Water Vapor. Bernd Sierk, 212 Seiten.

63 2001 Analysis of refraction influences in geodesy using image processing and turbulence models. Philipp Flach, 175 Seiten.

64 2003 INS/GPS Integration for Pedestrian Navigation. V. Gabaglio, 161 Seiten.

65 2003 Efficient Methods for Determining Precise Orbits of Low Earth Orbiters Using the Global Positioning System. Heike Bock, 214 Seiten.

66 2003 Capteurs et Algorithmes pour la Localisation Autonome en Mode Pédestre. Quentin Ladetto, 121 Seiten.

67 2004 GPS based Determination of the Integrated and Spatially Distributed Water Vapor in the Troposphere. Marc Troller, 172 Seiten.

68 2005 Geodetic Mobile Solar Spectrometer. Alexander Somieski, 205 Seiten.

69 2005 Absolute Airborne Gravimetry. Henri Baumann, 142 Seiten.

70 2006 The *Swiss Trolley* – A Modular System for Track Surveying. Ralph Glaus, 184 Seiten.

71 2006 Development of a Robotic Mobile Mapping System by Vision-Aided Inertial Navigation: A Geomatics Approach. Fadi Atef Bayoud, 157 Seiten.

72 2007 Das neue Landeshöhennetz der Schweiz LHN95. Andreas Schlatter, 373 Seiten.

73 2007 Pseudo-Stochastic Orbit Modeling of Low Earth Satellites Using the Global Positioning System. Adrian Jäggi, 214 Seiten.

74 2008 Cartographie Mobile en Temps Réel. Hervé Gontran, 162 Seiten.