



**HAL**  
open science

# Étude d'un système de type “ Mobile Mapping Scanning ” et mise en œuvre d'une procédure de calibration

Marine 16/04/1990 Nunes

## ► To cite this version:

Marine 16/04/1990 Nunes. Étude d'un système de type “ Mobile Mapping Scanning ” et mise en œuvre d'une procédure de calibration. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2014. dumas-01179403

**HAL Id: dumas-01179403**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01179403>**

Submitted on 22 Jul 2015

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

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

**CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS**  
**ÉCOLE SUPÉRIEURE DES GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES**

---

**MÉMOIRE**

présenté en vue d'obtenir

le **DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM**

**Spécialité : Géomètre et Topographe**

par

**Marine NUNES**

---

Étude d'un système de type « Mobile Mapping Scanning » et mise en œuvre  
d'une procédure de calibration.

**Soutenu le 08 Juillet 2014**

---

**JURY**

**PRESIDENT : M. MOREL Laurent**

**MEMBRES : M. RAFFIN Lionel, Maître de stage**

**M. VERDUN Jérôme, Professeur référent**

**M. POLIDORI Laurent**

**Mme. SIMONETTO Élisabeth**



## *Remerciements*

Je tiens tout d'abord à remercier mon maître de stage Lionel RAFFIN ainsi que Cédrik FERRERO et Mathias SAURA pour m'avoir accueilli au sein de leur entreprise durant ces cinq mois de recherches.

Je remercie grandement Damien BEAUFILS pour sa patience et pour avoir partagé tout son savoir concernant le RoadScanner qui était jusqu'alors, pour moi, un grand mystère.

J'adresse également mes remerciements à Fabio ADANI ainsi qu'à Ernesto RONCI, deux ingénieurs faisant partie de la société italienne Siteco, pour avoir répondu à mes nombreuses interrogations et pour avoir été présents lorsque je rencontrais des problèmes techniques avec le MMS.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers Jérôme VERDUN, mon professeur référant, pour ses conseils et pour m'avoir consacré un peu de son temps.

Enfin, je tiens à remercier toute l'équipe de Géosat pour leur accueil chaleureux et leur bonne humeur quotidienne.

## *Liste des abréviations*

**DMI** : Distance Measurement Instrument – Instrument de mesure de distance

**GDOP** : Geometric Dilution Of Precision – Dilution de précision géométrique

**GLONASS** : Système global de navigation satellitaire

**GPS** : Global Positioning System – Système de positionnement global

**GNSS** : Global Navigation Satellite System

**IMU** : Inertial Measurement Unit – Unité de mesure inertielle

**INS** : Inertial Navigation System – Système de navigation inertielle

**MMS** : Mobile Mapping System – Système de cartographie mobile

**LASER** : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – Amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement.

## *Glossaire*

**MMS** : Le MMS, ou système de cartographie mobile est une plateforme « mobile » terrestre ou aérienne composée de plusieurs capteurs de navigation et de différents capteurs de mesure permettant le géo-référencement des données collectées.

**Odomètre** : Instrument de mesure pour connaître la distance parcourue par un véhicule.

**Centrale inertielle** : Dispositif muni de gyromètres, d'accéléromètres et d'un calculateur pour connaître la position et la vitesse d'un véhicule dans l'espace.

**GLONASS** : Système de positionnement par satellites d'origine soviétique et géré par les forces spatiales de la Fédération de Russie. Il a été rendu fonctionnel en 2010 et couvre 100 % de la surface de la planète.

**GNSS** : Nom général des systèmes de navigation satellitaires fournissant une couverture de géopositionnement global. Les GNSS utilisent les constellations de satellite existantes. Dans notre étude, les données GNSS comprendront les mesures GPS et GLONASS.

# Table des matières

Remerciements.....	3
Liste des abréviations.....	4
Glossaire.....	5
Table des matières.....	6
Introduction.....	8
<b>I. Description du système de cartographie mobile.....</b>	<b>11</b>
<b>I.1 LES COMPOSANTS DU SYSTEME.....</b>	<b>11</b>
I.1.1 LE SYSTEME DE NAVIGATION.....	13
I.1.2 LES SCANNERS-LASERS.....	21
I.1.4 LA CAMERA.....	23
<b>I.2 LE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME.....</b>	<b>25</b>
I.2.1 LES DIFFERENTS REPERES UTILISES.....	25
I.2.2 LA MODELISATION CINEMATIQUE.....	25
I.2.3 LE GEOREFERENCMENT DES DONNEES.....	26
<b>I.3 LES APPLICATIONS POSSIBLES.....</b>	<b>28</b>
I.3.1 APPLICATIONS UTILISANT LA CAMERA.....	28
I.3.2 APPLICATIONS UTILISANT LES SCANNERS-LASERS.....	28
<b>II. La calibration du système de cartographie mobile.....</b>	<b>31</b>
<b>II.1 LES OPERATIONS PRELIMINAIRES.....</b>	<b>31</b>
II.1.1 LA CREATION D'UN MUR D'ETALONNAGE.....	31
II.1.2 DETERMINATION DES COORDONNEES DES CIBLES.....	33
<b>II.2 LE PRINCIPE DE L'ETALONNAGE.....</b>	<b>33</b>
II.2.1 DU REPERE INS AU REPERE TERRAIN.....	33
II.2.2 DU REPERE DES CAPTEURS AU REPERE TERRAIN.....	34
II.2.2.1 LA CALIBRATION DE LA CAMERA.....	34
II.2.2.1.1 LE MODELE GEOMETRIQUE.....	34
II.2.2.1.2 LE MODELE ANALOGIQUE.....	35
II.2.2.1.3 MODELE COMPLET SANS DISTORSION.....	37
II.2.2.1.4 CALCULS POUR LA CALIBRATION.....	38
II.2.2.1.5 EXTRACTION DES PARAMETRES INTRINSEQUES.....	39
II.2.2.1.6 EXTRACTION DES PARAMETRES EXTRINSEQUES.....	39
II.2.2.1.7 LA DISTORSION.....	40
II.2.2.2 LA CALIBRATION DES SCANNERS-LASERS.....	42
II.2.2.2.1 LE MODELE DES SCANNERS-LASERS.....	42
II.2.2.2.2 EXTRACTION DES PARAMETRES EXTRINSEQUES.....	44
II.2.3 DU REPERE DES CAPTEURS AU REPERE INS.....	44
<b>II.4 PRECISIONS.....</b>	<b>46</b>
II.4.1 VERIFICATION DE LA CALIBRATION.....	46
II.4.1.1 SYNCHRONISATION DE LA CAMERA ET DES SCANNERS-LASERS.....	46
II.4.1.2 SYNCHRONISATION DES SCANNERS-LASERS.....	47
II.4.2 PROCEDURE TERRAIN POUR AUGMENTER LA QUALITE.....	48
II.4.3 COMPARAISON AVEC LES MESURES D'UN TACHEOMETRE.....	48

Conclusion .....	51
Bibliographie.....	52
Liste des figures .....	53
Liste des tableaux.....	54
Table des annexes .....	55
RESUMÉ .....	58
SUMMARY .....	58

# Introduction

Afin de répondre aux nombreuses demandes d'acquisition de données géo-référencées, les systèmes mobiles de cartographie, aussi appelés Mobile Mapping Systems (MMS) se sont développés au cours des dernières années. De nombreuses recherches ont été effectuées afin d'intégrer différents capteurs de positionnement et des capteurs d'acquisition tels que des caméras et/ou des scanners-lasers pour à la fois dessiner des plans géoréférencés et pour visualiser l'environnement. La trajectoire et l'attitude de la plateforme mobile a ainsi pu être déterminée instantanément sans pour autant nécessiter de points de contrôle au sol. Le positionnement est ainsi assuré par des capteurs de positionnement qui sont un récepteur GNSS (ou GPS) et une centrale inertielle de navigation indispensable pour estimer la trajectoire du véhicule lorsque que le signal GPS est interrompu.

Un tel dispositif composé de caméras et/ou de scanners-lasers est déjà installé à bord de certains avions. Il est donc possible de réaliser des acquisitions dans des zones dangereuses ou inaccessibles avec les autres moyens de transport. Néanmoins, les données photogrammétriques et lasergrammétriques acquises avec un système aéroporté ne permettent pas d'obtenir le niveau de détail nécessaire pour certaines applications. En zone urbaine, par exemple, seules les toitures et les emprises au sol des bâtiments sont visibles. Il est donc impossible de visualiser les façades convenablement. De plus, le coût des opérations est relativement important et donc pas accessible à un large public.

Heureusement, le système terrestre est quant à lui plus abordable et peut être employé pour effectuer diverses missions comme par exemple des relevés d'environnements urbains et routiers. Il représente une grande innovation pour la création et la mise à jour de base de données du système d'informations géographiques (SIG).

En outre, de par les fortes demandes de relevés topographiques de linéaires, les topographes ont dû s'adapter et trouver de nouvelles solutions pour assurer un rendement optimal. Certains cabinets se sont donc pourvus d'un « Mobile Mapping System » (MMS) équipé de scanners-lasers pour créer des plans topographiques à l'aide des nuages de points et pour assurer à leur clientèle une bonne précision sur les acquisitions.

Le premier véhicule MMS était Stéréopolis issu de la recherche d'un des laboratoires de l'IGN. Il a été achevé au début des années 2000 et avait pour objectif d'acquérir des données images pour enrichir les bases de données pour les réseaux routiers. Les caméras alors utilisées avaient une résolution de 16 Méga pixels mais le positionnement n'était assuré que par un GPS (= antenne + récepteur). La basse fréquence d'acquisition ne permettait pas de circuler à une vitesse normale en ville et le véhicule Stéréopolis ne disposait pas de capteurs d'acquisition de type lasers. En 2005 est apparu le véhicule « StreetMapper » développé par la société allemande IGI et équipé de scanners-lasers qui mesuraient et collectaient les données en trois dimensions du réseau routier.

L'acquisition des données devient extrêmement rapide puisque le véhicule peut rouler à une vitesse normale en ville sans dépasser les 70 km/h. Ainsi, un levé d'environ 30 kilomètres de voie rapide nécessite une trentaine de minutes d'acquisition avec le MMS alors qu'il faut une dizaine de jours avec un scanner-laser en mode statique. Par ailleurs, le traitement au bureau demande davantage de temps que pour un levé traditionnel avec un tachéomètre par exemple (fig.1). En effet, il est

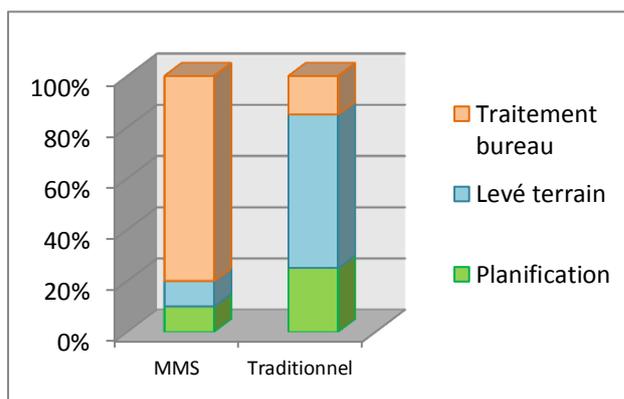


Figure 1 : Diagramme représentant le temps passé par l'opérateur sur chaque phase pour un levé MMS et un levé traditionnel

nécessaire de calculer la trajectoire du véhicule, d'extraire les données lasers et les images, de les synchroniser avant de pouvoir commencer à dessiner.

Durant ces dernières années, de nombreuses sociétés se sont intéressées au MMS et à ses qualités d'acquisition. Les capteurs intégrés dans les dispositifs varient d'un développeur à l'autre. En effet, ils n'ont pas tous les mêmes objectifs. Alors que certains privilégient la visualisation spatiale de l'environnement d'étude à travers les images, d'autres ont besoin des données lasergrammétriques afin de connaître les coordonnées précises d'objets.

Quelques exemples de systèmes de cartographie mobiles sont visibles dans le tableau 1 ci-après. Parmi eux, on retrouvera le MMS étudié dans ce projet à savoir le RoadScanner3 développé par la société italienne Siteco Informatica.

Tableau 1 : Quelques modèles de MMS

Nom	Développeur	Capteurs	
		Navigation	Cartographie
GPSVan	Université d'Ohio State	GPS bi-fréquence Gyromètre vertical 2 Gyromètres directionnels Odomètres	2 appareils photos CCD <sup>1</sup> 2 caméras vidéos analogiques
VISAT (Video Inertial SATellite)	Université de Calgary	2 GNSS bi-fréquence IMU lecteur ABS	1 caméra S-VHS 8 appareils photos CCD n/b
MoSES (Mobile Road Mapping System)	Université de forces armées fédérales de Munich	GPS INS Baromètre numérique	2 scanners-lasers 2 appareils CCD
GEOVAN	Institut de cartographie de Catalogne	GPS INS Odomètre	2 appareils photographiques 1 télémètre laser
RoadScanner3	SITECO Informatica, Italie	GPS/INS/Odomètre	3 scanners-lasers 1 caméra à 8 objectifs

La précision obtenue varie en fonction de plusieurs éléments. Tout d'abord, le matériel de navigation utilisé joue un rôle important car c'est sa précision qui permettra de connaître au mieux la

<sup>1</sup> Capteur photo utilisant un dispositif à transfert de charges (CCD = Charge Couple Device). Il s'agit d'un composant électronique d'un appareil photo numérique qui génère des charges électriques d'intensités variables en fonction de la quantité de lumière reçue et de la durée d'exposition. Ce dispositif permet de générer les pixels qui constituent l'image numérique stockée dans la carte mémoire de l'appareil.

position et l'orientation du véhicule à tout moment. De plus, il est essentiel que tous les capteurs du système soient correctement calibrés, c'est-à-dire qu'il faut rigoureusement déterminer la position et l'orientation de chaque capteur par rapport à la centrale inertielle.

Dans cette étude, nous nous intéresserons principalement au RoadScanner3 élaboré par la société italienne Siteco Informatica puisqu'il s'agit du système acquis par Géosat.

L'objectif premier de ce projet était d'élaborer une procédure complète d'étalonnage du MMS. Ici, le terme calibration ne signifie pas l'étalonnage individuel de chaque instrument comme ce terme pourrait le laisser penser. Il s'agit en revanche de déterminer la position et l'orientation relative des capteurs embarqués, c'est-à-dire les scanners-lasers et la caméra, par rapport au système de positionnement dynamique constitué de la centrale inertielle de navigation. Cette étape est essentielle car c'est à partir d'une bonne calibration que l'on pourra obtenir des mesures justes. Ainsi, la précision du géoréférencement repose en grande partie sur la bonne détermination des composantes des excentricités linéaires et angulaires entre les différents capteurs.

Il conviendra ainsi d'exposer, dans un premier temps, les éléments qui composent le MMS ainsi que son fonctionnement. Nous y verrons aussi quelques applications qui peuvent être réalisées grâce à ce nouveau système. Ensuite, il s'agira de décrire une procédure de calibration du MMS, d'en expliquer les différentes étapes et enfin d'en apprécier la qualité à travers une mission « test ».

# I. Description du système de cartographie mobile

Le road-scanner a été développé par la société italienne SITECO Informatica à partir de 2005 et n'a cessé d'évoluer autant au niveau de ses équipements que des logiciels. Il faisait alors partie des premiers systèmes à incorporer la technologie laser. Les premiers systèmes ne disposaient que d'un bras pour accueillir un scanner-laser mais après plusieurs années de recherches, SITECO a réussi à élaborer un dispositif comprenant trois scanners-lasers pour couvrir davantage de surface.

Le système étudié est donc ce dernier modèle, le RoadScanner3, il s'agit de la troisième génération de MMS élaboré par la société avec la coopération des universités qualifiées de Bologne et de Parme.

Dans cette partie il conviendra de décrire les différents éléments qui composent le système afin de comprendre son fonctionnement. Nous montrerons également les diverses applications possibles.

## I.1 Les composants du système

Les MMS peuvent être équipés de différents capteurs suivant les besoins de l'entreprise. Dans cette partie, nous allons décrire les éléments composant le Road-Scanner de la société Géosat.

Il s'agit d'un dispositif portable qui s'installe sur le toit de n'importe quel véhicule et qui est composé :

- d'un récepteur GNSS pour le géo-positionnement par satellites
- d'une centrale inertielle de haute précision IXBLUE Landins (INS)
- d'un odomètre externe (DMI – Distance Measurement Instrument) pour les mesures de distances.
- d'une caméra Ladybug5 comprenant six objectifs de haute résolution (5 x 6Mpx = 30 Méga pixels),
- de trois scanners-lasers Faro Focus 3D de 120 m de portée prenant environ trois millions de points par seconde (deux Focus 120 et un Focus X330),
- d'un PC interne comprenant l'ensemble des paramétrages des capteurs : carte récepteur GPS Trimble, centrale de commande LandIns, Road-Sit Master (paramétrage Ladybug et scanners Faro).
- d'un disque dur contenant toutes les données d'acquisition (Système de fichiers : NTFS - Capacité : 931 Go). Les fichiers générés sont :
  - o Position : des fichiers (.log)<sup>2</sup> concernant les données GPS et celles de la centrale inertielle pour pouvoir calculer la position du mobile.

---

<sup>2</sup> Les fichiers \*.log (logging) sont des fichiers regroupant l'ensemble des événements survenus sur un logiciel, une application, un serveur ou tout autre système informatique. Ils se présentent sous la forme d'un fichier texte.

- Images : - des fichiers (.pgr)<sup>3</sup> contenant les acquisitions avec la Ladybug5  
- un fichier (.txt) pour la synchronisation des images avec les autres capteurs
- Lasers : - des fichiers (.las) pour les données acquises avec les scanners-lasers  
- des fichiers (.txt) et (.dat)<sup>4</sup> pour la synchronisation des données lasers avec les autres capteurs.



Figure 2 : Récepteur GNSS Trimble



Figure 3 : Centrale Inertielle IXBLUE



Figure 4 : Focus X330 de FARO



Figure 5 : Ladybug5 de Point Grey



Figure 6 : Odomètre



Figure 7 : Focus 120 de FARO

Grâce à tous ces éléments, le road-scanner (fig.8) permet de faire des relevés rapides et très précis des routes sans perturber la circulation.

---

<sup>3</sup> Les fichiers .pgr sont des fichiers divers principalement associés avec Pretty Good Privacy (PGP). PGP (*Assez Bonne Confidentialité*) est un logiciel de chiffrement et de déchiffrement cryptographique garantissant la confidentialité et l'authentification pour la communication des données.

<sup>4</sup> Les fichiers \*.dat sont des fichiers de données. Ce sont des fichiers enregistrés dans un format qui les destinent à la lecture par d'autres programmes par opposition à la lecture par un individu.

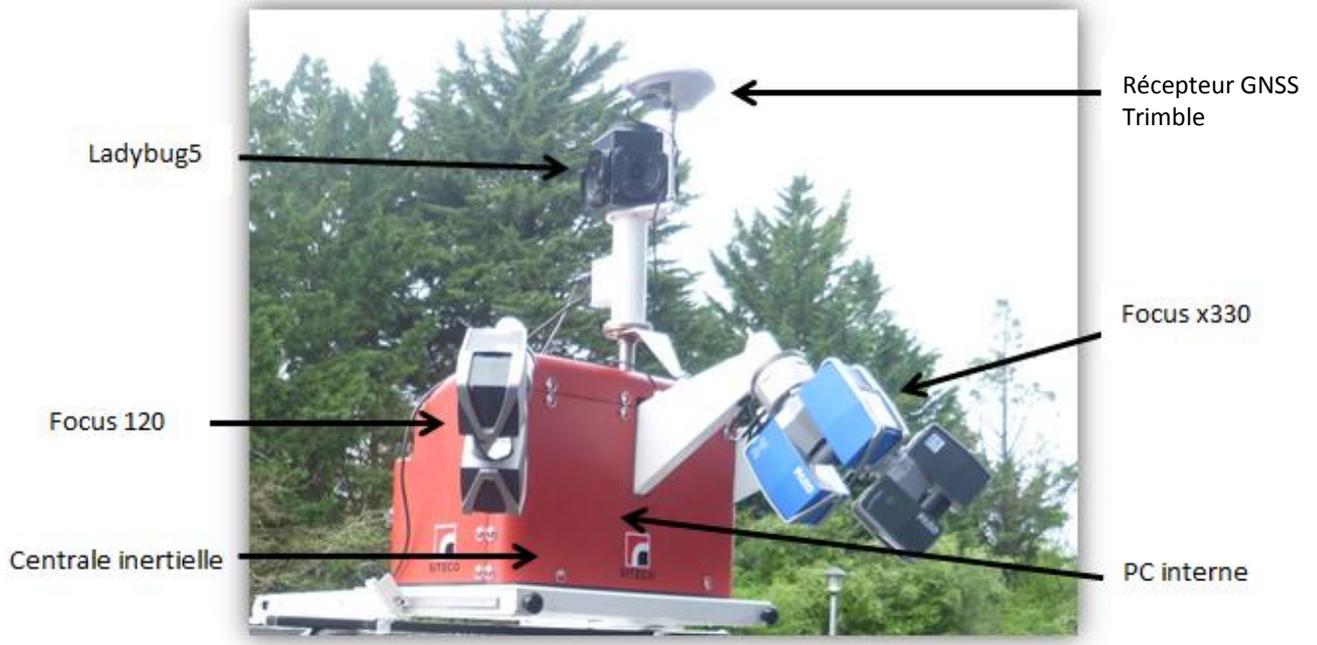


Figure 8 : Photographie du RoadScanner3 acquis par Géosat

## I.1.1 Le système de navigation

Afin de permettre le géo-référencement des données, le système est doté de capteurs de navigation permettant de connaître la position et l'orientation du véhicule durant une mission. Ainsi, la combinaison d'un récepteur GNSS avec une centrale inertielle et un odomètre donne des redondances de mesures et offre la précision attendue en termes de positionnement.

Dans cette partie, nous allons expliquer les différentes méthodes utilisées en robotique mobile pour déterminer l'emplacement du véhicule à tout moment. Nous aborderons ainsi les principes de localisation absolue et relative ainsi que la combinaison de ces deux méthodes à savoir le positionnement dit hybride.

### I.1.1.1 Le positionnement par mesures GNSS

#### I.1.1.1.1 Principe de la mesure

Le système de positionnement global (GPS) est un système de navigation qui, grâce aux données issues des satellites, permet d'obtenir une position, un temps ou bien de calculer une vitesse n'importe où sur la terre et à tout moment.

La position d'un récepteur GNSS est calculée par triangulation (fig.9). Les satellites émettent tout d'abord des signaux qui se propagent à la vitesse de la lumière. Ces signaux sont reçus par une antenne GPS qui calcule le temps de parcours de l'onde, grâce à des codes C/A ou P, et détermine le rayon de la sphère sur laquelle elle se situe. La position de l'antenne est alors représentée par l'intersection de trois sphères ce qui implique que trois satellites sont au minimum nécessaires. Un quatrième satellite sera indispensable pour avoir un contrôle et pour connaître l'heure.

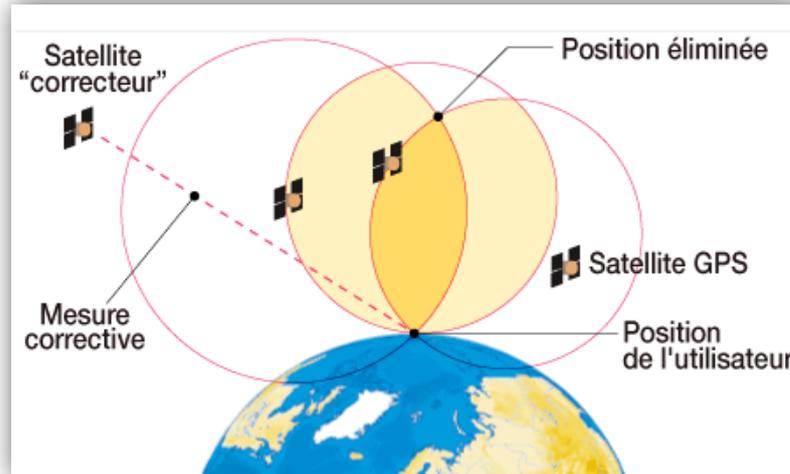


Figure 9 : Principe de la mesure GPS - intersection des sphères

De plus, les satellites envoient leurs données via deux fréquences, L1 et L2, qui sont ensuite modulées grâce à trois codes pour assurer une transmission de l'information avec une qualité suffisante. Il s'agit du code C/A qui module L1, du code P qui module L1 et L2 et le troisième code contient les informations concernant le temps GNSS, les éphémérides et les almanachs.

Le positionnement GNSS se base donc sur deux principes : la mesure de code et la mesure de phase que nous allons aborder rapidement.

#### Mesure de code

Le satellite émet donc un code qui est reçu par un récepteur avec un certain retard  $Dt$  qui correspond au temps mis par le signal pour faire le chemin jusqu'à l'antenne. Le récepteur va alors envoyer une réplique du code au satellite et la comparaison de ces deux codes va permettre de déterminer le retard.

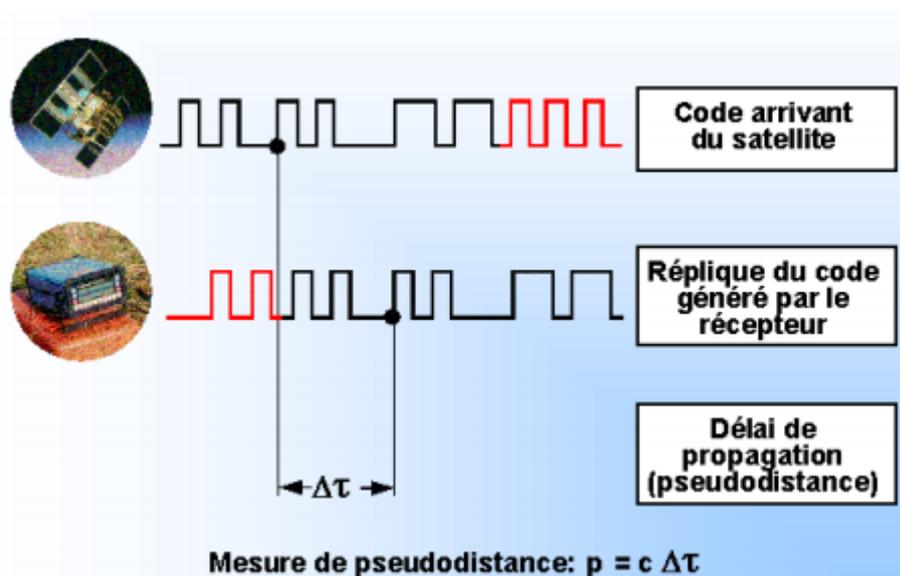


Figure 10 : Comparaison des codes pour déterminer le retard

### Mesure de phase

Elle se fait sur les ondes porteuses L1 et L2. Le principe est le même que pour la mesure de code : il y a une comparaison entre la phase du signal reçu par le récepteur et la réplique émise par ce dernier. La distance récepteur-satellite est déterminée par la différence entre l'instant de réception de la phase du signal par le récepteur et l'instant où elle est émise.

#### ***1.1.1.1.2 Le positionnement différentiel***

Dans le cas d'une mission effectuée avec le MMS, il est nécessaire d'avoir une station de référence à proximité du chantier pour pouvoir calculer la position du véhicule à chaque instant. Un récepteur GNSS doit donc être positionné sur cette station aussi appelée « pivot » ou « base », qui est connue en coordonnées. En revanche, si une station permanente du RGP se situe à moins de 5 kilomètres du chantier, il n'est pas obligatoire d'implanter une base et d'utiliser un récepteur GNSS.

Les satellites émettent donc des signaux qui sont reçus par la base et par le mobile. On détermine alors localement la somme de toutes les erreurs grâce aux observations reçues par la base. Lors du post-traitement et grâce aux logiciels adéquats, les corrections sont ensuite affectées aux mesures prises avec le récepteur GNSS embarqué à bord du mobile pour obtenir la position corrigée du véhicule. La proximité entre les deux récepteurs GNSS est donc très importante pour pouvoir appliquer les bonnes corrections au mobile ou plus exactement, pour que les erreurs s'annulent. On détermine alors les composantes du vecteur entre ces deux points.

#### ***1.1.1.1.3 La précision de la mesure***

Comme on l'a évoqué précédemment, le récepteur GNSS utilise une triangulation des signaux pour calculer sa position. Ainsi, plus la géométrie des satellites sera favorable et plus le positionnement du point sera précis. Par bonne géométrie, on entend une bonne répartition des satellites dans le ciel. La présence des satellites dans le même secteur ou l'existence de masques pouvant obstruer le signal (montagnes, arbres, immeubles,...) constituent une mauvaise configuration (Figs 11 et 12).

Le facteur GDOP (Geometric Dilution of Precision) permet de quantifier la géométrie des satellites. Sa valeur indique à l'utilisateur si la position évaluée par son appareil est fiable ou non. Ainsi, un GDOP proche de la valeur 1 indiquera une bonne constellation et plus sa valeur sera élevée, moins la position sera précise. On estime qu'au-delà de 8 la mesure GPS n'est plus acceptable.

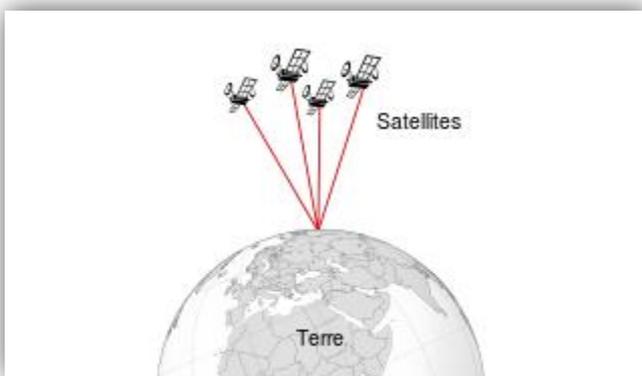


Figure 11 : Mauvaise constellation des satellites - GDOP élevé

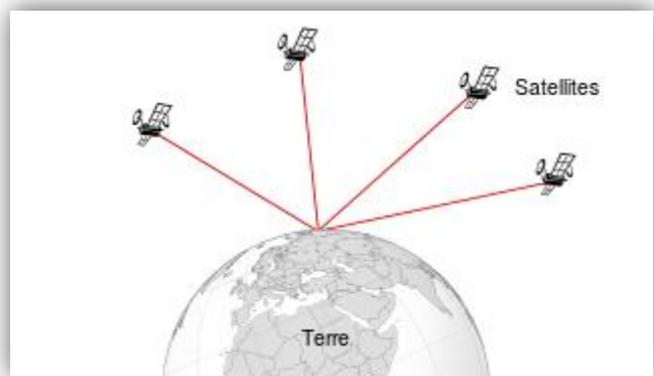


Figure 12 : Bonne configuration des satellites - GDOP faible

#### 1.1.1.4 Les sources d'erreur

Les sources d'erreur pour le positionnement GNSS sont nombreuses. Certaines sont dues à des facteurs naturels tandis que d'autres sont générées par une dégradation volontaire (disponibilité sélective et antibrouillage dont nous ne parlerons pas dans cette partie).

##### Erreurs atmosphériques

Les erreurs atmosphériques sont les plus fréquentes puisque, avant d'atteindre le récepteur, les signaux émis par les satellites doivent traverser la couche ionosphérique et la couche troposphérique (Fig. 13).

Ces signaux sont des messages qui transitent grâce à des ondes électromagnétiques. Leur vitesse atteint celle de la lumière dans le vide mais l'atmosphère terrestre perturbe la propagation du signal à cause notamment de la réfraction ionosphérique et de la réfraction troposphérique. L'onde portant le signal parcourt la distance

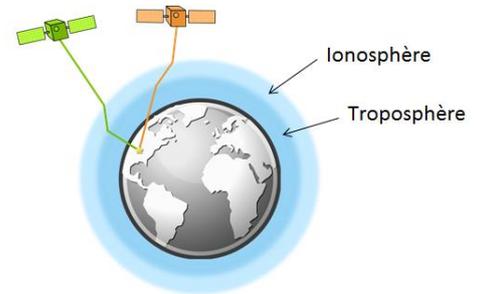


Figure 13 : Principe de l'erreur atmosphérique

satellite-station. En traversant l'atmosphère, la vitesse de l'onde est plus faible ou plus rapide que la vitesse de la lumière. Le retard (ou bien l'avance) du signal GPS est de l'ordre de plusieurs dizaines de nanosecondes qui correspondent à plusieurs mètres en termes de longueur.

Pour éliminer cette erreur, il faut connaître les modèles troposphériques et ionosphériques ou bien utiliser un récepteur GNSS bi-fréquence. En effet, le ralentissement d'un signal radio est inversement proportionnel à sa fréquence et on peut donc comparer les heures d'arrivée des deux signaux pour estimer le temps de propagation.

##### Trajets multiples

Lorsqu'il y a des objets réfléchissants à proximité de l'antenne, des erreurs dues aux multi-trajets peuvent survenir. En effet, avant d'atteindre le récepteur, les signaux GNSS vont réfléchir sur ces surfaces (étendue d'eau, façade d'immeuble,...) pouvant ainsi induire des erreurs de quelques centimètres à quelques mètres suivant la mesure (Fig. 14).

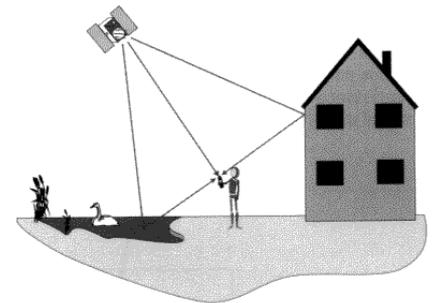


Figure 14 : Principe du multi-t trajet

Pour minimiser cette erreur, il est préférable de s'éloigner de toutes structures réfléchissantes.

##### Erreurs d'horloge du récepteur

Les horloges qui sont intégrées dans les récepteurs GNSS ne sont pas aussi précises que celles embarquées dans les satellites. L'heure du récepteur n'est donc pas synchronisée avec celle des satellites. C'est pourquoi quatre satellites sont indispensables pour déterminer le décalage d'horloge.

##### Erreurs orbitales des satellites

Afin de calculer la position exacte du récepteur GNSS, il est essentiel de connaître précisément les coordonnées spatiales des centres des sphères sur lesquelles il se situe.

Pour cela, le satellite envoie à une station de contrôle sa position théorique. Cette station calcule alors la position réelle du satellite et lui renvoie l'erreur de position. Suite à cela, le satellite peut émettre des signaux en tenant compte des corrections à appliquer pour donner sa position réelle (Fig.15).

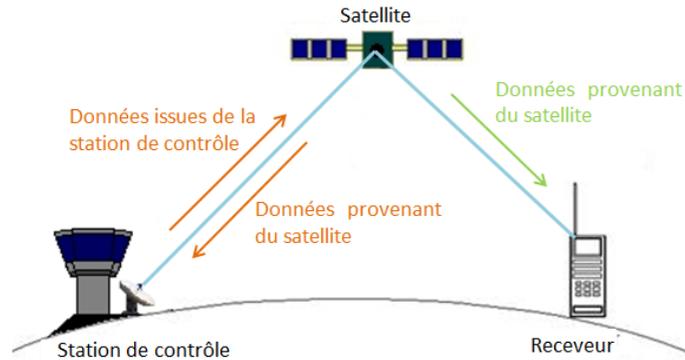


Figure 15 : Principe de la correction de l'erreur orbitale

### ***1.1.1.1.5 Les limites de l'utilisation du GNSS avec le MMS***

Au cours d'un levé, le véhicule en mouvement peut évoluer dans un environnement perturbé notamment lorsqu'il se situe en ville. Par ailleurs, l'une des limitations du GNSS est basée sur son incapacité à déterminer une position dans des lieux présentant des masques (passage sous un tunnel, sous un pont, proximité d'immeubles hauts, arbres, ...). En effet, le signal GNSS est interrompu plus ou moins longtemps ce qui occasionne une perte d'informations importante.

### **1.1.1.2 Le positionnement relatif : Le système de navigation (INS)**

Le rôle de l'INS est alors d'estimer la trajectoire de la voiture lorsque le signal GNSS est interrompu en assurant la continuité du service de navigation. Il n'utilise aucune information extérieure au mobile pour fonctionner mais intègre des capteurs capables de déterminer à la fois la position, la vitesse ainsi que l'attitude du véhicule. Un système INS se compose d'une centrale inertielle (IMU) qui intègre les différents capteurs ainsi que d'un ordinateur de calculs.



Figure 16 : Centrale inertielle LANDINS de iXSea

Dans cette partie, nous allons décrire les capteurs qui composent un système de navigation inertielle pour comprendre comment les mesures sont effectuées puis nous verrons quelles sont les erreurs pouvant intervenir lors de la détermination de la position et de la vitesse du mobile. Les recherches de O. ARRIJURIA, de P. COMTOIS-RIVET et de K.S NARAYANA détaillent davantage le fonctionnement d'un système de positionnement inertiel.

#### ***1.1.1.2.1 Les capteurs***

Les capteurs de la centrale inertielle sont des gyromètres et des accéléromètres qui détectent donc les mouvements du véhicule. Afin de pouvoir localiser le véhicule, il est nécessaire de poser un repère sur trois axes lié à la centrale. C'est pourquoi, un gyromètre et un accéléromètre sont posés sur chaque axe pour permettre au calculateur de déterminer à tout moment l'orientation de la voiture dans l'espace.

##### Les gyromètres

Les gyromètres sont des détecteurs de vitesse angulaire et permettent donc de déterminer l'orientation relative par un calcul d'intégration (Eq. 1).

$$\theta(t) = \int \omega(t) \cdot dt \quad (\text{Eq. 1}) \quad \text{avec } \theta \text{ l'angle recherché et } \omega \text{ la vitesse angulaire mesurée.}$$

Or, la vitesse angulaire de la Terre est aussi mesurée avec le gyromètre. Afin de trouver la vitesse de rotation réelle du véhicule par rapport à un référentiel terrestre, il est nécessaire de corriger cette dernière.

Une centrale à inertie utilisée à bord du RoadScanner est équipée de trois gyromètres à fibre optique pour déterminer les vitesses de roulis, de tangage et de lacet.

Ils utilisent deux rayons lumineux qui parcourent, dans une fibre optique, le même chemin mais en sens opposé et se rejoignent en un point unique. Lorsque le système est statique, les deux faisceaux parcourent le chemin et arrivent au détecteur en même temps, leur phase est identique. Par ailleurs, lors d'une rotation angulaire, le parcours d'un des deux rayons augmente alors que celui de l'autre devient plus court. On observe alors un décalage de la phase qui est proportionnel à la vitesse angulaire (Fig. 17).

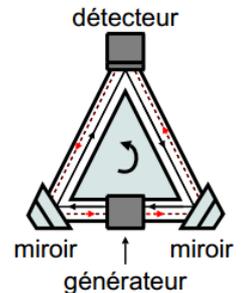


Figure 17 : Fonctionnement d'un gyromètre à fibre optique

### Les accéléromètres

Les accéléromètres sont, comme leur nom l'indique, des détecteurs d'accélération linéaire.

Le principe de mesure de l'accélération repose sur la deuxième loi de Newton : « *L'altération du mouvement est proportionnelle à la force qui lui est imprimée ; et cette altération se fait en ligne droite dans la direction de la force* ». En d'autres termes « *Dans un référentiel galiléen, la variation de la quantité de mouvement est égale à la somme des forces extérieures qui s'exercent sur le solide* » (Eq.2).

$$\vec{F} = m * \vec{a} \quad (\text{Eq. 2})$$

où la force  $\vec{F}$  représente le mouvement du corps,  $m$  est la masse du système et  $\vec{a}$  l'accélération.

Le principe d'un accéléromètre consiste en une masse connue  $m$  accrochée à un ou à des ressorts qui restreignent son mouvement dans une ou plusieurs dimensions. Quand l'accéléromètre subit une accélération, la masse va chercher sa position au repos et va donc déformer plus ou moins les ressorts. La déformation ressentie va permettre d'obtenir l'accélération, souvent appelée force spécifique. Cette force spécifique va comprendre l'accélération de la plateforme à laquelle il va falloir soustraire l'accélération gravitationnelle.

Plusieurs erreurs affectent les mesures des capteurs et engendrent ainsi des dérives des estimations de la vitesse et de la position en fonction du temps. Les erreurs sont essentiellement dues aux multiples intégrations nécessaires pour calculer la trajectoire.

#### ***1.1.1.2.2 Principe de fonctionnement***

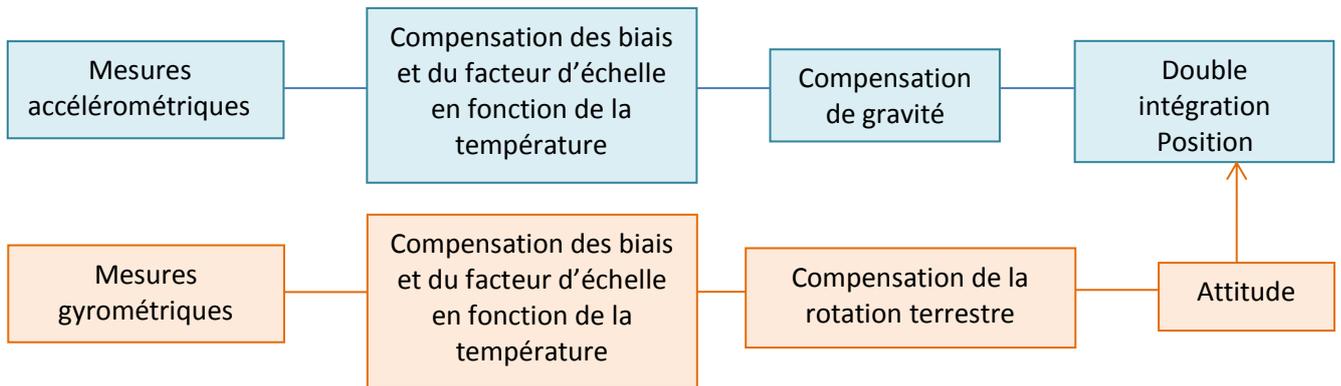
Comme on l'a dit précédemment, l'accéléromètre mesure une force due au déplacement du mobile. Cette force  $F$  est exprimée dans le référentiel  $v$  attaché au véhicule. Le gyromètre, quant à lui, mesure une vitesse angulaire de rotation  $\omega_i^v$  du repère  $v$  par rapport au repère inertiel  $i$ .

En intégrant  $\omega_i^v$ , on obtient la matrice de rotation  $R_i^v$  qui convertit la force  $F$  dans le repère inertiel. Ensuite, on lui soustrait la gravité pour en déduire l'accélération. Puis, l'ordinateur effectue un premier calcul d'intégration pour déterminer la vitesse du véhicule en mouvement (Éq. 3) puis la seconde intégration va donner sa position (Éq. 4), le tout dans le référentiel lié à la centrale inertielle :

$$V(t) = \int a(t).dt \quad (\text{Éq. 3}) \quad \text{où : } v \text{ est la vitesse et } a \text{ est l'accélération}$$

$$Pos(t) = \int V(t).dt + Pos(0) \quad (\text{Éq. 4}) \quad \text{où : } Pos(0) \text{ est la position initiale du mobile}$$

En prenant en compte la vitesse de rotation de la Terre, qui est une connue, dans la première intégration, on obtient la vitesse du véhicule dans le référentiel terrestre.



D'après les calculs présentés ci-dessus, on comprend bien que la centrale inertielle calcule la position du mobile relativement à son point de départ. Ceci implique que les coordonnées du point initial doivent être les plus précises possibles pour déterminer correctement la trajectoire.

### 1.1.1.3 Le positionnement hybride : la combinaison d'un récepteur GNSS avec une centrale inertielle

Un récepteur GNSS et un système de navigation inertielle ne présentent pas les mêmes techniques de positionnement et ont donc des limites et inconvénients différents. Leur couplage permet alors de compenser leurs défauts et d'optimiser les résultats (Figs.18 et 19). L'unique paramètre qui permet de synchroniser les informations du récepteur et de l'INS lors du post-traitement est l'heure précise fournie par une horloge générale du système.



Figure 18 : Représentation de la trajectoire du mobile avec uniquement les données GNSS. Les cercles rouges représentent les coupures de signal (logiciel GrafNav)



Figure 19 : Trajectoire calculée avec les données GNSS et celles de la centrale inertielle (logiciel ArcMap)

Le tableau 2 présente une comparaison des caractéristiques et performances d'un système de positionnement GNSS et d'un système de navigation inertielle.

Tableau 2 : Inconvénients et avantages des deux types de positionnement (GNSS/INS)

	Récepteur GNSS	Système de navigation inertielle
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ne diverge pas à long terme</li> <li>- Couverture mondiale</li> <li>- Faible coût</li> <li>- Performances importantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Autonomie (insensible au brouillage)</li> <li>- Informations en translation et rotation</li> <li>- Précis à court terme</li> <li>- Indépendant aux conditions extérieures</li> </ul>
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensibilité à l'environnement</li> <li>- Peu précis à court terme</li> <li>- Aucune information sur l'attitude du mobile</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dérive au cours du temps</li> <li>- Précision dépend du prix</li> </ul>

L'intégration des mesures effectuée avec le GPS et avec le système de navigation inertielle repose sur un filtre de Kalman étendu (EKF)<sup>5</sup>. Le post-traitement des mesures GNSS est fait indépendamment avant d'être intégrées aux données inertielles.

---

<sup>5</sup> Le filtre de Kalman étendu est une adaptation du filtre de Kalman pour les modèles non-linéaires. Il s'agit d'approximer par linéarisation les fonctions non-linéaires pour appliquer le filtre de Kalman classique.

## I.1.2 Les scanners-lasers

Dans cette partie, nous allons présenter le principal capteur qui compose les systèmes mobiles à savoir le scanner-laser.

Le RoadScanner3 de Géosat est équipé de trois scanners-lasers 3D :

- deux Focus 3D 120 de FARO placés à droite et à gauche du système ;
- un Focus 330X de FARO situé au centre.

Grâce à ces appareils, il est possible de mesurer les coordonnées 3D d'un point sur la surface d'un objet et ainsi, reconstituer à partir d'un nuage de points l'environnement dans lequel le véhicule a évolué.



Figure 20: RoadScanner3

### I.1.2.1 Description du scanner-laser

Dans le cas du RoadScanner, trois scanners-lasers 3D terrestres sont utilisés. Ils combinent à la fois :

- un télémètre laser 2D équipé d'un miroir oscillant avec un angle limité permettant d'envoyer le faisceau laser dans un plan ;
- une base qui effectue une rotation complète autour de son axe pour balayer l'ensemble de l'environnement.

Leur principe de fonctionnement est décrit dans la thèse de M. ALSHAWA et par J. VALLET.

La vitesse d'acquisition est impressionnante puisque chaque scanner peut prendre jusqu'à 976 000 points à la seconde avec une précision d'environ 2 millimètres. En combinant les trois appareils, on obtient donc près de trois millions de points à la seconde. Cette capacité de numériser beaucoup de données en un minimum de temps permet à l'utilisateur de rouler en zone urbaine sans perturber le trafic routier.

De plus, la portée des faisceaux lasers s'étend de 60 centimètres à 120 mètres. On peut ainsi aisément scanner les bords de route et certains objets encore plus éloignés.

### I.1.2.2 Montage des scanners-lasers sur la plateforme

La plateforme installée sur le toit de la voiture dispose de trois bras accueillant chacun un scanner-laser. Ces derniers sont bloqués dans leur position hélicoïdale, c'est-à-dire qu'ils sont orientés avec un angle de 90° par rapport au véhicule. De plus, les scanners à miroir oscillant ont un angle mort (au niveau de la base) et il faut donc les mettre de telle sorte à avoir cet angle vers le haut car il n'y a aucune utilité à scanner le ciel.

Grâce à cette configuration, le RoadScanner peut réaliser des profils en continu et prendre des points dans n'importe quelle direction avec une couverture complète de la route (Fig.21).

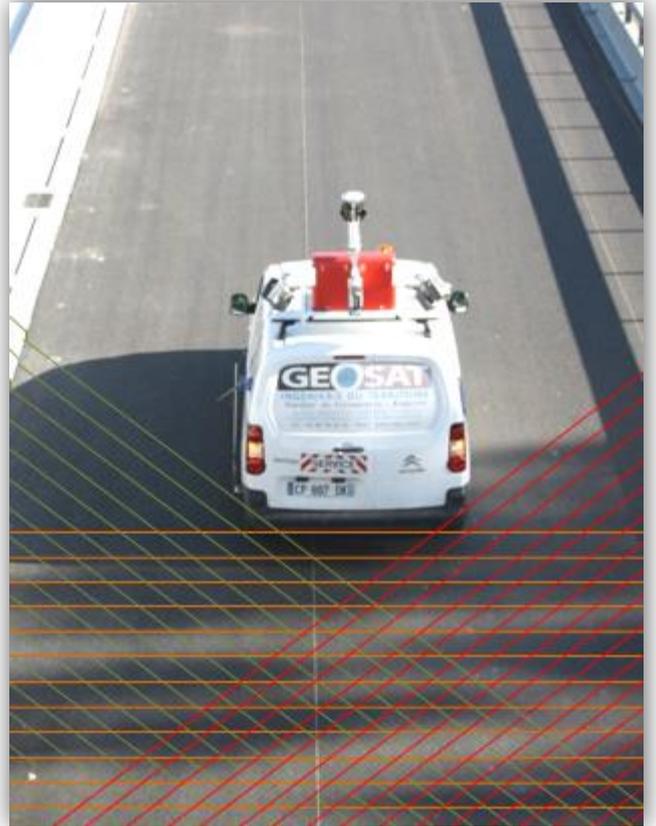
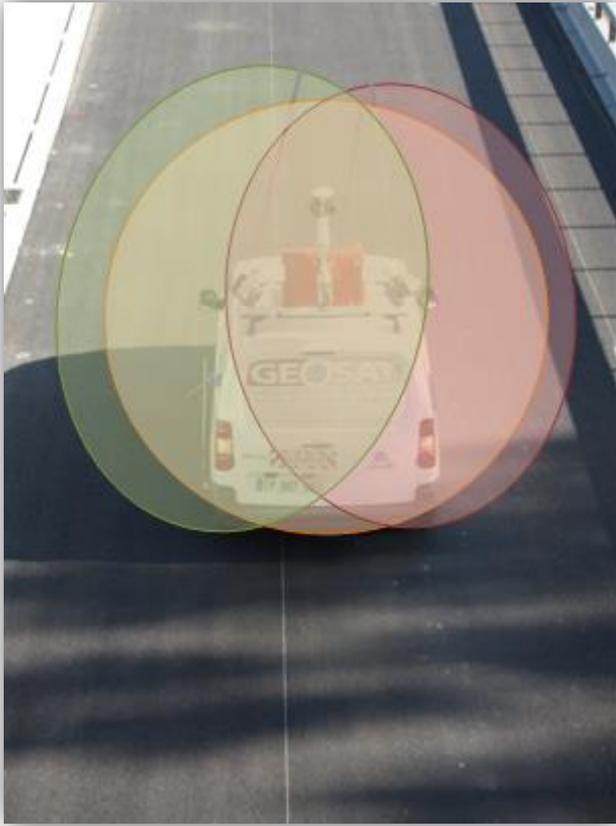


Figure 21 : Principe de balayage des faisceaux des trois scanners-lasers

## I.1.4 La caméra

Le système contient une caméra qui permet de réaliser des clichés panoramiques de l'environnement extérieur durant une mission. Ce capteur aura alors toute son importance lors du traitement des données afin de visualiser le milieu dans lequel le véhicule évoluait. La qualité des images dépend essentiellement de l'appareil utilisé mais aussi de la finesse de la calibration des paramètres intrinsèques et extrinsèques.



Figure 22 : Vue panoramique prise avec la Ladybug5

### I.1.4.1 Le modèle d'une caméra

Dans cette partie, il s'agira de décrire les différents paramètres composant une caméra. Ce sont ces éléments qu'il conviendra de déterminer grâce à une calibration.

Ainsi distingue-t-on deux ensembles de paramètres :

- les paramètres intrinsèques qui représentent la géométrie interne et les caractéristiques optiques du capteur ;
- les paramètres extrinsèques qui donnent la relation entre le repère de la caméra et celui de la centrale inertielle (dans notre étude). La position et l'orientation de la caméra par rapport à l'IMU sont définies par un vecteur de translation ( $T$ ) et une matrice de rotation ( $R$ ) ce qui correspond alors à six paramètres : les trois composantes du vecteur  $T$  et les trois angles de rotation.

Pour la caméra utilisée, c'est-à-dire la Ladybug5, les paramètres intrinsèques sont :

- la distance focale  $f$ , qui correspond à la distance (en mm) qui sépare le plan rétinien (plan image) et le point focal  $O_c$  ;
- les paramètres de conversion  $k_u$  et  $k_v$ , qui représentent l'ajustement horizontal et vertical qui permettent de passer d'un repère du plan rétinien (en mm) au repère image (en pixel) ;

- la position  $(u_0, v_0)$  du point principal (le centre de l'image) définie comme étant le projeté du centre optique  $O_c$  sur le plan image (en pixel).

#### I.1.4.2 La Ladybug5 de Point Grey

La caméra embarquée sur le MMS de Géosat est une Ladybug 5 de Point Grey (Fig.23). Elle permet d'obtenir une image panoramique grâce à la présence de six objectifs de haute qualité (cinq d'entre eux sont placés sur le plan horizontal et un pointe vers le haut).

Les six objectifs sont pré-calibrés en usine. Cela signifie que les vecteurs de translation et les matrices de rotation entre les différentes lentilles sont connus précisément.

De plus, la géométrie de la Ladybug permet d'obtenir n'importe quelle vue partielle de la sphère avec un minimum d'effets de distorsion grâce aux recouvrements existants entre les différents clichés.



Figure 23 : Ladybug5 de PointGrey

## I.2 Le fonctionnement du système

### I.2.1 Les différents repères utilisés

Dans un système de cartographie mobile, plusieurs repères sont utilisés que ce soit le repère local, le repère associé à un capteur ou le repère de référence. La connaissance des vecteurs de translation ainsi que des rotations existants entre ces différents repères est essentielle pour avoir un bon géo-référencement des données issues des divers capteurs composant le système. On va alors retrouver :

- Le repère terrain :

Le repère « terrain » est associé au système de référence national RGF93 dans lequel les coordonnées planes sont exprimées dans la projection cartographique « Lambert 93 ». L'altitude sera exprimée dans le système NGF/IGN69. On pourra aussi le nommer repère global ou de référence.

- Le repère de la centrale inertielle :

Le repère de la centrale inertielle (ou repère INS) est aussi le repère du mobile. Il s'agit d'un repère orthogonal dont l'origine correspond au centre de la LANDINS. L'axe X est orienté vers l'avant (selon l'axe longitudinal), l'axe Y vers la droite et l'axe Z vers le haut du véhicule.

- Le repère de la caméra :

Pour ce repère, l'axe Z est l'axe optique de la caméra, l'axe Y est orienté vers le haut et l'axe X est perpendiculaire à Y et Z et il est dirigé dans le plan horizontal.

- Les repères associés aux trois scanners-lasers :

Chaque scanner dispose de son propre repère afin que les données soient correctement géo-référencées.

Un tableau récapitulatif des repères est présenté dans l'annexe 1.

### I.2.2 La modélisation cinématique

La modélisation cinématique, décrite par EL-SHEIMY et par P. LAVOIE, est la détermination de la trajectoire du véhicule dans le repère de référence (ou repère terrain). Il est essentiel de connaître la position et l'orientation de la voiture à tout instant donc la rotation et la translation qui permettent de passer du repère INS (ou repère voiture) au repère terrain. On a alors l'équation 5 suivante :

$$P_i^t = P_{INS}^t(t) + R_{INS}^t(t) * D_{INS-i} \quad (\text{Éq.5})$$

avec,

$P_i^t$  les coordonnées du point i dans le repère terrain

$P_{INS}^t(t)$  les coordonnées du centre de la centrale inertielle à l'instant (t) dans le repère terrain

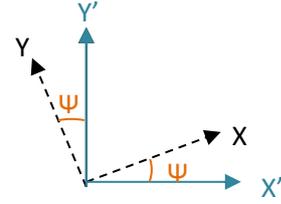
$R_{INS}^t(t)$  la matrice de rotation entre le repère de la centrale et le repère terrain à l'instant (t)

$D_{INS-i}$  la distance entre le point i et le centre de la centrale inertielle

La matrice de rotation  $R_{INS}^t$  s'obtient à partir des angles de roulis, de tangage et de lacet déterminés par la centrale inertielle et notamment grâce aux gyromètres. L'orientation du mobile est donc calculée suite à trois rotations le long de chaque axe du repère (on note OXYZ le repère terrain et OX'Y'Z' le repère lié à la centrale inertielle :

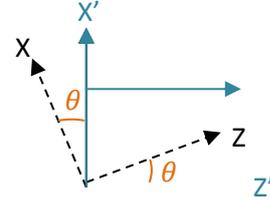
- Rotation de l'angle de lacet  $\Psi$  autour de l'axe z :  $R_{\Psi}^Z$

$$R_{\Psi}^Z = \begin{pmatrix} \cos\Psi & -\sin\Psi & 0 \\ \sin\Psi & \cos\Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



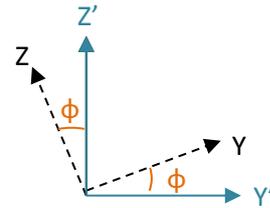
- Rotation de l'angle de tangage  $\theta$  autour de l'axe y :  $R_{\theta}^Y$

$$R_{\theta}^Y = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix}$$



- Rotation de l'angle de roulis  $\phi$  autour de l'axe x :  $R_{\phi}^X$

$$R_{\phi}^X = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix}$$



On a alors :

$$R_{INS}^t = R_{\Psi}^Z * R_{\theta}^Y * R_{\phi}^X \quad (\text{Éq.6})$$

D'où :

$$R_{INS}^t = \begin{pmatrix} \cos\theta\cos\Psi & \sin\phi\sin\theta\cos\Psi - \cos\phi\sin\Psi & \cos\phi\sin\theta\cos\Psi + \sin\phi\sin\Psi \\ \cos\theta\sin\Psi & \sin\phi\sin\theta\sin\Psi + \cos\phi\cos\Psi & \cos\phi\sin\theta\sin\Psi - \sin\phi\cos\Psi \\ -\sin\theta & \sin\phi\cos\theta & \cos\phi\cos\theta \end{pmatrix} \quad (\text{Éq.7})$$

### I.2.3 Le géoréférencement des données

Afin que les données issues des scanners-lasers et des différents objectifs de la caméra soient exploitables, il est essentiel qu'elles soient géoréférencées.

Nous allons décrire les différentes étapes et calculs pour déterminer les coordonnées d'un point. La méthode est la même que ce soit pour les données caméra ou pour celles des scanners-lasers. Dans cette partie, nous allons prendre l'exemple d'un géoréférencement des acquisitions de la Ladybug pour comprendre le principe.

Le géoréférencement des images consiste à déterminer les coordonnées 3D du vecteur  $T_p^t$ . Il s'agit de la translation existant entre le centre du repère terrain et le point à déterminer.

Pour calculer les coordonnées d'un point au travers de l'image obtenue avec la caméra, il faut tenir compte des rotations et des translations qu'il existe entre les référentiels caméra et INS. C'est notamment les paramètres qu'il conviendra de déterminer lors de la calibration du MMS.

L'équation du géoréférencement s'écrit :

$$T_p^t = T_c^t(t) + s * R_c^t(t) * T^c \quad (\text{Éq.8})$$

où :

$T_p^t$  est le vecteur de la position de l'objet dans le référentiel terrain ;

- $T_c^t$  est le vecteur entre le référentiel terrain et la caméra, donné dans le référentiel terrain ;
- $R_c^t$  est la matrice de transformation qui fait pivoter le référentiel caméra vers le référentiel terrain ;
- (t) est la date de la mesure (date de la capture de l'image) ;
- $T_c^c$  est le vecteur entre le référentiel image et le point, donné dans le référentiel image ;
- S est le facteur d'échelle spécifique à une combinaison un point/une caméra entre les coordonnées de l'image et celles de l'objet. Dans le cas des scanners-lasers, il s'agira de la distance mesurée par les scanners.

En considérant que  $T_c^{INS}$  constitue le bras de levier entre le centre de la caméra et le centre de la centrale et que  $R_c^{INS}$  est la matrice de rotation entre le référentiel INS et le référentiel caméra, on a :

$$R_c^t(t) = R_{INS}^t(t) * R_c^{INS}(t) \quad (\text{Éq.9})$$

$$T_c^t(t) = T_{INS}^t(t) + R_{INS}^t(t) * T_c^{INS} \quad (\text{Éq.10})$$

où :

$T_{INS}^t$  est le vecteur des coordonnées interpolées de la centrale inertielle (INS) dans le référentiel terrain ;

$T_c^{INS}$  est le vecteur constant entre le centre de la caméra et le centre du référentiel INS, déterminé grâce à une calibration.

D'où :

$$T_p^t = T_{INS}^t(t) + R_c^{INS}(t) * T_c^{INS} + s * R_{INS}^t(t) * R_c^{INS}(t) * T^c \quad (\text{Éq.11})$$

$$T_p^t = T_{INS}^t(t) + R_{INS}^t(t) * (T_c^{INS} + s * R_c^{INS}(t) * T^c) \quad (\text{Éq.12})$$

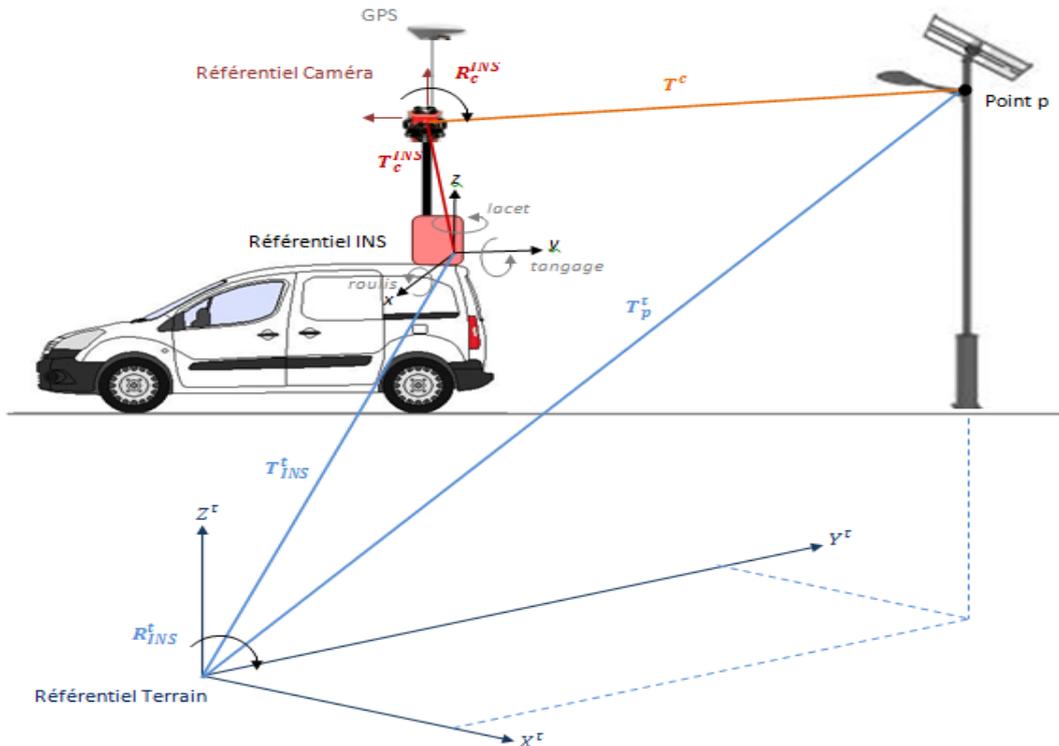


Figure 24 : Schéma représentant le principe du géoréférencement

### I.3 Les applications possibles

Du fait de la rapide extension des villes ainsi que des nombreuses modifications effectuées sur le territoire, les systèmes d'informations géographiques (SIG) ont besoin d'être mis à jour en permanence. Pour répondre à cette grande demande de données géo-référencées, il a fallu créer un système capable d'acquérir plusieurs types de données en un minimum de temps mais en gardant une précision acceptable.

Le RoadScanner trouve alors ici toute son importance. En combinant plusieurs capteurs, le MMS permet de réaliser des applications diverses et variées.

#### I.3.1 Applications utilisant la caméra

Les images sont essentiellement utilisées pour visualiser l'espace et pour se repérer. En effet, le piquetage des points sur la photographie a une précision de plusieurs centimètres voire quelques mètres. Voici quelques activités possibles :

- Les images géo-référencées peuvent permettre la création virtuelle d'une ville. On peut prendre l'exemple de Google Street View où on peut se promener virtuellement dans n'importe quel lieu. De plus, il est possible de connaître les coordonnées 3D de chaque point de l'image ce qui permet de mesurer des distances ou même des aires.



Figure 25 : Image panoramique obtenue avec la Ladybug5

- Les images géo-référencées sont très appréciées par les gestionnaires de voirie car elles permettent de voir l'état du réseau routier facilement grâce à la création des films.

#### I.3.2 Applications utilisant les scanners-lasers

Lorsqu'il s'agit de déterminer des coordonnées précises d'objet, il est préférable et même très conseillé de privilégier les données issues des scanners. En effet, ces dernières sont plus précises du fait de la qualité des appareils de mesure. Par expérience avec le RoadScanner3, la précision obtenue sur les images acquises était de l'ordre du mètre lorsqu'on voulait extraire les coordonnées d'un point alors qu'elle est de moins 5 cm avec les scanners-lasers.

- On peut réaliser des sections transversales et longitudinales des routes grâce aux relevés par scanners-lasers. La détermination des hauts et bas de trottoirs est de ce fait plus facile et plus précise.



Figure 26 : Coupe transversale d'une rue

- Les trois scanners-lasers permettent d'avoir trois balayages produisant ainsi un modèle en trois dimensions avec une couverture de haute densité de 1000 à 10 000 points par mètre carré. On peut alors obtenir la représentation en trois dimensions d'une rue par exemple.



Figure 27 : Vue 3D des nuages de points pris avec les trois scanners-lasers

- Les levés pour les fonds de plan deviennent très rapides. Un passage avec le RoadScanner permet d'avoir plusieurs détails : bord de route, signalisation, trottoirs, murs, tunnels, candélabres,... Plus on réduit la vitesse de la voiture et plus on obtient de

points dans la zone à lever. Lors de la phase dessin, l'utilisateur peut s'appuyer sur les images prises avec la caméra lorsqu'il ne reconnaît pas l'objet représenté par le nuage de points.



Figure 28 : Nuages de points issus des trois scanners-lasers

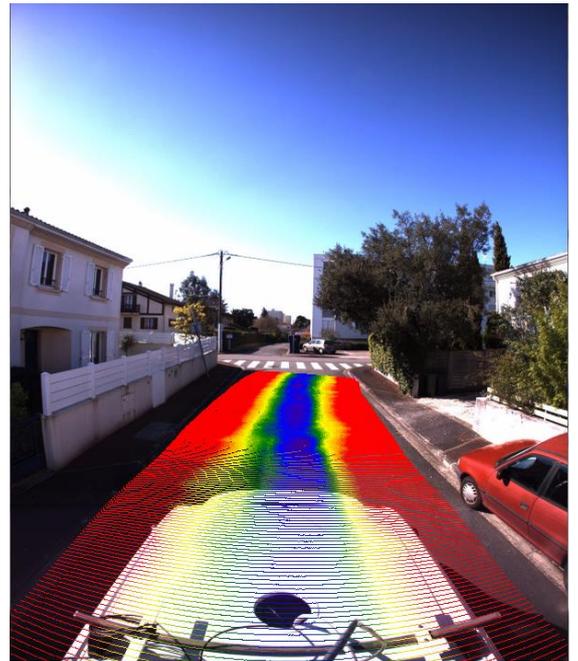


Figure 29 : Option "Altitude relative"

- A partir des données issues des scanners et avec l'option « Altitude Relative » du logiciel Road-Sit Survey, il est possible de voir aisément les pentes des voies ainsi que leur forme (Fig.29). Cette fonction est utile notamment pour visualiser l'écoulement des eaux pluviales au niveau de raccordement de voies ou d'intersections.

On se rend bien compte qu'en un minimum de temps, le RoadScanner permet de réaliser des missions variées en un seul passage. Grâce à la performance des scanners, l'environnement dans lequel le véhicule a évolué est totalement représenté. Ainsi est-on à l'abri des oublis de mesures que l'on peut rencontrer lors d'un levé topographique traditionnel.

## II. La calibration du système de cartographie mobile

Afin de garder une bonne précision des mesures, le road-scanner doit être réglé tous les trimestres.

En pratique, on entend par calibration (ou étalonnage) le procédé qui permet de déterminer les paramètres et les caractéristiques d'un capteur donné. On peut alors limiter les erreurs qui incombent aux mesures effectuées.

Par ailleurs, l'étalonnage d'un système combinant plusieurs capteurs revient non pas à régler les appareils eux-mêmes mais à trouver les paramètres de transformation, appelés aussi paramètres extrinsèques, qui existent entre les repères associés à chaque capteur. En effet, chacun exprime les données acquises dans le référentiel qui lui est propre. Il est donc nécessaire de pouvoir exprimer ces données dans un référentiel commun (le repère d'un autre capteur) pour uniformiser les différentes mesures.

Dans ce chapitre, il s'agira donc de déterminer la localisation de la caméra et des trois scanners-lasers par rapport au repère de la centrale inertielle (pris comme étant le référentiel commun). Pour cela, nous allons décrire les différentes étapes réalisées pour obtenir un étalonnage correct et précis.

### II.1 Les opérations préliminaires

#### II.1.1 La création d'un mur d'étalonnage

Pour commencer, il a fallu installer un polygone d'étalonnage. Il s'agit en fait d'un espace composé d'un ensemble de marqueurs disposés dans différents plans de façon régulière. Ces cibles doivent être connues dans un système de coordonnées. Le lieu devait être accessible avec le véhicule et dépourvu de masques (arbres, bâtiments d'une hauteur importante,...) afin que le signal GPS ne soit pas altéré. De plus, le choix de la matière du support est très important car celui-ci ne doit pas se déformer au cours du temps à cause notamment des variations de température (les supports en bois ou en acier étaient donc à proscrire).

Nous avons opté pour un fronton de pelote basque situé à proximité des locaux de l'entreprise après avoir eu l'accord du service universitaire des activités physiques et sportives-SUAPS.

La seconde étape a été de placer les cibles. Un grand nombre de marqueurs était nécessaire afin d'augmenter la fiabilité du positionnement de la caméra et des scanners. Ils devaient être placés uniformément sur toute l'image afin de calculer les résidus de transformation estimés pour la position de la caméra. (Fig.30)



Figure 30 : Mur de calibration - image issue de la Ladybug5

Par ailleurs, afin d'avoir une idée du champ de vision d'un des objectifs de la caméra, il a été nécessaire de retrouver les fichiers de paramétrage de la Ladybug afin d'obtenir les données utilisées pour le calcul.

Tableau 3: Caractéristiques de la Ladybug5

Ladybug 5	
Nombre de pixels	2448 x 2048 pixels
Taille d'un pixel	3,45 $\mu\text{m}$
Distance focale (caméra 0)	2,33200 mm

On a donc :

- $T_p$  : la taille du pixel image
- $H$  : distance entre la caméra et l'objet (fronton)
- $f$  : distance focale

On pose :

- $N = 2448 \text{ pixels} = 2448 \times 3,35 \mu\text{m} = 0,008446 \text{ m}$
- $n = 2048 \text{ pixels} = 2048 \times 3,35 \mu\text{m} = 0,007065 \text{ m}$
- $L = \frac{H \times N}{f} = 18,11 \text{ m}$
- $\ell = \frac{H \times n}{f} = 15,15 \text{ m}$

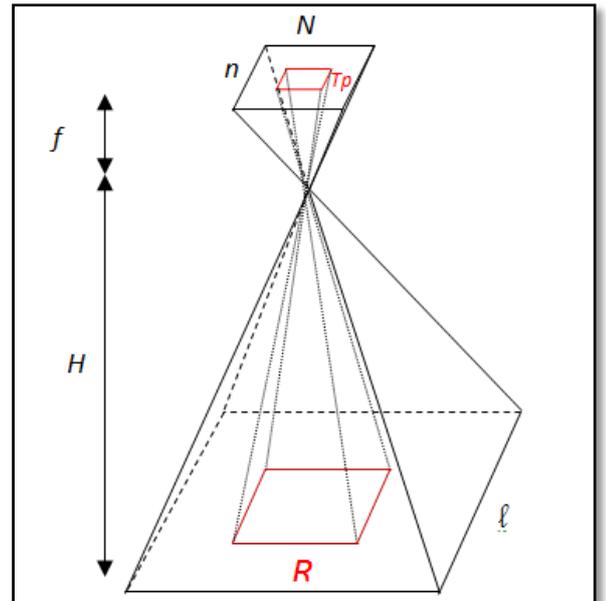


Figure 31: Schéma de photogrammétrie

Ainsi, si nous sommes à 5 mètres d'un mur, nous pourrions avoir sur notre image 18m x 15m du mur (dans le cas où l'appareil serait placé de telle sorte à ne pas capturer le sol).

Dans le cas réel, la Ladybug se situe à environ 3 mètres de hauteur. Nous allons donc déterminer qu'elle portion de sol est visible sur l'image.

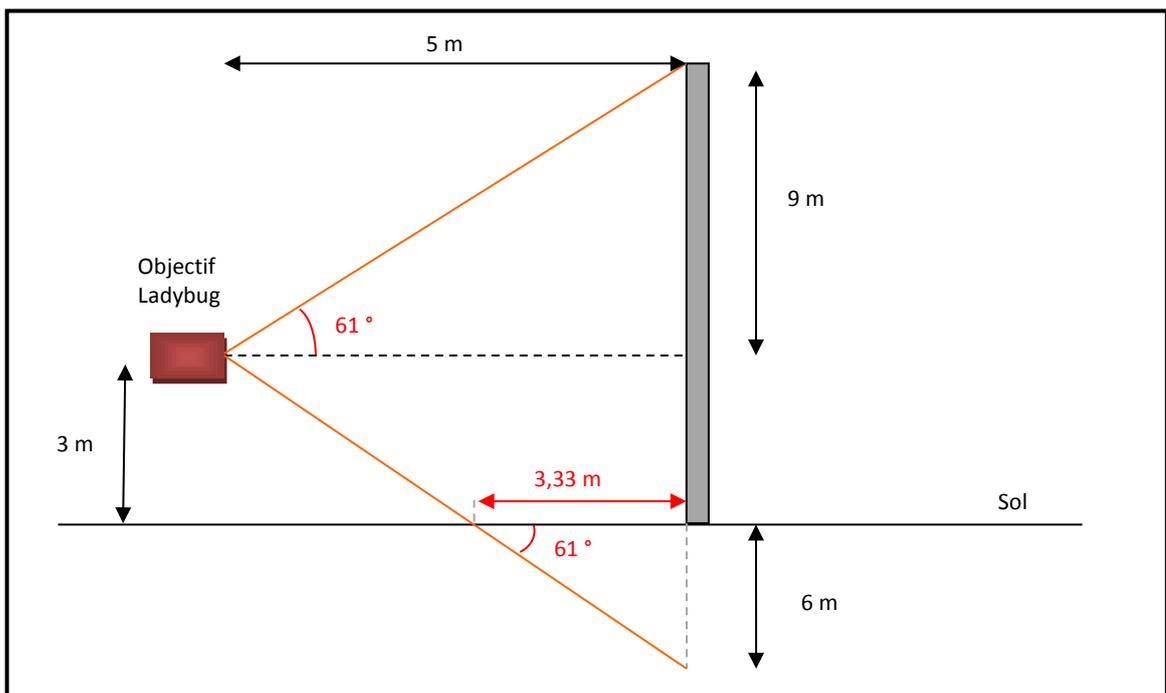


Figure 32 : Illustration des distances pour la prise de vue

On constate donc, que l'on pourra voir jusqu'à une hauteur de mur de 12 mètres ainsi que 3,33 m de sol devant le fronton. Ces calculs nous serviront à positionner les cibles afin qu'elles soient toutes visibles par un seul objectif de la caméra. Par ailleurs, nous devons également prendre en compte les effets de distorsion qui sont d'autant plus importants quand la distance focale est faible.

### II.1.2 Détermination des coordonnées des cibles

La mesure des cibles s'effectue par intersection à l'aide d'une station totale. L'idéal est de faire un centrage forcé (possibilité de désolidariser l'embase de la station totale ou du prisme) dans le but d'éviter tout défaut de centrage. Il s'agit de positionner l'appareil sur les deux stations et de faire un double retournement afin d'éviter toute erreur de pointé mais aussi pour obtenir des coordonnées précises des marqueurs. Il faut donc relever l'angle horizontal, l'angle vertical et la distance pour chaque cible.

Il faut apporter une attention particulière en ce qui concerne la mesure des hauteurs d'instrument. Il faut qu'elles soient prises bien verticalement pour ne pas engendrer d'erreurs sur la position des cibles. De plus, il ne faut pas oublier de viser également la base pour effectuer un contrôle.

## II.2 Le principe de l'étalonnage

L'étalonnage d'un système tel que le MMS revient à déterminer les paramètres extrinsèques de chaque capteur. Ceci revient à calculer les rotations et les bras de levier entre la caméra et la centrale inertielle et entre les différents scanners et la centrale inertielle.

Il s'agira dans cette partie d'expliquer le principe de changement de repères puis de montrer les calculs propres à la caméra et aux scanners-lasers pour passer du repère du capteur au repère terrain.

### II.2.1 Du repère INS au repère terrain

Ici, nous allons déterminer la matrice de rotation  $R_{INS}^t$  et le vecteur de translation  $T_{INS}^t$  qui existent entre les deux repères. Pour l'orientation, nous utilisons les angles de roulis, de tangage et de lacet qui sont directement calculés par le système de navigation.

On a ainsi pour la rotation :

$$\begin{aligned}
 R_{INS}^t &= R_{\psi}^Z R_{\theta}^Y R_{\phi}^X = \begin{pmatrix} \cos \Psi & -\sin \Psi & 0 \\ \sin \Psi & \cos \Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \Psi & \sin \phi \sin \theta \cos \Psi - \cos \phi \sin \Psi & \cos \phi \sin \theta \cos \Psi + \sin \phi \sin \Psi \\ \cos \theta \sin \Psi & \sin \phi \sin \theta \sin \Psi + \cos \phi \cos \Psi & \cos \phi \sin \theta \sin \Psi - \sin \phi \cos \Psi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{pmatrix} \quad (\text{Éq.13})
 \end{aligned}$$

Les angles sont directement calculés par le système de navigation embarqué dans le véhicule. Il est donc aisé de déterminer l'orientation du repère INS dans le repère terrain.

De même, le GPS permet de connaître la translation entre les deux repères.

On considère que le repère INS correspond au centre de la centrale inertielle et que les paramètres permettant d'obtenir la position et l'orientation du GPS par rapport à la centrale inertielle sont parfaitement connus et sont invariables au cours du temps.

## II.2.2 Du repère des capteurs au repère terrain

Il faut ensuite déterminer la position et l'orientation de chaque capteur dans le repère terrain. Dans cette partie, nous allons aborder dans leurs grandes lignes les opérations à effectuer.

### II.2.2.1 La calibration de la caméra

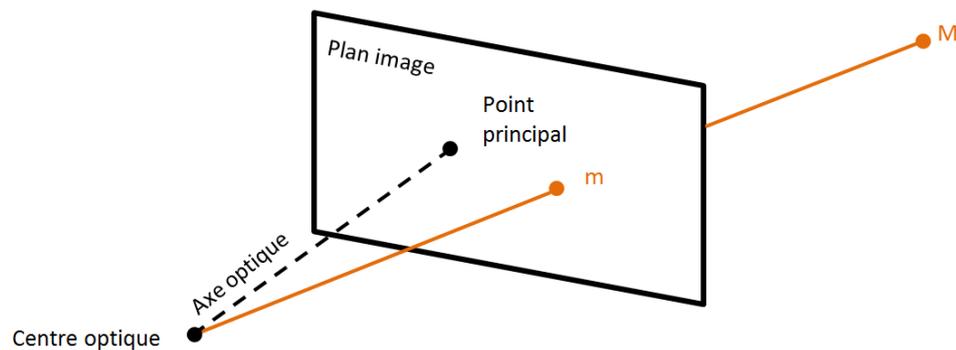
Afin de pouvoir réaliser la calibration de la caméra, il convient de comprendre la modélisation qui permet d'obtenir la projection d'un point en trois dimensions dans le référentiel terrestre sur une image en 2D. Nous décrivons dans cette partie un modèle sténopé<sup>6</sup>.

Comme on l'a vu dans le chapitre précédent, le modèle d'une caméra est représenté par deux types de paramètres : les paramètres intrinsèques et extrinsèques. Ce sont ces caractéristiques qu'il va falloir estimer grâce à une calibration.

#### II.2.2.1.1 Le modèle géométrique

Dans l'un de ces cours, P. STURM décrit le modèle géométrique d'une caméra. Le modèle sténopé se présente comme un centre optique et un plan image. En considérant un point 3D nommé  $M$  sur le terrain, son image  $m$  est l'intersection entre le plan image et le rayon qui le lie avec le centre optique (ou centre de projection). Il s'agit donc d'une projection dite « perspective ».

On appelle axe optique la droite passant par le centre optique et perpendiculaire au plan image et point principal ( $u_0, v_0$ ) l'intersection entre l'axe optique et le plan image



---

<sup>6</sup> Aussi appelé modèle *pin-hole*, c'est une modélisation simple et linéaire du processus de formation des images au sein d'une caméra. Ce modèle permet de transformer un point de l'espace en un point image.

## II.2.2.1.2 Le modèle analogique

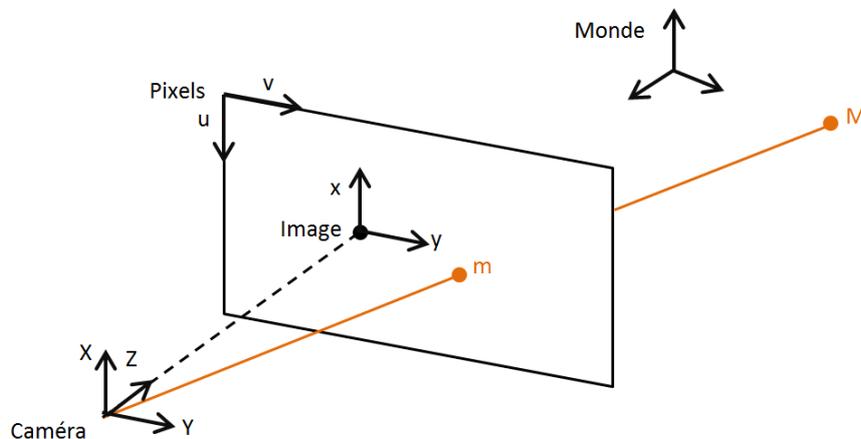
### II.2.2.1.2.1 Les paramètres intrinsèques

Il s'agit ici de déterminer les paramètres qui permettent de modéliser la géométrie interne d'une caméra. Ces caractéristiques, appelées paramètres intrinsèques, sont utilisées dans la relation donnant le projeté 2D dans le plan image d'un point 3D pris dans le repère de la caméra.

Avant de décrire les calculs, il est essentiel de déterminer les repères utiles :

- Le repère de référence ou repère terrain,
- Le repère caméra qui est un repère 3D lié à la caméra. Son origine est le centre optique et l'axe Z constitue l'axe optique. Ses axes X et Y sont parallèles au plan image,
- Le repère image qui est un repère 2D attaché au plan image. Son origine est le point principal et ses axes x et y sont parallèles aux axes X et Y du repère caméra et vont vers la même direction,
- Le repère pixels, dont l'origine est le coin en haut à gauche du plan image. Son axe u pointe vers le bas et son axe v est dirigé vers la droite du plan image.

La distance entre le centre optique et le point principal représente la distance focale de la caméra.



En considérant les coordonnées homogènes de  $M$  dans le repère caméra :  $M^c = \begin{pmatrix} X^c \\ Y^c \\ Z^c \\ 1 \end{pmatrix}$ , on a

les coordonnées  $x^c$ ,  $y^c$  et  $z^c$  de son projeté sur l'image (le point  $m$ ) dans le repère caméra, grâce au théorème de Thalès :

$$x^c = f * \frac{X^c}{Z^c} \quad y^c = f * \frac{Y^c}{Z^c} \quad z^c = f$$

D'où, sous forme matricielle et en utilisant les coordonnées homogènes :

$$m^c = \begin{pmatrix} sx^c \\ sy^c \\ sz^c \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X^c \\ Y^c \\ Z^c \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{Éq.14}) \quad \text{les coordonnées cartésiennes de } m$$

sont donc  $\frac{sx^c}{s}$ ,  $\frac{sy^c}{s}$ , et  $\frac{sz^c}{s}$ .

Ici, les images analysées sont des images digitales, c'est-à-dire qu'elles constituent des matrices dont les cellules sont des pixels. Chaque pixel dispose d'une coordonnée verticale et d'une coordonnée horizontale. Ceci implique qu'il est nécessaire de changer de repère pour exploiter les coordonnées 2D définies précédemment dans le repère image. Ce nouveau repère bidimensionnel est le repère pixel dans lequel les coordonnées seront notées  $u$  et  $v$ .

Pour effectuer le changement de repère, il faut faire une translation mais aussi un changement d'unités. En effet, le repère image a une unité métrique alors que l'unité du repère pixel est le nombre de pixels.

On nomme :

- $x_0$  et  $y_0$  les coordonnées du point principal dans le repère image, c'est-à-dire le centre de l'image.
- $k_u$  est le facteur d'échelle vertical c'est-à-dire, le nombre de pixels par mm en direction de l'axe  $u$  et  $k_v$  le nombre de pixels par mm en direction de l'axe  $v$ .

Les coordonnées du point  $m(x,y)$  initialement dans le repère image sont alors exprimées dans le repère pixel par :

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_u & 0 \\ 0 & k_v \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^c \\ y^c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} \quad (\text{Éq.15})$$

La transformation peut aussi s'écrire :

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_u & 0 & x_0 \\ 0 & k_v & y_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^c \\ y^c \end{pmatrix} \quad (\text{Éq.16})$$

Ce qui donne à partir des coordonnées du point  $M$  dans le repère terrain :

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} k_u & 0 & x_0/f & 0 \\ 0 & k_v & y_0/f & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X^c \\ Y^c \\ Z^c \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{Éq.17})$$

Le symbole  $\sim$  exprime l'égalité entre deux matrices ou deux vecteurs, à un scalaire près non nul.  $a \sim b$  signifie qu'il existe  $s \neq 0$  tel que  $a = sb$ .

En multipliant tous les coefficients par  $f$ , on identifie la matrice  $K = \begin{pmatrix} k_u f & 0 & x_0 \\ 0 & k_v f & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$  comme étant la matrice contenant les paramètres intrinsèques de la caméra.

On notera la matrice  $K$  de la manière suivante :

$K = \begin{pmatrix} \alpha_u & 0 & x_0 \\ 0 & \alpha_v & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ , avec  $\alpha_u$  et  $\alpha_v$  exprimant respectivement la distance focale dans la direction verticale puis dans la direction horizontale (en nombre de pixels).

### II.2.2.1.2.2 Intégration du repère terrain : les paramètres extrinsèques

Pour que les déplacements effectués par la caméra soient pris en compte, il faut intégrer à nos calculs un repère fixe par rapport à celui de la caméra. Nous introduisons le repère terrain pour que la position des points 3D et celle des caméras y soient présentées.

Ainsi, le bras de levier (ou translation) entre le repère caméra et le repère terrain sera représenté par le vecteur  $T \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix}$  et l'orientation de la caméra sera identifiée par la matrice de rotation  $R$ . Cette dernière matrice est obtenue par le produit matriciel de trois matrices de rotation simple autour des trois axes X, Y et Z.

$$R = \text{Rot}(Z, \gamma) \cdot \text{Rot}(Y, \beta) \cdot \text{Rot}(X, \alpha) = \begin{pmatrix} \cos\beta\cos\gamma & \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma & \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma + \sin\alpha\sin\gamma \\ \cos\beta\sin\gamma & \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\gamma \\ -\sin\beta & \sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha\cos\beta \end{pmatrix} \quad (\text{Éq.18})$$

avec  $\alpha, \beta$  et  $\gamma$  les angles associés respectivement aux axes X, Y et Z.

Pour simplifier la matrice, on aura :

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$$

Soit le point  $M$  exprimé dans le repère terrain par les coordonnées  $X^i, Y^i$  et  $Z^i$ . On note le changement du repère terrain vers le repère caméra :

$$\begin{pmatrix} X^c \\ Y^c \\ Z^c \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} X^t \\ Y^t \\ Z^t \end{pmatrix} + T \quad (\text{Éq.19})$$

Soit, en coordonnées homogènes :

$$\begin{pmatrix} X^c \\ Y^c \\ Z^c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X^t \\ Y^t \\ Z^t \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{Éq.20})$$

Cette dernière équation montre bien que six paramètres sont nécessaires pour exprimer la position et l'orientation de la caméra dans le repère terrain.

### II.2.2.1.3 Modèle complet sans distorsion

En combinant toutes les formules précédentes, nous obtenons le modèle complet qui donne la relation entre un point 3D dans le repère terrain et le point 2D qui est le projeté dans le plan image.

$$\begin{pmatrix} su \\ sv \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_u & 0 & x_0 & 0 \\ 0 & \alpha_v & y_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X^t \\ Y^t \\ Z^t \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{Éq.21})$$

Et on note la matrice de projection Q :

$$Q \sim \begin{pmatrix} \alpha_u & 0 & x_0 & 0 \\ 0 & \alpha_v & y_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} \end{pmatrix}$$

Nous avons donc les équations :

$$u = \frac{q_{11} \cdot X^t + q_{12} \cdot Y^t + q_{13} \cdot Z^t + q_{14}}{q_{31} \cdot X^t + q_{32} \cdot Y^t + q_{33} \cdot Z^t + q_{34}} \quad (\text{Éq.22})$$

$$v = \frac{q_{21} \cdot X^t + q_{22} \cdot Y^t + q_{23} \cdot Z^t + q_{24}}{q_{31} \cdot X^t + q_{32} \cdot Y^t + q_{33} \cdot Z^t + q_{34}} \quad (\text{Éq.23})$$

#### II.2.2.1.4 Calculs pour la calibration

Soit un point  $M_i$  de coordonnées  $(X_i^t, Y_i^t, Z_i^t)$  dans le repère terrain et  $m_i(u_i, v_i)$  le point correspondant dans le repère image. Le nombre  $i$  correspond au nombre d'observations effectuées donc au nombre de cibles installées sur le mur d'étalonnage.

A partir des équations précédentes (Éqs.22 et 23), on obtient :

$$u_i q_{34} = q_{11} \cdot X_i^t + q_{12} \cdot Y_i^t + q_{13} \cdot Z_i^t + q_{14} - (u_i q_{31} \cdot X_i^t + u_i q_{32} \cdot Y_i^t + u_i q_{33} \cdot Z_i^t) \quad (\text{Éq.24})$$

$$v_i q_{34} = q_{21} \cdot X_i^t + q_{22} \cdot Y_i^t + q_{23} \cdot Z_i^t + q_{24} - (v_i q_{31} \cdot X_i^t + v_i q_{32} \cdot Y_i^t + v_i q_{33} \cdot Z_i^t) \quad (\text{Éq.25})$$

Sous la forme matricielle nous obtenons donc :

$$\underbrace{\begin{pmatrix} M_1^t & 1 & 0_{1 \times 3} & 0 & -u_1 M_1^t \\ 0_{1 \times 3} & 0 & M_1^t & 1 & -v_1 M_1^t \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_i^t & 1 & 0_{1 \times 3} & 0 & -u_i M_i^t \\ 0_{1 \times 3} & 0 & M_i^t & 1 & -v_i M_i^t \end{pmatrix}}_{A_{2i \times 12}} \underbrace{\begin{pmatrix} q_{11} \\ \vdots \\ q_{14} \\ q_{21} \\ \vdots \\ q_{24} \\ q_{31} \\ \vdots \\ q_{34} \end{pmatrix}}_{Q_{12}} = 0 \quad (\text{Éq.26})$$

Ce qui donne plus simplement :

$$A_{2i \times 12} \cdot Q_{12} = 0_{2i}$$

La matrice  $A$  contient donc toutes les coordonnées dont nous disposons tandis que la matrice  $q$  regroupe les douze paramètres à déterminer (les paramètres intrinsèques et les paramètres extrinsèques).

Le principal obstacle à la résolution de ce problème est que la détermination des coordonnées des points  $M_i$  sur le terrain ainsi que l'extraction des points correspondant  $m_i$  sur l'image ne peut être faite sans imprécision. On dit que les données sont bruitées. Ceci suggère qu'il n'existe pas de solution exacte pour la matrice  $Q$  car le produit des deux matrices  $A$  et  $Q$  ne sera jamais égal à la valeur 0. C'est pourquoi, il faut déterminer une valeur  $\hat{Q}$  la plus juste possible. La solution sera obtenue en utilisant la décomposition en valeurs singulières SVD.

### II.2.2.1.5 Extraction des paramètres intrinsèques

Comme on l'a vu précédemment,  $Q \sim (KR \quad KT)$ . De plus, on considère la matrice  $\bar{Q}$  la sous-matrice comprenant les trois premières colonnes de  $Q$ . On a donc :  $\bar{Q} \sim KR$ .

En multipliant chaque côté par la transposée de  $\bar{Q}$ , on obtient :

$$\bar{Q}\bar{Q}^T \sim KR\bar{Q}^T = KR(KR)^T = KRR^TK^T$$

Or, la matrice de rotation est par définition orthonormale, ce qui suggère que :  $RR^T = I$ .

On a donc :  $\bar{Q}\bar{Q}^T \sim KK^T$

De plus, le produit d'une matrice non singulière avec sa transposée est une matrice symétrique et définie positive. En faisant une décomposition de Cholesky<sup>7</sup>, on obtient une matrice triangulaire supérieure  $L$  qui a alors les mêmes caractéristiques que la matrice  $K$ .

Or,  $K$  a son élément (3,3) qui vaut 1, il faut donc multiplier la matrice  $L$  par le scalaire nécessaire pour répondre à cette contrainte :

$$K = \left( \frac{1}{L_{3,3}} \right) L = \begin{pmatrix} \alpha_u & 0 & x_0 \\ 0 & \alpha_v & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

### II.2.2.1.6 Extraction des paramètres extrinsèques

Rappelons la matrice de projection :  $Q \sim (KR \quad KT)$

Nous avons donc :  $K^{-1}Q \sim (R \quad T)$  ;

Les trois premières colonnes correspondent donc à la matrice de rotation. On nommera cette sous-matrice  $D$ . Nous avons ainsi :  $D \sim R$  et en multipliant la matrice  $D$  par le scalaire  $\lambda$ , on obtient l'équation :  $\lambda D = R$ .

Or, si deux matrices sont égales alors leurs déterminants le sont également.

Ceci implique que :  $\lambda^3 \det D = \det R = 1$

Donc :  $\lambda = \sqrt[3]{1/\det D}$

Ce qui donne finalement :  $\lambda K^{-1}Q = (R \quad T)$

On extrait ensuite les angles de rotation comme suit :

$$\beta = \arcsin(-R_{3,1})$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{R_{3,2}}{\cos \beta}\right) \quad \text{avec } \beta \neq \pm \pi/2$$

---

<sup>7</sup> La décomposition de Cholesky (ou factorisation de Cholesky) consiste, pour une matrice symétrique définie positive  $A$ , à déterminer une matrice triangulaire inférieure (ou supérieure)  $L$  telle que  $A = LL^T$

$$\gamma = \arctan\left(\frac{R_{2,1}}{R_{1,1}}\right) \quad \text{avec } \beta \neq \pm \frac{\pi}{2} \text{ et } \gamma \neq \pm \pi/2$$

On obtient alors la matrice de rotation  $R_c^t$  et le vecteur  $T_c^t$  qui permettent de passer de repère caméra au repère terrain.

### II.2.2.1.7 La distorsion

En optique, il est possible qu'une image obtenue soit déformée. Ceci est dû au fait que la lentille utilisée ou son montage sur l'objectif est imparfait. On observe donc des distorsions qui peuvent être radiales ou tangentielles.



Figure 33 : Image déformée – avec distorsions

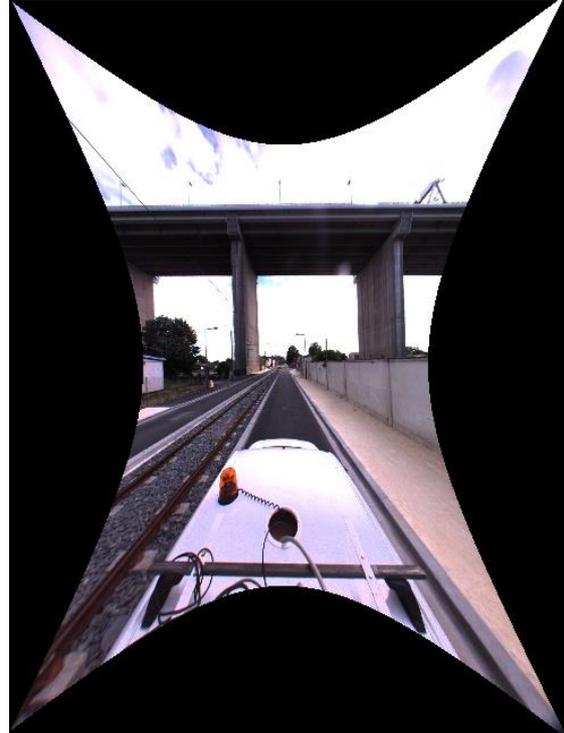


Figure 34 : Image rectifiée - sans distorsions

#### II.2.2.1.7.1 Distorsion radiale

L'effet de distorsion radiale survient lorsque la lentille n'est pas idéalement mince, les bords de l'image s'arrondissent. Avec cette distorsion, les points vont être plus ou moins affectés suivant la distance qu'il existe entre ces derniers et le centre de la distorsion (qui est en général confondu avec le projeté du centre optique).

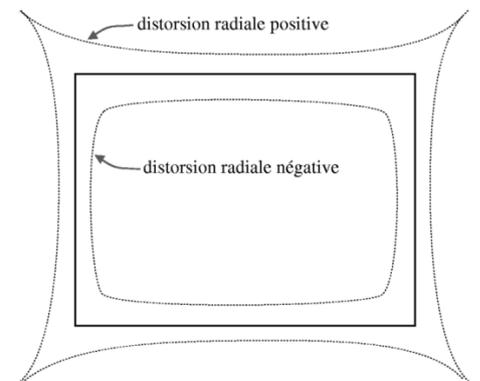


Figure 35 : Schéma de la distorsion radiale

Afin de pouvoir décrire le modèle mathématique, on considère :

- $(u_c, v_c)$  les coordonnées du centre de distorsion qui peut être assimilé au centre de l'image ;
- $(u_i, v_i)$  les coordonnées d'un point quelconque sur l'image distordue ;
- $(\hat{u}_i, \hat{v}_i)$  les coordonnées du point correspondant sur l'image rectifiée.

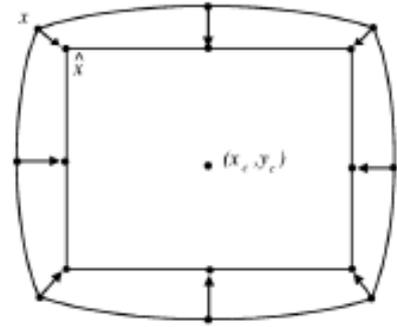


Figure 36 : Schéma des points indispensables au calcul

La relation existant entre ces deux points est décrite par N. DAUCHER. Elle est la suivante :

$$\begin{cases} \hat{u}_i = u_i + \Delta u_i \\ \hat{v}_i = v_i + \Delta v_i \end{cases} \quad (\text{Éq.27})$$

$$\text{avec : } \begin{cases} \Delta u_i = (u_i - u_c)(k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4) \\ \Delta v_i = (v_i - v_c)(k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4) \end{cases} \quad \text{et} \quad r_i^2 = (u_i - u_c)^2 + (v_i - v_c)^2$$

Le nombre de paramètres  $k_i$  va dépendre de la précision attendue sur le calcul de la distorsion. En général, seuls  $k_1$  et  $k_2$  sont pris en compte.

#### II.2.2.1.7.2 Distorsion tangentielle

La distorsion tangentielle, expliquée par C. CAUCHOIS dans son mémoire, est le résultat d'un décentrage de l'axe optique de la caméra mais aussi de la nature de la lentille utilisée. Elle correspond à une rotation autour du centre de l'image.

On modélise cet effet par une translation :

$$\begin{cases} \Delta u_i = (p_1(r_i^2 + 2u_i^2) + 2p_2 u_i v_i) * (1 + p_3 r_i^2 + p_4 r_i^4 + \dots) \\ \Delta v_i = (p_2(r_i^2 + 2v_i^2) + 2p_1 u_i v_i) * (1 + p_3 r_i^2 + p_4 r_i^4 + \dots) \end{cases} \quad (\text{Éq.28})$$

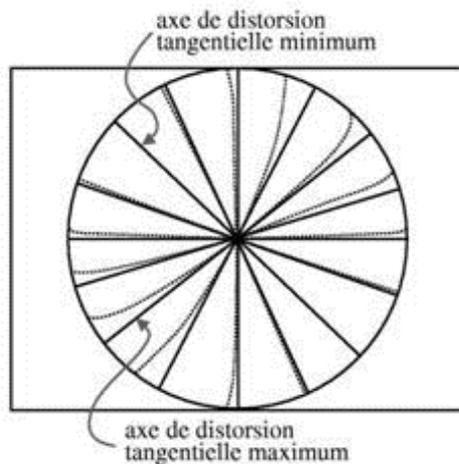


Figure 37 : Schéma de la distorsion tangentielle

#### II.2.2.1.7.3 Modèle complet avec les deux distorsions

En combinant les équations des différentes distorsions (Éqs.27 et 28), on obtient le modèle complet :

$$\hat{u} = \frac{q_{11} \cdot X^t + q_{12} \cdot Y^t + q_{13} \cdot Z^t + q_{14}}{q_{31} \cdot X^t + q_{32} \cdot Y^t + q_{33} \cdot Z^t + q_{34}} + \underbrace{u_c + (u_i - u_c)(k_1 r^2 + k_2 r^4)}_{\text{distorsion radiale}} + \underbrace{(p_1(r^2 + 2u^2) + 2p_2 uv)}_{\text{distorsion tangentielle}}$$

(Éq.29)

$$\hat{v} = \frac{q_{21} \cdot X^t + q_{22} \cdot Y^t + q_{23} \cdot Z^t + q_{24}}{q_{31} \cdot X^t + q_{32} \cdot Y^t + q_{33} \cdot Z^t + q_{34}} + \underbrace{v_c + (v_i - v_c)(k_1 r^2 + k_2 r^4)}_{\text{distorsion radiale}} + \underbrace{(p_2(r^2 + 2v^2) + 2p_1 uv)}_{\text{distorsion tangentielle}}$$

(Éq.30)

## II.2.2.2 La calibration des scanners-lasers

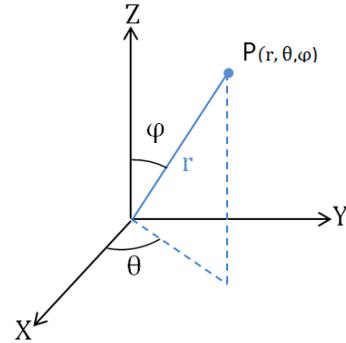
Les données lasers étant celles utilisées par le géomètre pour dessiner les plans, il est essentiel que le géo-référencement soit le plus précis possible. Pour cela, il est primordial de porter un intérêt particulier à la procédure de calibration de ces appareils.

### II.2.2.2.1 Le modèle des scanners-lasers

Pour procéder à la calibration des trois scanners-lasers de notre système, nous avons effectué un scan de l'environnement total, c'est-à-dire qu'il a fallu préalablement débloquent le mouvement des trois scanners pour qu'ils puissent pivoter sur leur axe et ainsi prendre des points à 360°. L'ensemble du mur de calibration a donc été scanné et nous avons pu extraire les coordonnées de toutes les cibles dans le repère des scanners. Contrairement aux méthodes utilisées pour les systèmes aéroportés, notre acquisition s'est faite en mode statique pour ne pas à avoir à prendre en compte les déplacements du véhicule dans nos calculs.

Comme il est expliqué par J. TALAYA et *al.*, lors de la mesure, les scanners enregistrent deux informations : la distance  $r$  entre le centre du scanner et la cible ainsi que l'angle  $\theta$  du scanner par rapport à la cible. On a ainsi les coordonnées cartésiennes :

$$\begin{cases} X_i^l = r \sin \theta \cos \varphi \\ Y_i^l = r \sin \theta \sin \varphi \\ Z_i^l = r \cos \theta \end{cases}$$



Avec  $X_i^l$ ,  $Y_i^l$  et  $Z_i^l$  les coordonnées d'un point  $i$  pris dans le nuage de points dans le repère du scanner-laser.

Ensuite, afin de déterminer l'orientation de chaque scanner dans le repère terrain, il est essentiel de déterminer la matrice de rotation et la matrice de translation qui permettent de passer d'un repère à l'autre.

Dans le cas statique, nous avons la relation suivante :

$$\begin{pmatrix} X_i^t \\ Y_i^t \\ Z_i^t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} + R_i^t \begin{pmatrix} X_i^l \\ Y_i^l \\ Z_i^l \end{pmatrix}$$

Où

$X_i^t, Y_i^t$  et  $Z_i^t$  sont les coordonnées du point  $i$  dans le repère terrain

$T_x, T_y$  et  $T_z$  représentent la translation entre les deux repères

$R_i^t$  est la matrice de rotation qui permet de passer du repère scanner-laser au repère terrain

En coordonnées homogènes, nous obtenons donc :

$$\begin{pmatrix} sX_i^t \\ sY_i^t \\ sZ_i^t \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_i^t & T_i^t \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_i^l \\ Y_i^l \\ Z_i^l \\ 1 \end{pmatrix} = K_i^t \begin{pmatrix} X_i^l \\ Y_i^l \\ Z_i^l \\ 1 \end{pmatrix}$$

On a donc les équations :

$$\begin{cases} X_i^t = \frac{K_{11}X_i^l + K_{12}Y_i^l + K_{13}Z_i^l + K_{14}}{K_{41}X_i^l + K_{42}Y_i^l + K_{43}Z_i^l + K_{44}} \\ Y_i^t = \frac{K_{21}X_i^l + K_{22}Y_i^l + K_{23}Z_i^l + K_{24}}{K_{41}X_i^l + K_{42}Y_i^l + K_{43}Z_i^l + K_{44}} \\ Z_i^t = \frac{K_{31}X_i^l + K_{32}Y_i^l + K_{33}Z_i^l + K_{34}}{K_{41}X_i^l + K_{42}Y_i^l + K_{43}Z_i^l + K_{44}} \end{cases}$$

En considérant  $P_i^t$  étant la matrice comprenant les coordonnées d'un point P dans le repère terrain, nous avons sous la forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} P_1^t & 1 & 0_{1*3} & 0 & 0_{1*3} & 0 & -X_1^t P_1^t \\ 0_{1*3} & 0 & P_1^t & 1 & 0_{1*3} & 0 & -Y_1^t P_1^t \\ 0_{1*3} & 0 & 0_{1*3} & 0 & P_1^t & 1 & -Z_1^t P_1^t \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_i^t & 1 & 0_{1*3} & 0 & 0_{1*3} & 0 & -X_i^t P_i^t \\ 0_{1*3} & 0 & P_i^t & 1 & 0_{1*3} & 0 & -Y_i^t P_i^t \\ 0_{1*3} & 0 & 0_{1*3} & 0 & P_i^t & 1 & -Z_i^t P_i^t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_{11} \\ \vdots \\ K_{14} \\ K_{21} \\ \vdots \\ K_{24} \\ K_{31} \\ \vdots \\ K_{34} \\ K_{41} \\ \vdots \\ K_{44} \end{pmatrix} = 0$$

Ce qui donne plus simplement :

$$A_{3i*16} \quad K_{16} = 0_{3i}$$

Comme on l'a vu dans la partie précédente lors de la calibration de la caméra, nous procédons en une décomposition en valeurs singulières pour trouver la matrice  $\hat{K}$  afin de minimiser la somme quadratique des résidus.

Pour contrôler le calcul de cette dernière matrice, il faut vérifier les égalités suivantes :

$$\begin{cases} K_{41} \cong 0 \\ K_{42} \cong 0 \\ K_{43} \cong 0 \\ K_{44} \cong 1 \end{cases}$$

### II.2.2.2.2 Extraction des paramètres extrinsèques

Ensuite, il s'agit d'extraire les paramètres extrinsèques. Nous avons :

$$Q \sim (R \ T)$$

Les trois premières colonnes correspondent donc à la matrice de rotation. On nommera cette sous-matrice  $D$ . Nous avons ainsi :  $D \sim R$  et en multipliant la matrice  $D$  par le scalaire  $\lambda$ , on obtient l'équation :  $\lambda D = R$ .

Or, on sait que si deux matrices sont égales alors leurs déterminants le sont aussi.

Ceci implique que :  $\lambda^3 \det D = \det R = 1$

$$\text{Donc : } \lambda = \sqrt[3]{1/\det D}$$

Ce qui donne finalement :  $\lambda Q = (R \ T)$

On extrait ensuite les angles de rotation comme suit :

$$\beta = \arcsin(-R_{3,1})$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{R_{3,2}}{\cos \beta}\right) \quad \text{avec } \beta \neq \pm \pi/2$$

$$\gamma = \arctan\left(\frac{R_{2,1}}{R_{1,1}}\right) \quad \text{avec } \beta \neq \pm \frac{\pi}{2} \text{ et } \gamma \neq \pm \pi/2$$

On obtient alors la matrice de rotation  $R_i^t$  et le vecteur  $T_i^t$  qui permettent de passer de repère caméra au repère terrain.

## II.2.3 Du repère des capteurs au repère INS

Dans cette partie, il s'agit de déterminer les paramètres qui nous intéressent pour réaliser les calculs de géo-référencement des données issues des différents capteurs. En effet, l'équation pour calculer les coordonnées d'un point pris sur une image ou dans un nuage de points s'écrit :

$$T_p^t = T_{INS}^t(t) + R_{INS}^t(t) * (T_c^{INS} + s * R_c^{INS}(t) * T^c)$$

Grâce aux calculs effectués précédemment, la matrice de rotation  $R_c^{INS}$  entre le capteur et l'INS est :

$$\boxed{R_c^{INS} = R_t^{INS} * R_c^t}$$

Puis, nous avons le bras de levier  $T_c^{INS}$  :

$$\boxed{T_c^{INS} = T_c^t - T_{INS}^t}$$

Tableau 4: Résultats des calculs de calibration effectués

		<b>Rx (rad)</b>	<b>Ry (rad)</b>	<b>Rz (rad)</b>	<b>Dx (en m)</b>	<b>Dy (en m)</b>	<b>Dz (en m)</b>
<b>Calibration du 25 Avril 2014</b>	<b>Caméra</b>	-0,0117	-0,0001	0,0142	-0,1487	0,1582	0,6759
	<b>Scanner Droit</b>	-3,1081	0,8653	0,8431	-0,462	-0,434	0,097
	<b>Scanner Central</b>	-3,1164	0,6871	0,0466	-0,648	0,158	0,116
	<b>Scanner Gauche</b>	-3,1168	0,8597	-0,7619	-0,460	0,742	0,102
<b>Calibration du 15 Avril 2014</b>	<b>Caméra</b>	-0,0126	-0,001	0,0027	-0,1475	0,1692	0,6717
	<b>Scanner Droit</b>	-3,1077	0,8654	0,8435	-0,464	-0,429	0,094
	<b>Scanner Central</b>	-3,1173	0,6862	0,0438	-0,649	0,162	0,109
	<b>Scanner Gauche</b>	-3,1155	0,8605	-0,7604	-0,463	0,744	0,097

On remarque que les écarts entre les valeurs des paramètres obtenues lors des deux calibrations ne sont pas significatifs ; en effet, les écarts de position engendrés sur les objets levés par le système sont inférieurs à la barre d'erreur.

Les calculs ont été réalisés grâce aux logiciels fournis par les constructeurs du MMS et par SCENE (logiciel de Faro). Une procédure bien précise doit être scrupuleusement appliquée afin que les calculs soient les plus justes possibles.

## II.4 Précisions

Bien que l'utilisation d'un MMS pour faire un levé routier soit relativement pratique, il est nécessaire d'en apprécier la précision. Plusieurs éléments peuvent ainsi dégrader la qualité d'une mission : le système de navigation doit constamment calculer une position et une orientation juste, les calibrations « internes » des capteurs doivent être correctes de même que l'étalonnage du MMS.

### II.4.1 Vérification de la calibration

C'est pourquoi, après chaque phase de calibration, il est essentiel d'effectuer une mission pour tester les paramètres calculés. En effet, c'est uniquement après cette étape qu'il est possible de savoir si l'étalonnage est fiable ou non. Pour cela, plusieurs vérifications sont à réaliser. C'est ce que nous allons voir dans les prochains paragraphes.

#### II.4.1.1 Synchronisation de la caméra et des scanners-lasers

L'une des premières vérifications est de voir si la synchronisation entre la caméra et les différents scanners-lasers est bonne. Pour cela, il suffit d'afficher dans une même fenêtre les données images et laser. Si leur superposition est correcte, cela signifie que la synchronisation est exacte. Dans le cas contraire, il faut refaire les calculs des paramètres extrinsèques de chaque capteur.



Figure 38 : Superposition et analyse de la synchronisation entre les données lasers et image

Sur l'illustration apparaît un léger décalage entre l'image et le nuage de points au niveau du bord droit du pilier. On admet cependant que le résultat est acceptable car plus l'objet est éloigné du MMS, plus l'écart entre les deux types de données sera élevé. Cette différence illustre parfaitement les effets de la distorsion de la caméra et on peut davantage l'observer sur les lignes blanches tracées sur les voies. C'est pourquoi il est préférable de choisir les données des scanners-lasers qui sont plus justes.

### II.4.1.2 Synchronisation des scanners-lasers

Une bonne synchronisation des lasers est indispensable pour pouvoir dessiner un plan. Les bandes issues des différents scanners-lasers doivent impérativement se superposer.

Lors de certaines missions, nous nous sommes aperçus sur les profils en travers des routes que les points des scanners-lasers n'étaient pas cohérents entre eux. Après avoir recalculé tous les paramètres, les avoir appliqués aux données, nous n'avons vu aucun changement. Après plusieurs réflexions, le problème a été résolu : l'utilisation des scanners-lasers en dehors du MMS était néfaste à la calibration.

En effet, les scanners-lasers utilisés pour le MMS de Géosat peuvent se démonter pour effectuer des scans en mode statique. L'inconvénient est qu'il faut alors débloquer le mouvement de l'appareil, faire les mesures puis le rebloquer. Cette manipulation affecte alors les paramètres de calibration car le scanner ne revient pas parfaitement à sa position initiale.

Ainsi, nous avons, par exemple, une valeur d'angle de  $0.62^\circ$  après une utilisation en statique alors que la valeur initiale était de  $0^\circ$ . Cet écart d'angle paraît faible mais pour une visée de 10 mètres, nous avons une différence de 11 centimètres entre la position du point mesurée et sa position vraie.

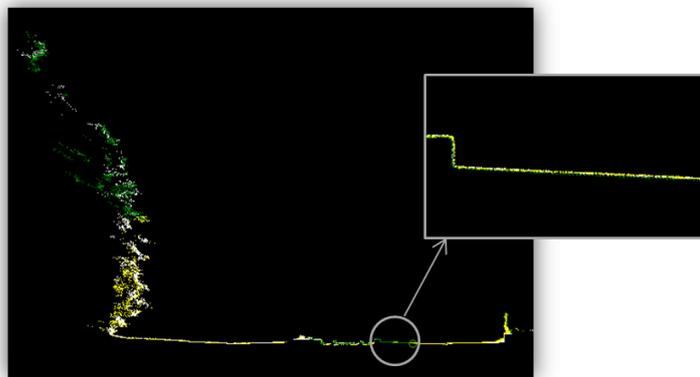


Figure 39 : Coupe en travers - Bonne synchronisation des lasers

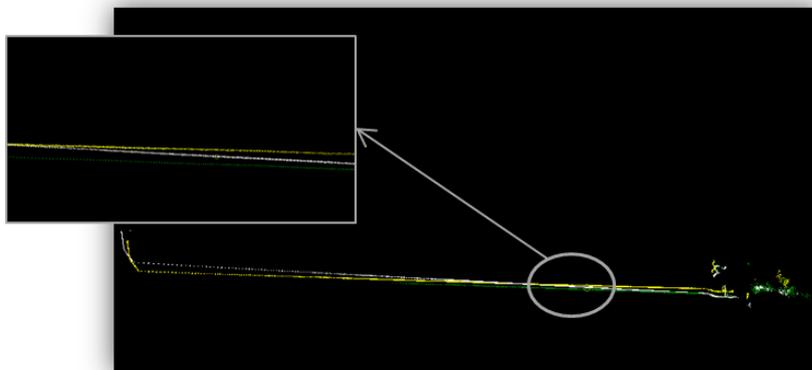


Figure 40 : Coupe en travers - Mauvaise synchronisation des lasers

Sur la première image, nous pouvons observer une coupe transversale d'une rue avec une bonne synchronisation des scanners-lasers avec pour les deux images :

- Trait vert : scanner de droite
- Trait blanc : scanner central
- Trait jaune : scanner de gauche.

En revanche, sur la deuxième image on peut voir un décalage entre les trois passes laser. Ceci est dû au fait que les appareils ont été utilisés en mode statique après que la calibration ait été effectuée.

#### **II.4.2 Procédure terrain pour augmenter la qualité**

Comme il a été montré dans la partie précédente décrivant les différents éléments du MMS, le système de positionnement (GPS/INS) peut calculer une trajectoire quelque peu déviée. Cette dérive apparaît notamment lorsque le signal GPS est coupé un long moment.

En effet, lors d'une mission, nous avons à lever une portion de voie rapide. Le parcours comprenait un tunnel d'environ 100 mètres de long ce qui implique que le signal GPS a été perdu et que le système de navigation inertielle a permis de calculer la trajectoire du véhicule. La vitesse moyenne était de 60-70 km/h et le signal GPS n'a pu être récupéré qu'après avoir effectué environ 1 kilomètre. A la fin du post-traitement, nous nous sommes rendu compte que nous avions un écart de 80 centimètres entre la trajectoire calculée et la trajectoire réelle en superposant le tracé sur une orthoimage.

Pour éviter cela et avoir une meilleure qualité sur la position et l'orientation du véhicule il faut respecter certaines consignes :

- il faut, si les conditions de circulation le permettent, s'arrêter après les ponts et les tunnels pour récupérer directement le signal GPS et ainsi éviter une dérive trop importante de la centrale inertielle ;
- il est conseillé de prendre des points de contrôle ou bien de calage a posteriori avec un autre appareil (GPS ou tachéomètre avec rattachement). Lors du post-traitement, il faudra faire des correspondances entre ces points et les points pris avec les scanners-lasers fixés sur le MMS pour donner aux « points lasers » des coordonnées exactes. La stratégie idéale est que les points de calage doivent être pris uniformément sur la zone de levé et plus particulièrement avant et après les ouvrages qui sont susceptibles de gêner le signal GPS.

#### **II.4.3 Comparaison avec les mesures d'un tachéomètre**

Enfin, pour avoir un aperçu sur la qualité du levé routier avec le MMS, une comparaison avec un levé effectué à l'aide d'un tachéomètre a été réalisée.

Pour améliorer le géo-référencement des données lasers issues du MMS, des points de calage avaient été pris sur le terrain pour les insérer dans le nuage de points.

Afin d'apprécier la différence entre les deux types de levés, nous avons choisi de comparer des points pris au centre de plaques car il s'agit d'une position bien précise (à l'inverse d'un bord de trottoir qui peut être pris à quelques centimètres d'écart). Cependant, il est difficile de déterminer exactement le centre d'un regard en planimétrie. Mais, avec le MMS, le centre est calculé à l'aide de trois points (lasers) pris sur le bord de la plaque ce qui est plus précis que le jugement d'une personne. Ici nous choisissons 22 points parmi d'autres disposés uniformément sur toute la surface du levé pour représenter les écarts.

Le graphique suivant (Fig.41) représente les écarts en X, Y et en Z entre les deux méthodes. Nous nous situons dans le repère terrain, celui associé au système de référence national RGF93

dans lequel les coordonnées planes sont exprimées dans la projection cartographique « Lambert 93 ». L'altitude est, quant à elle, exprimée dans le système NGF/IGN69.

On constate ainsi que les écarts sur les coordonnées planimétriques sont inférieurs à 3,5 centimètres et ceux sur les coordonnées altimétriques sont inférieurs à 4 centimètres.

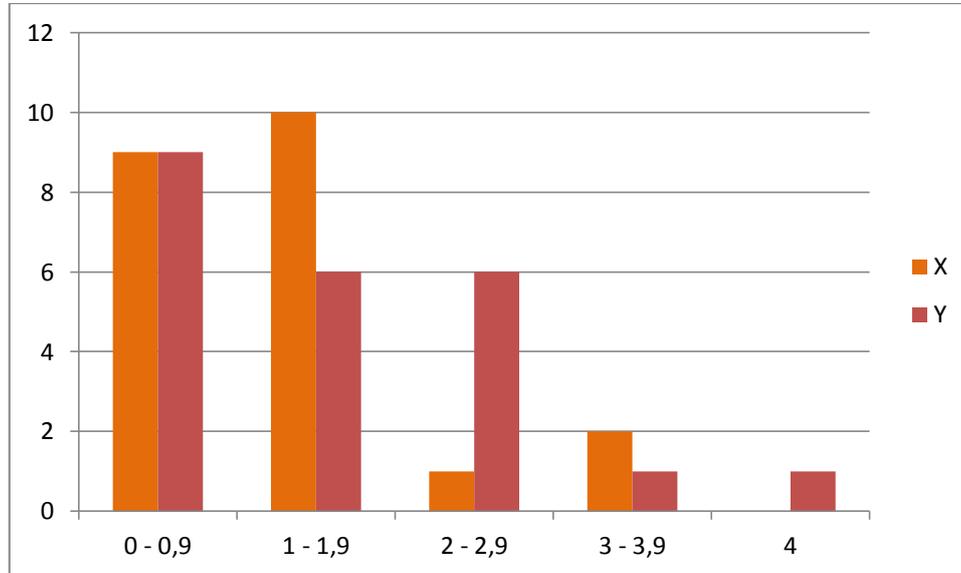


Figure 41 : Histogramme représentant les écarts planimétriques (en centimètres) entre les mesures prises avec le MMS et celles prises avec le tachéomètre avec sur l'axe des abscisses les écarts et sur l'axe des ordonnées le nombre de points par classe d'écarts sur un total de 22 points.

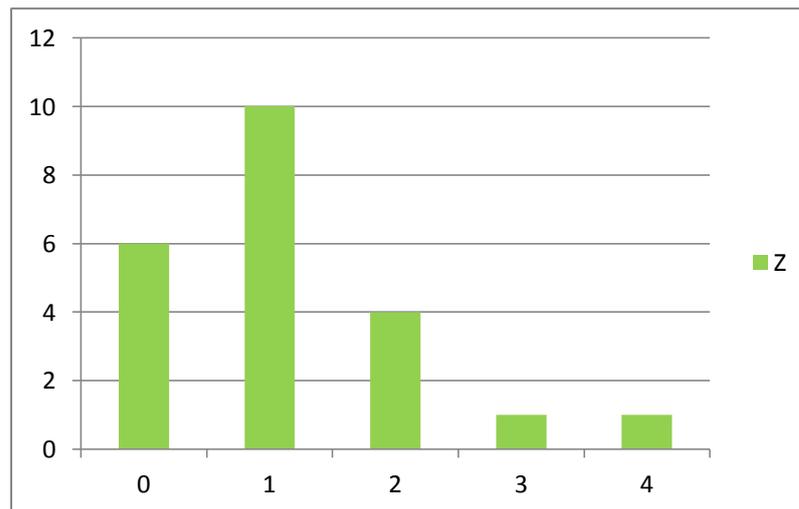


Figure 42 : Histogramme représentant les écarts altimétriques (en centimètres) entre les mesures prises avec le MMS et celles prises avec le tachéomètre avec sur l'axe des abscisses les écarts et sur l'axe des ordonnées le nombre de points par classe d'écarts sur un total de 22 points.

Nous montrons également, avec la figure 43, la moyenne des écarts. On obtient des valeurs raisonnables inférieures à 1,5 cm en planimétrie et inférieures 1,2 cm en altimétrie. On se rend ainsi bien compte de la précision obtenue avec un MMS en appliquant la bonne procédure à savoir prendre impérativement des points de calage pour à la fois contrôler le levé mais aussi pour améliorer le géo-référencement des données.

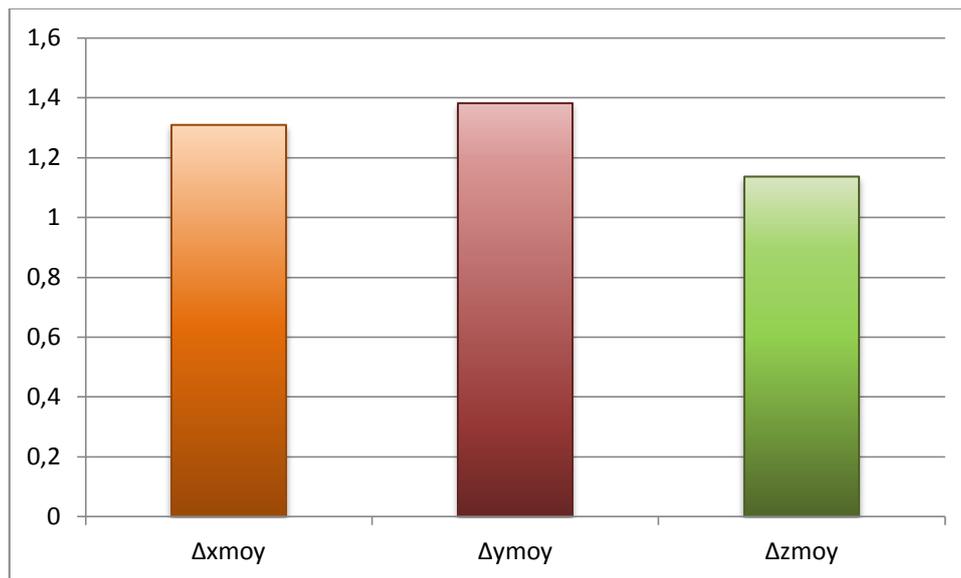


Figure 43 : Diagramme représentant la moyenne des écarts (en centimètre) entre les deux types de levé

Calculons maintenant l'erreur moyenne quadratique. On la détermine à partir des écarts apparents (ou résidus).

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{22} (\Delta X_i - \overline{\Delta X})^2}{21}} = 1.7 \text{ cm}$$

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{22} (\Delta Y_i - \overline{\Delta Y})^2}{21}} = 1.5 \text{ cm}$$

$$s_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{22} (\Delta Z_i - \overline{\Delta Z})^2}{21}} = 1.5 \text{ cm}$$

Les erreurs quadratiques moyennes obtenues sont quasiment identiques pour les trois directions. Ceci suggère que la localisation des points par le système est d'égale qualité dans les trois directions spatiales.

## *Conclusion*

Comme on a pu le voir dans ce mémoire, le système de cartographie mobile disposant à la fois de scanners-lasers et de caméras permet d'acquérir plusieurs types de données. Du fait de sa rapidité pour prendre des mesures, le MMS offre de nouvelles possibilités de levé en milieu urbain. L'environnement peut être modélisé en roulant à environ 30km/h et ce grâce à la haute fréquence d'acquisition des scanners. Il n'est alors plus nécessaire de bloquer des voies pour que les opérateurs effectuent leurs mesures et le facteur danger est donc largement diminué. Les données photogrammétriques resteront néanmoins un complément pour visualiser les lieux dans lesquels le MMS va évoluer et la haute résolution des caméras va permettre de distinguer les détails de taille raisonnable.

De plus, son efficacité a été prouvée. La précision des nuages de points dépend de la qualité de la centrale inertielle utilisée car c'est à partir du calcul de la trajectoire du véhicule que va découler l'exactitude du géoréférencement. Toutefois, le MMS est à employer avec modération. On entend par là, que son usage va dépendre de la précision exigée par le client. Malgré les résultats obtenus lors de la comparaison entre un levé avec le MMS et le même levé avec un tachéomètre en traditionnel, on pourra admettre de faire les mesures avec le MMS pour une précision demandée de 5 centimètres.

Dans ce rapport, nous avons présenté les étapes de la calibration et plus exactement de la résolution des bras de levier et des rotations entre chaque capteur (caméra et scanners-lasers) par rapport à la centrale inertielle. Le fait de faire des protocoles indépendants pour la caméra et pour les scanners limite les erreurs de calcul. On voit donc, lors d'une phase test, si les orientations et les orientations des capteurs sont bien étudiées en superposant leurs données.

Le résultat de la calibration est extrêmement important car un bon étalonnage permettra d'obtenir une meilleure qualité des mesures. Il faut donc dans un premier temps apporter une attention particulière aux opérations préliminaires, c'est-à-dire lors de la détermination par double retournement des coordonnées des cibles installées sur le mur.

Certains cabinets de géomètres commencent à s'équiper de ces systèmes. Ils y voient un intérêt technique et financier grâce au rendement que peut apporter ce type de levé. Une nouvelle concurrence apparaît alors entre les systèmes mobiles et les systèmes fixes.

Cependant, des améliorations sont attendues quant à la précision des points 3D. Une fois cette étape franchie, les MMS deviendront probablement le futur et l'outil indispensable aux géomètres pour concurrencer les marchés.

## Bibliographie

ARRIJURIA O. Contribution à l'Intégration de Centrales Inertielles : Outils d'Aide à la Conception et à l'Optimisation [en ligne]. Thèse pour obtenir le cadre de Docteur spécialité Électronique, Bordeaux : Université Bordeaux 1, 2008, 1-29 p.

Disponible sur < [http://ori-oai.u-bordeaux1.fr/pdf/2008/ARRIJURIA\\_OLIVIER\\_2008.pdf](http://ori-oai.u-bordeaux1.fr/pdf/2008/ARRIJURIA_OLIVIER_2008.pdf) >

COMTOIS-RIVET P. Système de Navigation Inertielle par Filtrage de Kalman Indirect pour un Sous-Marin d'Inspection Robotisé [en ligne]. Mémoire pour l'obtention de la maîtrise en Génie Électrique, Montréal : École de Technologie Supérieure, 2012, 159 p.

Disponible sur < <http://espace.etsmtl.ca/1029/> >

NARAYANA K.S. Solutions de Localisation des Systèmes Mobiles de Cartographie en Environnements Structurés [en ligne]. Thèse pour obtenir le grade de docteur ParisTech, Paris : École Supérieure Nationale des Mines de Paris, 2011, 267p.

Disponible sur < <http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00617985> >

ALSHAWA M. Contribution à la cartographie mobile : développement et caractérisation d'un système basé sur un scanner laser terrestre [en ligne]. Thèse pour obtenir le grade de Docteur en Génie Civil spécialité Topographie, Strasbourg : Université de Strasbourg, 2010, 99 p.

Disponible sur < <http://scd-theses.u-strasbg.fr/1746/> >

VALLET J. *La Lasergrammétrie Aéroportée, Approches Théoriques, Concepts, Méthodes*. Collection EDYTEM, [en ligne], 2011, n°12.

Disponible sur : < <http://www.helimap.com/doc/Vallet-IM3D.pdf>>

LAVOIE P. Système de navigation hybride GPS/INS à faible coût pour la Navigation Robuste en Environnement Urbain [en ligne]. Mémoire pour l'obtention de la maîtrise en Génie Électrique, Montréal : École de Technologie Supérieure, 2012, 314 p.

Disponible sur : < [http://www.researchgate.net/publication/236658166\\_Systeme\\_de\\_Navigation\\_Hybride\\_GPSINS\\_Faible\\_Cot\\_Pour\\_la\\_Navigation\\_Robuste\\_en\\_Environnement\\_Urbain](http://www.researchgate.net/publication/236658166_Systeme_de_Navigation_Hybride_GPSINS_Faible_Cot_Pour_la_Navigation_Robuste_en_Environnement_Urbain) >

EL-SHEIMY N. *An Overview of Mobile Mapping Systems*. TS 17 – The State of the Art in Positioning and Measurement of SDI [en ligne], 2005, n°3, p. 1-24.

Disponible sur : < [http://www.fig.net/pub/cairo/papers/ts\\_17/ts17\\_03\\_elsheimy.pdf](http://www.fig.net/pub/cairo/papers/ts_17/ts17_03_elsheimy.pdf) >

Quelques notes pour le cours de Vision par Ordinateur. In : STURM Peter [en ligne]

Disponible sur : <[http://steep.inrialpes.fr/people/Sturm/Teaching/poly\\_3D.pdf](http://steep.inrialpes.fr/people/Sturm/Teaching/poly_3D.pdf)>

DAUCHER N, DHOME M, LAPRESTE J.T. *Étalonnage de caméra à partir d'images associées de sphères et de grilles*. Traitement du Signal, [en ligne], 1994, Volume 11, n°1.

Disponible sur :

<<http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/1858/nondispo.pdf?sequence=1>>

CAUCHOIS C. Calibration du Capteur de Vision Omnidirectionnel : SYCLOP [en ligne]. Mémoire pour obtenir le Diplôme d'Études Approfondies – Contrôle des Systèmes, Amiens : Université de Picardie Jules Verne, 1998, 1-22 p.

Disponible sur <<http://cauchois.iut-amiens.fr/Recherche/Publi/DEA.pdf>>

TALAYA J, ALAMUS R, BOSCH E et al. *Integration of a Terrestrial Laser Scanner With GPS/IMU Orientation Sensors*, THS 17 – Close-Range Integrated Mapping System/Laser Scanning [en ligne], 6 p. Disponible sur <<http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm5/papers/190.pdf>>

SITECO INFORMATICA. In : SITECO [en ligne]

Disponible sur : < <http://www.sitecoinf.it/index.php/en/>>

## Liste des figures

Figure 1 : Diagramme représentant le temps passé par l'opérateur sur chaque phase pour un levé MMS et un levé traditionnel .....	8
Figure 2 : Récepteur GNSS Trimble .....	12
Figure 3 : Centrale Inertielle IXBLUE .....	12
Figure 4 : Focus X330 de FARO.....	12
Figure 5 : Ladybug5 de Point Grey .....	12
Figure 6 : Odomètre .....	12
Figure 7 : Focus 120 de FARO .....	12
Figure 8 : Photographie du RoadScanner3 acquis par Géosat .....	13
Figure 9 : Principe de la mesure GPS - intersection des sphères .....	14
Figure 10 : Comparaison des codes pour déterminer le retard.....	14
Figure 11 : Mauvaise constellation des satellites - GDOP élevé .....	15
Figure 12 : Bonne configuration des satellites - GDOP faible.....	15
Figure 13 : Principe de l'erreur atmosphérique.....	16
Figure 14 : Principe du multi-trajet .....	16
Figure 15 : Principe de la correction de l'erreur orbitale.....	17
Figure 16 : Centrale inertielle LANDINS de iXSea .....	17
Figure 17 : Fonctionnement d'un gyromètre à fibre optique.....	18
Figure 18 : Représentation de la trajectoire du mobile avec uniquement les données GNSS. Les cercles rouges représentent les coupures de signal (logiciel GrafNav) .....	19
Figure 19 : Trajectoire calculée avec les données GNSS et celles de la centrale inertielle (logiciel ArcMap) .....	19
Figure 20: RoadScanner3 .....	21
Figure 21 : Principe de balayage des faisceaux des trois scanners-lasers .....	22
Figure 22 : Vue panoramique prise avec la Ladybug5 .....	23
Figure 23 : Ladybug5 de PointGrey .....	24
Figure 24 : Schéma représentant le principe du géoréférencement.....	27
Figure 25 : Image panoramique obtenue avec la Ladybug5 .....	28
Figure 26 : Coupe transversale d'une rue.....	29
Figure 27 : Vue 3D des nuages de points pris avec les trois scanners-lasers .....	29
Figure 28 : Nuages de points issus des trois scanners-lasers .....	30
Figure 29 : Option "Altitude relative" .....	30
Figure 30 : Mur de calibration - image issue de la Ladybug5 .....	31

Figure 31: Schéma de photogrammétrie.....	32
Figure 32 : Illustration des distances pour la prise de vue .....	32
Figure 33 : Image déformée – avec distorsions .....	40
Figure 34 : Image rectifiée - sans distorsions .....	40
Figure 35 : Schéma de la distorsion radiale.....	40
Figure 36 : Schéma des points indispensables au calcul.....	41
Figure 37 : Schéma de la distorsion tangentielle .....	41
Figure 38 : Superposition et analyse de la synchronisation entre les données lasers et image.....	46
Figure 39 : Coupe en travers - Bonne synchronisation des lasers.....	47
Figure 40 : Coupe en travers - Mauvaise synchronisation des lasers.....	47
Figure 41 : Histogramme représentant les écarts planimétriques (en centimètres) entre les mesures prises avec le MMS et celles prises avec le tachéomètre avec sur l'axe des abscisses les écarts et sur l'axe des ordonnées le nombre de points.....	49
Figure 42 : Histogramme représentant les écarts altimétriques (en centimètres) entre les mesures prises avec le MMS et celles prises avec le tachéomètre avec sur l'axe des abscisses les écarts et sur l'axe des ordonnées le nombre de points.....	49
Figure 43 : Diagramme représentant la moyenne des écarts (en centimètre) entre les deux types de levé.....	50

## *Liste des tableaux*

Tableau 1 : Quelques modèles de MMS.....	9
Tableau 2 : Inconvénients et avantages des deux types de positionnement (GNSS/INS) .....	20
Tableau 3: Caractéristiques de la Ladybug5.....	32
Tableau 4: Résultats des calculs de calibration effectués .....	45

## *Table des annexes*

Annexe 1 Tableau récapitulatifs des repères utilisés .....	56
Annexe 2 Poster .....	57

## Annexe 1

### Tableau récapitulatifs des repères utilisés

<b>Repère « v »</b>	Repère associé au véhicule
<b>Repère « i » ou « INS »</b>	Repère associé au système inertiel. Il s'agit d'un repère orthogonal dont l'origine correspond au centre de la LANDINS. L'axe x est orienté vers l'avant (selon l'axe longitudinal), l'axe y vers la droite et l'axe z vers le haut du véhicule.
<b>Repère « t »</b>	Le repère « terrain » est associé au système de référence national RGF93 dans lequel les coordonnées planes sont exprimées dans la projection cartographique « Lambert 93 ».
<b>Repère « c »</b>	Repère associé à la caméra. Pour ce repère, l'axe Z est l'axe optique de la caméra, l'axe Y est orienté vers le haut et l'axe X est perpendiculaire à Y et Z et il est dirigé dans le plan horizontal.
<b>Repère « sc »</b>	Repère associé aux scanners-lasers. Chaque scanner dispose de son propre repère afin que les données soient correctement géoréférencées.

Afin de répondre aux nombreuses demandes d'acquisition de données géo-référencées, les systèmes mobiles de cartographie, aussi appelés Mobile Mapping System (MMS), se sont développés au cours des dernières années. L'acquisition des données est extrêmement rapide puisque le véhicule peut rouler à une vitesse normale en ville. Par ailleurs, le traitement au bureau demande plus de temps. Concernant la précision, elle dépend d'une part du matériel utilisé et d'autre part de la qualité de la calibration des différents capteurs.

Le système étudié ici est le RoadScanner3 élaboré par la société italienne Siteco Informatica.

## Description du système

La caméra est une Ladybug5 de PointGrey. Elle permet d'obtenir une image panoramique grâce à la présence de six objectifs de haute qualité. Son principal objectif est de visualiser l'environnement dans lequel le véhicule a évolué

Le récepteur GNSS va donner la position du véhicule par mesures différentielles. Son usage est limité en présence de masques (arbres, bâtiments,...) car le signal peut être interrompu. Un autre appareil est donc nécessaire pour obtenir une position précise.

La centrale inertielle va estimer la trajectoire du véhicule lorsque le signal GPS est interrompu. Ce calcul est réalisé à l'aide d'un ordinateur intégré et des capteurs tels que des accéléromètres et des gyromètres.

Les scanners-lasers vont mesurer les coordonnées 3D d'un point sur la surface d'un objet et ainsi reconstituer l'environnement dans lequel le véhicule a évolué à partir d'un nuage de points. La vitesse d'acquisition est impressionnante puisque le système peut lever près de 3 millions de points à la seconde.

ON THE ROAD ...



## La calibration ...

Opérations préliminaires

Un mur de calibration bien dégagé de tous masques et composé de plusieurs cibles est nécessaire. Les coordonnées précises des marqueurs ont été déterminées par intersection et double retournement à l'aide d'une station totale.



L'étalonnage d'un système MMS revient à calculer les rotations et les bras de levier entre la caméra et la centrale inertielle et entre les différents scanners et la centrale inertielle. Il s'agit donc de trouver les paramètres dits extrinsèques

### Précision :

La précision obtenue avec le MMS sur le géo-référencement des points va dépendre de plusieurs paramètres :

- il faut appliquer une procédure terrain particulière en prenant des points de calage régulier sur le parcours avec un autre instrument et s'arrêter avec le véhicule après les ponts et tunnels pour retrouver le signal GPS potentiellement perdu,
- il faut avoir des instruments performants en particulier pour le système de navigation (GPS et centrale inertielle).

On estime avoir une précision planimétrique et altimétrique d'environ 5 centimètres.

### Vérification :

Après chaque calibration, il est essentiel d'effectuer une mission pour tester les paramètres calculés. Il faut voir si la synchronisation entre la caméra et les différents scanners-lasers est bonne ainsi que celle entre les bandes issues de chaque scanner (voir image). Si ce n'est pas le cas, il faut recalculer les paramètres extrinsèques



## Conclusion

Ce système permet donc d'acquérir un maximum d'informations en un minimum de temps. Son efficacité a été prouvée mais il doit toutefois être employé avec modération et son usage va dépendre de la précision attendue par le client. Le MMS fait donc partie des grandes innovations dans le milieu des géomètres et concurrence déjà les systèmes fixes.

## *RESUMÉ*

Durant ces dernières années, les systèmes de cartographie se sont développés à travers le monde. Très efficaces, ils permettent à la fois d'acquérir des données issues de scanners-lasers et de caméras en un temps record. De plus, ce dispositif calcule la trajectoire du véhicule grâce à la centrale inertielle et au GPS embarqués dans le véhicule. Ceci implique que les acquisitions sont géoréférencées.

Afin d'améliorer la qualité des mesures, il est essentiel d'adopter une procédure particulière sur le terrain et d'effectuer des calibrations régulièrement. L'étalonnage va permettre d'estimer le plus précisément possible les paramètres extrinsèques de chaque capteur vis-à-vis de la centrale inertielle c'est-à-dire les bras de leviers et les rotations. De cette étape dépendra la précision des mesures effectuées sur le terrain.

**Mots clés :** Système de cartographie mobile, MMS, calibration, étalonnage, caméra, scanner-laser, GPS, INS.

---

## *SUMMARY*

In recent years, mobile mapping systems have developed worldwide. Very effective, they can both acquire data from laser-scanner and cameras in a few time. In addition, this device calculates the vehicle's path thanks to the inertial unit and the GPS in the vehicle. This implies that the acquisitions are georeferenced.

To improve the quality of measurements, it is essential to adopt a particular procedure on the ground and perform calibrations regularly. It will allow to estimate accurately the extrinsic parameters of each sensor against the inertial unit that is to say the lever arms and the rotations. In this step depends precision measurements in the field.

**Key words :** Mobile Mapping System, MMS, calibration, camera, laser-scanner, GPS, INS.