



HAL
open science

Lasergrammétrie mobile : étude et utilisation d'un système mobile de cartographie 3D en milieu ferroviaire : le GRP 5000

Benjamin Dupuis

► **To cite this version:**

Benjamin Dupuis. Lasergrammétrie mobile : étude et utilisation d'un système mobile de cartographie 3D en milieu ferroviaire : le GRP 5000. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2014. dumas-01167039

HAL Id: dumas-01167039

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01167039>

Submitted on 23 Jun 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

Benjamin DUPUIS

**LASERGRAMMETRIE MOBILE : ETUDE ET UTILISATION D'UN SYSTEME
MOBILE DE CARTOGRAPHIE 3D EN MILIEU FERROVIAIRE – LE GRP 5000**

Soutenu le 09 Juillet 2014

JURY

PRÉSIDENT : Monsieur Laurent POLIDORI

MEMBRES : Monsieur José CALI, professeur référent
Monsieur Jean-François BAUDET
Monsieur Mathieu BONNEFOND
Madame Elisabeth SIMONETTO

MAITRE DE STAGE : Monsieur Philippe DESCHAMP

Remerciements

Ce travail de fin d'études proposé par le service Topographie Régie Autonome des Transports Parisiens m'a tout de suite séduit. En effet, je désirais travailler dans la modélisation 3D et approfondir mes connaissances dans les systèmes mobiles de cartographie.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au bon déroulement de ce travail de fin d'étude, et qui m'ont aidé pour la rédaction de ce mémoire :

- Monsieur Philippe DESCHAMP, responsable du service Topographie et maître de stage, pour m'avoir permis de réaliser mon TFE à la RATP. Ses conseils ont été des plus avisés tout au long de mon stage. Je tiens tout particulièrement à le remercier pour sa disponibilité et sa gentillesse.
- Monsieur Xavier KERFERCH, pour ses précieux conseils sur des questions de topographie ainsi que pour son aide sur le terrain lors des tests réalisés avec le chariot de mesures
- L'ensemble du service de Topographie : Éric BIGOT, Paolino DE ARAUJO, Denis LANDRIN, Erwann LESIEUR et Guillaume VARAINE pour leur accueil chaleureux.
- Monsieur José CALI, mon professeur référent, pour ses précieux conseils techniques.
- Enfin, je souhaite remercier ma famille et mes amis qui m'ont encouragé et soutenu.

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| REMERCIEMENTS | 1 |
| SOMMAIRE | 2 |
| GLOSSAIRE (PAR ORDRE D'APPARITION) | 4 |
| INTRODUCTION | 5 |
| 1. LE MILIEU FERROVIAIRE ET LA LASERGRAMMETRIE | 6 |
| 1.1 PRESENTATION DU CADRE DU TRAVAIL..... | 6 |
| 1.2 LE MILIEU FERROVIAIRE | 7 |
| 1.2.1 Caractéristiques d'une voie ferrée | 7 |
| 1.2.2 Maintenance d'une voie | 9 |
| 1.3 LA LASERGRAMMETRIE | 9 |
| 1.3.1 Définition..... | 9 |
| 1.3.2 Le relevé laser | 10 |
| 1.3.3 L'instrument de mesure : le scanner laser | 11 |
| 1.3.4 Les erreurs rencontrées en lasergrammétrie..... | 14 |
| 1.4 INTERETS D'UN LEVE MOBILE EN MILIEU FERROVIAIRE | 15 |
| 1.4.1 DT/DICT | 15 |
| 1.4.2 Etude de gabarits | 16 |
| 2. LA CARTOGRAPHIE MOBILE 3D ET LES SYSTEMES MOBILES DE CARTOGRAPHIE | 17 |
| 2.1 QU'EST-CE QU'UN SYSTEME MOBILE TERRESTRE DE CARTOGRAPHIE ? | 17 |
| 2.2 COMPOSANTE DE PERCEPTION /LEVER | 18 |
| 2.2.1 Tachéométrie | 18 |
| 2.2.2 Lasergrammétrie | 18 |
| 2.2.3 Photogrammétrie | 19 |
| 2.3 COMPOSANTE POSITIONNEMENT/LOCALISATION | 19 |
| 2.3.1 Les systèmes souterrains | 19 |
| 2.3.2 Les systèmes utilisés en extérieur | 20 |
| 2.4 COMPOSANTE D'ORIENTATION | 21 |
| 2.4.1 Centrale inertielle / INS (Inertial Navigation System) | 21 |
| 2.4.2 Centrale d'attitude | 22 |
| 2.5 LES DIFFERENTS SYSTEMES MOBILE TERRESTRE DE CARTOGRAPHIE 3D | 23 |
| 2.5.1 Les Systèmes de Numérisation 3D Embarqués sur des Véhicules | 23 |
| 2.5.2 Les systèmes mobiles à environnement de navigation restreint..... | 24 |
| 2.6 PRINCIPE EN LASERGRAMMETRIE MOBILE | 25 |
| 2.6.1 A la volée | 25 |
| 2.6.2 Pluri-statique | 25 |
| 2.6.3 Par Intervalles..... | 26 |

| | |
|---|-----------|
| 2.7 VALEUR AJOUTEE DES MMS..... | 26 |
| 2.7.1 Les utilisations..... | 26 |
| 3. LE CHARIOT DE MESURES FERROVIAIRE : LE GRP 5000 | 27 |
| 3.1 LES SYSTEMES GRP FX | 27 |
| 3.2 GRP 5000 | 28 |
| 3.2.1 Description | 28 |
| 3.2.2 Les capteurs..... | 29 |
| 3.3 MESURES TERRAIN – METHODOLOGIE | 29 |
| 3.4 GEOREFERENCEMENT | 31 |
| 3.5 POST-TRAITEMENT | 34 |
| 3.5.1 Le logiciel Amberg Rail et ses applications..... | 34 |
| 3.5.2 Gestion des données -..... | 35 |
| 4. TESTS ET RESULTATS..... | 35 |
| 4.1 SUIVI PAR TACHEOMETRIE | 36 |
| 4.1.1 Influence prisme 360° | 36 |
| 4.1.2 Influence distance station/chariot. | 37 |
| 4.2 TESTS SUR LES CAPTEURS..... | 38 |
| 4.2.1 Inclinomètre et écartement | 38 |
| 4.2.2 Odomètre | 39 |
| 4.2.3 Alignement horizontal..... | 39 |
| 4.3 PRECISION ABSOLUE | 40 |
| 4.3.1 Réseau de points de contrôle..... | 40 |
| 4.4 RESULTATS ET DISCUSSIONS | 42 |
| 4.4.1 Analyse des Résultats..... | 42 |
| 4.4.2 Les améliorations possibles du système | 44 |
| Conclusion | 46 |
| Références Bibliographiques | 47 |
| Liste des figures | 49 |
| ANNEXES | 51 |

GLOSSAIRE

RATP : Régie Autonome des Transports Parisiens

RER : Réseau Express Régional

RVB : Renouvellement Voie Ballast

LASER : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

DT/DICT : Déclaration de projet de Travaux/Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux

MMS : Mobile Mapping System

ATR : Automatic Target Recognition

GNSS : Global Navigation Satellite System

GDOP : Geometrical Dilution Of Precision

GPS : Global Positioning System

RTK : Real Time Kinematic

DGPS : Differential Global Positioning System

INS : Inertial Navigation System

IMU : Inertial Measurement Unit

MEMS : Micro Electro Mechanical Systems

ZUPT : Zero Velocity Update Procedure

SIG : Système d'Information Géographique

BIM : Building Information Model

CIM : City Information Model

RGF 93 : Réseau Géodésique Français 1993

CTC : Canted Track Coordinates

UTC : Uncanted Track Coordinates

PK : Point Kilométrique

AFT : Association Française de Topographie

INTRODUCTION

Le réseau de La Régie Autonome des Transports Parisiens (RATP), établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) comporte plus de 220 kilomètres de voies (Métro et RER) essentiellement en milieu souterrain. Il est aujourd'hui l'un des plus denses du monde mais bien qu'il soit efficace, celui-ci doit être rénové et plus étendu. Ainsi, des travaux d'automatisation et de prolongement d'anciennes lignes sont depuis quelques années en cours de réalisation. Mais c'est le projet du Grand Paris annoncé pour 2030 qui fera de Paris l'une des capitales les plus modernes en termes de transport en commun. Un chantier titanesque attend donc la RATP, reconnue pour son savoir-faire dans le monde entier. D'ici 2030, ce sont plus de 150 kilomètres de nouvelles voies qui seront créées.

Les opérations d'études et de relevés de voies ferrées sont généralement faites par des trains appelés « trains chantier ». L'apparition de systèmes modernes comme les chariots de mesures ferroviaires offrent de nouvelles possibilités d'acquisition de données. Même si ces vieux engins d'études sont toujours utilisés, ils sont voués à disparaître au profit de chariots offrant de plus en plus de domaines d'application. Initialement conçus pour enregistrer les paramètres internes de la voie, l'ajout d'appareils lasergrammétriques d'une grande précision offre de toutes nouvelles perspectives. Des études de gabarit ou de travaux de maintenance sont désormais possibles. A l'heure de la troisième dimension, les chariots de mesures enregistrent d'énormes quantités de données avec une durée d'acquisition très courte.

Nous verrons que ce type de chariot de mesures, capable de réaliser une cartographie en trois dimensions, permet d'acquérir des données non structurées qu'il est nécessaire de traiter par la suite. Parmi les différentes techniques de cartographie, la lasergrammétrie dynamique ou mobile se présente comme une technique rapide, rentable et de précision. La lasergrammétrie, utilisée en mode statique depuis une dizaine d'années semble évoluer avec l'apparition de systèmes mobiles capables de numériser des zones d'une plus grande surface tout en réduisant le temps d'acquisition.

L'objectif de cette étude est de comprendre comment fonctionnent ces systèmes mobiles de cartographie et comment se comporte un chariot de mesures.

Néanmoins, différentes notions devront impérativement être acquises préalablement à l'étude du chariot de mesures. Dès lors, la première partie de ce mémoire sera consacrée à une présentation du milieu ferroviaire ainsi que de la lasergrammétrie. Dans un second temps, nous étudierons le fonctionnement des systèmes mobiles de cartographie. Enfin, après une présentation du chariot de mesures GRP 5000, différentes expérimentations seront effectuées pour quantifier l'incidence de plusieurs paramètres pouvant influencer la qualité de la mesure ainsi que sa précision absolue.

1. LE MILIEU FERROVIAIRE ET LA LASERGRAMMETRIE

1.1 PRESENTATION DU CADRE DU TRAVAIL

Créée en Janvier 1949, la Régie Autonome des Transports Parisiens garantit de nos jours la mobilité quotidienne de plus de 12 millions de personnes en France et dans le monde. En employant près de 53 000 personnes, la société assure les phases de conception, de gestion, d'exploitation et de maintenance des projets de tous les modes de transport public urbain : Bus, Ferroviaire, Tramway, Métro.

La RATP exploite l'un des plus importants réseaux multimodaux intégrés dans le monde en gérant quatre réseaux de transport urbain : 14 lignes de métro, 2 lignes de RER, 3 lignes de tramway et plus de 300 lignes de bus.

Pour faciliter la mobilité urbaine et moderniser les réseaux existants, la RATP a décidé en 2011 une automatisation intégrale de la ligne 1 du métro parisien. Ce défi technologique réalisé grâce à la collaboration de plusieurs unités techniques du département ingénierie (ING) donne un aperçu des travaux de modernisation du réseau.

Cependant, c'est à partir de 2017 que 150 kilomètres de lignes de métro automatique viendront s'ajouter au réseau actuel. Inspirateur du réseau du Grand Paris, la RATP est aujourd'hui un acteur majeur dans l'élaboration des études préliminaires et des phases de conception. Les équipes du département ING sont dès à présent totalement mobilisées au service de la construction de cette infrastructure. Ce département est divisé en plusieurs unités techniques :

- ISE (Installations et Systèmes Electriques)
- OIT (Ouvrages et Infrastructures du Transport)
- STF (Système Transport Ferroviaire)
- SVM (Système Voyageurs et Mobilité)

C'est dans le cadre de projets de construction ou de rénovation que l'unité OIT est chargée des études de conception et de réalisation des ouvrages et infrastructures de transport pour les réseaux RER, Métro, Tramway et Bus.

L'entité GST (Géologie Structure et Topographie) faisant partie d'OIT s'est dotée en 2013 d'un chariot pour la mesure du réseau ferré de transport souterrain. Cet outil, le GRP 5000 est commercialisé par la société suisse Amberg et mesure rapidement la géométrie de la voie ainsi que son environnement. Il est utilisé dans le cadre des levés « tel que construit » effectués par le service Topographie et fournit un état des lieux de l'existant.

1.2 LE MILIEU FERROVIAIRE

1.2.1 Caractéristiques d'une voie ferrée

1.2.1.1 Géométrie interne

Une voie ferrée est caractérisée par différents paramètres mécaniques qui définissent sa géométrie interne. Les rails sont les points d'interaction du train avec le sol, c'est pourquoi ils doivent être parfaitement connus et entretenus. Ils sont à la fois le support de roulement pour les trains mais aussi les guides.

Coenraad Esveld, professeur à l'université technologique de Delft, liste 4 principaux paramètres : [ESVELD, 2001]

- L'écartement
- Le dévers
- L'alignement
- L'altitude de la tête de rail.

L'écartement de la voie détermine la distance entre les deux cotés intérieurs des deux têtes du rail. Il peut varier sur une même voie de quelques centimètres. Près de 60% du réseau mondial utilise un écartement de 1435mm (Figure 1).

Le dévers définit la différence de niveau entre le champignon de rail droit et le champignon de rail gauche, il est calculé comme une distance verticale. Le dévers permet de limiter la force centrifuge dans les virages pour autoriser une plus grande vitesse du train dans les courbes (Figure 1).

L'alignement (horizontal) est le déplacement de l'axe de la voie dans le plan horizontal.

1.2.1.2 Coupe de rails

Le réseau RATP possède plusieurs types de rails en fonction du matériel roulant qui circule. Ceux-ci peuvent être de type pneumatique ou rail. Selon le type, les rails associés sont différents.

Coupe d'un rail (type RER ou métro rail)

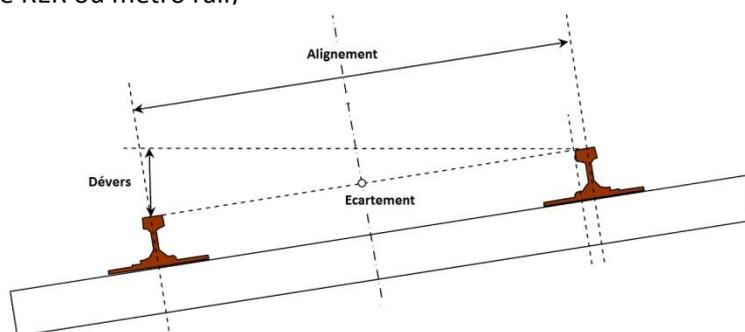
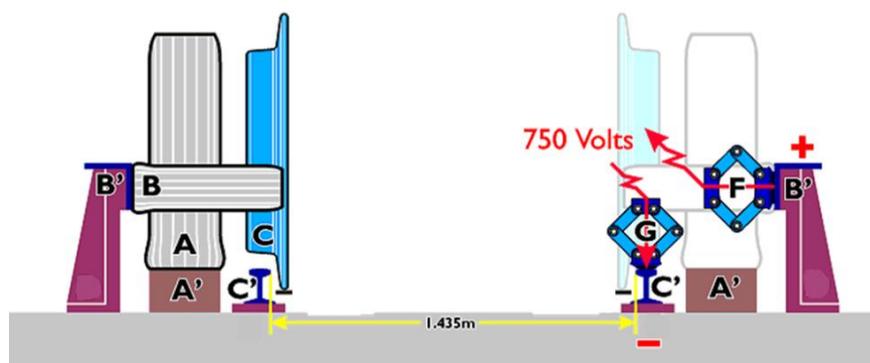


Figure 1 : Schéma d'une coupe d'un rail de métro rail, dévers et écartement (source [GLAUS R , 2006])

Coupe d'un rail (type métro pneumatique)



- A : Pneu principal
- A' : Bande de roulement
- B : Roue de guidage
- B' : Barre de guidage
- C : Roue de sécurité
- C' : Rail en métal

Figure 2 : Coupe d'un rail de type métro pneumatique et explications (source : <http://emdx.org/rail/metro/principe.php>)

La barre de guidage fournit le courant électrique nécessaire aux rames de métro.

Le rail en métal, situé à l'intérieur de la bande de roulement est une sécurité, si un pneu éclate ou crève ce sont les roues de sécurité qui assurent la fonction des pneus.



Figure 3 : coupe d'une voie de métro pneumatique (source : <http://emdx.org/rail/metro/principe.php>)

1.2.2.3 L'armement d'une voie ferrée

L'armement d'une voie ferrée soutenant les rails peut être de type ballast ou béton. Le ballast est un ensemble de roches éruptives concassées qui diffuse et propage les effets causés par les passages répétés des trains sur les rails sans que ceux-ci ne soient déformés. Les traverses assurent la transition entre le rail et le ballast pour

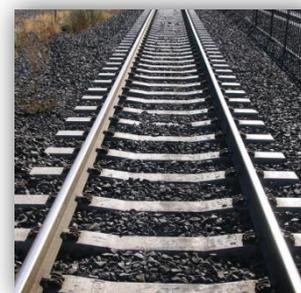


Figure 4 : Voie ballast



Figure 5 : Voie béton

maintenir l'écartement et le dévers (figure 4). L'épaisseur du ballast peut varier en fonction de la densité du trafic et de la charge roulante. Il sera plus épais pour des voies LGV par exemple.

Les rails peuvent être directement montés sur des traverses en béton sans ballast (figure5). Cette méthode pose plus de difficultés pour la mise en place de la voie ; En revanche, les phases d'entretien sont facilitées.

1.2.2 Maintenance d'une voie

Un réseau ferré dans un bon état est régulièrement surveillé et vérifié. Des travaux de maintenance effectués régulièrement engendrent une réduction du nombre d'incidents.

Pour des questions de sécurité il très est important d'entretenir régulièrement les voies. On entretient son support, les traverses, mais on vérifie aussi sa géométrie interne.

Un entretien du ballast est effectué si la voie est trop ancienne. Au fil du temps et sous l'action répétée des forces du train, le ballast peut s'affaisser. Des opérations de bourrage sont donc effectuées. Si les traverses sont trop endommagées ou si le ballast est trop ancien, on effectue des travaux de renouvellement voie ballast (RVB).

Un entretien des défauts internes du rail est aussi indispensable. Sous l'effet du nombre important des passages des trains, le rail peut s'endommager et s'user. Des fissures, des bourrelets sur le champignon de rail peuvent apparaître. Le rail est meulé pour retirer une fine pellicule d'acier et supprimer ces aspérités. Ces opérations, réalisées régulièrement restituent la forme initiale de la tête de rail.

La surveillance du réseau ferroviaire est primordiale pour assurer la sécurité du transport des voyageurs. Celle-ci engendre des coûts financiers très importants mais cette phase ne doit pas être négligée. C'est dans ce cadre, que l'utilisation d'un système mobile de cartographie et d'un chariot de mesures peut être un réel atout.

1.3 LA LASERGRAMMETRIE

1.3.1 Définition

La lasergrammétrie est une technologie d'acquisition de données en utilisant un laser.

Ces données se décomposent en deux parties :

- la mesure de la distance
- l'orientation du faisceau laser

Lors d'une acquisition, on obtient de nombreux points qui forment un nuage de points. Cette opération pratiquée en lasergrammétrie est appelée « scannage », « balayage laser » ou « numérisation 3D ».

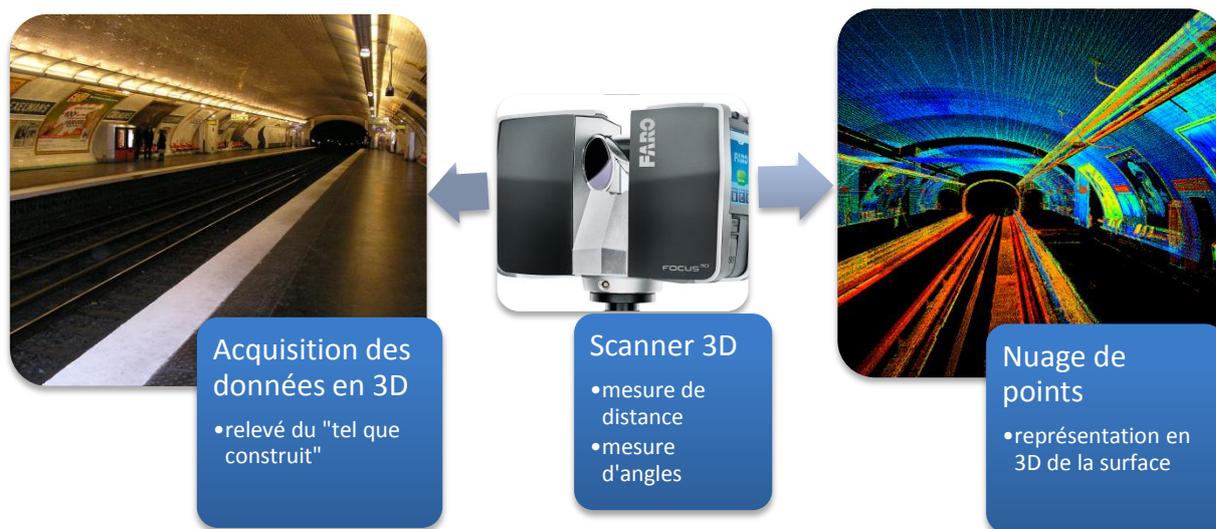


Figure 6 : Principe de la lasergrammétrie (source - photo : station Exelmans – wikipédia. Image scanner : Site web Faro)

Le rendu final appelé nuage de points correspond à un ensemble tramé de points en trois dimensions représentant la surface relevée par le scanner laser.

1.3.2 Le relevé laser

« Le relevé laser terrestre est une technique d'acquisition rapide et automatique de données tridimensionnelles utilisant la lumière laser pour mesurer directement, sans contact avec l'objet et selon une trame régulière, les coordonnées 3D des points sur des surfaces depuis une position terrestre ». (AFT, 2014)

Le terme LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) désigne une amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement. C'est une source de lumière artificielle permettant la production de faisceaux très intenses de lumière cohérente.

Le faisceau laser est émis à des fréquences élevées pour une acquisition d'un grand nombre de points en un temps très court. Chaque rayon laser retour est enregistré par l'appareil et utilisé pour connaître la position dans l'espace des points d'impact du laser.

Le balayage laser terrestre peut être effectué à partir de scanners lasers positionnés sur une station fixe (trépied) ou bien à partir d'une plateforme en mouvement, se déplaçant dans l'espace – la lasergrammétrie mobile.

Chaque scanner laser 3D possède des caractéristiques techniques différentes (principe de mesure de distances) qu'il est indispensable de connaître et de comprendre dans le but d'utiliser un instrument adapté aux besoins et aux précisions attendues (ANNEXE 1).

L'utilisation de la lasergrammétrie apporte des intérêts majeurs en cartographie 3D. Les avantages principaux de cette technologie sont :

- La rapidité : la numérisation de millions de points se fait en quelques minutes. Cette numérisation s'effectue donc plus vite et avec plus de détails qu'un levé classique.
- Pas de contrainte temporelle : les relevés peuvent s'effectuer de nuit ou de jour. Ceci est un avantage indéniable dans le milieu ferroviaire car les acquisitions nécessitent un arrêt des matériels roulants et se font donc généralement de nuit.
- Visualisation directe du résultat : les nuages de points facilitent la compréhension du résultat. Une acquisition qui génère autant de points peut être très utile si des détails complémentaires sont nécessaires à posteriori.

1.3.3 L'instrument de mesure : le scanner laser

Les appareils utilisant la lasergrammétrie sont appelés : les scanners lasers 3D. Ces appareils se décomposent en trois parties (figure7).

- La télémétrie laser donne l'information sur la distance (D)
- Les composantes de déflexion informent sur la direction, l'orientation (δ, φ)
- Le traitement pour enregistrer et stocker l'information

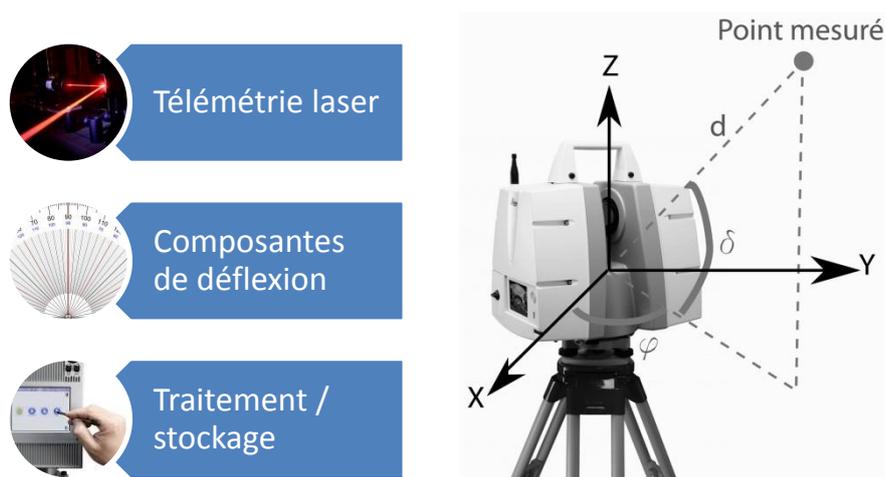


Figure 7 : Le scanner laser terrestre et ses composantes
(source image scanner : Site web Leica)

1.3.3.1 Dimensionnalité de la mesure

Le système de balayage laser peut différer selon la dimensionnalité de la mesure (figure 8).

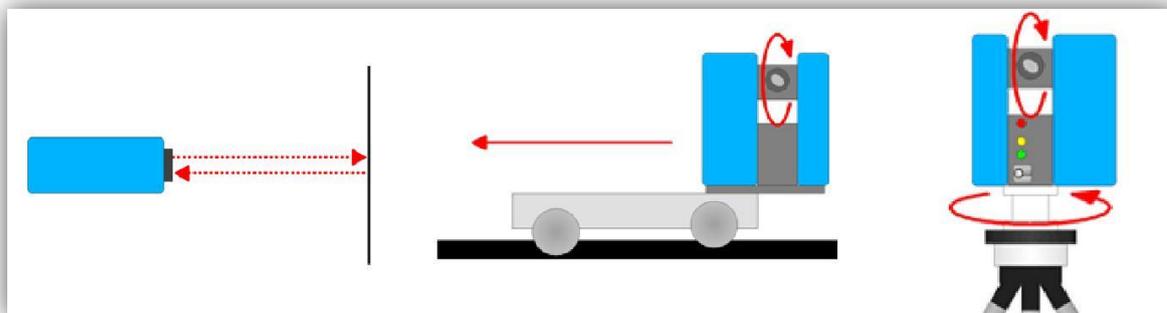


Figure 8 : Scanner 1D, 2D et 3D (gauche à droite) (source : site web société Z+F GmbH)

Télémétrie 1D : Le laser envoie une impulsion laser vers un objet et mesure la distance à celui-ci (*cas du distancemètre*).

Télémétrie 2D : C'est une combinaison d'un laser 1D à impulsions régulières et rapides avec une rotation du faisceau autour d'un axe via un miroir rotatif (figure 9).

Télémétrie 3D : C'est une combinaison d'un laser 2D avec une rotation de la base perpendiculaire à la rotation du laser 2D (*lasergrammétrie statique*).

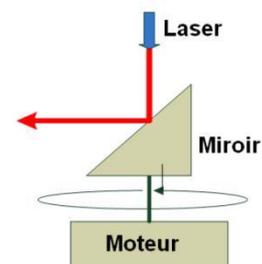


Figure 9 : Schéma d'un miroir rotatif d'un scanner laser source [YOO H, 2013]

La télémétrie 2D est utilisée dans le cas de la lasergrammétrie mobile. Le déplacement du chariot en continu transforme les profils 2D en 3D (figure 10).

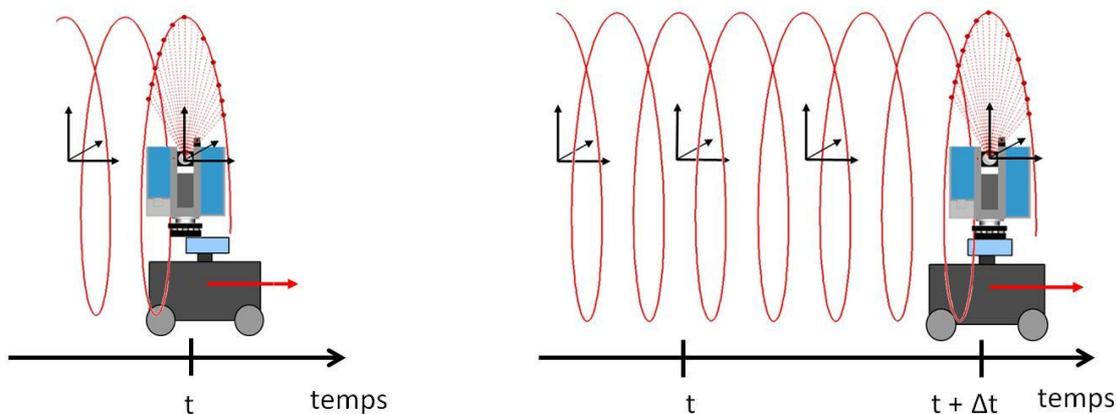


Figure 10 : Principe d'acquisition dynamique (source : plaquette d'information Leica)

1.3.3.2 Caractéristiques techniques d'un scanner laser

Les spécifications techniques transmises par les constructeurs sont issues de mesures réalisées dans des conditions idéales. Il est important de savoir que celles-ci sont le plus souvent surestimées et peuvent différer dans les conditions réelles de travail. Dans l'article « *les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre* », les auteurs évoquent et listent l'ensemble des facteurs pouvant influencer la qualité des données [LANDES T., GRUSSENMEYER P., 2011] :

- ✓ La précision sur les mesures angulaires. L'impulsion laser est envoyée vers l'objet après avoir été déviée par un miroir. La mesure de ces angles est utilisée lors du calcul des coordonnées en trois dimensions. Les erreurs sont causées par le système de mesure des angles et provoquent des erreurs perpendiculaires à la propagation du faisceau laser. Elles peuvent être localisées en mesurant de courtes distances verticales et horizontales et peuvent être minimisées en utilisant des dispositifs de précision.
- ✓ Exactitude/précision sur les mesures de distances : La précision sur les mesures de distances dépend de plusieurs paramètres et du type de scanner utilisé. Afin de connaître cette précision, une opération de contrôle peut être effectuée. Pour cela, une cible positionnée perpendiculairement à la direction de visée est scannée plusieurs fois. La dispersion du nuage et son épaisseur permet de caractériser et de déterminer son écart-type à partir d'un plan moyen. L'exactitude des coordonnées des cibles pourra être vérifiée en comparant les différentes mesures à une mesure tachéométrique. Cette valeur « vraie » sera déterminée par le biais de mesures plus précises que ce que le scanner est susceptible d'atteindre.
- ✓ « La résolution spatiale théorique d'un scanner laser terrestre représente le pas le plus fin que le scanner laser est capable de mesurer, à une distance objet-scanner fixe » [AFT, 2014]. Cette distance, différente pour chaque scanner, est généralement plus petite lorsque le prix du scanner augmente.
- ✓ La taille de l'empreinte laser se mesure au niveau de la surface de l'objet à numériser. Elle est généralement plus importante que la capacité à mesurer de façon indépendante deux objets situés sur des lignes de visées adjacentes (résolution angulaire).
- ✓ La portée représente la distance (minimale et maximale) où le scanner est capable de numériser un objet. Cette distance varie surtout en fonction du type du scanner (temps de vol, triangulation ou différence de phases).
- ✓ La cadence des mesures est définie par une fréquence exprimée en Hertz. Elle représente la capacité du scanner à effectuer des rotations par seconde et se traduit par un nombre de mesures par seconde. Aujourd'hui les scanners les plus performants peuvent mesurer des millions de points par seconde.

1.3.3.3 Les scanners lasers dédiés à une utilisation cinématique : les profilomètres



Figure 11 : RIEGL VQ-450, 200 rps (rotations par seconde) (source : Site Web RiegI)

Des scanners lasers peuvent être uniquement dédiés à une utilisation cinématique. Ce sont les profilomètres. La tête d'acquisition tourne à une vitesse angulaire beaucoup plus élevée pour déplacement plus rapide du système mobile. De plus, son champ de vision à 360° offre une numérisation complète et une disparition du cône de non résolution. Sans déplacement de la base mobile, le profilomètre réalise seulement une coupe et ne peut pas numériser une zone complète d'étude.

Dans la pratique, il est possible d'utiliser un scanner laser terrestre fixe 3D comme scanner laser mobile en bloquant la rotation autour de l'axe des Z. Cette solution économiquement avantageuse autorise l'utilisation du même scanner en mode statique et en mobile.

1.3.4 Les erreurs rencontrées en lasergrammétrie

Comme en topographie, les mesures effectuées en lasergrammétrie peuvent être entachées par des erreurs liées à divers éléments. Ces erreurs affectant la mesure au scanner laser terrestre peuvent être classifiées en 4 catégories [STAIGER, 2005] :

- ✚ Les erreurs relatives à l'objet numérisé
- ✚ Les erreurs environnementales
- ✚ Les erreurs instrumentales
- ✚ Les erreurs méthodologiques

Erreurs relatives à l'objet numérisé

Les erreurs liées à l'objet numérisé ont un impact sur le signal retour du faisceau laser réfléchi par l'objet. La première source d'erreurs provient de la réflectance de l'objet, car la mesure par lasergrammétrie n'utilise pas de déflecteur. Elle dépend de plusieurs paramètres propres à l'objet numérisé :

- les propriétés des matériaux de l'objet,
- la couleur de surface : en effet, l'objet réfléchira le signal plus ou moins bien en fonction de la longueur d'onde utilisée,
- l'angle d'incidence du faisceau laser,
- la longueur d'onde du laser,

- la rugosité de la surface numérisée ; une surface lisse et brillante provoquera une réflexion spéculaire,
- la température et l'humidité de l'objet visé.

Erreurs environnementales

Les erreurs environnementales affectent les mesures angulaires et de distances. Elles sont identiques à celles que l'on rencontre en tachéométrie. En effet, le faisceau laser peut être perturbé par des facteurs météorologiques comme la température, la pression et l'humidité dans le milieu de l'étude. L'indice de réfraction du milieu traversé n'est donc pas homogène et altère les calculs.

Erreurs instrumentales

Ces erreurs impactent les mesures angulaires et de distances. Elles peuvent être systématiques ou aléatoires et sont causées par l'état mécanique de l'appareil (par exemple erreur d'axes). C'est pourquoi il est important de procéder régulièrement à des révisions.

Erreurs méthodologiques

L'opérateur doit installer le scanner et choisir la résolution. Ce choix doit être cohérent par rapport à la précision de la mesure (il faut éviter le sous-échantillonnage et le sur-échantillonnage).

Une perte d'informations (sur des objets de petites tailles) est synonyme d'un sous-échantillonnage. A l'inverse, une trop grande quantité d'informations relevées fait apparaître plus de bruits de mesure.

1.4 INTERETS D'UN LEVE MOBILE EN MILIEU FERROVIAIRE

1.4.1 DT/DICT

Comme mentionné dans l'article « paroles d'experts » sur le site www.la-vie-des-reseaux.fr : « le Décret n°2011-1231 du 5 Octobre 2011 inscrit dans la loi Grenelle 2 dit décret DT/DICT relatif à l'exécution de travaux à proximité de certains ouvrages souterrains, aériens ou subaquatiques de transport ou de distribution vise à réduire les dommages causés aux réseaux lors de travaux effectués dans leur voisinage et à prévenir leurs conséquences néfastes pour la sécurité des personnes et des biens, la protection de l'environnement et la continuité des services aux usagers de ces réseaux. » [LAZARI, CHOISEZ, 2012]

Cette nouvelle réglementation vise à impliquer davantage les trois acteurs principaux : le maître d'ouvrage, l'exploitant et l'exécutant des travaux dans la localisation des réseaux. En effet, la méconnaissance de la localisation exacte des réseaux (gaz, électricité, ...) est à l'origine de nombreux incidents et sinistres.

Le décret impose aux exploitants de mettre en œuvre une cartographie précise des réseaux neufs et d'en améliorer celle des réseaux existants. Il établit trois classes de précision (source : site internet www.légifrance.gouv.fr, JORF n°0045 du 22 février 2012 page 2988, texte n° 10)

- Classe A : un ouvrage ou tronçon d'ouvrage est rangé dans la classe A si l'incertitude maximale de localisation indiquée par son exploitant est inférieure ou égale à 40 cm s'il est rigide, ou à 50 cm s'il est flexible ; l'incertitude maximale est portée à 80 cm pour les ouvrages souterrains de génie civil attachés aux installations destinées à la circulation de véhicules de transport ferroviaire ou guidé lorsque ces ouvrages ont été construits antérieurement au 1er janvier 2011
- Classe B : un ouvrage ou tronçon d'ouvrage est rangé dans la classe B si l'incertitude maximale de localisation indiquée par son exploitant est supérieure à celle relative à la classe A et inférieure ou égale à 1.5 mètre.
- Classe C : un ouvrage ou tronçon d'ouvrage est rangé dans la classe C si l'incertitude maximale de localisation indiquée par son exploitant est supérieure à 1.5 mètre, ou si son exploitant n'est pas en mesure de fournir la localisation correspondante.

Pour répondre aux nouvelles attentes du DT/DICT la RATP doit donc relever et procéder aux géoréférencement de l'ensemble du réseau existant. L'utilisation de systèmes mobiles utilisant la troisième dimension apporte un confort, une rapidité d'exécution et un haut rendement. Cette grande exhaustivité des données permettra une parfaite connaissance du réseau dans son intégralité et un géoréférencement dans le système national en vigueur.

1.4.2 Etude de gabarits

L'application première de la 3D dans le milieu ferroviaire est l'étude de gabarit pour les nouveaux matériels roulants. A l'aide d'une modélisation en trois dimensions du train, de l'environnement et des paramètres internes de la voie, une étude dynamique du comportement du train est réalisée.

Le gabarit ferroviaire désigne le contour, l'emprise totale du train. Son étude a pour but d'assurer la capacité du véhicule à franchir des obstacles (ponts, tunnels, panneaux de signalisation) mais aussi à contrôler que les trains se situent à une bonne distance des quais. Le périmètre de l'emprise du train est inséré dans l'environnement et son encombrement est étudié à l'arrêt (gabarit statique) ou en mouvement (gabarit cinématique). Les trains, circulant sur un environnement restreint, guidés par les rails ne peuvent dévier de leur voie à la vue d'un obstacle c'est pourquoi l'étude du gabarit est primordiale.

2. LA CARTOGRAPHIE MOBILE 3D ET LES SYSTEMES MOBILES DE CARTOGRAPHIE

De nouvelles demandes sont apparues en cartographie : le principe est de combiner de grandes zones d'intérêts avec un niveau de détails élevé dans un temps réduit.

Le terme cartographie mobile peut désigner plusieurs applications. En effet la « cartographie mobile » désigne l'action de cartographier à partir d'un système mobile. Ce système peut être aéroporté (satellite, avion, hélicoptère, drone), naval (bateau, péniche) ou bien terrestre (voiture, quad, vélo). Dans cette partie, on s'intéressera plus particulièrement aux applications terrestres.

2.1 QU'EST-CE QU'UN SYSTEME MOBILE TERRESTRE DE CARTOGRAPHIE ?

Les systèmes de relevés de données terrestres mobiles, appelés « Système Mobiles terrestres de Cartographie », ou « Mobile Mapping System » (MMS) sont apparus depuis une dizaine d'années. Ils sont maintenant en plein essor du fait de leur avantage de bénéficier d'une meilleure précision que les systèmes aériens et un niveau de détails plus fin. Ce sont des systèmes intermédiaires, entre les systèmes aéroportés et terrestres fixes, initialement conçus avec des appareils de prises de photos embarqués type streetview (GoogleStreetView). Des domaines variés d'applications sont aujourd'hui en pleine expansion comme dans le cadre d'aménagements urbains, d'architecture ou de gestion des tracés de voiries.

C'est plus récemment que des scanners lasers 3D ont été ajoutés. Ils réalisent des relevés 3D d'une bonne précision et enregistre une grande quantité d'informations.

Ces systèmes réalisent plusieurs traitements en temps réel tels que :

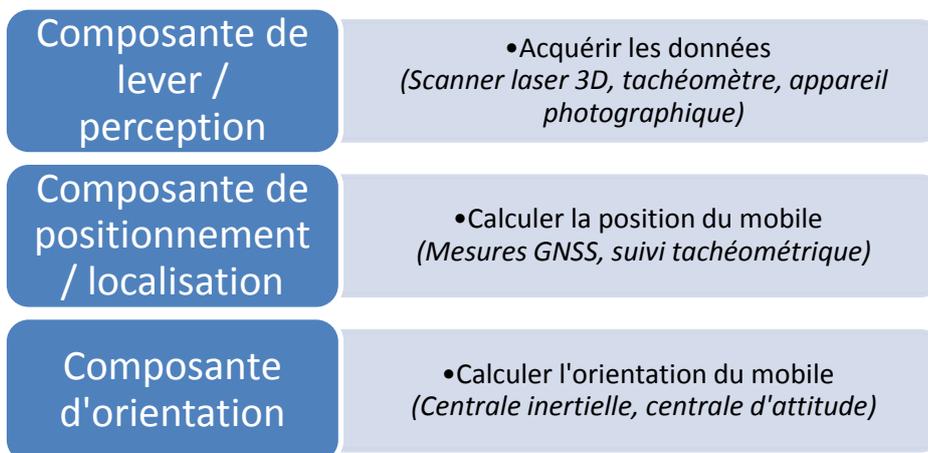
- ✚ La localisation du véhicule,
- ✚ La cartographie des lieux,
- ✚ La visualisation des données.

Chaque système de relevés de données terrestres mobiles peut se décomposer en trois parties principales :

- La composante de lever (caméra, scanner laser, appareil photo, tachéomètre)
- La composante de positionnement (mesures GNSS, suivi tachéométrique)
- La composante d'orientation (centrale inertielle, centrale d'attitude)

Ces systèmes sont embarqués sur une plateforme mobile (véhicule, chariot, vélo, individu.. .) et possède un système de communication et de stockage des données.

Plateforme mobile



2.2 COMPOSANTE DE PERCEPTION /LEVER

Tout dispositif de MMS doit disposer d'un instrument de mesure. Ces appareils peuvent utiliser différentes méthodes de travail : le lever tachéométrique classique, la lasergrammétrie mais aussi la photogrammétrie à l'aide de clichés issus de points de vues différents.

2.2.1 Tachéométrie

Dans son TFE PASCAL Alexandre [PASCAL A., 2011] présente un dispositif de tachéométrie mobile. En utilisant un appareil motorisé il est possible d'automatiser le fonctionnement du tachéomètre. Il ne s'agit pas dans ce cas-là de réaliser un lever complet de la zone (façade, ouvrage d'art..) mais de cibler des points importants. Cette technique évite le traitement d'une trop grande quantité de données.

2.2.2 Lasergrammétrie

Les systèmes équipés en lasergrammétrie possèdent un ou plusieurs scanners lasers. Cette méthode apporte une plus grande exhaustivité des données par rapport à la tachéométrie.

Par le biais d'une haute fréquence de rotation de la tête de scanner, l'appareil effectue une numérisation complète de plusieurs milliers de points de l'environnement. Si le dispositif possède plusieurs scanners, ils peuvent être disposés de façon à pouvoir numériser une plus grande partie de la zone en les plaçant avec un angle de lacet et de tangage. Il sera alors possible de scanner une partie des rues perpendiculaire à la rue étudiée ainsi que les objets situés au-dessus du véhicule, comme les ponts, les panneaux de signalisation. Chaque scanner acquiert une partie de la scène, puis les nuages de points sont consolidés.

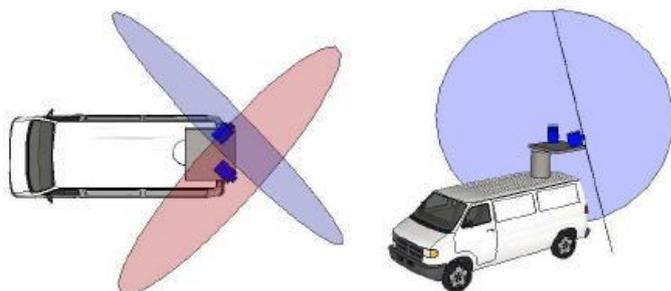


Figure 12 : Exemple de position des scanners lasers avec un angle de lacet et de tangage (source [YOO H. 2011])

2.2.3 Photogrammétrie

Utilisant la stéréoscopie, cette technique se base sur plusieurs clichés avec des prises de vue différentes afin d'obtenir la troisième dimension. Si les prises de vue sont issues d'appareils photo différents on parlera de stéréoscopie spatiale (parallaxe horizontale). En revanche, si les clichés sont issues du même appareil mais capturés un instant Δt alors la stéréoscopie devient temporelle (parallaxe de mouvement).

2.3 COMPOSANTE POSITIONNEMENT/LOCALISATION

La composante de positionnement a pour but de générer la position géoréférencée du mobile par rapport à un référentiel terrestre.

Deux cas sont à différencier : Les systèmes souterrains et les systèmes utilisés en extérieur.

2.3.1 Les systèmes souterrains

Le suivi tachéométrique

Il consiste à repérer la position du mobile au cours du temps de façon automatique et par le biais d'une station totale via un prisme situé sur le mobile. L'appareil repère et enregistre la position à l'aide de deux modes :

- Le mode ATR (Automated Target Recognition). La station totale repère où se trouve le prisme dans un certain champ de vision.
- Le mode Lock, qui est un verrouillage et un suivi continu du prisme

Suivant la cadence des mesures, la station totale effectue des mesures d'angles et de distances plusieurs fois par seconde. La vitesse de déplacement du mobile est un paramètre important car c'est elle qui va définir la distance entre deux mesures successives du tachéomètre.

De plus, une parfaite synchronisation entre la mesure de distance et la mesure d'angles est nécessaire. Le décalage temporel entre ces deux mesures doit être pris en compte, il est appelé temps de latence. En cinématique, ne pas considérer le temps de latence engendre des erreurs systématiques sur les coordonnées. Cette erreur est beaucoup plus importante sur les coordonnées planimétriques, que sur l'altitude à cause du déplacement du chariot dans un plan horizontal. Le temps de latence peut être spécifié dans la fiche technique de l'appareil du constructeur et résulte du fait de l'impossibilité à réaliser une mesure d'angles et de distance en même temps. Ce décalage temporel Δt (typiquement de quelques ms) engendre un écart de position.



Figure 13 : Suivi tachéométrique
source : site web Leica

Le temps de latence et le décalage qu'il engendre doit directement être mis en relation avec la vitesse de déplacement du système mobile. Plus la vitesse de déplacement est élevée, plus le chariot parcourt de distance entre les deux instants de mesure et donc plus cet écart sera important.

Les systèmes intégrant une centrale inertielle peuvent être aussi utilisés en milieu souterrain, mais ce système sera expliqué dans la partie relative à la composante d'orientation.

2.3.2 Les systèmes utilisés en extérieur

Mesures GNSS

Ce paragraphe traite seulement une partie du principe de positionnement par satellites, pour plus de précisions se référer à la thèse de ALSHAWA M. [ALSHAWA, 2010]

Lors d'une acquisition mobile, une antenne GNSS est placée sur le haut du véhicule. Ce récepteur enregistre les observations issues des satellites. Le principe consiste à capter des signaux provenant d'au minimum trois satellites et à réaliser des mesures de distance entre ces derniers et le récepteur au sol. Chacune des sphères est centrée à partir de la position connue du satellite (calculée avec les éphémérides) au moment de la mesure de distance. Les rayons des sphères correspondent aux mesures de distance et l'unique point d'intersection des cercles (ou sphères) représente le positionnement du récepteur à la surface de la Terre. Si plus de trois satellites sont observés, la précision et la fiabilité du positionnement est de meilleure qualité. Toutefois, la position dans l'espace des satellites doit être prise en compte. Avec l'information sur le GDOP (Geometrical Dilution Of Precision), il est possible de quantifier l'effet de la configuration des satellites sur la précision du positionnement. Le GDOP peut être vu comme le rapport entre l'erreur de positionnement et l'erreur de la pseudo-distance.

Les récepteurs GNSS sont capables de capter des informations des signaux de constellations différentes (NAVSTAR, GLONASS, BEIDOU et COMPASS, prochainement GALILEO). Travailler en multi-constellations influe directement sur la qualité du positionnement en augmentant la probabilité de capter des satellites visibles.

La majorité des MMS utilisent le GPS en RTK (Real Time Kinematic) qui est un cas particulier du DGPS. Cette solution est adaptée à une utilisation cinématique et offre une incertitude de position qui est de l'ordre de quelques centimètres si le récepteur reçoit les corrections différentielles.

2.4 COMPOSANTE D'ORIENTATION

Lorsqu'un objet est dans un espace en trois dimensions, on s'intéresse en général à sa position à chaque instant t en repérant la position de son centre d'inertie au cours du temps par rapport à un référentiel donné. Mais la connaissance de cette position est insuffisante pour contrôler sa trajectoire, il faut également connaître son orientation.

Plusieurs dispositifs sont capables de déterminer cette orientation. Les centrales inertielle mais aussi les centrales d'orientation.

2.4.1 Centrale inertielle / INS (Inertial Navigation System)

Une INS renseigne sur la position du mobile ainsi que son orientation dans l'espace.

L'INS est composée d'une unité de mesure inertielle nommée IMU pour (Inertial Measurement Unit) et d'un calculateur équipé d'un filtre de Kalman. Trois accéléromètres et trois gyroscopes sont présents lorsque la plate-forme est stabilisée ou trois gyromètres pour les cas des centrales inertielle à composants liés.

Les trois capteurs d'accélération disposés de façon orthogonale détectent de l'accélération linéaire selon les axes X, Y et Z. Et les trois capteurs de rotation renseignent sur la détection des rotations autour des axes X, Y et Z.

Les mouvements et les 6 degrés de libertés relatifs au mobile sont donc identifiables.

Ces centrales présentent des différences d'exécution. Les systèmes inertielle de navigation actuels sont pour la plupart du temps, conçus comme des systèmes « strap-down ». Tous les capteurs sont montés de façon fixe sur une base commune, mécaniquement rigide (« strapped down »). Des gammes de capteurs d'attitude et d'orientation, combinant la miniaturisation grâce à la technologie MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) et les mesures de qualité sont de nos jours disponibles.

La performance d'une centrale inertielle repose sur la neutralisation du biais dans les mesures d'accélération. Celui-ci entraîne un défaut de position qui augmente avec le carré de la durée de la mesure. Une dérive de position est présente si aucun calcul de correction n'est appliqué. Cette dérive dépend de la gamme de la centrale inertielle et elle est de l'ordre de 2 centimètres en 10 secondes d'acquisition pour un appareil milieu de gamme.

Exemple de calcul de dérive :

Pour une centrale inertielle présentant un défaut d'offset de $25\mu\text{g}$

L'écart de mesure se calcule comme le chemin qui serait parcouru au terme d'un temps déterminé :

$$\Delta s = 1/2 \cdot a_0 \cdot T^2 \text{ avec } a_0 = 25 \cdot 10^{-6} \times 9,81$$

Pour une acquisition à 5km/h, $T = 72$ secondes pour un chemin parcouru de 100 mètres :

$$\text{Alors ; } \Delta s = 1/2 \times 25 \cdot 10^{-6} \times 9.81 \times 72^2 = 0.636 \text{ m}$$

Il est possible d'ajouter des corrections pour limiter cette dérive. Elles peuvent être multiples :

- Ajout de capteurs supplémentaires (Odométrie)
- Calcul de corrections a posteriori (Points de calage le long du parcours)
- Compensation de Schuler
- Amélioration par ZUPT (Zero Velocity Update Procedure)

Avantages / Inconvénients

Les centrales inertielles offrent l'avantage d'être une solution complète donnant la position, l'orientation et les paramètres d'accélération et de rotation du mobile. Elles disposent d'un haut rendement ainsi qu'une fréquence d'échantillonnage élevée (100 – 200 Hz). De nos jours, les INS présentent un encombrement très faible et peuvent être placées facilement dans des véhicules mobiles.

Cependant, les INS étant un système de navigation à l'estime, la position et la vitesse sont calculées à partir de conditions initiales fournies par un dispositif extérieur. De plus, les centrales inertielles présentent de fortes dérives qu'il est possible de diminuer ou d'éliminer grâce à des capteurs supplémentaires, des modes opératoires spécifiques ou bien par le calcul de corrections a posteriori. Leurs prix sont encore très élevés bien qu'ils aient beaucoup baissé lors des dernières années.

2.4.2 Centrale d'attitude

Comme une centrale inertielle, une centrale d'attitude ou d'orientation informe sur l'orientation du mobile. (Exemple : Centrale fabriquée par les sociétés Octans ou SMC) Il en existe deux types :

- Les centrales d'orientation stabilisées fournissent des données géoréférencées, mais leur mise en œuvre est difficile.
- Les centrales d'orientation à composants liés proposent un encombrement plus modéré mais génèrent leurs données dans un repère local. Ce paragraphe résume les généralités sur les centrales d'attitude et ne traite pas de leur fonctionnement. Pour plus de précisions, se référer au TFE de Alexandre PASCAL. [PASCAL A, 2011]

2.5 LES DIFFERENTS SYSTEMES MOBILE TERRESTRE DE CARTOGRAPHIE 3D

De nombreux systèmes sont apparus lors des dix dernières années. D'abord construits comme prototype par des chercheurs dans des laboratoires universitaires, les MMS sont de nos jours créés par des sociétés commerciales d'ingénierie. Véritables intermédiaires entre les dispositifs aériens et terrestres fixes, les MMS proposent un large choix d'applications et peuvent convenir à plusieurs domaines d'activités.

Présentation de quelques systèmes existants :

2.5.1 Les Systèmes de Numérisation 3D Embarqués sur des Véhicules.

Système Pegasus One – Société Leica :



Figure 14 : Système Pegasus One embarqué sur le toit d'un véhicule

Développé par la société Suisse Leica et monté sur le toit d'un véhicule, ce système est composé de nombreux capteurs et appareils de mesures. Il utilise 6 appareils photos numériques offrant une vue à 360° autour du véhicule et un scanner laser 3D (ou un profilomètre) pour établir le relevé. L'acquisition des données est réalisée par le biais de deux méthodes : lasergrammétrie et photogrammétrie.

L'avantage principal de ce système est que l'utilisateur peut travailler dans les deux modèles et associer la photogrammétrie à la lasergrammétrie, ce qui offre plus de visibilité et colorise le nuage de points.



Figure 15 : Nuage de points issu d'une acquisition avec le système Pegasus One - source : site internet Leica.

Le véhicule est localisé tout le long de son parcours par le biais d'une antenne GNSS, une centrale inertielle et un odomètre. Lorsque la couverture GPS est insuffisante la centrale inertielle permet d'obtenir avec précision le positionnement du véhicule. En réalisant une fusion des données entre les appareils de positionnement [GRINSTEAD et al, 2006], la position du véhicule est connue à chaque instant. On obtient donc la trajectoire parcourue par le véhicule. Des points de recalages peuvent être créés afin de limiter la dérive de la centrale inertielle.

Lors d'une démonstration au lycée Dorian à Paris effectuée par la société Leica, j'ai pu prendre part à une acquisition de données et participer aux phases de post-traitement. En s'appuyant sur des

points de contrôles dispersés le long du trajet, le système assure une précision inférieure à 2 centimètres dans des conditions difficiles (milieu urbain, canyons urbains).

Il existe d'autres types de MMS pour acquérir et produire massivement des nuages de points et des images géoréférencées. Ces systèmes sont relativement identiques puisqu'ils sont tous équipés d'une antenne GNSS, d'une centrale inertielle et d'un odomètre pour connaître la trajectographie. Les différences se font essentiellement sur les appareils de perception (scanner et appareils photos) et leurs caractéristiques.

2.5.2 Les systèmes mobiles à environnement de navigation restreint

Les chariots de mesures en milieu ferroviaire

Ces chariots sont des systèmes mobiles de cartographie à partir de voies ferrées. Ils se déplacent sur la voie, leur trajectographie est donc contrainte par la géométrie de la voie. La partie navigation du système peut être constituée soit d'un couple GPS/INS ou bien par un système de suivi tachéométrique en cas de cartographie dans le milieu souterrain. Ils sont mobiles et facilement transportables, ce qui est très utile pour changer de voie par exemple. De plus, ils sont capables d'effectuer différentes missions : de l'étude de voie, de gabarit ou de nouveaux projets

Exemples : Le Swiss Trolley développé par l'institut de géodésie et de photogrammétrie de Zurich, le Krab Slight fabriqué par la société KZV et le système GRP 5000 développé par Amberg Technologies.



Figure 17 : Swiss Trolley (source : <http://www.geometh.ethz.ch/research/track>)



Figure 16 : GRP 5000 (source : site web Amberg)

Les détails sur l'utilisation du GRP 5000 et son fonctionnement seront traités dans les parties suivantes.



Figure 18 : Krab Slight (source : KSV)

2.6 PRINCIPE EN LASERGRAMMETRIE MOBILE

Il existe deux modes de fonctionnement pour la lasergrammétrie mobile, selon la façon de combiner les informations de perception et de localisation [VOSELMAN et MAAS, 2010] :

- ✚ A la volée (« on the flight » ou « on-drive »)
- ✚ Pluri-statique (« stop and go »).

2.6.1 A la volée

L'objectif de ce mode de travail est de numériser, sans discontinuité, l'intégralité de la zone. Le relevé laser s'effectue à partir de la rotation de la tête du scanner et par le biais du déplacement du mobile. L'acquisition du laser crée un hélicoïde.



Figure 19 : Schéma du principe "à la volée" (source : notice d'utilisation Ambreg Rail)

2.6.2 Pluri-statique

Avec cette deuxième méthode, la capture de l'environnement s'effectue en mode statique. La position du mobile ne change pas lors de l'acquisition. Ces captures sont faites à des endroits différents. Après avoir effectué une acquisition, le mobile se déplace jusqu'à la prochaine position.



Figure 20 : Schéma principe « pluri-statique » (source : notice d'utilisation Ambreg Rail)

Le balayage peut s'effectuer sur un seul axe de rotation, c'est le cas du laser scanner 2D, ou bien sur deux axes de rotation laser scanner 3D. Après avoir terminé, le premier donnera une coupe transversale alors que le second offrira un nuage de points. Ce principe offre l'avantage d'économiser de la mémoire si seules quelques coupes à des endroits précis sont nécessaires. Il offre aussi l'avantage d'avoir de meilleures précisions du fait que le chariot reste immobile.

2.6.3 Par Intervalles

Un autre principe peut être intégré aux deux précédents, c'est celui de l'acquisition par intervalle.

L'opérateur va définir un pas (soit un intervalle de temps, soit un intervalle de distance). Par exemple, l'opérateur peut choisir d'acquérir un scan toutes les 2 secondes ou bien tous les 2 mètres.



Figure 21 : Schéma principe "intervalles" (source : notice d'utilisation Ambreg Rail)

2.7 VALEUR AJOUTEE DES MMS

2.7.1 Les utilisations

Les systèmes de cartographies utilisés en usage dynamique présentent de nombreux avantages :

- ✓ Rapidité d'acquisition à très haut rendement
- ✓ Relevé sécurisé sans contact
- ✓ Exhaustivité des données (relevé de l'existant)
- ✓ Aide à la compréhension, à la gestion du patrimoine
- ✓ Aide à la prise de décisions à partir d'un existant numérisé en trois dimensions
- ✓ Base de données inestimables pour répondre aux nouvelles problématiques

Les données traitées par MMS constituent des livrables de plusieurs types et peuvent être destinés à différents corps de métiers :

- | | |
|--------------------------------------|---|
| ✓ Plan topographique 2D/3D vectoriel | ✓ Détection de conflit, simulation d'interférences (étude de gabarit, réseaux filaires) |
| ✓ Profil en long, Profil en travers | ✓ Données pour les SIG 3D, Maquette numérique 3D, modèle BIM, CIM. |
| ✓ MNT (Modèle numérique de terrain) | |
| ✓ MNS (Modèle numérique de surface) | |
| ✓ Calcul de cubatures | |

Les avancées continues des technologies de la mesure révolutionnent les domaines de l'étude topométrique et ouvrent un champ de possibilité infini aux professionnels de la mesure. Avec la maîtrise et l'adaptation des technologies lasergrammétriques, mais aussi les progrès dans les systèmes de positionnement, des relevés rapides et à grande échelle sont désormais possibles.

3. LE CHARIOT DE MESURES FERROVIAIRE : LE GRP 5000

Les chariots de mesures sont utilisés dans le milieu ferroviaire car les méthodes de relevés classiques réalisées au tachéomètre ou par des engins de chantier sont souvent fastidieuses et économiquement trop chères. Pour la réalisation des travaux de relevés « tel que construit », l'utilisation d'un système mobile, capable d'acquérir à la fois la géométrie interne de la voie et l'environnement extérieur se présente comme une solution efficace.

3.1 LES SYSTEMES GRP FX

Le GRP System FX développé par l'entreprise Suisse/Allemande Amberg Technologies est une solution « tout en un » pour l'étude de voies ferrées et de l'environnement ferroviaire. Avec trois modèles disponibles, la société Amberg propose plusieurs choix. Le GRP 1000, la version la plus basique qui enregistre seulement les paramètres de la voie. Le GRP 3000 une extension du GRP 1000, permettant d'obtenir des profils. Puis le GRP 5000, appareil le plus récent et le plus perfectionné de la société. Un scanner laser, positionné en hauteur sur une batterie, produit une numérisation 3D.



Figure 22 : chariot de mesures GRP System FX (source : Site web Amberg Technologies)

| Modèle | Appareil Lasergrammétrique |
|----------|-------------------------------|
| GRP 1000 | Aucun |
| GRP 3000 | Profiler |
| GRP 5000 | Scanner laser 3D |

Dans toutes les versions, les paramètres internes de la voie sont enregistrés (l'écartement, le dévers, l'alignement et la position de l'axe). L'avantage principal du GRP 5000 est que le scanner laser 3D enregistre de façon continue une multitude de profils avec une densité de points importante. Celle-ci dépend du nombre de rotations par seconde effectuées par la tête du scanner, mais aussi de la vitesse du déplacement de la plateforme. Plusieurs paramètres peuvent être modifiés comme le nombre de points pris par rotation du scanner ou bien le nombre de rotations par seconde. Cet aspect sera développé plus tard.

3.2 GRP 5000

3.2.1 Description

Le système se décompose en 4 éléments :

Le chariot. C'est un tri-roues en forme de T. Le bras principal, reliant le côté mono-roue au côté bi-roue est composé du scanner laser 3D et du support de sa batterie ainsi que du bras servant à supporter l'ordinateur portable. Le bras secondaire est lui composé de deux roues. Ces bras contiennent également tous les capteurs capables d'acquérir les paramètres de la voie. Le chariot peut s'adapter à de nombreux écartements de voie. En fonction des pays celui-ci peut être différent de 1067mm à 1676mm.

Le scanner. Le scanner laser 3D utilisé est un HDS7000 fabriqué par la société Leica. Il employé comme un scanner 2D, en bloquant sa rotation autour de l'axe Z. Sa fréquence (ou vitesse de rotation) peut varier de 6,5hz à 50hz, ce qui génère un maillage de 2x2cm si l'opérateur avance à la vitesse de 1.1 m/s soit 4 km/h. Il est positionné sur le socle de la batterie (en forme de colonne) offrant une élévation plus importante.

Un ordinateur portable est connecté au système et offre la possibilité de visualiser les données en temps réel via le logiciel Amberg Rail. Il est conseillé d'utiliser un ordinateur résistant aux chocs et à la pluie. Des paramètres peuvent aussi être affichés à l'écran comme la vitesse d'acquisition et le verrouillage de la connexion entre le tachéomètre et le chariot.

Le géoréférencement du GRP 5000 peut être assuré par deux méthodes : par mesure GPS ou par suivi tachéométrique. Dans ce second cas, une connexion entre le prisme situé au-dessus du scanner laser 3D et la station totale est opérée. C'est évidemment cette seconde méthode qui est utilisée par la RATP du fait que les acquisitions se font essentiellement en milieu souterrain.

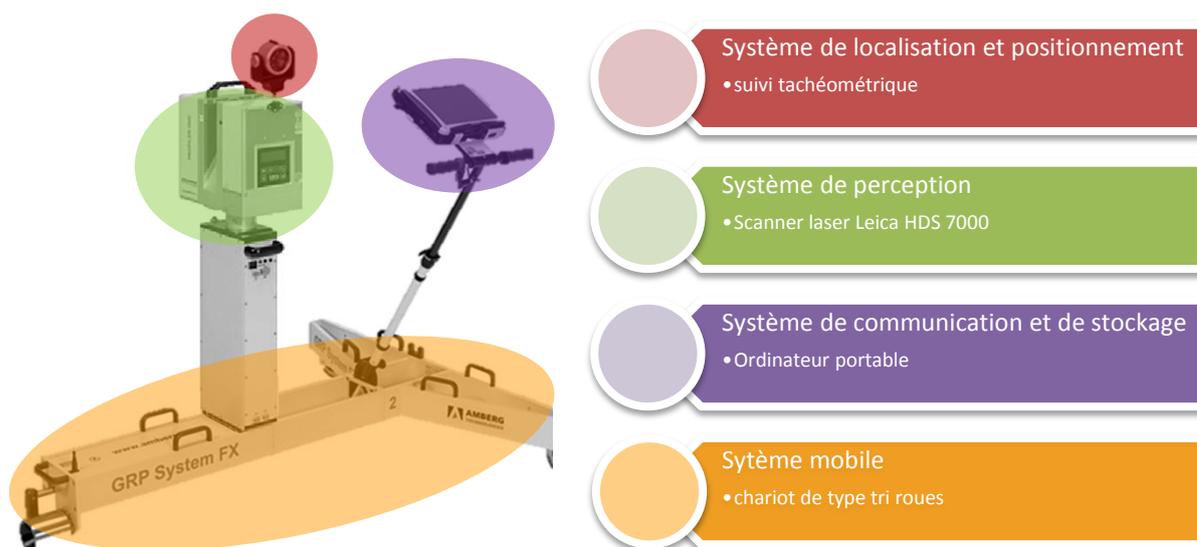


Figure 23 : les systèmes du GRP 5000

3.2.2 Les capteurs

- ✓ L'odomètre est le capteur renseignant sur la distance totale parcourue. Il se trouve sur le côté mono-roue du chariot et compte les tours effectués par la roue. En connaissant précisément le diamètre de la roue et le nombre de tours effectués, l'odomètre est capable de mesurer la distance totale parcourue (distance 3D).
- ✓ L'inclinomètre est un type de capteur qui utilise un simple principe de niveau à bulle mais avec une haute précision. Un système d'électrodes capte la position exacte de la bulle dans une solution électrolytique. Les changements de niveau sont enregistrés et stockés. Il est situé dans la partie centrale du chariot et informe sur la valeur des angles de roulis et donc son inclinaison par rapport au plan horizontal.
- ✓ L'extensomètre mesure l'écartement entre deux rails et fonctionne comme un potentiomètre. Quand l'écartement entre les deux rails varie, l'extensomètre est poussé vers l'extérieur ou l'intérieur ce qui fait varier une résistance.

3.3 MESURES TERRAIN – METHODOLOGIE

Préparation

Les mesures collectées sont de deux types : les données issues du scanner laser 3D et les mesures de géométrie de la voie. Toutes les mesures sont rassemblées dans un projet, puis dans des jobs créés au préalable. Un projet contient une des stations et inter-stations de la ligne étudiée (Exemple de nom de projet : Ligne 11_station_arts_et_métiers). Un job contient les mesures effectuées par station. La façon la plus pratique de procéder est de créer un job par voie et par station totale. (Exemple de nom de Job : station_arts_et_métiers_1000_Voie1).

Les coordonnées vraies des points stationnés par la station totale peuvent être connus ou ignorés suivant l'état d'avancement du dossier. Dans le cas le plus courant, ils sont connus et dans le système RGF93 en projection conique conforme zone 8 c'est-à-dire en CC49. Pour cela, les équipes topographiques de la RATP ont préalablement réalisé des mesures GPS à la surface et à proximité des entrées de métro. Puis, en utilisant la méthode du centrage forcé il est possible de descendre dans les tunnels par le biais de visées successives. Tout au long de cette étape, il est nécessaire de tout mettre en œuvre pour minimiser les possibles erreurs. Chaque visée est effectuée en cercle à droite et cercle à gauche, puis répéter plusieurs fois. Chaque point stationné par le tachéomètre est ainsi connu avec une bonne précision.

Un tachéomètre positionné sur un point connu doit impérativement viser 2 points de référence lors de la mise en station et 4 dans le cas d'une station libre.

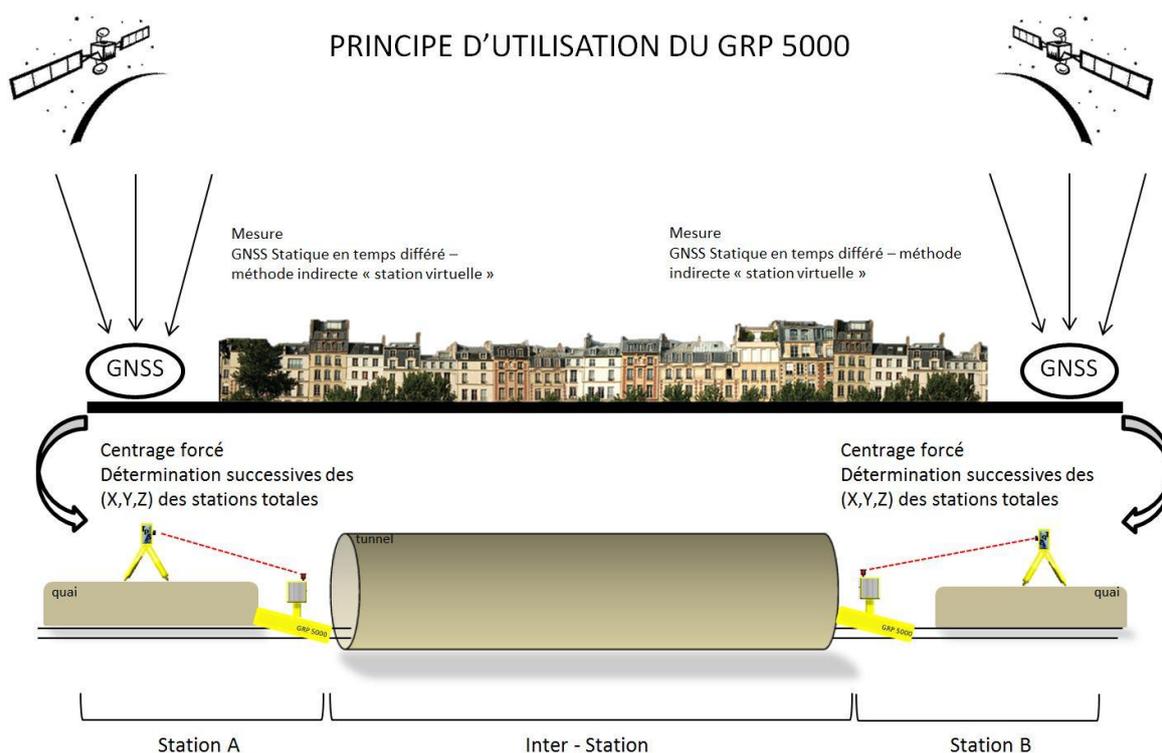


Figure 24 : Principe d'utilisation du GRP 5000

Mesures

Le chariot est assemblé et monté sur la voie. Dans un premier temps, l'opérateur doit procéder à une calibration de l'inclinomètre. Pour cela, une mesure de dévers est effectuée puis comparée à une autre mesure après avoir appliqué une rotation de 180° sur le même emplacement. Si les deux mesures ont des valeurs hors tolérance cette opération doit être réitérée.

Ensuite, la station totale doit être connectée avec le modem du chariot. La communication est faite par liaison radio. Ainsi chaque mesure du tachéomètre est enregistrée et envoyée vers l'ordinateur portable.

Puis l'utilisateur renseigne le sens d'avancé (sens PK croissant ou décroissant) ainsi que la configuration du chariot (coté deux roues positionné à droite ou à gauche par rapport au sens d'avancé) qui seront utiles pour effectuer le géoréférencement.

Voici les paramètres relatifs à la géométrie interne de la voie que le système GRP 5000 mesure ou calcule :

- Distance totale parcourue
- Dévers
- Torsion
- Rayon
- Ecartement
- E, N, H
- Azimut
- Pente longitudinale
- Flèche horizontale courte, longue
- Flèche verticale courte, longue

3.4 GEOREFERENCEMENT

Le calcul pour le géoréférencement des points scannés peut être décomposé en plusieurs étapes (figure 25).

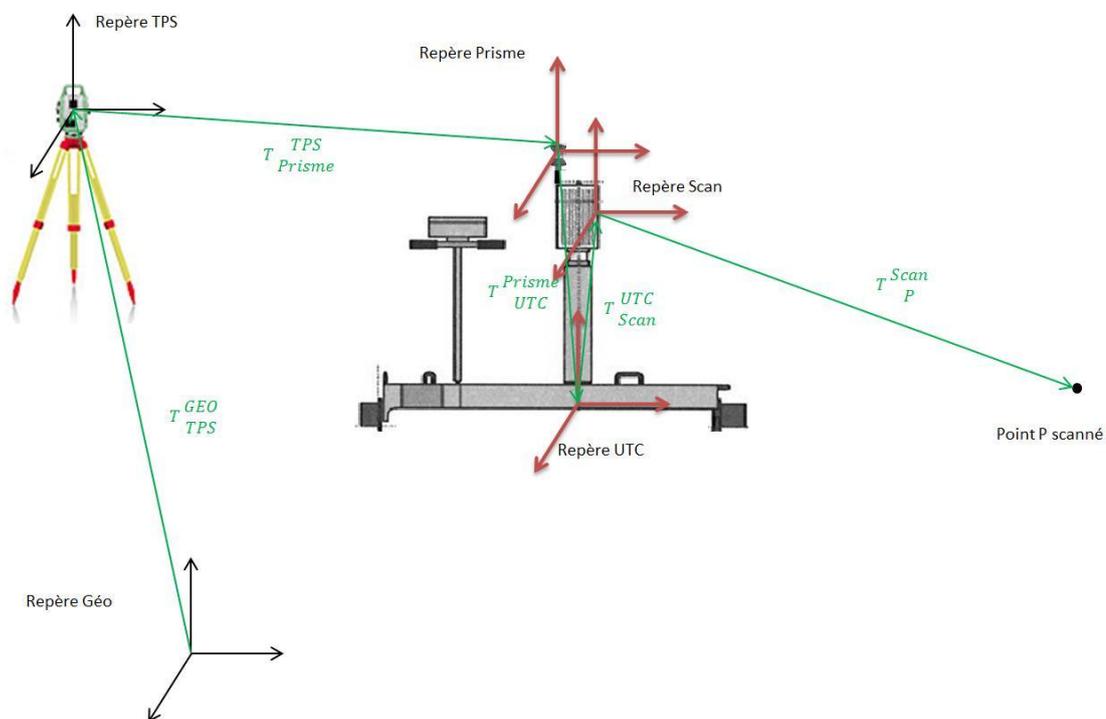


Figure 25 : Schéma principe du géoréférencement du GRP 5000

Explications des repères

Les repères terrestres :

Le repère GEO représente les repères terrestres géocentriques finaux dans lequel l'utilisateur veut exprimer les coordonnées des points mesurés.

Les repères propres aux appareils

Repère CTC associé au chariot / Repère UTC associé au chariot.

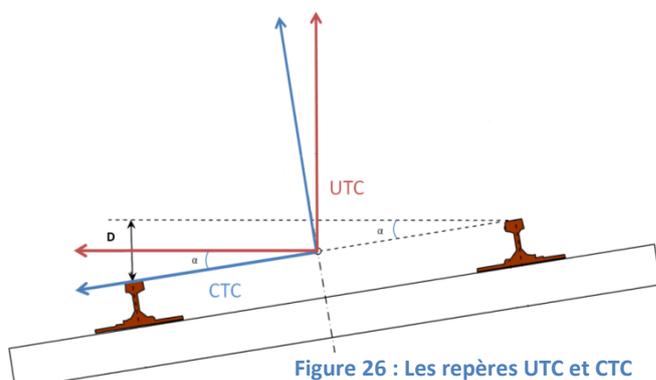


Figure 26 : Les repères UTC et CTC

Avec

UTC : Uncanted Track Coordinate system

CTC : Canted Track Coordinate system

α : Angle de dévers

D : dévers

Le repère scanner, repère TPS et le repère prisme, représentent les repères associés aux appareils et sont utiles pour comprendre la décomposition des étapes du géoréférencement.

Solution mathématique.

Dans ce paragraphe :

- Soit R_b^a une matrice de rotation du repère A vers le repère B.
- Soit T_b^a une translation du repère A vers le repère B.

Une rotation en trois dimensions peut être assimilée à 3 rotations, une autour de chaque axe tel que :

$$R_1(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad R_2(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad R_3(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

L'objectif est de déterminer les paramètres de la transformation rigide relative aux six mouvements de la plateforme mobile à chaque instant correspondant aux six degrés de liberté (figure 27). Une transformation rigide est une transformation comprenant des translations et des rotations.

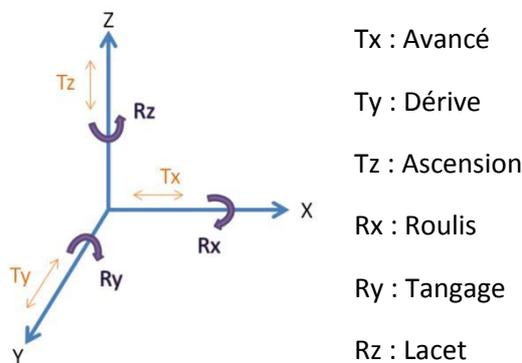


Figure 27 : Représentation des 6 degrés de libertés

Première étape :

Calculer les coordonnées du point scanné dans le repère associé au scanner laser.

Soit P un point scanné dans le repère du scanner laser. Avec, d la distance séparant l'objet du scanner et θ l'angle du scannage, on a :

$$R_P^{SCAN} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ d \cdot \cos(\theta) \\ d \cdot \sin(\theta) \end{bmatrix}$$

Deuxième étape :

Le second objectif est d'aligner le repère associé au chariot lorsqu'il est incliné (CTC) en UTC.

Le chariot se déplaçant uniquement sur les deux files de rails, il est soumis au dévers de la voie. La valeur du dévers est connue grâce aux observations mesurées par l'inclinomètre. Celle-ci est ensuite utilisée pour transformer les points scannés en CTC vers le système UTC.

$$T_P^{UTC} = T_{SCAN}^{UTC} + R_{CTC}^{UTC} \cdot T_P^{SCAN}$$

Troisième étape :

Pour aligner les axes des systèmes UTC et GEO final, des translations sont nécessaires.

$$T_{TPS}^{GEO}, T_{TPS-prisme}^{GEO} \quad \text{et} \quad T_{prisme-UTC}^{GEO}$$

Enfin on a :

$$\begin{aligned} T_P^{GEO} &= T_{TPS}^{GEO} + T_{TPS-prisme}^{GEO} + T_{prisme-UTC}^{GEO} + R_{UTC}^{GEO} \cdot T_P^{UTC} \\ &= T_{TPS}^{GEO} + T_{TPS-prisme}^{GEO} + T_{prisme-UTC}^{GEO} + R_{UTC}^{GEO} \cdot (T_{SCAN}^{UTC} + R_{CTC}^{UTC} \cdot T_P^{SCAN}) \\ &= T_{TPS}^{GEO} + T_{TPS-prisme}^{GEO} + T_{prisme-UTC}^{GEO} + R_{UTC}^{GEO} \cdot T_{SCAN}^{UTC} + R_{UTC}^{GEO} \cdot R_{CTC}^{UTC} \cdot T_P^{SCAN} \end{aligned}$$

S'il n'y a pas de rotation entre l'origine du repère UTC et l'origine du repère CTC (dévers nul) alors

R_{UTC}^{CTC} est une matrice unité.

Le décalage T entre le prisme et l'origine du repère UTC a été déterminé lors d'une calibration.

Le décalage T entre l'origine du repère scanner et l'origine du repère UTC a été déterminé lors d'une calibration (ANNEXE 3).

$$\text{Et ; } R_{UTC}^{GEO} = R_{TPS}^{GEO} \cdot R_{prisme}^{TPS} \cdot R_{UTC}^{prisme}$$

Roulis – enregistré par l'inclinomètre

Lacet – l'extensomètre permet de ne pas avoir de lacet

Tangage – Il n'y a pas d'inclinomètre positionné dans le sens longitudinal, parallèle au sens d'avancement du chariot. L'angle de tangage est déterminé en fonction des visées successives de la station totale sur le prisme.

3.5 POST-TRAITEMENT

Après la prise des mesures sur le terrain, les données doivent être traitées sur ordinateur.

La première étape consiste à récupérer les données enregistrées par le chariot de mesures. Les fichiers sont de deux types : Les fichiers *.sen* et *.zfs*

- ✚ Les fichiers *.sen* correspondent aux paramètres de la voie. Ils sont composés d'observations effectués par la station totale et des différentes positions du chariot. On retrouve les valeurs mesurées de l'inclinomètre, la distance totale parcourue par l'odomètre, les valeurs d'écartement, etc. Dans l'en-tête de ces fichiers, on trouve la configuration interne du chariot et de la station totale (ANNEXE 2).
- ✚ Les fichiers *.zfs* où se trouvent les données issues du scanner laser 3D sont composées d'observations effectuées par le scanner laser.

L'objectif est de faire concorder les deux types de fichiers pour assimiler les lignes de scans aux bonnes positions du chariot. Une parfaite synchronisation temporelle entre la station totale et le scanner laser est indispensable. La synchronisation temporelle de ces données est assurée au moyen d'une horloge commune (time-stamp). Dans la pratique, c'est un nombre qui change de valeurs à chaque intervalle Δt . Durant la phase post-traitement, c'est au vu de ce nombre que les données sont classées.

Après calcul des coordonnées de la station totale, un fichier texte (*.txt*) contenant le matricule de la station, ses coordonnées tridimensionnelles ainsi que son G0 est créé. Il est ensuite intégré dans un job. On associe donc un jeu de coordonnées d'une station à un fichier de mesures.

3.5.1 Le logiciel Amberg Rail et ses applications

Le logiciel Amberg Rail est employé dans le milieu ferroviaire mais aussi dans le cadre d'auscultations et d'études de tunnels. Le logiciel est utilisé au cours de la phase terrain ainsi que lors du traitement au bureau et contient plusieurs modules de travail.

Amberg rail basic : C'est la plateforme d'Amberg rail, ce module créé et gère les projets ou les jobs. Il contient toutes les configurations et les paramètres du logiciel.

Module Survey : Ce module calcule les données du chariot et il est utilisé uniquement lors de la phase de post-traitement. Il analyse les paramètres géométriques internes de la voie telle que construite. Celle-ci peut être affichée graphiquement à l'écran dans un maillage de coordonnées. En complément des données graphiques, les résultats sont affichés dans un tableau où les valeurs hors tolérance des paramètres seront surlignées en rouge. Toutes les mesures peuvent être exportées dans différents formats ; En *.DXF*, format compatible AUTOCAD et en format *.ASCII*, susceptible d'être ouvert dans un tableur Microsoft Excel.

Module étude de gabarit (Clearance) : L'objectif de ce module est de dresser des études de gabarit. Avec l'aide des données acquises par le laser scanner 3D, des paramètres géométriques de la voie et des gabarits des trains saisis dans la base de données, il est possible de savoir si l'enveloppe du train est adaptée pour circuler dans les tunnels. Des filtres peuvent être appliqués de sorte à montrer les zones de conflit. Selon la vitesse du train et l'angle de dévers, le comportement du train est modélisé. Avant l'apparition de cette technique, un train réalisé en carton ou en bois était confectionné puis conduit à vitesse réelle dans les tunnels afin de voir s'il y avait suffisamment d'espace.

Il est possible de dessiner des coupes automatiques à intervalles réguliers ou à des endroits spécifiés manuellement. Ces coupes donnent un premier ordre d'idée de l'environnement, mais ne pourront pas être utilisées pour le dessin car chaque point est relié au suivant sans tenir compte des masques existants.

3.5.2 Gestion des données

Le tableau ci-dessous montre le temps de traitement et les tailles des fichiers créés avec 3 paramétrages différents du scanner laser (10 000, 5 000, 2 500 points/rotation).

| Pts / Profil | Taille (Go) | | Temps (min) | | | Nb points / Mètre linéaire |
|--------------|--------------|--------------------------|-------------------|-----------------------------|---------------|----------------------------|
| | Fichier Brut | Fichier après traitement | Traitement Amberg | Exportation nuage de points | Total | |
| 10 000 | 2.7 Go | 6.6 Go | 25 min | 19 min | 44 min | 1 350 000 |
| 5 000 | 1.3 Go | 3.1 Go | 12 min | 9 min | 21 min | 800 000 |
| 2 500 | 0.7 Go | 1.5 Go | 7 min | 5 min | 12 min | 300 000 |

Vitesse d'acquisition : 1 km/h

Distance d'acquisition : 100 mètres

Nombre de rotations par seconde : 50

Gestion au Kilomètre avec $V_{\text{acquisition}} \approx 1 \text{ Km/h}$

| Pts / Profil | Taille | Temps |
|--------------|--------------------------|-------------------|
| | Fichier après traitement | Total |
| 10 000 | 66 Go | 7 H 20 min |
| 5 000 | 31 Go | 3H 30 min |
| 2 500 | 15 Go | 2 H |

Les résultats montrent qu'une acquisition avec 10 000 points par rotation de la tête de scanner engendre un traitement beaucoup plus long et des fichiers très volumineux par rapport à une acquisition avec 5 000 points. La densité du nuage de points est insuffisante si le scanner effectue 2 500 mesures par rotation. La configuration adaptée est de 5 000 points par rotation.

4. TESTS ET RESULTATS

4.1 SUIVI PAR TACHEOMETRIE

Afin de réaliser un suivi tachéométrique optimal, des caractéristiques techniques sont à prendre en compte. Les paramètres techniques de la station totale influencent la qualité du positionnement. Toutefois, le déplacement de la base mobile est un enjeu aussi important :

- Vitesse maximale du système mobile
- Précision sur le pointé (utilisation prisme 360° ou classique)
- Synchronisation des mesures d'angles et de distances (temps de latence)
- Qualité des mesures d'angles et de distances
- Portée maximale
- Fréquence des mesures

Ce sont ces paramètres qui rentrent en compte pour connaître la qualité du suivi tachéométrique. Dans le but de vérifier ce positionnement par suivi tachéométrique plusieurs tests ont été effectués avec la station totale Leica TS50 utilisée par l'équipe topographie de la RATP.

| Caractéristiques | TS 50 (Leica) |
|--|--|
| Vitesse maximale du mobile | Vitesse tangentielle : 9m/s à 20m – 45m/s à 100m Vitesse radiale : 5m/s |
| Précision sur les angles | 0.15 mgon |
| Synchronisation des mesures d'angles et distance | OUI |
| Portée maximale | Prisme 360° : 1500 m Prisme standard circulaire : 3000 m |
| Fréquence | 7 Hz |

4.1.1 Influence prisme 360°

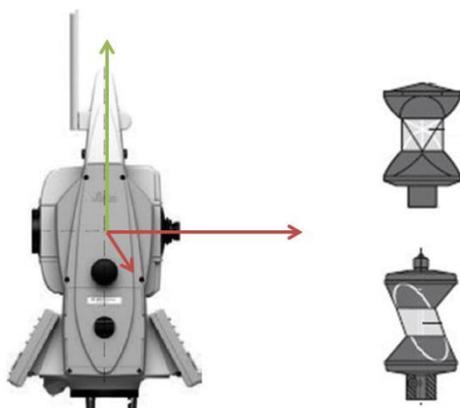


Figure 28 : Leica TS50 et prisme 360° modèle GRZ 122 (source Site Web Leica)

Le prisme 360° possède la même fonction qu'un prisme standard circulaire, il renvoie le faisceau laser. Son utilisation permet de ne pas constamment aligner le prisme avec la station totale. L'acquisition des mesures est donc simplifiée. Le constructeur établit une précision de +/- 2mm. Pour vérifier la précision du prisme 360°, une série de mesures a été réalisée. Entre chaque mesure le prisme était tourné d'un angle d'environ 25 grades.

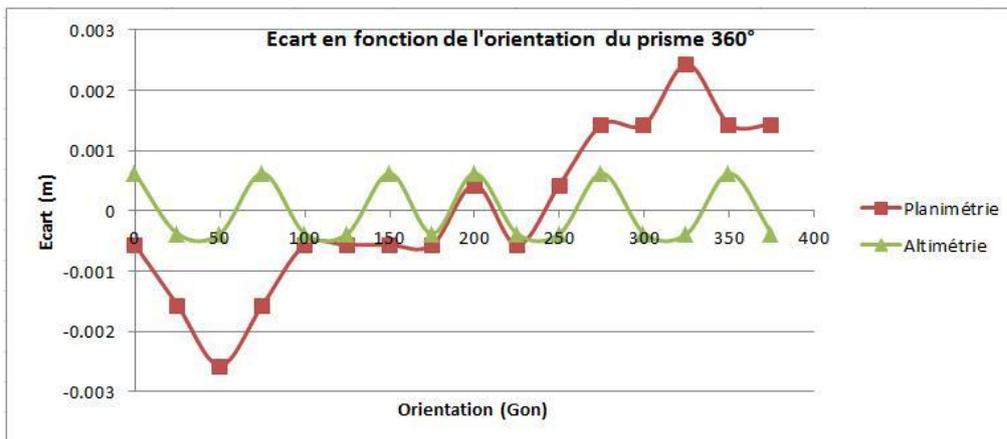


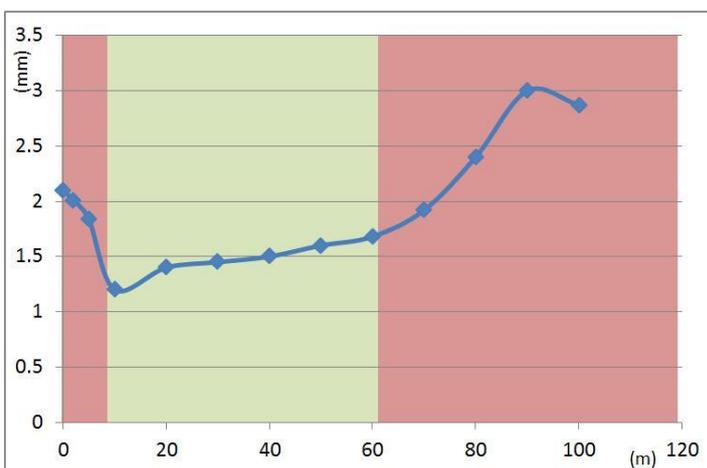
Tableau 1 : Ecart sur les coordonnées planimétriques et altimétriques en fonction de l'orientation du prisme 360°

Les résultats montrent qu'en fonction de l'orientation du prisme 360°, les coordonnées varient de :

- +/- 2.5 mm en planimétrie
- +/- 0.5 mm en altimétrie

Il est préférable d'utiliser un prisme standard circulaire pour effectuer des mesures de précision. La géométrie d'un prisme 360° affecte les mesures de distances et d'angles en fonction de son orientation (Figure 26).

4.1.2 Influence distance station/chariot.



Le graphique représente

Tableau 2 : Ecart en fonction de la distance prisme/chariot

La distance optimale pour effectuer le suivi tachéométrique est une plage de 10 mètres à 60 mètres. Cette distance correspond à la distance entre la station totale et le tachéomètre.

Après cette plage, des erreurs plus grossières sur le positionnement apparaissent.

4.2 TESTS SUR LES CAPTEURS

Pour vérifier la précision des capteurs du GRP 5000, différents tests ont été réalisés sur les capteurs mesurant le dévers et l'écartement de la voie ainsi que la distance totale parcourue. Un autre test effectué a permis de représenter les écarts d'alignement horizontal de l'axe de la voie.

Ces tests sont tous basés sur la répétabilité de la mesure afin de calculer la moyenne des mesures et les écarts-types.

4.2.1 Inclinomètre et écartement

Le principe a été de réaliser dix mesures d'écartement et de dévers. Entre chaque mesure, le chariot est déplacé de quelques mètres puis il retrouvait sa position initiale. L'extensomètre était ouvert puis refermé pour simuler par exemple, le franchissement d'un appareil de voie. Après cinq mesures, le chariot a été tourné d'un angle de 180°.

Les résultats sont recensés dans le tableau ci-dessous :

| Mesure | Ecartement (m) | Dévers (m) | | Ecartement (m) | Dévers (m) |
|-----------------|----------------|---------------|----|----------------|---------------|
| 1 | 1.439 | 0.008 | 6 | 1.439 | 0.008 |
| 2 | 1.439 | 0.008 | 7 | 1.440 | 0.008 |
| 3 | 1.440 | 0.008 | 8 | 1.439 | 0.008 |
| 4 | 1.438 | 0.008 | 9 | 1.439 | 0.007 |
| 5 | 1.439 | 0.007 | 10 | 1.440 | 0.008 |
| Moyenne | 1.439 | 0.0078 | | 1.439 | 0.0078 |
| Ecart-type (m) | 0.0007 | | | 0.0005 | |
| Ecart-type (mm) | 0.7071 | | | 0.5477 | |

TOTAL

| | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|
| Moyenne | 1.4392 | 0.0078 |
| Ecart-type (m) | 0.0006 | 0.0004 |
| Ecart-type (mm) | 0.632 mm | 0.422 mm |

Tableau 3 : tableau des mesures d'écartement et de dévers

L'analyse des résultats est effectuée en 4.4.1 – Analyse des résultats

4.2.2 Odomètre

L'odomètre est mis à zéro et une visée sur le prisme par le tachéomètre est réalisée. Le chariot est ensuite poussé jusqu'à une marque où le tachéomètre effectue une nouvelle visée. Le tableau ci-dessous liste les résultats :

| Mesure | Dodomètre | Dmesurée | ΔD | % |
|-----------------|---------------|----------|--------------|---------------|
| 1 | 94.670 | 94.667 | 0.003 | 0.0032 |
| 2 | 94.668 | 94.658 | 0.010 | 0.0106 |
| 3 | 94.674 | 94.670 | 0.004 | 0.0042 |
| 4 | 94.665 | 94.664 | 0.001 | 0.0011 |
| 5 | 94.667 | 94.662 | 0.005 | 0.0053 |
| Moyenne (m) | 94.669 | | 0.005 | 0.0049 |
| Ecart-type (mm) | 3.4205 | | 3.362 | |

Tableau 4 : Distance totale mesurée par l'odomètre et comparaison distance tachéomètre

L'analyse des résultats est effectuée en 4.4.1– Analyse des résultats

4.2.3 Alignement horizontal

La position de l'axe de la voie ainsi que des deux files de rail sont directement obtenues à partir des mesures effectuées par la station totale sur le prisme. C'est-à-dire que la précision de l'alignement horizontal de l'axe de la voie dépend de la précision à laquelle le prisme est observé par suivi tachéométrique. De plus, cette précision affecte aussi les données issues du scanner laser et notamment les coordonnées absolues finales.

D'une façon similaire aux autres tests effectués sur les capteurs internes au chariot, la précision de l'alignement horizontal a été déterminée par le biais de mesures redondantes. Cinq passages ont été effectués en utilisant la même configuration (même vitesse, même sens d'acquisition et un prisme identique). Puis les cinq axes de la voie ont été exportés sous Autocad dans le but de visualiser les écarts de position.

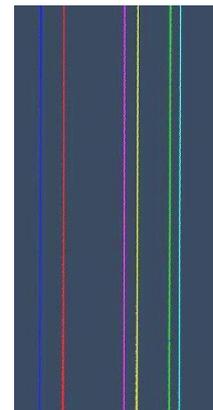


Figure 29 : Représentation des écarts en position de l'axe de la voie

Le tableau ci-dessous récapitule à 5 endroits différents les écarts de la position de l'axe en fonction des passages. L'axe de couleur rouge (figure n°29) a été choisi arbitrairement comme axe de référence pour la comparaison. Les écarts sont recensés en millimètres et comparés

| | Rouge | Vert | Magenta | Cyan | Jaune | Bleu | Moyenne | Ecart-type |
|---------|-------|------|---------|------|-------|------|---------|-----------------|
| Coupe 1 | / | 0.2 | 0.3 | 0.6 | 0.4 | 0.7 | 0.440 | 0.207 |
| Coupe 2 | / | 0.8 | 0.5 | 1 | 2 | 1 | 1.060 | 0.564 |
| Coupe 3 | / | 0.3 | 1.1 | 0.4 | 1.2 | 0.6 | 0.720 | 0.409 |
| Coupe 4 | / | 3.7 | 1.6 | 5 | 4.7 | 0.9 | 3.180 | 1.843 |
| Coupe 5 | / | 2.6 | 4.5 | 1.2 | 2.7 | 1 | 2.400 | 1.409 |
| | | | | | | | | 0.886 mm |

4.3 PRECISION ABSOLUE

4.3.1 Réseau de points de contrôle

L'objectif de la mise en place d'un réseau de points de contrôle est de vérifier la précision absolue sur les coordonnées des objets lors d'une acquisition avec GRP 5000. Des cibles utilisées normalement lors des acquisitions au scanner fixe pour recalibrer les nuages de points ont été mesurées au tachéomètre puis au scanner dynamique.

Ce test a été réalisé en extérieur, car il est difficile d'obtenir les autorisations d'accès aux lignes souterraines et aux stations de métro dans la journée. La voie scannée est une voie d'essai de matériels roulants de type pneumatique et se trouve dans la commune de Sucy-en-Brie. Dans l'idéal ce test aurait été mis en place en souterrain pour placer les cibles sur la voûte du tunnel.

Les cibles sont réparties de part et d'autre de la voie sur la barre de guidage et sont orientables de manière à pouvoir être relevées précisément au tachéomètre puis repositionnées parallèlement à la voie lors de l'acquisition dynamique avec le chariot.

La station totale de matricule ST1 a été positionnée au milieu de la voie étudiée et des coordonnées locales (X=1000 ; Y=1000 ; Z=10) lui ont été attribuées.

Dans le but d'annuler le défaut de collimation horizontale et verticale ainsi que l'erreur d'index, chaque cible a été mesurée en double retournement, puis calculée sur Covadis.

Le chariot a été monté puis placé à proximité de la première cible (C1). La vitesse de rotation du scanner a été paramétrée sur 50 rotations par seconde et 5000 points sont relevés par rotation. L'acquisition s'est faite à une vitesse d'environ 1.5 km/h et réduite à l'approche d'une cible afin d'obtenir une densité de points plus élevée.

Après traitement des données brutes sur Amberg Rail, les coordonnées des centres des cibles ont été obtenues à partir de la développée du nuage de points.

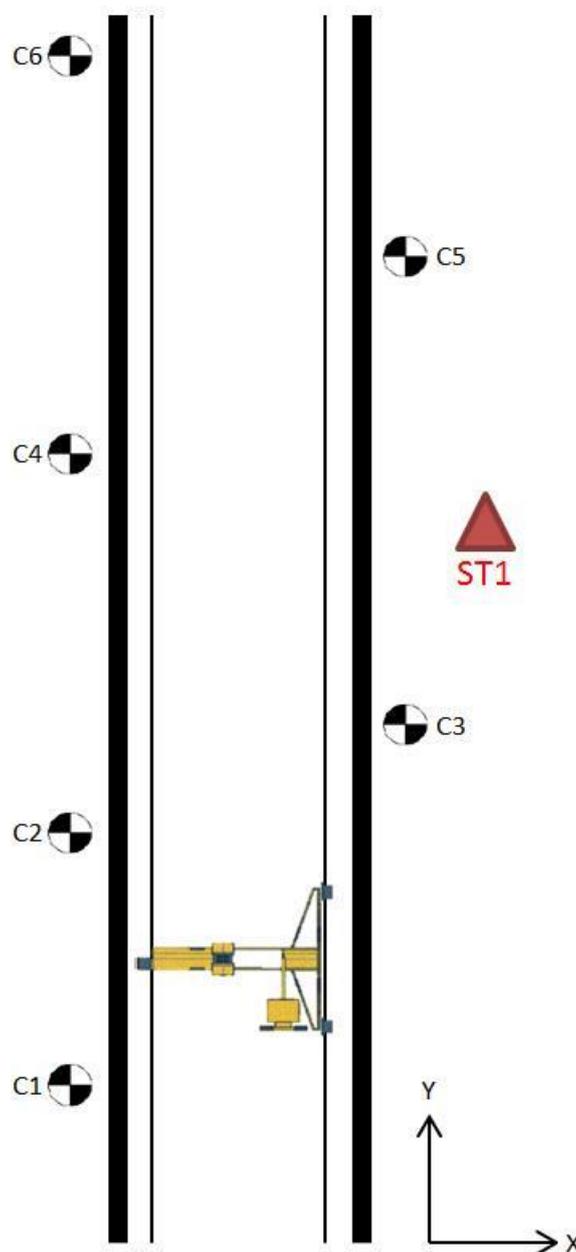


Figure 30 : Configuration du réseau de points de contrôle

Les coordonnées des cibles tachéomètre (tableau 3) et scanner (tableau 4) sont listés dans les tableaux ci-dessous.

Coordonnées Tachéomètre

| | X (m) | Y (m) | Z (m) |
|----|---------|----------|-------|
| C1 | 987.852 | 966.405 | 9.670 |
| C2 | 987.172 | 975.039 | 9.667 |
| C3 | 989.886 | 993.196 | 9.225 |
| C4 | 987.045 | 1003.513 | 9.329 |
| C5 | 989.046 | 1012.878 | 9.430 |
| C6 | 991.303 | 1026.257 | 9.609 |

Tableau 5 : Coordonnées des cibles « vraies » tachéomètre

Coordonnées cibles scannées des deux passages

| | V1 + | | | V1 - | | |
|----|---------|----------|-------|---------|----------|-------|
| | X (m) | Y (m) | Z (m) | X (m) | Y (m) | Z (m) |
| C1 | 987.858 | 966.416 | 9.674 | 987.842 | 966.368 | 9.676 |
| C2 | 987.176 | 975.056 | 9.667 | 987.162 | 975.012 | 9.665 |
| C3 | 989.878 | 993.172 | 9.226 | 989.978 | 993.171 | 9.224 |
| C4 | 987.058 | 1003.536 | 9.327 | 987.042 | 1003.488 | 9.329 |
| C5 | 989.050 | 1012.910 | 9.428 | 989.041 | 1012.844 | 9.427 |
| C6 | 991.311 | 1026.270 | 9.609 | 991.297 | 1026.233 | 9.610 |

Tableau 6 : Coordonnées des cibles scannées

Calcul de différence de coordonnées entre les cibles tachéomètre et scannées.

$$\Delta\text{Total} = \sqrt{(X_{\text{tachéo}} - X_{\text{scan}})^2 + (Y_{\text{tachéo}} - Y_{\text{scan}})^2 + (Z_{\text{tachéo}} - Z_{\text{scan}})^2}$$

Ecarts : Différence des Coordonnées « vraies » et scannées (en mètre)

| V1 + | | | | V1 - | | | |
|------------|------------|------------|----------------------|------------|------------|------------|----------------------|
| ΔX | ΔY | ΔZ | ΔTotal | ΔX | ΔY | ΔZ | ΔTotal |
| -0.006 | -0.011 | -0.004 | 0.013 | 0.010 | 0.037 | -0.006 | 0.039 |
| -0.004 | -0.017 | 0.000 | 0.017 | 0.010 | 0.027 | 0.002 | 0.029 |
| -0.008 | -0.024 | 0.001 | 0.025 | 0.008 | 0.025 | 0.001 | 0.026 |
| -0.013 | -0.023 | 0.002 | 0.026 | 0.003 | 0.025 | 0.000 | 0.025 |
| -0.004 | -0.032 | 0.002 | 0.032 | 0.005 | 0.034 | 0.003 | 0.034 |
| -0.008 | -0.013 | 0.000 | 0.015 | 0.006 | 0.024 | -0.001 | 0.025 |

| | | | | | | | |
|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| -0.007 | -0.020 | 0.000 | 0.022 | 0.007 | 0.029 | 0.000 | 0.030 |
|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

Tableau 7 : Ecart entre les coordonnées des cibles « vraies » et scannées

4.4 RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.4.1 Analyse des Résultats

L'étude du comportement de l'odomètre, de l'inclinomètre et du capteur mesurant l'écartement montre que le GRP 5000 possède des capteurs de précision.

- Selon le tableau 4, l'odomètre mesure la distance totale parcourue avec une précision de +/- 3,4mm pour une distance d'environ égale à 100 mètres soit : 0.0034% d'erreur sur la distance totale. Ce test montre une meilleure précision que celle spécifiée sur la fiche constructeur (ANNEXE 4 –B).
- L'inclinomètre montre lui aussi une précision meilleure (+/- 0,5mm) mais le test a été effectué en statique, les résultats sont donc améliorés (tableau 3).
- Selon le tableau 3, l'imprécision sur les mesures d'écartement est deux fois plus importante que celle spécifiée par le constructeur (+/- 0,3 mm, ANNEXE 4 - B). Cette différence peut s'expliquer par l'état de la voie où le test a été réalisé, des petites aspérités peuvent apparaître sur le côté de la tête de rail. De plus, il est relativement difficile de placer le chariot à une position identique. Au vu de l'écart-type il est possible d'affirmer que le chariot est capable de mesurer l'écartement avec une incertitude de +/- 0,6mm.

Le GRP 5000 possède des capteurs de précision pour le relevé des paramètres de la voie ce qui en fait un appareil performant en mode relatif c'est-à-dire sans géoréférencement. Il relève la géométrie interne d'une voie et son environnement avec une bonne précision. Le nuage de points créé est homogène et cohérent. Sa rapidité de mise en œuvre est un atout et il convient bien pour son application première : l'étude de gabarits.

Toutefois, les tests pour vérifier sa précision absolue montrent une précision inférieure à celle spécifiée par le constructeur. En effet, un décalage dans le sens longitudinal apparaît (2 cm et 2,9 cm suivant le sens d'avancé – tableau 7). Il est alors primordial d'effectuer plusieurs passages avec des sens d'avancés opposés pour le réduire.

Pour le travail en absolu, il peut y avoir deux sources d'erreurs :

- La précision des coordonnées « vraies » issues des mesures au tachéomètre.
- La précision des cibles scannées à partir du scanner.

Dans le premier cas, la précision sur le pointé du centre des cibles peut être remis en cause. Mais cette précision est de l'ordre de quelques millimètres et ne peut pas être l'unique cause de cet écart.

Le second aspect peut dépendre de la densité du nuage de points. Si aucun point ne correspond exactement à l'endroit du centre de la cible, alors c'est le point le plus proche de celui-ci qui est choisi. Pour la plupart des cibles, la densité de points était suffisamment élevée pour pouvoir pointer le centre avec une précision inférieure à 1 cm.

Le problème semble donc venir de la détermination de la position du chariot et donc du suivi tachéométrique. Les résultats montrent que suivant le sens de passage, les positions des cibles scannées se trouvent « à l'avance » d'environ 2 à 3 cm.

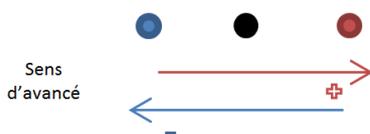


Figure 31 : Position des cibles scannées selon le sens d'avancé

Cette erreur présente un systématisme dans le fait que les cibles scannées se trouvent toujours devant la position de la cible tachéomètre « vraie ». Mais ce décalage ne présente pas de valeur systématique.

Plusieurs facteurs peuvent en être la cause :

- A cause d'un mauvais positionnement du scanner. Si le scanner n'est pas rigoureusement perpendiculaire et présente un angle de lacet par rapport au chariot. Mais cet écart se retrouve de part et d'autre de la voie, ce qui prouve que ce n'est pas la cause.
- La calibration de l'appareil peut être une explication et remis en cause car comme vu précédemment, c'est à partir des dimensions et de la distance entre la position du prisme et de la tête du scanner que le calcul du géoréférencement est effectué. C'est pour vérifier l'éventuelle erreur de calibration que le chariot n'est pas retourné entièrement. Seulement son bras est pivoté ce qui ne change pas l'orientation du GRP 5000.
- Une mauvaise synchronisation des mesures entre le mobile et le tachéomètre semble être la cause la plus plausible.

Pour diminuer cette erreur, le meilleur mode opératoire est d'effectuer deux passages dans des sens différents, mais sans retournement du chariot. Celui-ci ne devra pas être soulevé et tourné mais seulement son bras sera pivoté. Par la suite, un calcul de moyenne entre les deux coordonnées des centres des cibles sera effectué.

Tableau représentant les coordonnées moyennées des cibles ; V1+ et V1-

| | Moyenne (V1+ , V1-) | | |
|----|---------------------|----------|-------|
| | X (m) | Y (m) | Z (m) |
| C1 | 987.850 | 966.392 | 9.675 |
| C2 | 987.169 | 975.034 | 9.666 |
| C3 | 989.886 | 993.196 | 9.225 |
| C4 | 987.050 | 1003.512 | 9.328 |
| C5 | 989.046 | 1012.877 | 9.428 |
| C6 | 991.304 | 1026.252 | 9.610 |

Tableau 8 : Coordonnées moyennées des cibles

Tableau de comparaison Coordonnées Moyennées (V1+, V1-) et Coordonnées tachéomètre.

| | ΔX | ΔY | ΔZ |
|---------|------------|------------|------------|
| C1 | 0.002 | 0.013 | -0.005 |
| C2 | 0.003 | 0.005 | 0.001 |
| C3 | 0.000 | 0.001 | 0.001 |
| C4 | -0.005 | 0.001 | 0.001 |
| C5 | 0.001 | 0.001 | 0.003 |
| C6 | -0.001 | 0.006 | 0.000 |
| Moyenne | 0.000 | 0.004 | 0.000 |

Tableau 9 : Ecart entre les coordonnées moyennées et coordonnées tachéomètre

Par le biais de ce mode opératoire, les écarts entre les coordonnées moyennées et tachéomètre sont diminués. Le géoréférencement des objets est donc amélioré.

$$\text{Résultat final : } \Delta T_{\text{Total}} = \sqrt{(X_{\text{tachéo}} - X_{\text{moy}})^2 + (Y_{\text{tachéo}} - Y_{\text{moy}})^2 + (Z_{\text{tachéo}} - Z_{\text{moy}})^2}$$

$$= 0.0014 \text{ m}$$

Résultat graphique :

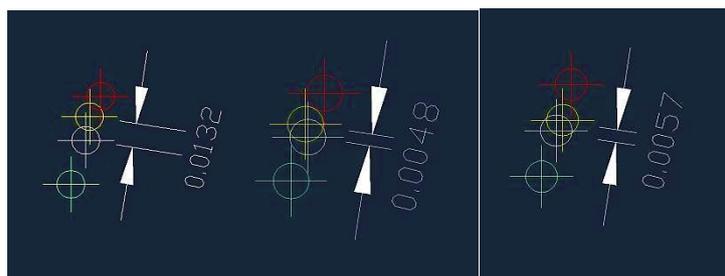


Figure 32 ; Exemple cibles : C1, C2, C6 (de gauche à droite) - Sans échelle

En rouge : cibles scannées passage aller (PK croissant)

En bleu : cibles scannées passage retour (PK décroissant)

En blanc : moyenne des cibles scannées (passage aller/retour)

En jaune : cibles levées au tachéomètre

4.4.2 Les améliorations possibles du système

L'étude des systèmes de cartographie a permis d'établir une liste des améliorations possibles à apporter au chariot de mesures GRP 5000 :

- ✚ L'ajout de caméras ou appareils photos externes serait utile, comme dans le cas du système mobile de cartographie Pegasus One. Les images pourraient être utilisées pour visualiser et analyser des défauts dans la structure des tunnels. Ce système est déjà utilisé par certain MMS, et avec l'aide d'algorithmes d'analyse de fissures, des fentes ou crevasses

peuvent être détectées. De plus, l'ajout d'un appareil photo calibré pourrait coloriser le nuage de points.

- ✚ L'utilisation d'une caméra thermique infrarouge permettrait de visualiser les fuites d'eau. Les tunnels des voies de métro et RER coupent régulièrement la Seine ou sont très proches de nappes phréatiques. Ces tunnels, construits à proximité de l'eau, sont soumis à l'érosion et des fissures peuvent apparaître. Ce type de caméra est susceptible de différencier les températures des matériaux et pourrait être un apport très intéressant.

Plus généralement, la mise en place de matériels photographiques ferait du GRP 5000, un système plus polyvalent et faciliterait les travaux d'inspection.

- ✚ On peut ensuite imaginer un appareil ultrasons positionné sous le chariot afin d'étudier la structure du ballast. Le chariot serait capable de détecter l'épaisseur ballast et d'examiner sa densité afin de connaître les zones où le ballast doit être rénové. Cet appareil faciliterait les études de travaux de maintenance.
- ✚ La position du scanner peut aussi être déplacée de manière à numériser les files de rails et supprimer le cône de non résolution. Celui installé sur le GRP 5000 est positionné verticalement par rapport à la voie, et au-dessus du chariot sans déport. Il n'est donc pas apte à numériser la voie. Comme le font d'autres systèmes de cartographie mobile, il pourrait être positionné de manière incliné pour ne pas avoir d'occlusion vers le bas et les files de rails pourraient être numérisés. En appliquant des techniques de filtrages il sera ensuite possible d'extraire seulement celles-ci. Cette méthode peut être une bonne solution pour détecter des défauts sur la voie ou des objets aux sols (capteurs, pédales).
- ✚ La configuration actuelle du chariot ne dispose que d'un seul odomètre et un unique inclinomètre. L'ajout d'un odomètre supplémentaire rendrait possible d'effectuer deux mesures de distance. En étudiant la différence de la distance effectuée par la roue droite et de la roue gauche, le rayon de courbure serait calculé plus précisément. Un inclinomètre placé longitudinalement donnerait la valeur de la pente de la voie de façon plus précise que par un suivi tachéométrique.

D'autres solutions concernant le dispositif de positionnement sont envisageables. On a pu voir que la centrale inertielle autorise une acquisition plus rapide. Avec des points de contrôles suffisants, il est possible de corriger la dérive et d'obtenir une trajectoire très bien connue. Cette solution offre un plus grand rendement sur le terrain, mais engendre un important investissement financier.

De plus, le chariot GRP 5000 ne possède pas de moteur, l'utilisateur est contraint de le pousser. Un moteur électrique générerait une acquisition à vitesse constante et engendrerait un nuage de points de densité homogène.

Conclusion

L'objectif de ce travail de fin d'études était de réaliser une approche des systèmes mobiles de cartographie en trois dimensions et plus spécifiquement en milieu ferroviaire avec les chariots de mesures.

A travers ce mémoire, j'ai passé en revue le domaine de la lasergrammétrie et découvert le milieu ferroviaire. De plus, une analyse des MMS et de leurs systèmes de perception, de positionnement et d'orientation a permis de démontrer tout le potentiel de ces systèmes mobiles. Les relevés fournis sont denses, exhaustifs et à haut rendement et donnent accès à un état des lieux instantané et réaliste.

En revanche, bien que bénéficiant d'un temps d'acquisition réduit, de tels dispositifs nécessitent un temps supplémentaire pour améliorer la qualité des données en post-traitement.

Le chariot de mesures GRP 5000 est un appareil performant quand il effectue des relevés en relatif. La très bonne précision de ses capteurs est un réel atout. Ce système est donc adapté pour son domaine d'application initial : l'étude de gabarits. Toutefois, il est nécessaire d'utiliser le chariot de mesures avec prudence lors d'un travail en absolu. En effet, des écarts de position sont présents et doivent être éliminés.

De plus, l'état de la voie est à prendre en compte, sur des rails usés ou recouverts de graisse, les mesures des paramètres internes de la voie peuvent être faussées.

Par le biais d'autres systèmes utilisés en souterrain ou en extérieur, on a pu voir que d'autres modes opératoires utilisant d'autres technologies sont aujourd'hui disponibles, comme l'utilisation de centrales inertielles.

Les constructeurs de matériels roulants et les exploitants des réseaux ont besoin d'informations complètes concernant les ouvrages et les objets pouvant restreindre l'espace libre sur les lignes. Le chariot GRP 5000, capable d'effectuer des mesures rapides et mobiles, permet de réduire le temps d'occupation de la voie et augmente la disponibilité de la ligne pour son exploitation.

Références Bibliographiques

TFE

PASCAL A. , 2011, Tachéométrie Mobile : Elaboration d'un dispositif de mesures et Traitement des données, 63 pages, Mémoire de travail de fin d'études ESGT.

Thèse

AL SHAWA M. , 2010, Contribution à la cartographie mobile : développement et caractérisation d'un système basé sur un scanner laser terrestre, 227 pages thèse INSA Strasbourg.

GLAUS R. , 2006, The Swiss Trolley – A Modular System for Track Surveying, 199 pages, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie Zurich.

RESHETYUK Y. , 2009, Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning, 174 pages, thèse Royal Institute of technology Stockholm.

RIDENE T. , 2010, Co-recalage de données hétérogènes 3D géoréférencées : contribution à la correction de relevés laser mobiles, 267 pages, thèse Ecole Nationale supérieure des Mines de Paris.

YOO H. , 2011 - Analyse et conception de scanners laser mobiles dédiés à la cartographie 3D d'environnements urbains - 130 pages, thèse Ecole Nationale supérieure des Mines de Paris.

Articles

ESVELD C. , 2001 – Modern Railway track – Delft University of Technology - Editing: Dior Zwarthoed-van Nieuwenhuizen, 87 pages.

GRINSTEAD B. , SUKUMAR S., PAGE D and KOSCHAN A, 2006, Mobile Scanning System for the Fast Digitization of Existing Roadways and Structures, Sensor Review, Vol.26, Number 4, 283-289,

LANDES T. , GRUSSENMEYER P., 2011. Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre : systèmes et caractéristiques (partie 1/2). XYZ, n°128, p37–49.

LANDES T. , GRUSSENMEYER P., BOULAASSAL H, 2011. Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre: acquisition, traitement des données et applications (partie 2/2). XYZ, n°129, p25–38.

LAZARI, CHOISEZ, 2012, Parole d'experts : nouvelle réglementation DT-DICT,[en ligne] disponible sur :<http://www.laviedesreseaux.fr/Consultez-nos-themes-reseaux/Autres/Parole-d-experts-nouvelle-reglementation-DT-DICT>. Consulté le 13/06/2014.

VOSSelman G. et MAAS H., 2010, Airborne and Terrestrial Laser Scanning, Whittles Publishing

Sites internet

Site de l'AFT– Lexique : <http://www.aftopo.org/FR/lexique-7.html>

Site internet Leica : <http://www.leica-geosystems.fr/fr/index.html>

Site Amberg : <http://www.ambergtechnologies.ch/en/home>

Site information métro : <http://emdx.org/rail/metro/principe.php>

Site Legifrance : <http://www.legifrance.gouv.fr>

Site sur les réseaux : <http://www.la-vie-des-reseaux.fr> – article Consulté le 13/06/2014

Articles et ouvrages consultés

ABUHADROUS I. ,2005. Système embarqué temps réel de localisation et de modélisation 3D par fusion multi-capteur- 228 pages, thèse Ecole Nationale supérieure des Mines de Paris.

DESPRES M. , 2012, Etude sur la modélisation 3D de l'espace public de voirie du Grand Lyon à l'aide des technologies laser ou image, 90 pages, Mémoire de travail de fin d'études ESGT.

ENGSTRAND A., 2011, Railway surveying- a case of study grp 5000 – 49 pages, Master's of science thesis in Geodesy

GOULETTE F., 2009 - Relevés laser urbains par Systèmes Mobiles de Cartographie - 5 pages, revue XYZ n°119

GRAEFE G, 2007, High precision kinematic surveying with laser scanners, Journal of Applied Geodesy, Editor : H.Kahmen/C. Rizos, Walter De Gruyter Verlag, 4/2007, p185-199

LIE B. , 2012, Optimisation des techniques de calage et de contrôle des relevés lasergrammétriques des aéroréfrigérants de la société EDF, 64 pages, Mémoire de travail de fin d'études INSA

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Schéma d'une coupe d'un rail de métro rail, dévers et écartement..... | 7 |
| Figure 2 : Coupe d'un rail de type métro pneumatique et explications - source : www.edmx.org..... | 8 |
| Figure 3 : coupe d'une voie de métro pneumatique - source : www.edmx.org..... | 8 |
| Figure 4 : Voie ballast source www.ville-entraigues84.fr | 8 |
| Figure 5 : Voie béton | 8 |
| Figure 6 : Principe de la lasergrammétrie | 10 |
| Figure 7 : Le scanner laser terrestre et ses composantes | 11 |
| Figure 8 : Scanner 1D, 2D et 3D (gauche à droite) - source (société Z+F GmbH)..... | 12 |
| Figure 9 : Schéma d'un miroir rotatif d'un scanner laser - source : thèse YOO H..... | 12 |
| Figure 10 : Principe d'acquisition dynamique | 12 |
| Figure 11 : RIEGL VQ-450, 200 rps (rotations par seconde) – source : www.riegl.com..... | 14 |
| Figure 12 : Exemple de position des scanners lasers avec un angle de lacet et de tangage - source : thèse YOO H | 19 |
| Figure 13 : Suivi tachéométrique - source : site web Leica..... | 20 |
| Figure 14 : Système Pegasus One embarqué sur le toit d'un véhicule | 23 |
| Figure 15 : Nuage de points issu d'une acquisition avec le système Pegasus One - source : site internet Leica..... | 23 |
| Figure 16 : Swiss Trolley | 24 |
| Figure 17 : GRP 5000 - source : Amberg..... | 24 |
| Figure 18 : Krab Slight - source : KSV..... | 24 |
| Figure 19 : Schéma du principe "à la volée" - source Amber Rail | 25 |
| Figure 20 : Schéma principe « pluri-statique » - source : Amberg Rail | 25 |
| Figure 21 : Schéma principe "intervalles" - source : Amberg rail..... | 26 |
| Figure 22 : chariot de mesures GRP System FX fabriqué par la société Amberg Technologies..... | 27 |
| Figure 23 : les systèmes du GRP 5000..... | 28 |
| Figure 24 : Principe d'utilisation du GRP 5000 | 30 |
| Figure 25 : Schéma principe du géoréférencement du GRP 5000 | 31 |
| Figure 26 : Les repères UTC et CTC..... | 31 |
| Figure 27 : Représentation des 6 degrés de libertés..... | 32 |
| Figure 28 : Leica TS50 et prisme 360° | 36 |
| Figure 29 : Représentation des écarts en position de l'axe de la voie..... | 39 |
| Figure 30 : Configuration du réseau de points de contrôle | 40 |
| Figure 31 : Position des cibles scannées selon le sens d'avancé..... | 43 |
| Figure 32 ; Exemple cibles : C1, C2, C6 (de gauche à droite) - Sans échelle..... | 44 |
| Tableau 1 : Ecart en fonction de l'orientation du prisme 360° | 37 |
| Tableau 2 : Ecart en fonction de la distance prisme/chariot | 37 |
| Tableau 3 : tableau des mesures d'écartement et de dévers | 38 |
| Tableau 4 : Distance totale mesurée par l'odomètre et comparaison distance tachéomètre..... | 39 |
| Tableau 5 : Coordonnées des cibles « vraies » tachéomètre..... | 41 |
| Tableau 6 : Coordonnées des cibles scannées | 41 |
| Tableau 7 : Ecart entre les coordonnées des cibles « vraies » et scannées..... | 41 |
| Tableau 8 : Coordonnées moyennées des cibles | 43 |
| Tableau 9 : Ecart entre les coordonnées moyennées et coordonnées tachéomètre | 44 |

LASERGRAMMETRIE MOBILE : Etude et utilisation d'un système mobile de cartographie 3D : le GRP 5000

Mémoire de soutenance de Diplôme d'Ingénieur ESGT - Benjamin DUPUIS

RESUME

Les travaux de relevés de voies ferrées sont traditionnellement réalisés par des trains travaux et par tachéométrie classique. Depuis quelques années, des chariots de mesures ferroviaires sont utilisés. Le GRP 5000, employé lors des études de gabarits ferroviaires et développé par la société Amberg Technologies enregistre les paramètres internes de la voie tout en capturant l'environnement de la zone par le biais d'un scanner laser 3D. Ces systèmes appelés : systèmes mobiles de cartographie 3D intègrent des scanners lasers capables d'acquérir une multitude de profils. D'énormes quantités de données sont acquises dans un temps réduit par rapport aux systèmes terrestres fixes. Ces données peuvent être par la suite géoréférencées dans le but d'obtenir un nuage de points et une maquette numérique 3D.

Ces avancées technologiques et la maîtrise des dispositifs de positionnement de précision offrent de nouvelles perspectives de relevés rapides et à grande échelle.

Mots clés : milieu ferroviaire, lasergrammétrie mobile, scanner laser dynamique, système mobile de cartographie 3D, modélisation 3D.

ABSTRACT

The techniques for recording and surveying of railway environment are traditionally made by track recording vehicles or by tacheometry. Since a couple of years, track measuring trolleys are used. The GRP 5000, employed for clearance analysis is developed by the company Amberg technologies registers internal geometry rail track and it's capable of capturing three-dimensional data from surrounding objects through a laser scanner 3D. These systems, called Mobile Mapping Systems involve lasers scanners which are able to acquire a lot of profiles. Huge amounts of data are acquired in a limited time compared to fixed terrestrial time. These data can be georeferenced in order to obtain a point cloud and a 3D digital mock-up.

These technological advances and the control of precision positioning devices provide new perspectives for fast and large-scale surveys.

Keywords : railway environment, mobile lasergrammetry, kinematic laser scanner, mobile mapping system, 3D modeling.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Classification des scanner laser selon principe de mesure de distances

ANNEXE 2 : Fichier .sen

ANNEXE 3 : Certificat de calibration du GRP 5000 – Géométrie interne

ANNEXE 4 : Fiches constructeurs

- A – Scanner laser LEICA HDS 7000
- B – GRP 5000

ANNEXE 5 : Schématisation du principe d'acquisition et du traitement des données du GRP 5000

ANNEXE 6 : Nuage de points représentant la station Châtelet Ligne M11

ANNEXES

ANNEXE 1 : Classification des systèmes de mesures terrestre par laser – principe de mesure de distances

ANNEXE 2 : Fichier .sen

ANNEXE 3 : Certificat de calibration du GRP 5000 – Géométrie interne

ANNEXE 4 : Fiches constructeurs

- A – Scanner laser LEICA HDS 7000
- B – GRP 5000

ANNEXE 5 : Schématisation principe d'acquisition du GRP 5000

ANNEXE 6 : Nuage de points relevé au GRP 5000 – station : Châtelet L11

Temps de vol (Time of flight) – (pulse method):

Ce principe consiste à mesurer la distance séparant l'instrument de la surface visée en calculant le temps de parcours aller/retour (Δt) d'une impulsion laser.

Une impulsion laser est envoyée par la source sur une très courte durée (de l'ordre de la nanoseconde), une fois arrivée à la rencontre d'un objet celle-ci est rétrodiffusée vers le scanner. Par le biais de l'équation n°1, en connaissant l'indice du milieu dans lequel évolue le faisceau et la vitesse de la lumière dans le vide, nous pouvons calculer la distance séparant l'objet du scanner.

$$2 \times D = \frac{c}{n} \times \Delta t$$

Avec , D : Distance parcourue (m)

c : vitesse de la lumière dans le vide ($\approx 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$)

n : indice du milieu

Δt : temps de parcours (s)

Cette méthode fonctionne pour des grandes portées (quelques centaines de mètres) mais elle est aussi étroitement liée à la capacité à mesurer de petits intervalles de temps, en effet la distance mesurée est liée et dépendante de l'intervalle Δt . Le problème est donc que le scanner doit disposer d'une horloge de haute précision. Ceci constitue le grand inconvénient des scanners à impulsions.

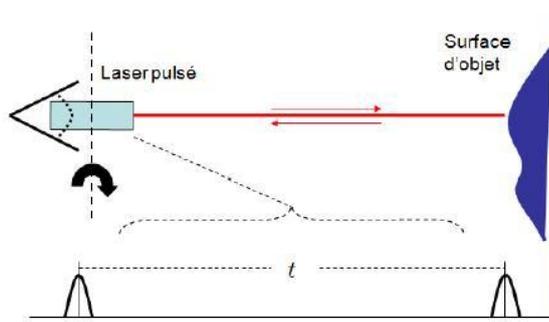


Figure 1 : Principe mesure de temps de vol (source : thèse ALSHAWA M.)

Son utilisation n'est pas appropriée pour les mesures de courte distance mais ce type d'instrument reste toutefois très intéressant du fait de sa capacité à répondre à des types différents d'utilisation.

La télémétrie par différence de phases consiste à diriger vers l'objet le faisceau d'un laser (continu, de forte intensité et modulé de façon sinusoïdale), et à comparer les phases des ondes émises avec celles des ondes retour. (Baltsavias, 1999). Cette méthode est basée sur une mesure de déphasage.

La valeur de ce déphasage $\Delta\varphi$ entre le signal émis et le signal reçu est mesurée à l'aide d'un phasemètre numérique.

$$\Delta\varphi = 2\pi \times f \times \Delta t$$

$$\Delta\varphi = 2\pi \times f \times \left(\frac{2d}{c}\right)$$

Soit, $d = \frac{\Delta\varphi \times c}{4\pi \times f}$

- Avec, $\Delta\varphi$: Différence de phase (rad)
f : fréquence du signal sinusoïdal (Hz)
 Δt : Décalage temporel entre le signal envoyé et le signal reçu (s)
d : distance parcourue (m)
c : vitesse de la lumière dans le vide ($\approx 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$)

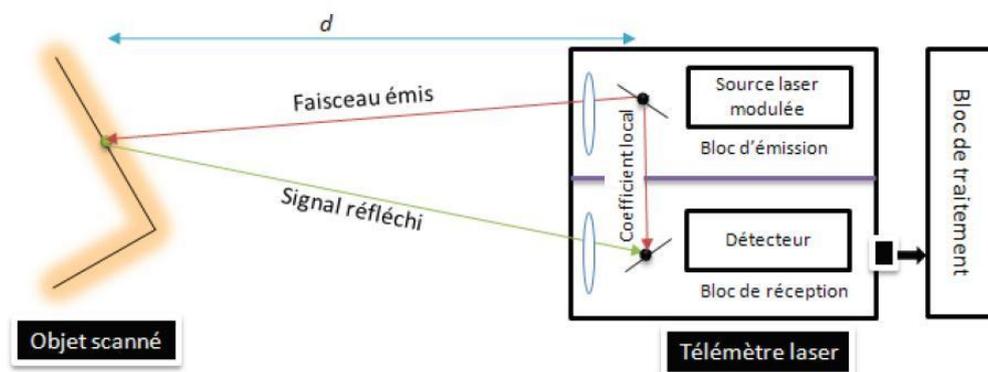


Figure 2 : Principe de mesure par différence de phases (source : thèse RIDENE T.)

Pour la résolution d'ambiguïté, liée au déphasage $\Delta\varphi$ modulo 2π , une technique consiste à combiner les faisceaux envoyés et reçus avec des fréquences différentes.

Ce mode de télémétrie, assimilé aux mesures réalisées avec un tachéomètre est adapté aux mesures de faibles distances car le signal rétrodiffusé doit conserver une intensité suffisamment élevée. Les constructeurs préconisent ce type d'appareil pour des portées inférieures à 100m. La vitesse d'acquisition est rapide, généralement supérieure aux autres méthodes c'est pourquoi son utilisation est adaptée pour la lasergrammétrie cinématique.

La télémétrie par triangulation utilise la résolution de triangles pour calculer la distance. Le signal émis par le système optique émetteur et décalé par rapport au système optique récepteur. Le triangle est formé par l'émetteur, le capteur CCD (récepteur) et le point d'impact P. La distance (b) entre le laser et le capteur CCD est connue ainsi que les deux angles λ et σ .

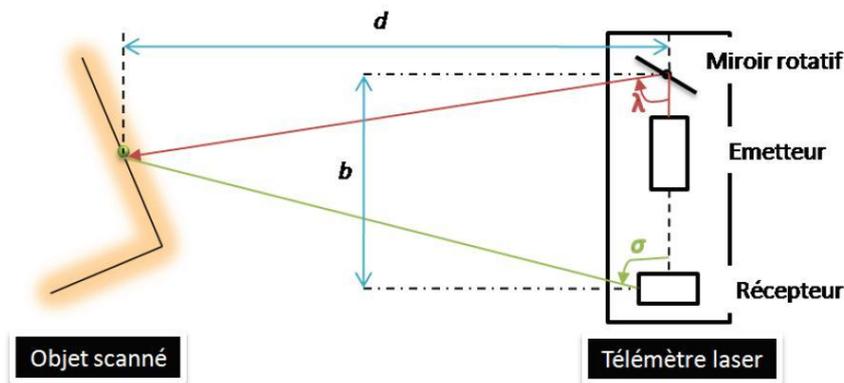


Figure 3 : principe triangulation (source : thèse RIDENE T.)

La portée maximale et minimale dépend de la dimension et de la position de la partie réceptrice. De plus, l'objet doit être visible depuis le système optique émetteur et récepteur.

Ce type de laser est adapté pour numériser des objets situés à faible distance et de petite taille.

Bilan

Les trois types de télémétrie présentées ont chacune leurs spécificités et proposent des avantages et inconvénients. La méthode par temps de vol est peu précise mais permet la numérisation d'objets éloignés. Le calcul par différence de phases propose une vitesse d'acquisition très rapide et une bonne précision mais sa portée est limitée. Enfin la méthode par triangulation permet d'obtenir la meilleure précision mais avec une portée très faible.

Le tableau ci-dessous, présent dans la thèse de (H-J Yoo, 2011) synthétise cette comparaison selon trois critères : la portée, la précision et la vitesse d'acquisition.

| | Portée | Précision | Vitesse d'acquisition |
|---------------------|--------|-----------|-----------------------|
| Temps de vol | +++ | + | ++ |
| Différence de phase | ++ | ++ | +++ |
| Triangulation | + | +++ | + |

ANNEXE 2

```

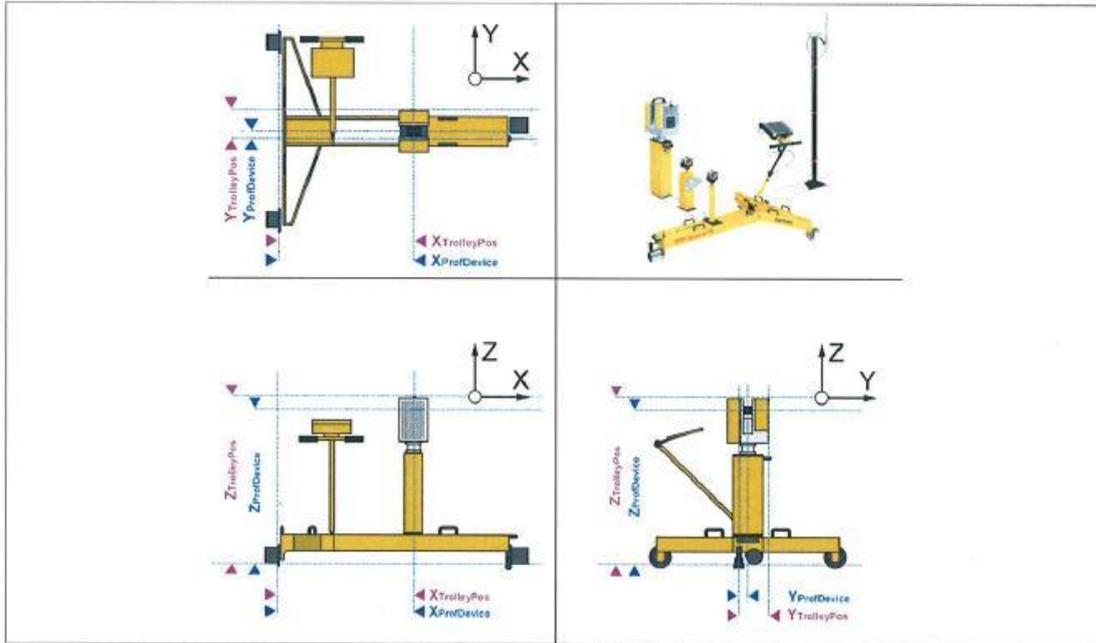
AMTGRP5000--20140407124222m - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
<?xml version="1.0" encoding="utf-8" standalone="yes" ?>
<SensorTrace system="GRP5000" format="xml" version="1.03">
  <client Name="Amberg Rail 2.0" version="2.12.0.1"/>
  <GRP5000Setup>
    <Environment ScannerPos="right" WalkDirectionStng="Decreasing" Mounting="ScanPosRightROTANTIClock" MountTiltDeg="0.00000" Operator="" TrolleySerialNo="3608" ScannerSerialNo="3318" TrolleyLicense="202980.8" />
    <calibration name="GRP5000_i.435m" OdometerStepM="0.005236" TrackwidthQTicksPerMM="630.00000" TwCalibwidthM="1.43495" TwCalibwidthTicks="21474.00" positionreferenceX="0.8402" positionreferenceY="1.0981" />
    <Tiltcalibration isCalibrated="yes" Calib1Rad="-0.002732" calib2Rad="0.001188" />
    <ScannerToCarello mode="3d" ScannerBoxRotOffsetRad="0.000000" ScannerBoxRotYawRad="0.000000"/>
    <Geometry XFromDoubleWheelM="0.8402" YAboveTrackAxisM="1.0389" ZInPushingDirectionM="-0.0484"/>
  </GRP5000Setup>
  <CantSmoothing IsUsed="yes" FilterType="Exponential" />
  <TPSSetup name="10000" comment="" posrefheight="0.1110" easting="1653255.9338" northing="8180143.0314" height="58.9307" instrheight="0.0000" serialNo="367835" instrtype="TS50 I 0.5 R1000" instrsversion="1" />
  <GPSSetup name="" comment="" antennaheight="0.0000" isantennainclined="no"/>
</GRP5000Setup>
<SensorLines>
  <L T5="1859340" TSS="1859344" ST="1" CS="57.6744" TSO="59650" TT="26864" CT="1.4435" TSG="59651" TA="-0.00106" TST="59650" SMC="-0.00230" SPD="0.0033" GPTS="0" GPLI="" SMTS="0" SMST="0.00000" TPSE="1653252.0879" />
  <L T5="1859440" TSS="1859469" ST="3" CS="57.6639" TSO="59751" TT="26864" CT="1.4435" TSG="59751" TA="-0.00315" TST="59750" SMC="-0.00230" SPD="0.0295" GPTS="0" GPLI="" SMTS="0" SMST="0.00000" TPSE="1653252.0879" />
  <L T5="1859540" TSS="1859563" ST="4" CS="57.6587" TSO="59850" TT="26864" CT="1.4435" TSG="59851" TA="-0.00215" TST="59850" SMC="-0.00229" SPD="0.0340" GPTS="0" GPLI="" SMTS="0" SMST="0.00000" TPSE="1653252.0883" />
  <L T5="1859740" TSS="1859750" ST="5" CS="57.6535" TSO="60051" TT="26864" CT="1.4435" TSG="60051" TA="-0.00200" TST="60050" SMC="-0.00228" SPD="0.0371" GPTS="0" GPLI="" SMTS="0" SMST="0.00000" TPSE="1653252.0893" />
  <L T5="1859840" TSS="1859875" ST="7" CS="57.6430" TSO="60151" TT="26864" CT="1.4435" TSG="60151" TA="-0.00222" TST="60150" SMC="-0.00231" SPD="0.0467" GPTS="0" GPLI="" SMTS="0" SMST="0.00000" TPSE="1653252.0896" />
  <L T5="1859940" TSS="1859968" ST="8" CS="57.6378" TSO="60250" TT="26864" CT="1.4435" TSG="60251" TA="-0.00418" TST="60250" SMC="-0.00237" SPD="0.0475" GPTS="0" GPLI="" SMTS="0" SMST="0.00000" TPSE="1653252.0896" />
  <L T5="1860040" TSS="1860062" ST="11" CS="57.6220" TSO="60350" TT="26864" CT="1.4435" TSG="60351" TA="-0.00069" TST="60350" SMC="-0.00237" SPD="0.0671" GPTS="0" GPLI="" SMTS="0" SMST="0.00000" TPSE="1653252.0910" />
  <L T5="1860140" TSS="1860155" ST="13" CS="57.6116" TSO="60450" TT="26864" CT="1.4435" TSG="60451" TA="-0.00176" TST="60450" SMC="-0.00233" SPD="0.0713" GPTS="0" GPLI="" SMTS="0" SMST="0.00000" TPSE="1653252.0910" />
  <L T5="1860240" TSS="1860280" ST="16" CS="57.5959" TSO="60550" TT="26864" CT="1.4435" TSG="60551" TA="-0.00297" TST="60550" SMC="-0.00234" SPD="0.0798" GPTS="0" GPLI="" SMTS="0" SMST="0.00000" TPSE="1653252.0929" />
  <L T5="1860340" TSS="1860374" ST="18" CS="57.5854" TSO="60650" TT="26864" CT="1.4435" TSG="60651" TA="-0.00282" TST="60650" SMC="-0.00236" SPD="0.0821" GPTS="0" GPLI="" SMTS="0" SMST="0.00000" TPSE="1653252.0942" />
  <L T5="1860440" TSS="1860467" ST="21" CS="57.5697" TSO="60750" TT="26864" CT="1.4435" TSG="60751" TA="-0.00057" TST="60750" SMC="-0.00224" SPD="0.0952" GPTS="0" GPLI="" SMTS="0" SMST="0.00000" TPSE="1653252.0942" />
  <L T5="1860540" TSS="1860561" ST="24" CS="57.5540" TSO="60851" TT="26864" CT="1.4435" TSG="60851" TA="-0.00424" TST="60850" SMC="-0.00229" SPD="0.1000" GPTS="0" GPLI="" SMTS="0" SMST="0.00000" TPSE="1653252.0942" />
  <L T5="1860640" TSS="1860655" ST="28" CS="57.5330" TSO="60950" TT="26864" CT="1.4435" TSG="60951" TA="-0.00238" TST="60950" SMC="-0.00235" SPD="0.1142" GPTS="0" GPLI="" SMTS="0" SMST="0.00000" TPSE="1653252.0965" />
  <L T5="1860740" TSS="1860748" ST="31" CS="57.5173" TSO="61050" TT="26864" CT="1.4435" TSG="61051" TA="-0.00196" TST="61050" SMC="-0.00236" SPD="0.1285" GPTS="0" GPLI="" SMTS="0" SMST="0.00000" TPSE="1653252.0965" />
  <L T5="1860840" TSS="1860873" ST="35" CS="57.4964" TSO="61150" TT="26864" CT="1.4435" TSG="61151" TA="-0.00149" TST="61150" SMC="-0.00231" SPD="0.1428" GPTS="0" GPLI="" SMTS="0" SMST="0.00000" TPSE="1653252.0995" />
  <L T5="1860940" TSS="1860967" ST="39" CS="57.4754" TSO="61250" TT="26864" CT="1.4435" TSG="61251" TA="-0.00182" TST="61250" SMC="-0.00233" SPD="0.1523" GPTS="0" GPLI="" SMTS="0" SMST="0.00000" TPSE="1653252.0995" />
  <L T5="1861040" TSS="1861060" ST="43" CS="57.4545" TSO="61350" TT="26864" CT="1.4435" TSG="61351" TA="-0.00478" TST="61350" SMC="-0.00236" SPD="0.1666" GPTS="0" GPLI="" SMTS="0" SMST="0.00000" TPSE="1653252.1029" />
  <L T5="1861140" TSS="1861154" ST="48" CS="57.4283" TSO="61450" TT="26864" CT="1.4435" TSG="61451" TA="-0.00191" TST="61450" SMC="-0.00236" SPD="0.1761" GPTS="0" GPLI="" SMTS="0" SMST="0.00000" TPSE="1653252.1029" />
  <L T5="1861240" TSS="1861247" ST="52" CS="57.4074" TSO="61550" TT="26864" CT="1.4435" TSG="61551" TA="-0.00497" TST="61550" SMC="-0.00249" SPD="0.1856" GPTS="0" GPLI="" SMTS="0" SMST="0.00000" TPSE="1653252.1029" />
  <L T5="1861340" TSS="1861341" ST="56" CS="57.3864" TSO="61650" TT="26864" CT="1.4435" TSG="61651" TA="-0.00006" TST="61650" SMC="-0.00253" SPD="0.1904" GPTS="0" GPLI="" SMTS="0" SMST="0.00000" TPSE="1653252.1072" />
  <L T5="1861440" TSS="1861466" ST="61" CS="57.3602" TSO="61750" TT="26880" CT="1.4435" TSG="61751" TA="-0.00212" TST="61750" SMC="-0.00258" SPD="0.2047" GPTS="0" GPLI="" SMTS="0" SMST="0.00000" TPSE="1653252.1116" />
  <L T5="1861540" TSS="1861559" ST="67" CS="57.3288" TSO="61851" TT="26816" CT="1.4434" TSG="61851" TA="0.00073" TST="61850" SMC="-0.00240" SPD="0.2190" GPTS="0" GPLI="" SMTS="0" SMST="0.00000" TPSE="1653252.1116" />
  <L T5="1861640" TSS="1861653" ST="72" CS="57.3027" TSO="61950" TT="26768" CT="1.4434" TSG="61951" TA="-0.00480" TST="61950" SMC="-0.00237" SPD="0.2285" GPTS="0" GPLI="" SMTS="0" SMST="0.00000" TPSE="1653252.1134" />
  <L T5="1861740" TSS="1861747" ST="76" CS="57.2817" TSO="62050" TT="26784" CT="1.4434" TSG="62051" TA="-0.00508" TST="62050" SMC="-0.00235" SPD="0.2285" GPTS="0" GPLI="" SMTS="0" SMST="0.00000" TPSE="1653252.1134" />
  <L T5="1861840" TSS="1861871" ST="83" CS="57.2451" TSO="62150" TT="26784" CT="1.4434" TSG="62151" TA="-0.00027" TST="62150" SMC="-0.00234" SPD="0.2475" GPTS="0" GPLI="" SMTS="0" SMST="0.00000" TPSE="1653252.1183" />
  <L T5="1861940" TSS="1861965" ST="88" CS="57.2189" TSO="62250" TT="26736" CT="1.4433" TSG="62251" TA="-0.00022" TST="62250" SMC="-0.00226" SPD="0.2523" GPTS="0" GPLI="" SMTS="0" SMST="0.00000" TPSE="1653252.1183" />
  <L T5="1862040" TSS="1862059" ST="94" CS="57.1875" TSO="62351" TT="26640" CT="1.4432" TSG="62351" TA="-0.00553" TST="62350" SMC="-0.00242" SPD="0.2618" GPTS="0" GPLI="" SMTS="0" SMST="0.00000" TPSE="1653252.1231" />

```

- 1 En tête du fichier
- 2 Configuration chariot
- 3 Configuration tachéomètre
- 4 Mesures effectuées par le chariot (écartement, devers)

Producer Inspection Certificate

Product: GRP 5000 Nominal gauge: 1.435m Trolley SNo: 3608
 Config. name: GRP5000_1.435m
 Prof. device type: Leica HDS7000 Prof. device SNo: 3318



Inspector: Jens-Peter Thorenz
 Inspecting company: Amberg Technologies AG
 Trockenloostrasse 21
 8105 Regensdorf
 Switzerland

Your order No.:
 Inspection date: 27.05.2013

Inspection Specification

| | |
|---|---------------------|
| Gauge measurement (static / kinematic) | s = 0.3 mm / 0.5 mm |
| Superelevation measurement (static / kinematic) | s = 0.5 mm / 1.0 mm |
| Internal geometry system accuracy | s = 0.5 mm |

Inspection devices

Total station

Model: TCA2003
 Serial no.: 438843
 Last calibrated: 12.03.2009
 Calibration certificate No.: SCS 079
 Calibration by: Leica Geosystems AG

Gauging frame

Model: Amberggauging frame GF1
 Serial no.: 4000
 Last calibrated: 12.04.2010
 Calibration certificate No.: LE2010-023
 Calibration by: GP-Messtechnik-AG



Amberg Technologies AG
 Trockenloostrasse 21
 8105 Regensdorf
 Switzerland
 044 870 92 22
 044 870 92 22
 www.amberg.ch

generated with GRP Fidelity
 © 2007-2013 by Amberg Technologies AG

Producer Inspection Certificate

Product: GRP 5000 Nominal gauge: 1.435m Trolley SNo: 3608
Config. name: GRP5000_1.435m
Prof. device type: Leica HDS7000 Prof. device SNo: 3318

Inspection results

Wheel type RATP Swings

Wheel wear 24.05.2013

Two wheel part

Diameter wheel (A): 100.0mm Flange (D): 12.0mm
Diameter wheel (B): 100.0mm Flange (E): 12.0mm

One wheel part

Diameter wheel (C): 100.0mm

Geometric Reference 24.05.2013

Parameters considering wheel wear

X_{TrolleyPos} = 0.8402m s = 0.0mm
Y_{TrolleyPos} = 0.1994m s = 0.1mm
Z_{TrolleyPos} = 1.0981m s = 0.0mm

Parameters measured

X_{TrolleyPos} = 0.8402m s = 0.0mm
Y_{TrolleyPos} = 0.1994m s = 0.1mm
Z_{TrolleyPos} = 1.0981m s = 0.0mm

X_{ProfDevice} = 0.8402m s = 0.3mm
Y_{ProfDevice} = 0.0484m s = 0.3mm
Z_{ProfDevice} = 1.0389m s = 0.3mm

X_{ProfDevice} = 0.8402m s = 0.3mm
Y_{ProfDevice} = 0.0484m s = 0.3mm
Z_{ProfDevice} = 1.0389m s = 0.3mm

Gauge 24.05.2013

Nominal gauge: = 1.4350m
Sensor origin position: = 1.4009m s = 0.0mm
Scale factor of gauge sensor: = 630000inches/m

Cant angle sensor / super elevation 24.05.2013

Cant angle additional constant s1: -0.0010 rad
Cant angle additional constant s2: -0.0019 rad
Resulting cant angular correction: -0.0014 rad
s = 0.0001 rad
s = 0.3 mm on a gauge of 1.4350m

Odometer 24.05.2013

Odometer pulses: 190.986 pulse/m



Amberg Technologies AG
Trockenloostrasse 21
8105 Regensdorf
Switzerland
044 870 92 22
044 870 92 22

generated with GRP Fidelity
© 2007-2013 by Amberg Technologies AG

A – SCANNER LASER HDS 7000

HDS7000

Product Specifications

| General | |
|------------------------|---|
| Instrument type | Compact, phase-based, dual-axis compensated, ultra-high speed laser scanner, with survey-grade accuracy, range, field-of-view and laser plummet |
| User interface | Onboard control, notebook or tablet PC, PDA |
| Scanner drive | Servo motor |
| Data storage | Integrated flash drive or external USB flash drive |
| Camera | No integrated camera; supports use of external camera |

| Laser Scanning System | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|---|------------|------------|----------|-----------|--------------------|------------|------------|------------|--------------------|------------|------------|------------|--------------------|------------|------------|------------|---------------------|-----------|------------|------------|
| Type | Phase-shift | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Wavelength | 1.5 µm (invisible) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Laser Class | 1 (in accordance with IEC 60825-1 resp. EN 60825-1) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Range | 187 m ambiguity interval 0.3 m minimum range 0.1 mm resolution | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Linearity error¹ | ±1 mm | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Spot size | ~ 3.5 mm @ 0.1 m distance (Gaussian-based) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Beam divergence | < 0.3 mrad | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Scan rate | Up to 1,016,727 points/sec, maximum instantaneous rate | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Range noise | <table border="1"> <thead> <tr> <th>Range</th> <th>Black 14%</th> <th>Gray 37%</th> <th>White 80%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>10 m¹²</td> <td>0.5 mm rms</td> <td>0.4 mm rms</td> <td>0.3 mm rms</td> </tr> <tr> <td>25 m¹²</td> <td>1.0 mm rms</td> <td>0.6 mm rms</td> <td>0.5 mm rms</td> </tr> <tr> <td>50 m¹²</td> <td>2.7 mm rms</td> <td>1.2 mm rms</td> <td>0.8 mm rms</td> </tr> <tr> <td>100 m¹²</td> <td>10 mm rms</td> <td>3.8 mm rms</td> <td>2.0 mm rms</td> </tr> </tbody> </table> | Range | Black 14% | Gray 37% | White 80% | 10 m ¹² | 0.5 mm rms | 0.4 mm rms | 0.3 mm rms | 25 m ¹² | 1.0 mm rms | 0.6 mm rms | 0.5 mm rms | 50 m ¹² | 2.7 mm rms | 1.2 mm rms | 0.8 mm rms | 100 m ¹² | 10 mm rms | 3.8 mm rms | 2.0 mm rms |
| Range | Black 14% | Gray 37% | White 80% | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 m ¹² | 0.5 mm rms | 0.4 mm rms | 0.3 mm rms | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 m ¹² | 1.0 mm rms | 0.6 mm rms | 0.5 mm rms | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 50 m ¹² | 2.7 mm rms | 1.2 mm rms | 0.8 mm rms | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 100 m ¹² | 10 mm rms | 3.8 mm rms | 2.0 mm rms | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| Scan resolution | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|---|-----------|-----------|-----------|------|---------|----------------------|----------|----------|----------|----------|-----|----------|----------|----------|----------|--------|----------|----------|----------|----------|------|----------|----------|----------|-----------|------------|----------|----------|-----------|-----------|-------------------------|-----|-----------|-----------|-----------|-----------------------------|-----|--------|--------|--------|
| Selectability | 7 pre-set spacings per table | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | <table border="1"> <thead> <tr> <th>Pts/360°</th> <th>Low</th> <th>Normal</th> <th>High</th> <th>Premium</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>preview⁴</td> <td>0.13 min</td> <td>0.26 min</td> <td>0.52 min</td> <td>1.44 min</td> </tr> <tr> <td>low</td> <td>0.26 min</td> <td>0.52 min</td> <td>1.44 min</td> <td>3.24 min</td> </tr> <tr> <td>middle</td> <td>0.52 min</td> <td>1.44 min</td> <td>3.22 min</td> <td>6.44 min</td> </tr> <tr> <td>high</td> <td>1.44 min</td> <td>3.22 min</td> <td>6.44 min</td> <td>13.28 min</td> </tr> <tr> <td>super high</td> <td>3.28 min</td> <td>6.44 min</td> <td>13.28 min</td> <td>26.56 min</td> </tr> <tr> <td>ultra high⁵</td> <td>---</td> <td>13.28 min</td> <td>26.56 min</td> <td>53.20 min</td> </tr> <tr> <td>extremely high⁷</td> <td>---</td> <td>1.21 h</td> <td>2.42 h</td> <td>3.24 h</td> </tr> </tbody> </table> | Pts/360° | Low | Normal | High | Premium | preview ⁴ | 0.13 min | 0.26 min | 0.52 min | 1.44 min | low | 0.26 min | 0.52 min | 1.44 min | 3.24 min | middle | 0.52 min | 1.44 min | 3.22 min | 6.44 min | high | 1.44 min | 3.22 min | 6.44 min | 13.28 min | super high | 3.28 min | 6.44 min | 13.28 min | 26.56 min | ultra high ⁵ | --- | 13.28 min | 26.56 min | 53.20 min | extremely high ⁷ | --- | 1.21 h | 2.42 h | 3.24 h |
| Pts/360° | Low | Normal | High | Premium | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| preview ⁴ | 0.13 min | 0.26 min | 0.52 min | 1.44 min | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| low | 0.26 min | 0.52 min | 1.44 min | 3.24 min | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| middle | 0.52 min | 1.44 min | 3.22 min | 6.44 min | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| high | 1.44 min | 3.22 min | 6.44 min | 13.28 min | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| super high | 3.28 min | 6.44 min | 13.28 min | 26.56 min | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ultra high ⁵ | --- | 13.28 min | 26.56 min | 53.20 min | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| extremely high ⁷ | --- | 1.21 h | 2.42 h | 3.24 h | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Field-of-View | max. 360° x 320° (horizontal/vertical) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Scanning Optics | Vertically rotating mirror on horizontally rotating base; User selectable vertical rotation speed (6.25 rps, 12.5 rps, 25 rps or 50 rps); Environmentally protected by shield | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Scan motors | Direct drive, brushless | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Angular accur. | 125 µrad / 125 µrad (horizontal/vertical) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Angular resol. | 7 µrad / 7 µrad (horizontal/vertical) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| Miscellaneous | |
|----------------------------------|--|
| Onboard display | Touchscreen control with stylus, full color graphic display, VGA (640 x 320 pixels) |
| Dual-axis compensator | Selectable on/off, resolution 3.6", measurement range +/- 30", accuracy < 25" |
| Level indicator | Electronic bubble in onboard control and software |
| Laser plummet | Laser class 2 (in accordance with IEC 60825-1 resp. EN 60825-1) Centering accuracy: 0.5 mm / 1 m Laser dot diameter: < 1.5 mm @ 1.5 m Selectable on/off |
| Data transfer | Ethernet or USB 2.0 device (two ports) |
| Data storage | 64 GB flash drive (integrated), 2 x 32 GB USB flash drive (external) |
| Communications | Ethernet or integrated Wireless LAN (WLAN) |
| Data integrity monitoring | Self-check at startup |

| Electrical | |
|---------------------|--|
| Power supply | 24 V DC, 100 - 240 V AC |
| Power Cons. | < 65W (on average) |
| Battery Type | Internal: Li-Ion |
| Power ports | Internal: 1, External: 1 |
| Duration | Internal: > 2.5 h, AC power supply: unlimited |
| Power status | LEDs indicate charging status and capacity level |

| Environmental | |
|----------------------|---|
| Temperature | Operating -10°C to +45°C/Storage -20°C to +50°C |
| Lighting | Fully operational between bright sunlight and complete darkness |
| Humidity | Non-condensing |
| Dust/humidity | IP53 (IEC 60529) |

| Physical | |
|---------------------------|---|
| Scanner | |
| Dim. / Weight | 286 mm D x 170 mm W x 395 mm H / 9.8kg, nominal |
| Battery (internal) | |
| Dim. / Weight | 88 mm D x 170 mm W x 61 mm H / 1.2kg |
| AC Power Supply | |
| Dim./Weight | 167 mm D x 67 mm W x 35 mm H / 0.54kg |

| Standard Accessories Included | |
|---|--|
| Scanner and accessory transport case | |
| 2x 32 GB USB memory stick, 1x USB plug | |
| Additional rechargeable integrated battery | |
| Charging/power cable, Ethernet cable, A/C cable | |
| Battery charger/AC power supply | |
| Battery charging cradle for internal battery | |
| Cleaning kit | |
| Cyclone™ SCAN software | |
| 1 year CCP Basic support agreement | |

| Hardware Options | |
|---|--|
| Notebook PC, Tablet PC, or PDA | |
| HDS scan targets and target accessories | |
| Service agreement for HDS7000 | |
| Extended warranty for HDS7000 | |
| External camera kit (third party product) | |
| External battery | |
| Tripod, tripod star, rolling base | |

| Notebook PC for scanning with Cyclone software ^Δ | |
|---|--|
| Component | required (minimum) |
| Processor | 1.7 GHz Pentium M or similar |
| RAM | 1 GB or greater (2GB for Windows Vista) |
| Network card | Ethernet |
| Display | SVGA or OpenGL accelerated graphics card (with latest drivers) |
| Operating system | Windows XP Professional (SP2 or higher) (32 or 64) Windows Vista (32 or 64), Windows 7 (32 or 64) |

| Control Options | |
|---|--|
| Full colour touch screen for onboard scan control | |
| Leica Cyclone SCAN software (see Cyclone SCAN data sheet for full list of features) | |
| Web browser | |

| Ordering Information | |
|---|--|
| Contact: Leica Geosystems or authorized representatives | |

All specifications are subject to change without notice.
All accuracy specifications are one sigma unless otherwise noted.

- ¹ Detailed explanation on request
- ² Data rate 127000 pts/sec (equivalent to "high resolution, high quality scan"), 1 sigma range noise, unfiltered raw data
- ³ All values extrapolated
- ⁴ "Preview" resolution not recommended for exact measurements, only for positioning higher resolution scan selections
- ⁵ Only recommended for scan selections because of enormous amount of data
- ⁶ Doubling ("low quality") and halving ("high quality") the data rate (pixel/sec.) theoretically increases the range noise on each pixel by 40% ("low quality") or decreases it by 40% ("high quality") compared to "normal quality". Depending on the roughness of the surface measured, in reality this difference could be less, especially when scanning objects with a bright surface at short distances, e.g. indoors

^Δ Minimum requirements for modeling operations are different.
Refer to Cyclone data sheet specifications

Windows is a registered trademark of Microsoft Corporation. Other trademarks and trade names are those of their respective owners.

Illustrations, descriptions and technical specifications are not binding and may change.
Printed in Switzerland – Copyright Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland 2011.
789094en - III.11 - RDV

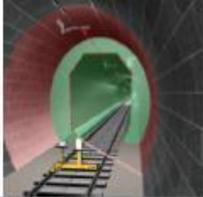
Leica Geosystems AG
Heerbrugg, Switzerland
www.leica-geosystems.com

- when it has to be **right** 

GRP 5000

Spécifications et précision du système



| | Contrôle de gabarit (2D relatif) | Contrôle de structure (3D absolu) |
|--|--|---|
| | <p>Contrôle de gabarit et de structures adjacentes en mode relatif 2D.</p>  | <p>Etude 3D d'empiètements potentiels pour l'analyse de gabarit et études de variantes au cours de la conception ou d'un réalignement</p>  |
| Exigences requises | | |
| Résolution | 1 x 1 cm | 1 x 1 cm |
| Précision | Profil : ±10 mm | Profil : ±10 mm |
| Point métrique (P.M.) | P.M. sans ambiguïté: ±1 m | P.M. : ±5 cm |
| Fonctionnement du système | | |
| Système GRP | GRP 5000 | GRP 5000 |
| Mode de mesure | Cinématique, 2D | Cinématique, 3D |
| Géo-référence | Plaques kilométriques (P.M.) | TPS: Leica Viva TS15 A / GPS: Leica Viva GNSS ²⁾ |
| Résolution du profil (pts/profil) | 10'160 10'160 5'080 | 10'160 10'160 5'080 |
| Vitesse de rotation (rot./sec.) | 50 Hz 100 Hz 200 Hz ¹⁾ | 50 Hz 100 Hz 200 Hz ¹⁾ |
| Vitesse de mesure du GRP | 1.8 km/h 3.6 km/h >3.6 km/h | 1.8 km/h 3.6 km/h >3.6 km/h |
| Précision d'application | | |
| <p>La précision d'application représente la qualité de la résultante des coordonnées de l'objet, qui peut être réalisée grâce à la configuration du système, de méthodes géodésiques appropriées et en considérant des conditions types d'un projet.</p> <p>Précision globale selon l'utilisation des différents composants du système :</p> | | |
| 1. Position de la voie | non applicable | TPS ±5 mm |
| 1.1 Coordonnées brutes (Prisme / antenne) | | GPS ±40 mm |
| <p>Note: Ce composant de la détermination des coordonnées est basé sur des mesures géodésiques indépendantes d'Amberg Rail. La précision obtenue peut être influencée par la qualité du réseau de points fixes, par la précision du capteur de positionnement (TPS, GPS), par les méthodes topographiques (distances, processus de mesures), par les conditions atmosphériques, la vitesse de la mesure. Les précisions indiquées sont basées sur des mesures géodésiques sous conditions de mesure favorables. Des mauvaises précisions affecteront directement la qualité des coordonnées du profil selon les règles de propagation d'erreur.</p> | | |
| 1.2 Géométrie de la voie | | |
| - Dévers | ±1 mm | ±1 mm |
| - Écartement | ±0.3 mm | ±0.3 mm |
| 1.3 P.M. | ±20 mm | ±30 mm |
| Synchronisation des coordonnées brutes + mesures GRP (précision P.M.) | | |
| Précision de (1.1 – 1.3) résultante des coordonnées de la voie ((Propagation de l'erreur selon Gauss) | non applicable | TPS ±31 mm |
| | | GPS ±51 mm |
| | | Approximation: Erreur latérale ±5 mm ±40 mm Erreur longitudinale ±30 mm ±50 mm Direction principale de l'ellipse d'erreur dans le sens de la mesure |
| 2. Levé de profils | ±5 mm | ±5 mm |
| - Mesure jusqu'à 7 m de distance relative à l'axe de la voie | | |
| Précision résultante (Propagation de l'erreur selon Gauss) | Coordonnées 2D du profil Relative à l'axe de la voie ±5 mm (1 σ) ±15 mm (3 σ) Précision du P.M. ±2 cm (1 σ) ±6 cm (3 σ) | Coordonnées 3D du profil ³⁾ TPS ⁴⁾ ±31 mm ±93 mm GPS ±52 mm (1 σ) ±155 mm (3 σ) |

¹⁾ La fréquence maximale dépend du modèle du scanner. Modèles supportés: Amberg Profiler 5002 / 5003 / 5033 / 6012.

²⁾ Plusieurs modèles supportés. Veuillez contacter le représentant ou Amberg Technologies AG.

³⁾ Précision relative par rapport à l'axe de la voie identique à l'application 2D.

⁴⁾ Composante d'erreur principale est dans le sens du P.M.

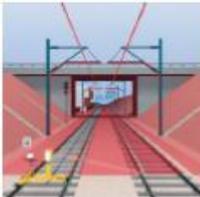
Légende:

1 σ = 68 % des valeurs mesurées

3 σ = 99 % des valeurs mesurées

GRP 5000

Spécifications et précision du système

| | | Relevé des nuages de points en 3D | | Image Haute Densité | |
|--|--|--|--|--|--|
| | | Levé topographique 3D de la voie pour la planification, le projet et la gestion des infrastructures.  | | Image détaillée des infrastructures adjacentes à la voie pour l'inspection et l'entretien.  | |
| Exigences requises | | | | | |
| Résolution | | Rés. Haute 10 x 10 mm | Rés. Basse 20 x 20 mm | Hte Densité 5 x 5 mm | |
| Précision | | Coord. Objet : ±20 mm | Coord. Objet : ±50 mm | Profil: ±10 mm Echelle adéquate de l'image pour la mesure de la longueur et de la superficie des défauts de structure | |
| Fonctionnement du système | | | | | |
| Système GRP | | GRP 1000 (Voie) GRP 5000 (Profil) | GRP 5000 (Voie + Profil) | GRP 5000 | |
| Mode de mesure | | Voie : 3D Stop+Go, Intervalle 5 m Profil : cinématique 2D | Voie+Profil: cinématique 3D | Cinématique 2D | |
| Geo-référencement (position) | | Voie : TPS Leica TS15 A ²⁾ Profil : Plaques de P.M. | TPS : Leica TS15 A ²⁾ GPS: Leica Viva GNSS ²⁾ | Plaques de P.M. | |
| Résolution du profil (pts/profil) | | 10'160 / 5'080 / 5'080 | 10'160 / 5'080 | 10'160 | |
| Vitesse de rotation (rot./sec.) | | 50 Hz / 100 Hz / 200 Hz | 100 Hz / 200 Hz | 100 Hz | |
| Vitesse de mesure du GRP | | GRP 1000/5000: 1.8 km/h | > 3.6 km/h | 1.8 km/h | |
| Précision d'application avec géo-référence par tachéomètre (TPS) | | | | | |
| La précision d'application représente la qualité de la résultante des coordonnées de l'objet, qui peut être réalisée grâce à la configuration du système, de méthodes géodésiques appropriées et en considérant des conditions types d'un projet. Précision globale selon l'utilisation des différents composants du système : | | | | | |
| 1. Position de la voie | | ±2 mm | ±5 mm | non applicable | |
| 1.1 Coordonnées brutes (Prisme / antenne) | | | | | |
| Note: Ce composant de la détermination des coordonnées est basé sur des mesures géodésiques indépendantes d'Amberg Rail. La précision obtenue peut être influencée par la qualité du réseau de points fixes, par la précision du tachéomètre (TPS), par les méthodes topographiques (distances, processus de mesures), par les conditions atmosphériques, la vitesse de la mesure. Les précisions indiquées sont basées sur des mesures géodésiques par tachéomètre (TPS) sous conditions de mesure favorables. Des mauvaises précisions affecteront directement la qualité des coordonnées du profil selon les règles de propagation d'erreur. | | | | | |
| 1.2 Géométrie de la voie | | | | | |
| - Dévers | | ±0.5 mm | ±1 mm | ±1 mm | |
| - Ecartement | | ±0.3 mm | ±0.3 mm | ±0.3 mm | |
| 1.3 P.M. | | ±20 mm | ±30 mm | ±15 mm | |
| Synchronisation des coordonnées brutes + mesures GRP (précision P.M.) | | | | | |
| Précision de (1.1 – 1.3) (Propagation de l'erreur selon Gauss) | | ±20 mm | ±30 mm Comme application "Contrôle de structure (3D absolu)" | non applicable | |
| 2. Levé de profils | | | | | |
| - Mesure jusqu'à 7 m de distance | | ±5 mm | ±5 mm | ±5 mm | |
| - Mesure jusqu'à 20 m de distance relative à l'axe de la voie | | ±15 mm | ±15 mm | | |
| Précision résultante pour géo-référence par tachéomètre (TPS) | | | | | |
| (Propagation de l'erreur selon Gauss) | | | | | |
| | | Coord. Objet 3D ^{3) 4)} dist. <7 m ±21 mm (1 σ) <20 m ±25 mm dist. <7 m ±63 mm (3 σ) <20 m ±75 mm | Coord. Objet 3D ^{3) 4)} dist. <7 m ±31 mm (1 σ) <20 m ±33 mm dist. <7 m ±93 mm (3 σ) <20 m ±99 mm | Echelle de l'image (Précision du P.M.) ±1.5 cm (1 σ) ±4.5 cm (3 σ) Déroulement du profil La précision dépend du profil de projection choisi : <5 % possible | |

Note: la précision est réalisable en fonction des conditions réelles du projet et peut varier.
Tous les paramètres énumérés sont basés sur les expériences d'application du système pour de nombreuses applications différentes. Sauf indication contraire les précisions sont données à un sigma (1 σ).



ANNEXE 5

