



HAL
open science

Proposition d'un protocole de relevé ferroviaire par adjonction d'un GPS au chariot GRP 3000

Clément Bury

► **To cite this version:**

Clément Bury. Proposition d'un protocole de relevé ferroviaire par adjonction d'un GPS au chariot GRP 3000. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2016. dumas-01803517

HAL Id: dumas-01803517

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01803517>

Submitted on 30 May 2018

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

Clément BURY

Proposition d'un protocole de relevé ferroviaire par adjonction d'un GPS au
chariot GRP 3000

Soutenu le 04 Juillet 2016

JURY

PRESIDENT : M. Stéphane DURAND

MEMBRES : M. Olivier BOUSQUET
M. José CALI, Professeur référent
M. Philipp CLAUSEN
M Christophe DUPRÉ
M. Pierre GUSMANO, Maître de stage
Mme. Valérie RENAUDIN
M. Max RUFFO
M. Jérôme VERDUN



AVANT PROPOS ET REMERCIEMENTS

L'entreprise MIRE S.A.S occupe une place importante au niveau national dans le domaine de la topographie ferroviaire. Ce travail de fin d'études (TFE) d'une durée de vingt semaines au sein de cette société, m'a donné l'opportunité d'utiliser des instruments à la pointe de la technologie.

La mise en œuvre d'un protocole expérimental nécessitait une part d'autonomie dans la réalisation de différents tests. Elle m'a été accordée sur l'emprise d'un chantier également à la pointe des grands projets nationaux de Ligne à Grande Vitesse (LGV).

En complément au cursus de formation et des stages intermédiaires, ce dernier m'a permis de me confronter réellement au monde professionnel et d'en découvrir les singularités. Aussi, en dehors de la mission spécifique du travail de fin d'études, d'autres aspects comme le travail partagé, les contraintes de délais, la qualité des prestations, la sécurité liée aux interventions, sont autant d'éléments riches en expériences diverses, qui ont également contribué à façonner ce mémoire.

A ce titre, j'adresse mes plus sincères remerciements à l'ensemble des personnes qui m'ont apporté leur connaissance et leur soutien durant ce travail de fin d'études.

Je tiens à remercier tout particulièrement :

Monsieur Pierre GUSMANO, Directeur Général de l'entreprise MIRE S.A.S et Maître de stage qui a bien voulu m'accueillir au sein de son entreprise. J'avais apprécié l'environnement professionnel et la diversité des activités lors d'un précédent stage et je souhaitais approfondir mes connaissances dans le domaine des opérations topographiques en milieu ferroviaire.

Monsieur Stéphane GACHON, Directeur Technique et financier de l'entreprise MIRE S.A.S pour son expérience, sa disponibilité, son écoute et l'autonomie qu'il m'a accordée dans le cadre de la phase d'expérimentation.

Monsieur Nicolas PEYROT, Technicien Géomètre, pour son aide et sa patience lors de la réalisation des tests sur le terrain.

Monsieur Vincent DEMEULE, Ingénieur Géomètre pour sa disponibilité, ses compétences et son aide dans l'usage du matériel et de sa configuration.

Monsieur José CALI, Professeur référent de l'ESGT pour son accompagnement, ses précieux conseils, son attention et ses remarques pertinentes dans la conception et la rédaction de ce mémoire.

Ma famille, pour son soutien et son encouragement tout au long de cette période, ainsi que mes amis parisiens qui m'ont permis de sortir, par moment, de ce cadre de travail.

De manière générale, j'adresse toute ma gratitude au personnel de l'entreprise MIRE S.A.S pour son accueil et avec qui j'ai eu plaisir à échanger durant ce travail de fin d'études.



LISTE DES ABRÉVIATIONS

LGV: Ligne Grande Vitesse
SEA : Sud Europe Atlantique
SNCF : Société Nationale des Chemins de Fer Français
VRD: Voirie Réseaux Divers
PK: Point Kilométrique
EPIC: Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial
GPS: Global Positioning System
RTK: Real Time Kinematic
RVB: Renouvellement Voie Ballast
ARTIX: Appareil de Relevé de Terrain Informatisé
RVB: Renouvellement Voie Ballast
LRS: Long Rail Soudé
SIG: Système Information Géographique
GNSS: Global Navigation Satellite System
GDOP: Geometrical Dilution Of Precision
GLONASS: Global Navigation Satellite System
IMU: Inertial Measurement Unit
CTC: Canted Track Coordinates
UTC: Uncanted Track Coordinates
CCE: Chef de Chantier Elémentaire
RE: Responsable d'Entreprise
EPI: Equipements de Protection Individuel
TPS: Total Station
NMEA: National Marine Electronics Association
LLPQ: Leica Local Position and Quality
RGF 93: Réseau Géodésique Français 1993
RINEX: Receiver Independant EXchange Format
RGP: Réseau GNSS Permanent
IGN: Institut National de l'Information Géographique et Forestière
EMQ: Erreur Moyenne Quadratique
LASER: Light Amplification by Simulated Emission of Radiation



TABLE DES MATIÈRES

AVANT PROPOS ET REMERCIEMENTS	2
LISTE DES ABRÉVIATIONS	3
TABLE DES MATIÈRES	4
INTRODUCTION	6
I PRÉSENTATION DU CADRE D'INTERVENTION.....	7
I-1 LE CONTEXTE FERROVIAIRE	7
I.1.1 Généralités	7
I.1.2 Les caractéristiques d'une voie.....	8
I.1.3 Les contraintes géométriques	8
I.1.4 La sécurité.....	10
I.1.5 Synthèse.....	11
I-2 LA SOCIÉTÉ MIRE S.A.S	11
I.2.1 Présentation.....	11
I.2.2 Missions	12
I.2.3 Matériel.....	12
I.2.4 Principaux chantiers sur voie ferrée	12
I-3 LES SITES ÉTUDIÉS	13
I.3.1 Site de Nanterre	13
I.3.2 Site de Saint Etienne	14
I.3.3 Site de Saint Pierre Le Moutier	16
I.3.4 Sites de Nemours et Fontainebleau.....	17
I-4 LE SITE D'EXPERIMENTATION	18
I.4.1 Acteurs de l'opération LGV-SEA	18
I.4.2 Organisation du chantier ferroviaire.....	19
I.4.3 Profils en travers de la LGV-SEA	20
I.4.4 Missions de l'entreprise MIRE S.A.S sur la LGV-SEA.....	20
II LES APPAREILS TOPOGRAPHIQUES EN MILIEU FERROVIAIRE	22
II-1 GÉNÉRALITÉS SUR LA CARTOGRAPHIE MOBILE	22
II-2 L'ÉVOLUTION DU MATÉRIEL EN MILIEU FERROVIAIRE	23
II-3 LE MATÉRIEL MOBILE ET LES COMPOSANTES DU SYSTÈME	25
II.3.1 Composante du levé	26
II.3.2 Composante de positionnement.....	26
II.3.3 Composante d'orientation	28
II-3 LE CHARIOT GRP 3000	29
II.3.1 Description	29
II.3.2 Capteurs.....	30
II.3.3 Principe de géo-référencement.....	31
II-4 MÉTHODOLOGIE POUR ADJONCTION DU GPS AU GRP 3000	33
II.4.1 Équipement.....	33
II.4.2 Connexion entre pivot et mobile	33
II.4.3 Licence	34
Figure	34
II.4.4 Configuration du récepteur.....	34
II.4.5 Paramètres de communication.....	35



II.4.6 Méthode GNSS applicable RTK	35
III LE PROTOCOLE D'EXPERIMENTATION	37
III-1 PRÉSENTATION DES DIFFÉRENTS TESTS	37
III.1.1 Test 1 - Vérification et validation du mode opératoire	38
III.1.2 Test 2 - Comparaison des deux modes opératoires.....	39
III.1.3 Test 3 - Comparaison entre levé en « point unique » et levé en « continu »	39
III.1.4 Test 4 - Influence des satellites sur la qualité des coordonnées.....	40
III.1.5 Test 5 - Capacité du post-traitement	40
III-2 LES RÉSULTATS ET L'EXPLOITATION DES TESTS	41
III.2.1 Test 1 – Vérification du mode opératoire	41
III.2.2 Test 2 – Comparaison des deux modes opératoires	42
III.2.3 Test 3 – Comparaison entre levé en « point unique » et levé en « continu ».....	45
III.2.4 Test 4 – Influence des satellites sur la qualité des coordonnées	47
III.2.5 Test 5 – Capacité du post-traitement.....	48
III.2.6 Récapitulatif et Synthèse des tests	50
III-3 ANALYSE COMPARATIVE.....	51
III.3.1 analyse multicritères	51
III.3.2 Synthèse et Analyse	52
III-4 BILAN ET PERSPECTIVES	52
III.4.1 Bilan	52
III.4.2 Perspectives.....	53
III.4.2.1 Les logiciels d'exploitation de la société MIRE S.A.S.....	54
III.4.2.2 L'amélioration de la précision	55
III.4.2.3 Méthodologie et formation du personnel	55
CONCLUSION	56
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	57
LISTE DES FIGURES-TABLEAUX-GRAPHES.....	59
ANNEXES	60
RÉSUMÉ.....	68



INTRODUCTION

La société MIRE S.A.S est l'entreprise de topographie dans laquelle s'est déroulé le travail de fin d'études présenté dans ce mémoire. La société compte un effectif permanent d'une cinquantaine de personnes. Active en France et à l'international pour un ensemble de donneurs d'ordres publics et privés, ses équipes sont appréciées pour leur expérience et leur réactivité.

La société participe à des missions d'assistance à la maîtrise d'œuvre, d'appui technique, d'études d'infrastructures ferroviaires sur de nombreux projets réalisés en France et à l'étranger. Afin de répondre au mieux aux attentes de ses partenaires, notamment pour les études de gabarit et de relevés ferroviaires, elle s'est équipée de matériel topographique de haute précision. En particulier, l'acquisition de six chariots GRP ces dernières années fut la solution retenue pour la saisie de données précises de la géométrie de la voie et de ses abords. Ce système détermine et contrôle la position de la voie dans le respect des tolérances admissibles, il décèle les écarts de position lors de la pose et de la maintenance de voies, il identifie les objets proche de la voie et il fait l'analyse de l'espace libre.

Le mode opératoire actuel est composé d'une « station totale » et d'un système mobile sur rail type « chariot GRP ». Les deux équipements sont complémentaires, le chariot intègre plusieurs capteurs capables d'acquérir à la fois la géométrie interne de la voie et de son environnement proche et la station totale connectée permet le positionnement absolu du chariot.

En revanche, sur des opérations au linéaire important et selon le degré de précision requis, le procédé est consommateur de temps puisqu'il nécessite de nombreuses interventions répétitives sur le terrain. Or, la préoccupation essentielle de l'exploitant du domaine ferroviaire est de réduire les délais d'immobilisation de l'infrastructure. Par ailleurs, la compétitivité implique aussi de limiter les charges financières liées aux relevés de terrain, d'autant plus que l'entreprise exporte également son activité à l'étranger. Le critère « temps » devient alors le paramètre commun des différentes préoccupations.

Compte tenu du plan de charge de l'entreprise MIRE S.A.S sur le réseau ferroviaire, l'objectif du travail de recherche porte sur l'optimisation du temps d'acquisition des données de terrain. A ce titre, un nouveau mode opératoire substituant la station totale par un GPS embarqué sur le système mobile pourrait être une solution alternative assurant le positionnement absolu du chariot. Après avoir paramétré le matériel et réalisé une série de tests, une analyse comparative entre les usages actuels et envisagés alimentera la réflexion à partir de l'exploitation des résultats.

En premier lieu, les caractéristiques du domaine ferroviaire et la particularité des missions de l'entreprise MIRE S.A.S dans ce secteur d'activités nécessitent préalablement à la proposition d'un nouveau protocole, une connaissance du domaine d'intervention ainsi que l'apprentissage du matériel. Une seconde partie sera consacrée à une présentation du matériel utilisé dans les différentes missions topographiques, principalement sur le réseau ferré, ainsi que les adaptations envisagées en phase d'expérimentation. Enfin, à partir de différents essais une analyse permettant d'évaluer la faisabilité de la solution alternative fera l'objet de la dernière partie de ce mémoire. Elle présentera également le bilan et les perspectives envisageables dans le cadre de ce projet.



I PRÉSENTATION DU CADRE D'INTERVENTION

I-1 LE CONTEXTE FERROVIAIRE

L'objet de ce mémoire, son protocole et les essais seront réalisés en milieu ferroviaire. Son infrastructure linéaire présente des caractéristiques géométriques spécifiques constituant une base de référence pour les missions du géomètre. Par ailleurs, les mesures de sécurité s'y appliquant, sont également des éléments incontournables pour toute personne intervenant sur ce domaine.

I.1.1 Généralités

Mis en place à partir du 19^e siècle en France, le réseau ferré national représente 30 000 km de voie ferrée irriguant l'ensemble du territoire. La SNCF bénéficie en grande majorité du monopole dans l'exploitation des services de ce réseau. Elle est l'un des premiers groupes mondiaux de transport de voyageurs et de marchandises avec 15 000 trains qui circulent quotidiennement et plus de 4 millions de voyageurs transportés par jour.

La SNCF s'est récemment réorganisée en un nouveau groupe comprenant trois EPIC (Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial) :

- SNCF Mobilités qui est l'opérateur de transports ;
- SNCF Réseau qui est en charge de la gestion des infrastructures et du réseau ;
- SNCF qui est en charge du pilotage stratégique du groupe.

Cette transformation affirme une volonté du groupe à être la référence mondiale des réseaux et des services de mobilité durable.

SNCF Réseau a la responsabilité de fiabiliser et moderniser le réseau ferré, afin que les trains puissent circuler dans des conditions optimales. L'entreprise publique travaille avec de nombreux partenaires, nationaux comme européens sur les projets ferroviaires allant de la conception à l'utilisation des voies. L'État détermine les orientations générales et les régions organisent et définissent les politiques de financement.

S'agissant des opérations de maintenance et de développement du réseau, SNCF Réseau travaille avec des entreprises mandataires. Les projets d'infrastructures, comme les lignes à grandes vitesses, sont confiés aux grands groupes de travaux publics.

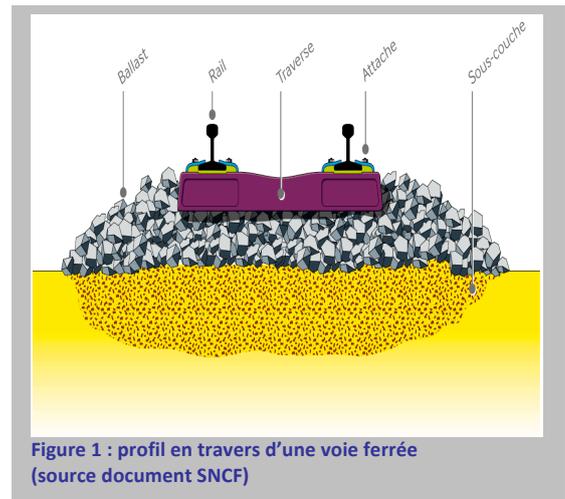
Sur ce domaine, la sécurité est un point essentiel de l'organisation des chantiers. Elle doit être respectée par tous les intervenants sur l'ensemble des champs d'intervention.

1.1.2 Les caractéristiques d'une voie

Les paramètres principaux sont:

- le type de rail utilisé (poids, longueur, section);
- le mode de fixation des rails aux traverses;
- la longueur des rails en voie;
- l'écartement des rails et les tolérances admises;
- le type et la densité des traverses (travelage);
- le tracé en long (rayons de courbure et dévers);
- le tracé en profil (pente ou rampe);
- le support (ballast ou béton);
- la charge admise par mètre courant ou à l'essieu;
- la vitesse des trains.

La figure 1 représente un profil en travers.



1.1.3 Les contraintes géométriques

Une voie ferrée présente des caractéristiques géométriques qui se mesurent suivant deux plans : le plan vertical définit la ligne ferroviaire par son profil en long et le plan horizontal la définit par son tracé en plan.

Sur toute la longueur de la ligne ferroviaire, le profil en long indique les points kilométriques (PK), l'altitude par rapport au terrain naturel et les déclivités. Le tracé en plan, qui représente la trajectoire du tracé vue du dessus, doit faire apparaître un alignement le plus rectiligne et des courbes les plus douces possibles. En raison de l'augmentation de l'effet centrifuge avec la vitesse, le rayon minimal des courbes est élevé, il dépend des vitesses ciblées.

L'énergie cinétique emmagasinée par les trains à grande vitesse et leur puissance massique très élevée leur permet de monter des rampes très fortes sans trop pénaliser leur consommation électrique. A titre d'exemple, la LGV Paris Sud-Est comporte des rampes de 35 ‰. Cette caractéristique facilite l'insertion des lignes et réduit en certains cas, les coûts de construction. D'autres types de voie « métrique ou étroite » ne permettent pas d'atteindre 200 km/h en service courant. La voie dite « normale » est la norme la plus répandue dans le monde.

Les paramètres géométriques et les seuils de tolérance de l'infrastructure ferroviaire constituent une base de références pour les missions de contrôles dans le cas de travaux de construction ou de programmes de maintenance. Nous proposons de reprendre dans ce chapitre, les principales caractéristiques d'une voie ferrée en lien avec ce mémoire. Les seuils de tolérance donnés dans les définitions suivantes dépendent d'un extrait du référentiel technique pour la réalisation de la Ligne à Grande Vitesse Sud-Europe-Atlantique.

L'écartement :

Comme l'indique la figure 2, l'écartement de la voie se mesure entre les champignons des rails dans un plan perpendiculaire aux rails, la cote nominale est de 1435 millimètres. Pour que l'essieu puisse rouler sans risque de déraillement, il est nécessaire que l'écartement de la voie soit compris entre un écartement minimal et un écartement maximal, respectivement E_{\min} et E_{\max} . Pour E_{\min} , l'essieu doit pouvoir reposer librement sur les rails sans frottement. Pour E_{\max} , une roue de l'essieu est plaquée sur le rail tandis que le bandage de l'autre roue conserve un appui suffisant sur le rail. E_{\min} doit être supérieur à 1433mm et E_{\max} inférieur à 1444mm.

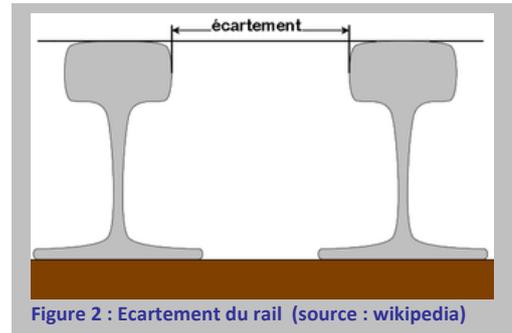


Figure 2 : Ecartement du rail (source : wikipedia)

Le dévers :

Comme le représente la figure 3, le dévers est la différence d'altitude entre les deux files de rail.

Aucun contre-dévers n'est admis.

Pour des vitesses de circulation supérieures à 30 km/h, le rail extérieur doit être surhaussé dans les courbes d'une valeur donnée par la formule suivante :

$$h = (V^2 * e) / (3.6^2 * 9.81 * R)$$

soit ; $h = 11.8 * V^2 / R$ avec :

$e = 1500$ mm

V : vitesse en km/h

R : rayon de la courbure en m

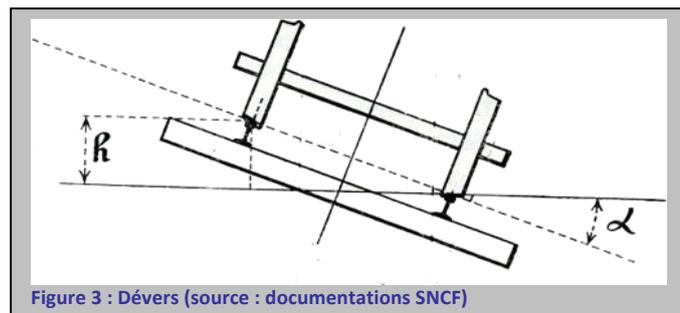


Figure 3 : Dévers (source : documentations SNCF)

La flèche :

La flèche est un segment joignant les milieux d'un arc et d'une corde définis par deux points identiques d'un cercle. Elle sert à affiner le tracé. En pleine courbe par exemple, la flèche sera maximale tandis qu'elle sera nulle en alignement. La figure 4 illustre le principe de la flèche.

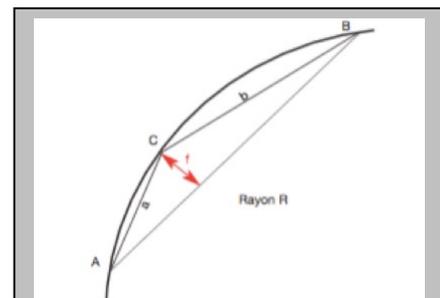


Figure 4 : Flèche
(source : <http://www.ilemaths.net>)

La déclivité :

La déclivité est l'inclinaison que présente le profil en long de la voie ferrée.



La valeur de gauche :

La valeur de gauche est la différence de dévers entre deux points (souvent espacé de trois mètres). Elle dépend de la vitesse de déplacement du train. Cette différence mesurée entre deux points espacés de trois mètres doit être inférieure à trois millimètres.

L'inclinaison du rail :

Afin de favoriser le centrage des roues du train, les rails sont inclinés vers l'intérieur selon une pente de $1/20^\circ$ en voie normale.

Le ballast :

La couche de ballast doit constituer un substrat nivelé et stable. L'épaisseur de ballast mesurée sous traverses ou supports d'appareil de voie au droit des rails dépend du type de traverse (bois ou béton), du tonnage annuel qui y circule et de la vitesse.

Le profil du ballast doit être régulièrement contrôlé notamment pour prévenir l'apparition de défauts tels que les affaissements, affouillements latéraux, dégarnissage des traverses.

L'usure :

Le rail ne doit pas être perforé par la corrosion.

L'usure des rails, dans un plan vertical, ne doit pas laisser une épaisseur résiduelle de champignon inférieure à 10 mm mesurée au-dessus du rétreint du rail. En voie normale, le chanfreinage par usure de la face intérieure du champignon ne doit pas dépasser une pente de 30° mesurée par rapport au plan vertical.

1.1.4 La sécurité

De façon générale, sur le domaine ferroviaire la sécurité est au centre de l'organisation des services à l'usager et de l'exploitation des infrastructures. A partir de ce postulat, la sécurité doit être intégrée dès la conception de tout projet ou toute intervention sur l'emprise domaniale. Elle se décline ensuite selon une organisation structurée par le biais de documents cadres et de prescriptions au sein de l'entreprise. Les salariés sont fortement impliqués dans cette démarche et les prestataires externes sont tenus de respecter les mesures de précaution édictées par des plans « sécurité ».

S'agissant plus particulièrement des interventions dans le cadre de ce mémoire, une formation sécurité fut obligatoire avant d'accéder aux différents chantiers. Elle informe sur les risques et les consignes que chaque intervenant du chantier doit connaître, ainsi que :

- les informations générales sur l'infrastructure, les entreprises;
- le contexte juridique, les documents obligatoires de sécurité et les règlements;
- les différents intervenants sur le chantier et leur imbrication dans l'organisation.

Lors de la réalisation des tests, il est obligatoire par exemple d'informer par radio le chef de chantier élémentaire (CCE) ainsi que le représentant d'entreprise (RE) pour accéder aux voies. L'accès au chantier nécessite un badge d'identification, l'utilisation exclusive des accès prévus et d'être doté impérativement d'équipements de protection individuels (EPI). Le badge et les EPI sont fournis après validation de cette formation.

Les EPI obligatoires sont les vêtements orange ou le gilet, un casque et des chaussures de sécurité. Lors des interventions sur voie, il faut obligatoirement se protéger par des dispositifs de sécurité type lumières et pétards, placés sur la voie de part et d'autre de la zone de travail. Par ailleurs, la zone doit être isolée du risque lié à l'électrification des caténaires.

En effet, les risques d'accident sont importants dans l'environnement ferroviaire et les précautions à prendre sont essentielles.

I.1.5 Synthèse

Le trafic se concentre désormais sur les lignes à grandes vitesses qui sont régulièrement entretenues et modernisées. L'objectif d'ici 2030 est de construire 800 km de voies ferrées nouvelles comprenant en bonne partie des lignes à grande vitesse, ainsi que 100 km pour le raccordement au réseau existant. Des contrats entre partenaires publics et privés sont passés pour des projets de grandes ampleurs. Cela a été le cas, pour la construction de la Ligne à Grande Vitesse Sud-Europe Atlantique (LGV SEA), par LISEA du groupe Vinci, qui est la société concessionnaire de la future ligne pour une durée de 50 ans.

La société MIRE S.A.S s'est spécialisée dans les travaux topographiques en milieu ferroviaire, elle y consacre une part importante de son activité. Le chapitre suivant est consacré à la présentation de l'entreprise et de ses principales missions.

I-2 LA SOCIÉTÉ MIRE S.A.S

I.2.1 Présentation



Dédié aux travaux publics, le groupe français NGE est une entreprise multi-métiers en croissance. Elle compte plus de 7500 hommes et femmes participant à des projets urbains ou de proximité, ainsi qu'à la construction de grandes infrastructures, en France et dans le monde. Son activité se développe à travers plusieurs filiales: le génie civil, les VRD et le terrassement, les canalisations et les réseaux, la route, les travaux géotechniques et la sécurisation, ainsi que les travaux ferroviaires.

L'entreprise TSO est devenue une filiale du groupe NGE en 2011, elle possède un savoir-faire et une expertise dans le domaine de la construction, du renouvellement et de l'entretien d'infrastructures ferroviaires. Ses compétences techniques et sa maîtrise dans le domaine lui a permis d'être l'auteur des projets les plus techniques en France et hors des frontières. Elle a par exemple posé les voies sur lesquelles le record du monde de vitesse a été atteint (la ligne LGV Atlantique en 1990 et LGV Est Européenne en 2007).

L'entreprise MIRE S.A.S fait partie depuis 2007 de la filiale TSO pour les travaux de topographie. Elle est spécialisée dans les domaines de l'instrumentation et de l'auscultation automatique, la lasergrammétrie terrestre 3D, l'interférométrie et les études ferroviaires dont elle a naturellement héritées et qui en font aujourd'hui son cœur de métier. L'entreprise en croissance comprend 53 salariés et son chiffre d'affaire annuel était de 5,7 millions d'euros en 2015.

Le siège de l'entreprise MIRE S.A.S est basé à Nanterre. Elle développe son activité en France et à l'étranger dans le domaine des travaux publics (V.R.D, terrassement, travaux souterrains), mais également en bâtiment et génie civil.

I.2.2 Missions



Ses principales missions concernent l'instrumentation, les relevés de terrain, le développement de logiciel, le scanner 3D, la polygonale, le récolement, les études ferroviaires et l'auscultation.

Sur le domaine ferroviaire, l'entreprise MIRE S.A.S intervient sur les infrastructures suivantes :

- tramway
- métro
- voies classiques
- TGV

Elle s'est spécialisée dans ce domaine depuis une dizaine d'années et principalement sur les programmes de LGV. Dans ce cadre, les principales phases d'intervention sont :

- travaux de polygonation de précision
- réception des plates-formes et du génie civil
- implantation de précision des points principaux
- suivi des bourreuses
- nivellement
- récolement de la voie

I.2.3 Matériel

Le matériel utilisé est constitué principalement de:

- niveaux classiques
- niveaux automatiques
- théodolites de précision
- logiciels spécifiques
- chariots de mesure GRP1000 et 3000

I.2.4 Principaux chantiers sur voie ferrée

Les grands chantiers sur le ferroviaire sont :

- TGV Belge
- TGV Coréen
- TGV Méditerranée
- TGV Anglais
- TGV Est
- LGV Atlantique
- LGV SEA (Sud Europe Atlantique)
- Métro Panama
- Métro Mexique



Figure 5 : Chantier Ferroviaire - Mire
(Source MIRE S.A.S)

La figure 5 illustre à titre d'exemple, des travaux topographiques sur un chantier à l'étranger.

La mise en œuvre des prestations sur une LGV nécessite du matériel de haute précision. Il doit répondre à des tolérances strictes en planimétrie et altimétrie. Les chariots GRP de la société suisse Amberg Technologies ont été choisis par l'entreprise MIRE S.A.S pour leur précision et leur facilité d'acquisition.

L'une des opérations sur laquelle est fortement mobilisé le personnel de l'entreprise, concerne la LGV SEA reliant Tours à Bordeaux. Aussi, comme le présente la partie suivante, elle intervient également sur d'autres voies conventionnelles du réseau national dont certains des sites présentés ci-dessous, seront l'occasion de découvrir différentes missions, ainsi que le matériel associé.

I-3 LES SITES ÉTUDIÉS

La réflexion préalable à la proposition d'un nouveau protocole de relevés ferroviaires nécessite une bonne connaissance des pratiques de l'entreprise, de son organisation et du matériel, ainsi que les contraintes du domaine d'intervention, en termes d'horaire, de sécurité, mais également des aspects techniques et réglementaires.

L'apprentissage sur les sites suivants, les différentes missions décrites ci-après et réalisées au cours des premiers mois d'intégration, ont permis de prendre connaissance des différents instruments et des techniques, employés par la société. L'objectif est d'être confronté aux préoccupations de l'entreprise et de pouvoir apporter des réponses pertinentes à ses attentes, notamment sur le nouveau mode opératoire envisagé.

I.3.1 Site de Nanterre

Numéro d'affaire : P990

Le test réalisé sur le matériel et présenté ci-dessous, a pour objet la prise en main du système GPS1200

Le chariot GRP est compatible avec les systèmes Leica GPS1200 et GPS500. L'entreprise MIRE S.A.S a, parmi son matériel topographique, deux systèmes GPS1200. Ce système se compose d'un mobile et d'un pivot. Les antennes sont connectées à un récepteur, boîtier sur lequel est fixée une radio comme moyen de communication.

Les démarches nécessaires au test du matériel en figure 6, sont la mise en place du pivot avec l'enregistrement des observations, la position du pivot en mode naturel, l'installation du moyen de communication avec le mobile (radio), l'émission des messages, la mise en marche du mobile avec l'enregistrement des observations, la vérification de la connexion radio entre pivot et mobile, l'enregistrement de plusieurs points, ainsi qu'un contrôle de quelques uns pour la comparaison des coordonnées.

Le diagnostic fait apparaître un problème de connexion radio sur l'un des systèmes GPS1200, nécessitant une intervention de la société Leica. Néanmoins, des tests ont été réalisés à partir d'un chariot en appliquant la méthode « RTK Pivot libre ».

Cette méthode est envisagée dans la mise en œuvre du futur protocole. La démarche sera détaillée dans la troisième partie du mémoire.



Figure 6 : Test matériel GPS
(source C Bury)

1.3.2 Site de Saint Etienne

Numéro d'affaire : P2770

Renouvellement de Voie et Ballast (RVB)

Ce site permet de découvrir les différentes missions topographiques de la société MIRE S.A.S sur un chantier de réhabilitation de la voie ferrée.

Le Renouvellement Voie Ballast (RVB) est un chantier mécanisé ferroviaire itinérant destiné à remplacer la voie ferrée dans son ensemble: les rails, les traverses et le ballast. Il s'agit d'une opération de maintenance lourde.

Un RVB peut avoir lieu sur une voie ferrée entièrement neutralisée pour l'occasion (aucun train n'y circule), ou dans le cas d'une double voie, avec une seule neutralisée, l'autre assurant le trafic, le plus souvent à vitesse réduite. Afin de ne pas pénaliser l'exploitation, la majorité des RVB se font de nuit comme l'illustre la figure 7 ci-contre.

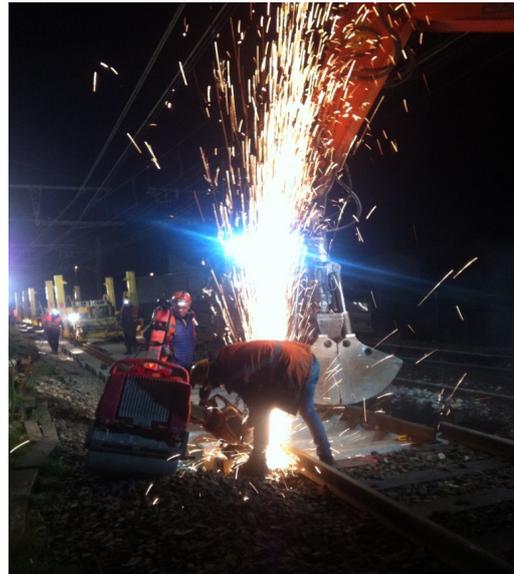


Figure 7: opération RVB (source C Bury)

Le RVB nécessite des matériels à haut rendement et à grande capacité, effectuant les opérations dans un ordre précis, décrit de la façon suivante:

- une dégarnisseuse est chargée de retirer le ballast et de le trier pour réutilisation éventuelle en le déversant sur la voie ;
- un train de substitution permet le renouvellement en continu des traverses et des rails ;
- une bourreuse assure la mise en place du ballast sous les traverses en plusieurs couches jusqu'au nivellement définitif de la voie ;
- une garnisseuse / régaleuse réalise la mise en forme de la couche de ballast ;
- un stabilisateur dynamique, simulant le passage de plusieurs convois par vibrations permet la stabilisation finale de la voie et du ballast.

Sur ce chantier, le tronçon comprend 300 mètres de voie dont 180 mètres d'appareillage assurant la liaison entre les voies.

Les premières interventions du géomètre sont un préalable aux études de définition du projet. Elles consistent à marquer et repérer un point tous les 10 mètres à l'aide d'un odomètre sur le rail, puis de matérialiser le déport des points par un support (piquet) ou sur un élément fixe du site (poteau caténaire par exemple) à proximité de la voie. Ensuite, il convient de rechercher des points connus (polygone de la SNCF) le long de la voie et lever à la station totale les points marqués sur le rail (voie 1 et 2), ainsi que les points de déport afin d'en définir leurs coordonnées. Enfin, il faut placer l'appareil au bord de la voie et en faire une mise en station à partir du référencement de points connus de la SNCF (au minimum trois points pour définir une « station libre »), puis réaliser le levé topographique sur l'emprise du projet et transmettre les données au bureau d'études.

La « station libre » correspond à une méthode de mise en station, qui à partir d'au moins trois références, permet d'établir la position de l'appareil, sans obligation de placement sur un point connu. Selon les différentes contraintes de chantier, ce procédé permet de se placer idéalement pour la visée. Il est alors facile de refaire une mise en station afin de rester au plus proche de l'avancement du chantier.

A partir de ces données et du levé topographique, l'ingénieur chargé de l'étude peut définir le projet selon les prescriptions du Maître d'Ouvrage.

Le projet réalisé et approuvé, le planning et le protocole d'intervention également validés, l'entreprise de travaux publics retire d'abord tous les équipements de la plate-forme (ballast, traverses et rails) avant de terrasser.

Une nouvelle intervention du géomètre est programmée à cette phase de terrassement pour vérifier le niveau de la couche de base (support sur lequel sera mis en œuvre le ballast) en effectuant un nivellement direct entre le point de départ et cette couche sur le même profil. Après validation du support, l'entreprise met en œuvre le ballast sur une épaisseur moyenne de 20 cm.

A ce stade, nous vérifions par un nivellement direct que la couche atteint le niveau de référence. En termes de main d'œuvre et de matériaux, ce type d'opération est coûteux. Il s'agit donc de respecter strictement les quantités prescrites au marché de travaux.

Après compactage et lorsque cette phase est réceptionnée, l'entreprise pose les traverses et le rail sur la voie.

La position théorique du rail étant définie dans le cadre du projet et reportée sur les plans d'exécution, nous connaissons alors la distance horizontale et la distance verticale pour chaque point du rail placé face au piquet « rejet » (en départ). Lorsque la voie est posée sur le ballast, il faut ensuite déterminer la position du rail et en établir une fiche dite de « bourrage ». Elle sera ensuite la référence utilisée pour positionner le rail à son emplacement définitif en planimétrie et en altimétrie sur la base des cotes du projet.

Suite au passage de la « bourreuse », nous devons vérifier la nouvelle position du rail, en fonction des mêmes repères. L'ajustement ne peut se faire que sur quelques centimètres. Une nouvelle fiche de « bourrage » servira alors au prochain passage de l'engin jusqu'au placement définitif du rail.

Afin de déterminer les valeurs de ripage (planimétrie) et relevage (altimétrie), nous utilisons systématiquement la même méthode ; sachant que la précision demandée n'est pas de l'ordre du millimètre pour ce type de voie où le train passe à petite vitesse.

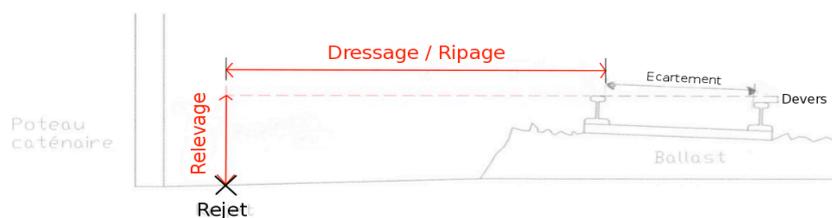


Figure 8 : Relevage et Dressage (source : C Bury)

En planimétrie, une simple vérification est effectuée à l'aide d'un niveau de maçon bullé alors placé sur le piquet rejet et un mètre placé à l'horizontale. En altimétrie, nous effectuons le contrôle à partir d'un niveau et d'une mire.

La bourreuse doit aussi « lisser » le rail dans les meilleures conditions et dans le respect du profil en long, l'objectif étant d'assurer les normes de sécurité et le confort des usagers.



Cette opération terminée et après en avoir contrôlé les seuils de tolérances admissibles (présentés au chapitre I-2-3), nous réalisons un récolement sur l'emprise du chantier à partir de la position des rails de chaque voie et de chaque point de départ.

Sur des tronçons plus importants ou en gare, les fiches de bourrage (*exemple de fiche en Annexe 1*) peuvent être réalisées à partir d'un chariot de type ARTIX ou GRP. En effet, si l'on cherche à connaître les distances entre le rail et le piquet rejet, ce matériel est bien adapté et plus précis que la méthode simple décrite précédemment. Le laser du chariot indique les distances et transmet au besoin, des informations complémentaires sur la géométrie de la voie. Ce fut d'ailleurs le cas pour la gare de Saint Etienne.

Ce type de mission est souvent programmé de nuit afin d'en réduire l'impact sur l'exploitation de la voie ferrée. Elle nécessite un respect absolu des consignes de sécurité ainsi qu'une parfaite cohésion et coordination entre la SNCF, le géomètre et l'entreprise en charge des travaux. Aussi, le géomètre y joue un rôle prépondérant dans les fiches de suivi nécessaires à la position du rail au fur et à mesure de l'avancement du chantier.

Une telle opération permet de découvrir l'ensemble des travaux topographiques, ainsi que la méthode, la précision et le matériel. Ces informations constituent une base de référence dans la mise en œuvre d'un futur protocole de relevés ferroviaires.

I.3.3 Site de Saint Pierre Le Moutier

Numéro d'affaire : P2866

Renouvellement de Voie et de Ballast (RVB)

Ce site permet d'appréhender la partie opérationnelle et fonctionnelle d'un relevé ferroviaire avec de fortes contraintes de délai et de sécurité.

Les délais imposés par le Maître d'Ouvrage a nécessité un renfort en personnel. Deux équipes de deux personnes présentes sur le chantier se relayent jour et nuit. Le RVB concerne 300 mètres de rails, comprenant deux appareils de voie.

Ce type de mission nécessite de la ponctualité et de la rigueur. Il faut être présent pendant toutes les différentes phases, puis réaliser les mesures au moment opportun et en parfaite coordination avec l'autre équipe, notamment dans le suivi des informations et des données. En effet, il ne serait pas envisageable de ralentir la cadence des travaux. L'ingénieur en charge de la coordination des travaux joue dans ce cas, un rôle central de planification, d'organisation et de contrôle de l'aménagement. Les figures 9 et 10 ci-dessous, illustrent les phases de contrôle.



Figure 9 : Phase de contrôle (source C Bury)



Figure 10: Phase de contrôle (source C Bury)

Les points caractéristiques retenus de l'expérience de ce chantier sont le niveau d'exigence des mesures de sécurité, la rigueur d'organisation et les contraintes d'immobilisation de la voie. L'analyse multicritères du protocole envisagé devra prendre en considération ces différents paramètres.

1.3.4 Sites de Nemours et Fontainebleau

Numéro d'affaire : P2354

Relevé d'un quai de gare

Ce site a permis de découvrir l'utilisation d'un chariot mobile de type « ARTIX » dans le cadre du relevé d'un quai de gare.

Ce relevé a pour objectif de répondre à une demande de la SNCF suite à un programme de mise en conformité des quais de la gare pour l'accueil d'un nouveau gabarit. Le relevé porte sur la valeur précise séparant le rail du quai, à raison d'un profil tous les deux mètres sur la longueur totale des quais de la gare de Nemours et Fontainebleau.

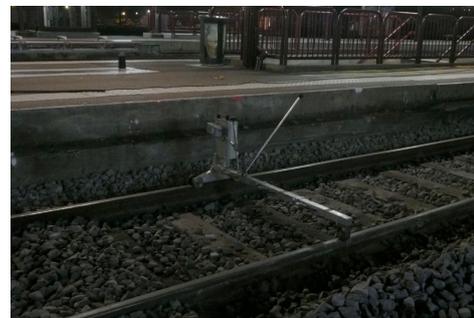


Figure 11 : Chariot mobile « Artix » (source C Bury)

Un chariot mobile « ARTIX » (Appareil de Relevé de Terrain Informatisé) conçu par TSO est utilisé pour cette mission. En effet, le matériel est particulièrement adapté par son faible poids et son encombrement, sa facilité à installer sur site et sa rapidité d'exécution. Les figures 11 et 12 présentent le chariot ARTIX.

Le chariot est équipé d'un capteur d'écartement de voie, d'un inclinomètre et d'un télémètre laser permettant de mesurer les distances horizontales et verticales du point visé.

S'agissant du mode opératoire, il a fallu réaliser un marquage sur le quai tous le 2m, monter le chariot et faire la calibration du dévers. Ensuite, le levé du quai de gare est réalisé à l'aide du télémètre placé sur le chariot.

La précision de lecture sur le bord du quai est obtenue à l'angle de la perpendiculaire entre le plan horizontal et le plan vertical. Si le bord du quai est arrondi, il faut alors placer une équerre en sa bordure, afin de lever correctement le point d'intersection des deux plans.

La mesure du point avec le télémètre laser renvoie plusieurs données (*explication sur un schéma en Annexe 2*) :

- E: Écartement (mm)
- D: Dévers (mm)
- DH_i : Distance horizontale entre la cible et l'intérieur du rail (mm)
- DH_a : Distance horizontale entre la cible et l'axe réel de la voie (mm)
- DV_b : Distance verticale entre la cible et la file basse (mm)
- DV_h : Distance verticale entre la cible et la file haute (mm)

Nous devons alors connaître les valeurs DH_i , DV_b ou DV_h , le dévers, ainsi que le rayon de la courbe pour calculer les cotes demandées par l'exploitant.

Dans la réflexion à engager pour le travail de recherche, cette mission permet d'appréhender le principe de relevé ferroviaire à partir d'un chariot. Le matériel est parfaitement adapté à ce type de prestation. En revanche, il présente l'inconvénient d'être moins précis que le chariot GRP, il ne permet pas de positionner la voie, puisqu'il n'est pas équipé de prisme. L'intervention avec le chariot ARTIX constitue une première approche de l'usage d'un système mobile de levé topographique sur la voie ferrée, qu'il faudra approfondir avec l'usage du chariot GRP 3000 comme développée dans la partie suivante.



Figure 12 : Relevé des quais de gare (source C Bury)

I-4 LE SITE D'EXPERIMENTATION

Durant la période de stage, les missions décrites ci-dessus et la mise à disposition du matériel de la société MIRE S.A.S sur le chantier de la Ligne Grande Vitesse - Sud Europe Atlantique (LGV-SEA) a permis, dans de bonnes conditions de sécurité, la réalisation de cette phase expérimentale. Ce site sera le support des tests nécessaires au travail de fin d'études.



I.4.1 Acteurs de l'opération LGV-SEA

LISEA est la société concessionnaire de la future ligne pour une durée de 50 ans.

COSEA est la société en charge de la conception et de la construction de la LGV-SEA.

La phase chantier s'organise autour de 5 groupes d'entreprises (figure 13):

- conception
- infrastructures
- superstructures
- signalisation et télécommunication
- énergie

MESEA est la société en charge de la future exploitation et maintenance.



Figure 13: Opération LGV-SEA (source : site « Travaux LGV-SEA »)

La LGV SEA, plus grand chantier d'Europe, aura une longueur de 300 km :

- Nord du tracé : Tours – Poitiers = 120 km
- Sud du tracé : Poitiers – Bordeaux = 180 km

La société MIRE S.A.S a actuellement en charge le récolement des 180 km de la tranche Sud, ce qui mobilise le quart de son effectif.

1.4.2 Organisation du chantier ferroviaire

La mise en place des équipements ferroviaires est la deuxième grande étape du chantier de construction de la LGV SEA Tours-Bordeaux, qui vient succéder à la phase de génie civil. Elle nécessite une grande coordination des équipes. L'organisation du chantier est différente des travaux de génie civil, avec notamment l'implantation de deux bases de travaux ferroviaires ainsi que l'intervention de métiers et d'engins spécifiques.

Les différents équipements sont posés dans un ordre précis sur le chantier, dont voici les principales phases :

1° PHASE: Installation des poteaux caténaires

Une entreprise est mandatée pour l'installation des poteaux caténaires. L'opération en comporte 14 000 sur sa totalité et l'entreprise doit en poser 30 par jour. Ce chantier mobilise 150 personnes par base de travaux

2° PHASE : Distribution des traverses sur la plate-forme

L'opération comporte dans sa globalité 1 million de traverses. Les entreprises en charge de ce chantier réalisent 650 mètres de pose par jour ; sachant que chaque traverse pèse 250 kg.

3° PHASE: Pré-ballast

Le ballast est posé en 2 fois avec une première couche moyenne de 20 cm et une seconde après la pose de la voie par des trains spécifiques de travaux ferroviaires. La figure 14 ci-contre illustre la mise en œuvre du ballast.

4° PHASE: Pose des voies

Cette étape correspond à la pose des traverses et des Longs Rails Soudés (LRS).

2 techniques sont utilisées :

Méthode dite par voie auxiliaire : Les engins posent une voie auxiliaire composée de traverses. Ils installent ensuite la voie principale. Les LRS sont acheminés pour les deux voies par un train à partir de la voie auxiliaire.

Technique du wagon pousseur : Le train circule sur les rails définitifs. Le wagon pousseur achemine les LRS jusqu'à leur emplacement et il pousse les rails à l'avancement. Un engin de type pelle araignée positionne les rails sur les traverses.

5° PHASE: Ballastage et relevage

La hauteur du ballast doit être de 30 cm au minimum sous traverse ce qui correspond aussi à 4,2 tonnes de ballast par mètre de voie.

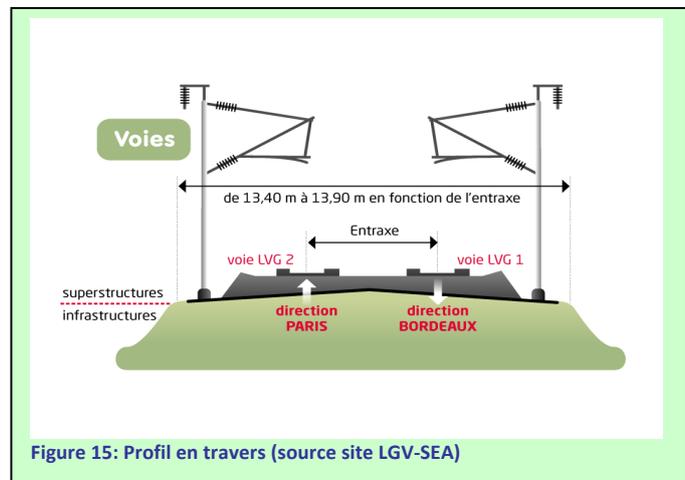
Le bourrage est la méthode de réglage et de stabilisation de la voie, comme pour le RVB décrit précédemment.



Figure 14: Mise en œuvre ballast
(source: site LGV-SEA)

I.4.3 Profils en travers de la LGV-SEA

Comme l'illustre la figure 15 ci-contre, le profil en travers de la LGV comporte une plate-forme à double voie dont la largeur varie en fonction de la vitesse de référence. La distance entre l'axe des deux voies est déterminée pour limiter l'effet de souffle lors du croisement des trains. Sur la LGV cet entraxe est de 4.50m pour une vitesse de référence de 300km/h.



I.4.4 Missions de l'entreprise MIRE S.A.S sur la LGV-SEA

Site de Clérac (près d'Angoulême)

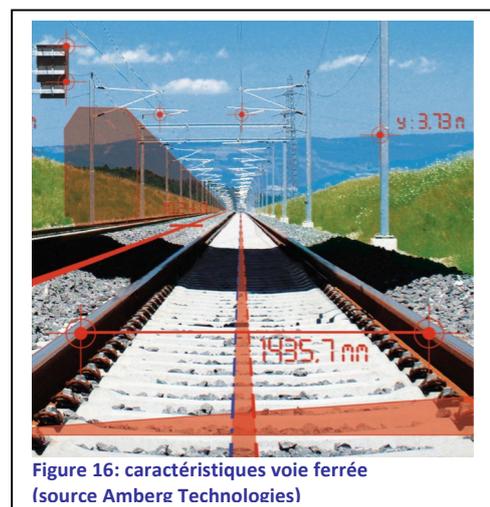
Numéro d'affaire : P2146

Chantier de la LGV – SAE

L'entreprise MIRE S.A.S participe aux travaux topographiques depuis les premières phases du projet. L'une des dernières missions à accomplir est le récolement de l'infrastructure ferroviaire après travaux. Cette mission sera l'occasion de découvrir plus en détail les possibilités du chariot GRP 3000.

En effet, le chariot GRP 3000 offre des possibilités intéressantes pour le récolement de l'infrastructure, puisqu'il enregistre rapidement la géométrie de la voie, ainsi que la position de son axe. Le cahier des charges prescrit un profil tous les 10 mètres comportant les indications suivantes (figure 16):

- le dévers
- l'écartement
- l'écart planimétrique au projet
- l'écart altimétrique au projet
- les poteaux caténaires
- les points particuliers
- les points kilométriques



Toutes les informations enregistrées par le chariot pourraient être acquises par d'autres moyens topographiques, en utilisant par exemple une règle à dévers pour le dévers. Par contre, le chariot présente l'avantage d'enregistrer simultanément toute la géométrie, ce qui présente un gain de temps considérable.

La méthode de relevé

Afin de positionner le chariot en absolu, il convient de réaliser un suivi tachéométrique du prisme placé sur le profilomètre du chariot. La figure 17 illustre le chariot et la station totale.

Tout d'abord, nous faisons une mise en station (« station libre ») en prenant comme référence huit goujons placés sur les poteaux caténaux à proximité de la station. La précision de cette mise en station est très importante pour garantir la position de l'axe de la voie en Est, Nord et Altitude. La précision doit être en dessous du millimètre.

Les mesures sont prises tous les 10 mètres sur un point kilométrique arrondi. Pour une station, il faut se placer dans le sens des PK croissants et relever 180 mètres de voie. La méthode est ensuite renouvelée en effectuant un recouvrement de 20 mètres sur le tronçon levé précédemment.



Figure 17 : Levé profil au chariot – LGV SEA
(source C Bury)

Apprentissage et Méthodologie

La prise de connaissance du matériel utilisé pour ces travaux, avec une phase d'apprentissage spécifique au GRP 3000, a été programmée de façon à comprendre le fonctionnement du couple « chariot – station totale ».

Les différentes phases pratiques sont les suivantes :

- Assemblage du chariot et connexion (plate-forme, profilomètre, ordinateur, prisme)
- Mise en station de précision par la méthode d'une station libre.
- Calibration de l'inclinomètre sur les rails par une mesure de dévers, reprise après retournement du chariot (180°) sur le même emplacement. Le logiciel calcule l'erreur de dévers qu'il appliquera à chaque mesure. Cette calibration doit être réalisée à chaque fois que le chariot est réassemblé ;
- Vérification des trois points doubles de la zone précédente marquée sur le rail. Si deux des points doubles sont inférieurs à cinq millimètres, la procédure est validée, sinon il faut reculer de 50 mètres avec le chariot et la station, puis refaire une mise en station. Les points pris plusieurs fois entre chaque station sont moyennés par le logiciel.

Les écarts en planimétrie et altimétrie sur les points doubles doivent être inférieurs à 5 millimètres.

- Relevé de la voie en prenant un point tous les dix mètres avec le chariot. Le logiciel enregistre la position de l'axe de la voie grâce au suivi tachéométrique et aux paramètres internes de la voie à ce même instant. Il enregistre également la géométrie interne sur chaque position prise. De plus, il est demandé de lever au profilomètre tous les poteaux caténaux croisés sur la voie (environ tous les cinquante mètres), ainsi que des points particuliers matérialisés par des bornes. Ils correspondent à des changements du tracé de la voie (courbe ou pente).
- Marquage sur le rail des trois derniers points levés du tronçon, puisqu'ils serviront de points doubles pour le contrôle ultérieur.
- Prise d'un point de contrôle à la station totale avant de changer de zone

La station totale est placée à proximité de la banquette (partie ballastée sur laquelle repose les rails et les traverses) de façon à pouvoir prendre les mesures sur les poteaux caténaires, la voie et les points particuliers. Une fois l'appareil positionné, huit références connues en position matérialisée par un goujon placé sur le poteau caténaire, sont levées. Après calcul, si la mise en station ne rentre pas dans les tolérances, elle doit être refaite. Sinon, la visée est orientée sur le prisme du chariot et le mode « lock » de la station est activé pour le suivi tachéométrique.



Figure 18 : Station positionnée avant levé – LGV SEA (source C Bury)

Les travaux de récolement doivent être d'une précision millimétrique, d'autant plus qu'ils concernent une ligne à grande vitesse. Le matériel utilisé pour garantir la précision de la position du chariot est le suivant:

- une station totale Leica TS16 - précision 1'. (figure 18)
- un réflecteur de précision Leica GPH1P précision de centrage 0,3mm.

Après avoir pris connaissance de l'environnement professionnel, des pratiques usuelles et du domaine d'intervention, une analyse détaillée des appareils topographiques utilisés particulièrement sur l'infrastructure ferroviaire, est nécessaire à la compréhension de son fonctionnement et des perspectives d'utilisation dans le cadre d'un nouveau protocole.

II LES APPAREILS TOPOGRAPHIQUES EN MILIEU FERROVIAIRE

II-1 GÉNÉRALITÉS SUR LA CARTOGRAPHIE MOBILE

Les progrès de la géodésie spatiale ces vingt dernières années ont permis de développer des systèmes de plus en plus utiles aux activités topographiques. Aussi, la cartographie mobile est aujourd'hui un moyen incontournable dans de nombreux domaines et projets. Avec ces systèmes performants d'acquisition de données, le levé topographique prend une nouvelle dimension.

Les plates-formes sont des systèmes multi-capteurs aux capacités diverses et variées. Ils peuvent stocker, traiter et géo-référencer les données acquises, fournissant une solution globale aux problèmes de cartographie.

La cartographie mobile peut être réalisée par des moyens aériens (satellites, avions, drones), maritimes (bateaux, sous-marins) et terrestres. Dans ce dernier cas, la précision est plus élevée compte tenu de la vitesse de la plate-forme et la distance rapprochée de l'objet à lever. La cartographie mobile terrestre est souvent liée aux systèmes embarqués sur des voitures, mais il existe d'autres utilisations comme la cartographie en milieu ferroviaire. Ces systèmes sont assez simples et légers, ils se composent le plus souvent d'un profilomètre ou d'un scanner pour lever les objets environnants, une station totale ou un GPS pour se positionner et plusieurs capteurs mesurant la géométrie de la voie. Ils sont capables d'effectuer différentes missions topographiques dans le cadre d'études de voie et

de gabarit. Il existe aujourd'hui plusieurs modèles comme, le « Swiss trolley » de Terra International, le « Krab Slight » fabriqué par la société KZV, le « GRP System FX » d'Amberg Technologie.

Dans le cadre d'une retranscription pour la revue XYZ à l'occasion du Forum de la Topographie, on évoque l'évolution du matériel mobile dans les relevés topographiques. En effet, ce sujet occupe une place importante dans les travaux topographiques en général et en particulier dans le domaine ferroviaire.

Voici une retranscription du propos introductif : « *La question primordiale est de trouver le meilleur compromis entre précision et rapidité d'acquisition* ».

[GOULETTE F., 2009]. C'est effectivement le cœur de notre réflexion dans ce travail de fin d'études, dont nous allons analyser les possibilités suite à l'évolution du matériel.

II-2 L'ÉVOLUTION DU MATÉRIEL EN MILIEU FERROVIAIRE

La mesure de la voie ferrée a été améliorée au fil des années grâce aux nouveaux instruments de mesure utilisés par les entreprises de topographie. L'évolution est directement liée aux nouvelles technologies et à la nécessité de travailler avec un degré de précision satisfaisant, mais aussi aux besoins spécifiques car les interventions diffèrent selon le type de voie, l'environnement, le pays.

Peu d'entreprises de topographie sont spécialisées sur le domaine ferroviaire. Il a fallu de nombreuses années avant de voir apparaître des systèmes mobiles se déplacer sur les rails des voies ferrées.

Au début, la position du rail était déterminée en plaçant simplement un mini prisme sur le centre de la largeur du champignon d'un rail (partie supérieure du rail sur laquelle repose les roues du train) puis sur l'autre, à intervalle régulier. La moyenne des deux mesures permet alors de déterminer l'axe de la voie. Déterminer la position du rail en posant de façon aléatoire la canne du prisme sur la demi-largeur du champignon va obligatoirement engendrer des imprécisions. Ces erreurs auront un impact sur la position, le dévers et l'écartement des rails calculés pour chaque profil.



Figure 19 : Levé à la canne (source C Bury)

Un autre moyen d'améliorer cette précision fut aussi source de réflexion interne à l'entreprise MIRE S.A.S. L'idée n'est plus de chercher à positionner la demi-largeur du rail mais la file intérieure du rail, c'est à dire l'intersection des plans horizontal et vertical du champignon à l'intérieur du rail. Ils ne sont pas parfaitement perpendiculaires, en revanche l'intersection de ces deux plans constitue une position qui peut être plus facilement déterminée. La société MIRE S.A.S a alors conçu une canne à rail (figure 19). Cette canne est posée sur le rail, elle permet de déterminer la file intérieure du rail. La base de la canne ne repose plus sur une pointe mais sur une équerre qui se positionne sur les deux plans du rail. Placée ainsi, elle permettra de prendre en compte l'usure du rail. Un prisme est placé sur la pointe de l'équerre et détermine sa position. Il suffit alors de caler correctement la canne sur le rail pour connaître sa nouvelle position (écart type sur la précision de 2 mm). En prenant la position de part et d'autre du rail et en faisant la moyenne des deux, il est possible d'en déduire l'axe de la voie. Ces deux positions (file haute et file basse) permettent également de déterminer plus précisément le dévers et l'écartement de chaque profil.

Ce moyen, bien que précis, à ses défauts. Il est consommateur de temps sur le terrain lorsque le travail concerne une importante longueur de voie à lever. De plus, il est délicat de se placer correctement sur les rails au droit du même profil, celui-ci en chaque point correspondant à la perpendiculaire du sens d'avancement. La société MIRE S.A.S a donc développé un moyen de déterminer plus rapidement la position des deux rails sur un même profil. La solution fut d'intégrer sur une règle à dévers, deux goujons sur lesquels peuvent reposer un prisme. En posant correctement la règle sur les rails à l'aide de deux butées, elle se trouve perpendiculaire au rail. L'autre extrémité de la règle est poussée sur le bord intérieur du rail par un ressort. Bien calée sur les deux rails, la position peut être levée en prenant les mesures sur les deux prismes de la canne, correspondant chacun à l'intérieur des deux rails (précision millimétrique).

Plus récemment, la société MIRE S.A.S s'est équipée de six chariots GRP 3000 pour les levés du domaine ferroviaire. Ce système mobile est bien plus précis, rapide et complet pour ce type de prestation. La figure 20 représente le chariot GRP3000 placé sur les rails.



Figure 20: Chariot de mesure (source : C BURY)

Les travaux d'aménagement et de maintenance de la voie ferrée nécessitent l'intervention de géomètres et l'utilisation d'un matériel mobile, type « chariot de mesure » capable de cartographier l'environnement de l'infrastructure. Le chariot, équipé de capteurs, peut enregistrer la géométrie interne (dévers, écartement, gauche, flèche....) de la voie et définir les tolérances prévues par le Maître d'Ouvrage.

Lors de la mise en œuvre des composants, le chariot donne une position absolue indispensable à l'implantation de la voie selon les caractéristiques du projet. A partir du chariot, ces mesures permettent de réaliser des fiches de bourrage qu'utilisera la bourreuse pour déplacer le rail en planimétrie (ripage) et en altimétrie (relevage).

Le récolement de la voie est aussi l'une des prestations que permet de réaliser le chariot. Lorsque les rails sont placés correctement, l'axe est relevé une dernière fois pour valider son emplacement définitif dès lors que les seuils de tolérances attendues sont respectés. Avec son instrument de mesure (profilomètre ou scanner), le chariot peut également lever l'environnement de la voie, comme les superstructures, les caténaires, des points particuliers, mais aussi les quais de gare ou les tunnels qui doivent impérativement respecter le gabarit des trains. Pour ce dernier point, le chariot est performant, puisqu'il permet de déterminer les côtes horizontales et verticales d'un point (quais de gare) par rapport à l'intérieur du rail le plus proche de ce point. Ces données sont indispensables pour la SNCF, lorsqu'elle réalise de nouveaux quais ou procède à leur rénovation.

Le chariot de mesure de la voie ferrée est finalement utilisé dans de nombreux domaines d'application, allant de l'avant projet, aux travaux ainsi qu'au récolement de la voie. Il présente une avancée technologique indéniable dans les projets de construction, de réhabilitation et de maintenance des infrastructures ferroviaires. Ce matériel de collecte de données constituera le support des essais proposés dans le cadre de ce mémoire.

II-3 LE MATÉRIEL MOBILE ET LES COMPOSANTES DU SYSTÈME

Les systèmes mobiles de cartographie ont connu un essor important ces dernières années face à une forte demande d'informations géographiques. En parallèle, les systèmes d'information géographiques (SIG) désormais utilisés dans de nombreuses applications comme le système de navigation personnel (automobilistes ou piétons) ou en aménagement urbain par les architectes et urbanistes ont désormais recours à la 3D. La qualité de ces systèmes nécessite une quantité importante d'information dont les moyens de collecte sont divers, comme les images par satellite ou par avion.

Le système de levé terrestre « statique » au scanner laser terrestre mesure une multitude de points en X, Y, Z (nuage de points) structurant l'image 3D. La saisie des points se fait suivant deux directions perpendiculaires de rotation, le système étant placé en un point donné. Selon le matériel, la précision est de l'ordre du centimètre pour une distance couverte de l'ordre de la centaine de mètres et une vitesse d'acquisition variant entre la dizaine et la centaine de milliers de points par seconde. L'inconvénient majeur de ce système d'acquisition est le temps d'intervention élevé en comparaison aux systèmes mobiles.

Le système de levé terrestre « mobile » nécessite un scanner laser installé sur une plate-forme mobile. Il permet d'établir un nuage de points en fonction du déplacement du support. Dans ce cas, l'acquisition des données est identique à un système statique avec l'avantage de se déplacer plus rapidement d'un point d'observation à un autre. A partir de capteurs, d'un GPS et d'une centrale inertielle, la position et l'orientation de la plate-forme mobile sur sa trajectoire est connue. Le système peut être complété d'un odomètre qui mesure la position ou la vitesse des roues de la plate-forme. Dans ce cas, la précision doit être du centimètre en position et du degré en orientation pour être comparable au système terrestre fixe. Or, certains cas spécifiques comme la densité de la végétation ou du bâti ne permettent pas de garantir parfaitement la précision requise.

Le système de levé « aérien » est particulièrement adapté aux projets de grande superficie, mais la densité de points est plus faible qu'en terrestre compte tenu de l'éloignement du scanner par rapport aux éléments relevés. **Le système de levé « par drones »** à mi-chemin entre le levé aérien classique et le levé terrestre permet de cartographier des lieux inaccessibles par voie terrestre sur des zones réduites. Même si les fonctions ne sont pas comparables, son coût reste bien plus avantageux que l'utilisation d'un avion.

Les composantes du système

L'acquisition de données à partir de systèmes mobiles peut se décomposer en trois parties, la composante du levé, la composante de positionnement et la composante d'orientation. Elles sont décrites respectivement dans les paragraphes suivants.



II.3.1 Composante du levé

Différentes méthodes peuvent être utilisées pour réaliser le levé.

Certains utilisent la **photogrammétrie ou la photographie** : Romain GABORIT, explique dans son PFE [GABORIT, 2011], comment obtenir un film géo-référencé en point kilométrique par adjonction de caméras vidéo 2D placées sur un chariot de mesures ferroviaires. L'entreprise MIRE S.A.S avait besoin d'un système capable de répertorier des objets de l'environnement ferroviaire de type signalisation, pancartes, aiguilles de voie, ponts, tunnels et de pouvoir en positionner les objets en PK. Il a fallu créer un logiciel d'acquisition et de géo-référencement des images en post-traitement ; ce logiciel s'appelle PK Express. Il est donc couplé au chariot GRP.

La troisième dimension peut s'obtenir par stéréoscopie, en prenant plusieurs clichés d'une même zone avec des prises de vue différentes.

Un autre moyen d'acquisition est la **tachéométrie**. C'est la méthode d'acquisition du chariot GRP 3000 par l'intermédiaire d'un profilomètre. Il ne s'agit pas de réaliser un levé complet d'une zone (façade, tunnel...) mais de réaliser des profils ou de cibler des points particuliers. Lors du récolement par exemple, il était demandé aux équipes utilisant le chariot, de lever tous les goujons présents sur les poteaux caténares, ainsi que des bornes au sol indiquant les changements de courbes ou de pentes. Il est parfois demandé de prendre un profil complet pour la mesure de gabarit. Dans ce cas, le profilomètre est programmé avec un pas ou un angle à définir. Cette technique évite le traitement d'une trop grande quantité de données.

La plus récente des méthodes d'acquisition est la **lasergrammétrie**. Un scanner laser 3D est placé sur le système mobile et permet d'acquérir une plus grande exhaustivité des données par rapport à la tachéométrie. C'est le cas du GRP5000 qui est la dernière version de chariot conçue par la société Amberg Technologies. L'instrument effectue une numérisation complète de l'environnement avec l'acquisition de millions de points (nuage de points).

II.3.2 Composante de positionnement

La composante de positionnement doit permettre un positionnement absolu du système mobile. Dans un référentiel terrestre, la position est alors géo-référencée soit par suivi tachéométrique, soit par une mesure GNSS.

Le suivi tachéométrique

C'est la méthode qu'utilise l'entreprise MIRE S.A.S pour les relevés de voie et la réalisation de récolement avec le système GRP 3000. Elle consiste à connecter une station totale au chariot sur lequel repose un prisme. Le prisme permet de repérer la position du chariot à chaque instant et de façon automatique. Le mode « Lock » (visée de la station fixe sur le centre du prisme) est utilisé pour un suivi continu de prisme. A partir d'un logiciel connecté à l'ordinateur du chariot, sa position est parfaitement détectable. Un seul opérateur est donc nécessaire dans ce cas.

Dans ce cas précis, il est possible d'obtenir la position en levé unique ou continu, de prendre une position sur un point défini (tous les dix mètres) ou prendre la position en continu. La vitesse de déplacement du mobile est un paramètre à ne pas négliger, car elle impacte la distance entre deux mesures successives.



Les mesures GNSS

Un autre moyen de positionner un système mobile peut se faire par mesures GNSS (Système de Navigation par Satellites), en fixant une antenne GNSS sur la plate-forme.

Le principe général de la mesure GNSS consiste à réaliser une multilatération dans l'espace à partir des satellites connus en coordonnées. Les distances entre les satellites et le récepteur au sol sont calculées par ce dernier à partir de signaux envoyés par les satellites. Elles sont déduites de deux mesures fondamentales : la mesure de code et de phase. Dans l'espace, quatre satellites sont nécessaires pour calculer une position. On peut alors calculer l'intersection de 4 sphères donnant un point unique dans l'espace, ce point d'intersection des sphères représente le positionnement du récepteur à la surface de la Terre. En effet, la mesure du temps de propagation du signal entre chaque satellite et le récepteur de l'utilisateur permet de calculer le rayon de chacune des sphères puisque la vitesse de propagation du signal est connue.

Pour garantir une précision centimétrique, il faut corriger les mesures influencées par différents postes d'erreurs : on travaille alors en mode différentiel par l'utilisation de récepteur GNSS au sol. Comme le décrit Laurent MOREL dans « Les méthodes de travail dans les réseaux GNSS », le principe est le suivant : *« A partir des observations d'un récepteur mobile, des observations d'une station de référence et de sa position connue avec précision, le logiciel de post-traitement ou le récepteur mobile en temps réel vont synchroniser les données afin de calculer les coordonnées du mobile. Le principe consiste ainsi à calculer les coordonnées d'un vecteur appelé ligne de base dont une des extrémités est parfaitement connue dans une réalisation du système géodésique dans lequel nous souhaitons nous positionner »* [MOREL L., 2013].

C'est en faisant des calculs de différenciation multiple (simple et double) que les erreurs liées aux satellites et au récepteur mobile s'annulent (erreur d'horloge et bruits d'électronique du satellite et récepteur mobile) ou tentent de s'annuler (erreur de centre de phase de l'antenne du satellite et du récepteur mobile, erreur d'orbite du satellite). Les erreurs de réfraction ionosphérique ou troposphérique sont estimées, puis corrigées. Les erreurs diminuent d'autant plus que la longueur de la ligne de base est faible.

Le nombre de satellites ainsi que la constellation visible dans l'espace depuis le récepteur, influe directement sur la qualité du positionnement du mobile. En d'autres termes, les satellites doivent être suffisamment bien répartis, de manière à ce que le calcul d'intersection des 4 sphères soit le moins ambigu possible. Il existe différents indicateurs de DOP (Dilution Of Précision) traduisant l'influence de la répartition des satellites sur la précision du positionnement d'un récepteur GNSS. Le GDOP (Global Dilution Of Précision) par exemple, traduit l'affaiblissement global de la précision. Il peut être lié à une mauvaise répartition des satellites dans l'espace ou à un problème de mauvaise synchronisation temporelle entre l'horloge satellite et l'horloge du récepteur.

En complément et pour optimiser la qualité, la zone de levé doit être située dans des endroits faiblement encombrés d'obstacles (végétation, bâtiments...). Ces obstacles peuvent pénaliser la mesure et la perturber, voire fausser les observations en raison du phénomène de multi-trajets.

La majorité des systèmes mobiles utilisent le GPS en RTK (Real Time Kinematic). Cette solution est adaptée à un usage cinématique et offre une précision de la position de l'ordre de quelques centimètres, si le récepteur reçoit des corrections différentielles.

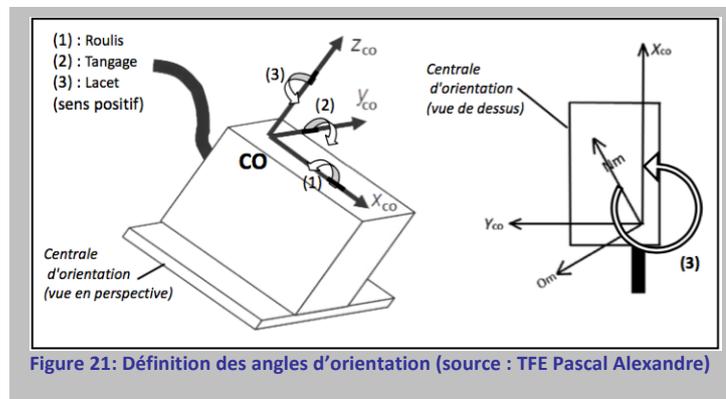
II.3.3 Composante d'orientation

Pour définir l'orientation d'un objet au cours du temps dans un référentiel donné, il est nécessaire d'en connaître son orientation. Les centrales d'orientation et les centrales inertielles sont capables de déterminer cette orientation.

Elles sont généralement munies des mêmes capteurs, mais ne fournissent pas les mêmes informations. La centrale d'orientation donne simplement les angles d'orientation tandis que la centrale inertielle donne en complément le positionnement en temps réel.

La centrale inertielle est composée d'une unité de mesure inertielle nommée IMU (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 inertielles à composants liés. Les trois capteurs d'accélération disposés de façon orthogonale détectent l'accélération linéaire selon les axes X, Y et Z.

Les trois capteurs de rotation renseignent sur la détection des rotations autour des axes X (roulis), Y (tangage) et Z (lacet), comme décrit dans la figure 21 ci-contre. Les 6 degrés de libertés relatifs au mobile sont donc identifiables.



Un chariot GRP 3000 que possède l'entreprise MIRE S.A.S est équipé d'une centrale inertielle (actuellement au Panama). Les avantages sont nombreux, puisqu'elle permet de déterminer la position du chariot à tout moment pendant l'avancement sans devoir reprendre la position par GPS ou par une station totale. La vitesse d'acquisition de données peut aller jusqu'à 4 km par heure et l'utilisation par tous les temps (fort ensoleillement, pluie) est possible, sans exigence de corridor de vue. En connaissant une position de départ, toutes les autres positions de l'avancement du chariot sont déduites. La performance d'un tel procédé est appréciable, en particulier dans les tunnels. Par contre, ce système est très coûteux, il faut donc en évaluer sa rentabilité, quant au coût d'investissement et d'exploitation.

Par ailleurs, placé sur les rails d'une voie, le système mobile n'a pas obligatoirement besoin de centrale inertielle, puisque la trajectographie est contrainte par la géométrie rectiligne des rails qui est déterminée avec les capteurs du chariot.

En l'état actuel, les systèmes mobiles ne répondent que partiellement aux besoins et ils s'inscrivent probablement dans la complémentarité par rapport aux systèmes statiques. Néanmoins, ils apparaissent comme un compromis intéressant entre densité de points acquis et rapidité d'intervention. Dans ce contexte, le paragraphe suivant est consacré plus particulièrement à la présentation du chariot GRP 3000, ses équipements et son principe de géo-référencement.

II-3 LE CHARIOT GRP 3000

II.3.1 Description

Le système GRP FX, développé par la société suisse Amberg Technologies, est la solution adaptée aux mesures de données précises sur la géométrie et l'environnement de la voie ferrée. En fonction des besoins individuels, la construction modulable du chariot permet d'adapter le système de manière optimale. Le chariot, par la présence de plusieurs capteurs, permet d'obtenir des informations sur la voie comme l'écartement, le dévers et la longueur. De plus, son poids et sa facilité d'utilisation permettent des travaux topographiques s'intégrant facilement dans le processus de construction sur le domaine ferroviaire.

Actuellement, trois modèles sont proposés par la société : le GRP 1000, 3000 et 5000. Le GRP 1000 est la plus ancienne version, elle enregistre uniquement les paramètres internes de la voie grâce aux capteurs présents sur la plate-forme. Un prisme est positionné sur le chariot pour obtenir une position absolue si le chariot est connecté à une station totale. Le GRP 3000 (figure 22), en est une extension, il a l'avantage d'être équipé d'un profilomètre permettant de prendre des profils ou des points uniques de l'environnement de la voie, comme des profils d'ouvrage (tunnels, quais...) pour la mesure de gabarit, mais également des points particuliers au bord de la voie (goujons, réseaux divers...). Ce chariot peut être équipé d'un GPS placé sur un mât de la structure et relié au chariot. Il permet alors de déterminer la position absolue du système sans utiliser la station totale. Ce protocole est moins précis, mais il offre des avantages qui seront développés dans les parties suivantes.



Figure 22: Chariot GRP 3000
(source C Bury)

Le modèle de chariot « ARTIX » développé par TSO n'est pas assimilable au GRP3000, il n'a pas les mêmes précisions de mesure de la voie et n'est pas conçu pour être positionné par suivi tachéométrique ou GPS.

La dernière version de la société Amberg Technologies est le GRP 5000 qui est équipé d'un scanner 3D, remplaçant alors le profilomètre de la version précédente. Un Travail de Fin d'Etudes a été proposé par Benjamin Dupuis traitant de l'étude et de l'utilisation de ce système mobile de cartographie 3D en milieu ferroviaire.



Il résume :

« 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, utilisé 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'importantes quantités de données sont acquises dans un temps réduit par rapport aux systèmes terrestres fixes. Ces données peuvent être par la suite géo-référencées 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. »

[DUPUIS B., 2014].

II.3.2 Capteurs

La structure mobile est équipée des différents capteurs suivants :

Odomètre : capteur calculant la distance totale parcourue. Placé sur le côté mono-roue du chariot, l'odomètre compte les tours effectués par la roue. Avec un diamètre de roue connu et sachant le nombre de tours effectués, il peut mesurer la distance parcourue. Il détermine des points métriques relatifs avec une précision $< 0.5 \%$.

Profilomètre (Profiler 110 FX) : distancemètre laser motorisé mesurant sans réflecteur à une portée de 0.3 m à 30 m, avec une précision de ± 1.5 mm. La distance aux points d'appui doit être inférieure à 15 m.

Inclinomètre : capteur de dévers pour la mesure du dévers. Il est placé sur la pièce centrale du chariot. Grâce aux changements de niveau à bulle, connu avec précision, on peut avoir l'inclinaison par rapport au plan horizontal. La précision est de ± 0.5 mm pour un écartement nominal de 1435 mm.

Extensomètre (TGS FX) : capteur d'écartement qui mesure l'écartement entre les deux rails. Une résistance subit des forces qui poussent l'extensomètre vers l'intérieur ou l'extérieur. La précision est de ± 0.3 mm

II.3.3 Principe de géo-référencement

Le système est capable de fournir des informations de position et d'attitude avec une précision suffisante. Il peut être géo-référencé.

La position absolue du chariot est donnée par un prisme ou une antenne GPS. Le calcul du géo-référencement de l'axe de la voie est décomposé en plusieurs étapes. Les figures 23 et 24 montrent les différents repères utilisés par les deux méthodes de positionnement.

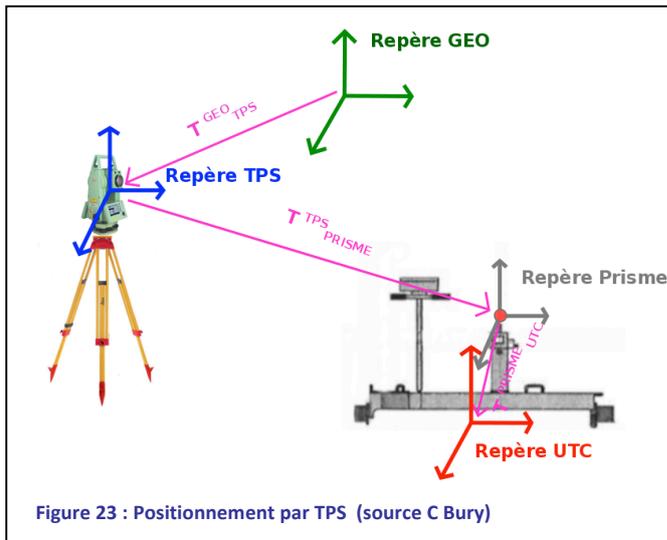


Figure 23 : Positionnement par TPS (source C Bury)

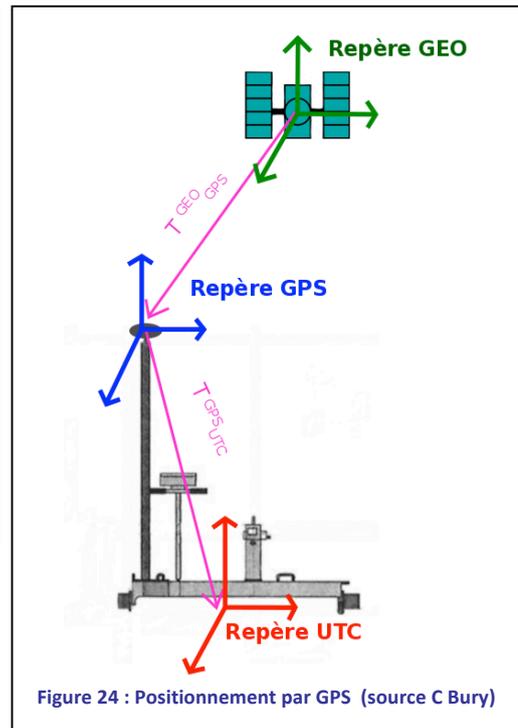


Figure 24 : Positionnement par GPS (source C Bury)

Explication des repères :

- Repère GEO : repère terrestre dans lequel on veut exprimer les coordonnées de l'axe de la voie
- Repère TPS, GPS, PRISME : repères associés aux appareils
- Repère UTC, CTC (Uncanted Track Coordinate) : repères associés au chariot.

En connaissant la géométrie interne du chariot, les points levés par le profilomètre peuvent être translatis du système « profilomètre » vers le système « chariot CTC » (Canted-Track-Coordinates). De plus, connaissant le dévers D de la voie grâce à l'inclinomètre, les points levés dans le système CTC peuvent être transformés par rotation dans le système UTC (Uncanted-Track-Coordinates) dont les axes sont corrigés du dévers.

Le principe est illustré dans la figure n°25 ci-dessous.

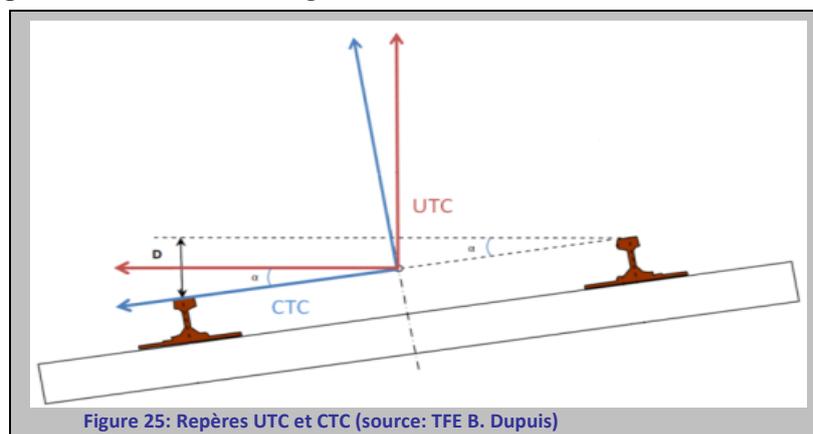
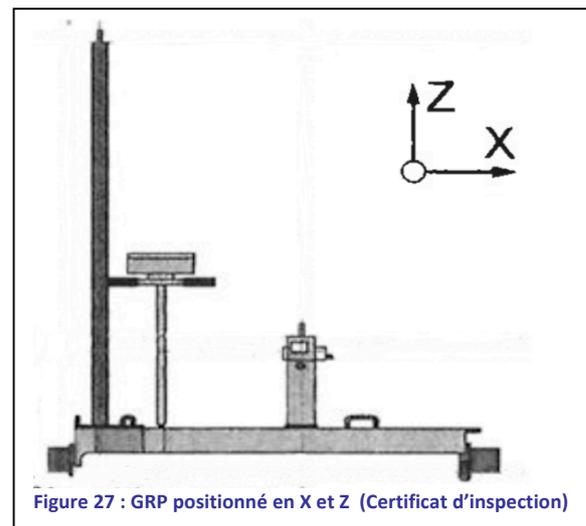
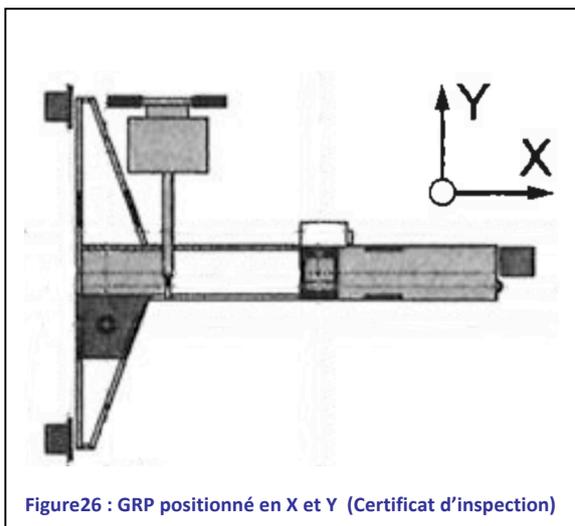


Figure 25: Repères UTC et CTC (source: TFE B. Dupuis)

Pour connaître l'orientation du chariot lors de son déplacement sur les rails, les angles d'attitude doivent être déterminés. N'étant pas équipé d'une centrale inertielle, le chariot GRP utilise le capteur d'inclinaison et la géométrie rectiligne de la voie pour déterminer son orientation. Ces trois angles décrivent le changement d'orientation d'un état initial par rapport à un autre. L'angle de roulis est l'angle de déviation par rapport au plan horizontal, dans la partie transversale de la voie. Il est déterminé par un capteur d'inclinaison sur le chariot. Il n'y a pas de capteur d'inclinaison dans la direction longitudinale pour mesurer l'angle de tangage. L'inclinaison de la pente est donc déterminée par la trajectoire du prisme ou du GPS, donnée à deux moments consécutifs. Pour l'angle de lacet, une force appuie l'extensomètre contre l'intérieur de la voie, afin d'éviter l'oscillation affectant les mesures, il n'y a pas de dérive de lacet. Ces trois angles sont schématisés dans la partie II.3.3 de ce mémoire sur la figure 21.

Lorsque le chariot circule sur les voies, il définit momentanément l'axe de la voie comme l'axe des Y, il est alors possible d'en déduire les axes X et Z en fonction de sa position sur la voie, comme mentionnées aux figures 26 et 27 ci jointes.



La position absolue du chariot est donc déterminée par la station totale ou le GPS, à la fréquence d'échantillonnage souhaitée. Ces positions ainsi géo-référencées sont traitées par un logiciel adapté à ce type de chariot afin de déterminer la position absolue de l'axe de la voie ferrée.

En synthèse, le chariot GRP 3000 est parfaitement adapté aux acquisitions de données sur une infrastructure linéaire telle que le milieu ferroviaire. La méthode répond aux seuils de tolérance qu'exige les prestations topographiques. Afin d'optimiser le délai des interventions sur site, l'entreprise MIRE S.A.S propose de tester une adaptation du chariot par adjonction d'un GPS au système mobile, même si l'on ne peut concevoir pour autant, que le positionnement par GPS pourra participer à des missions de récolement de la voie. Le paragraphe suivant présente la méthodologie appliquée en vue de tester ce mode opératoire.

II-4 MÉTHODOLOGIE POUR ADJONCTION DU GPS AU GRP 3000

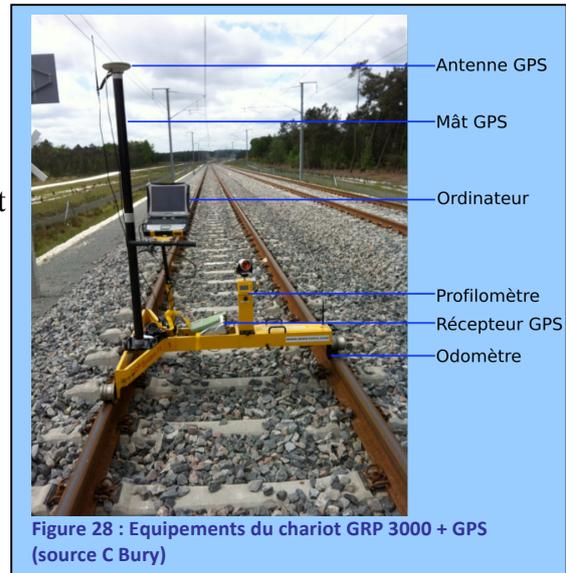
Ce chapitre a pour objectif de présenter la méthode appliquée dans l'adjonction du GPS au chariot GRP 3000. Les équipements du chariot sont mentionnés dans la figure 28. Le chapitre présente en particulier le principe de connexion entre pivot et mobile, la configuration du récepteur ainsi que les paramètres de communication.

En effet, la solution technologique n'était pas « plug and play ». Il a fallu paramétrer les différents appareils pour que cela fonctionne.

II.4.1 Équipement

Suite à l'installation du matériel, le chariot GRP 3000 est équipé d'un mât GPS, d'un mobile (antenne GPS AX1200 et récepteur Leica) et d'un ordinateur.

Les équipements annexes sont les batteries, les câbles de connexion, ainsi qu'un tendeur fixant le récepteur. Le profilomètre n'est pas indispensable.



II.4.2 Connexion entre pivot et mobile

Le logiciel Amberg Rail accepte les coordonnées pour lesquelles les ambiguïtés sont résolues. La connexion entre le pivot et le mobile est donc indispensable si l'on souhaite utiliser le logiciel pour effectuer les mesures. Afin de ne pas être surpris par du matériel défaillant, une vérification du bon fonctionnement du système GNSS est recommandé avant d'utiliser le protocole liant le chariot et GPS.

En phase expérimentale le système GNSS mis en place pour effectuer les mesures à partir du chariot était défaillant. Sans raison décelable, la radio du récepteur mobile n'émettait plus, tandis que celle du pivot fonctionnait. Après plusieurs vérifications du matériel et des branchements, la configuration des récepteurs, dans laquelle il est possible de modifier les paramètres de la radio, pouvait à priori répondre au problème. En effet, dans l'interface « Temps Réel » du récepteur, il est possible de choisir le type de radio, le port de la radio, la référence du récepteur, la référence de l'antenne, le canal, la fréquence. Toutes les situations possibles pouvant établir la connexion radio ont été réalisées, mais aucune d'entre elles n'a permis d'y parvenir. Ce système GNSS avait déjà été défaillant et envoyé chez Leica. Sans pouvoir résoudre le problème, provenant probablement de la radio ou du récepteur, les nouveaux tests ont été effectués avec un autre système GNSS 1200.

II.4.3 Licence

Un simple positionnement du GPS sur le chariot n'est pas suffisant pour déterminer la position de l'axe de la voie. En effet, le logiciel Amberg Rail traite les données brutes acquises par le mobile, mais nécessite une licence payante du constructeur Amberg Technologies permettant la connexion du GPS au chariot. Bien que cette licence soit rarement demandée par les entreprises, il paraît cependant intéressant d'en faire usage pour certains types de travaux. L'activation de la licence implique de charger un fichier informatique dans le logiciel GRP Fidelity.

Le logiciel GRP Fidelity, kit de réglage permettant de contrôler les tolérances du système, doit être installé sur l'ordinateur connecté au chariot. Il permet de fournir des mesures parfaitement fiables et de garantir une fiabilité durable. Il est donc possible ensuite de calibrer et régler le système, afin de contrôler tous les éléments utiles aux mesures de la géométrie interne de la voie.

La licence renseigne également sur des paramètres géométriques qui seront appliqués en complément des paramètres internes de la voie.

Les deux captures d'écran (figure 29 et 30) ci-dessous, montrent respectivement les translations pour le TPS et pour le GPS appliquées par le logiciel de façon à déterminer la position de l'axe de la voie, lorsque le chariot est placé sur celle-ci. Ces translations diffèrent logiquement entre les possibilités de configuration proposées. Elles dépendent d'abord du matériel d'acquisition de la position (TPS ou GPS), mais également de la géométrie de la voie, c'est à dire du dévers, de l'écartement et de la pente à chaque position levée. Elles représentent les distances entre le prisme ou le haut de l'antenne à un point interne du chariot qui n'est pas l'axe de la voie.

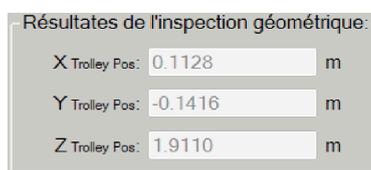


Figure29: Translations GPS (source C Bury)

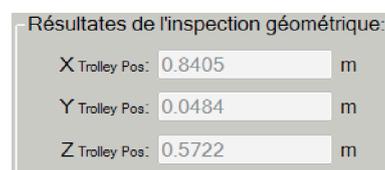


Figure 30 : Translations TPS (source C Bury)

II.4.4 Configuration du récepteur

Sans configuration spécifique du récepteur Leica, il est fort probable que la connexion avec le chariot échoue. Il faut alors rentrer dans les paramètres du récepteur, à partir du menu « Interface », et configurer la communication entre le GPS et le chariot, afin que le logiciel Amber Rail reconnaisse le GPS. La chaîne NMEA (National Marine Electronics Association) est une spécification pour la communication entre les équipements, elle doit être activée sur le récepteur GPS et assignée à un port sur lequel il faudra brancher le câble reliant récepteur et chariot. De plus, il est important que la chaîne à activer soit de type LLQ (Leica Local Position and Quality), cette information est vérifiée sur la fenêtre du récepteur Leica dans le menu NMEA.

Enfin, dans le menu « Paramètres Instrument » des configurations du récepteur Leica, il faut aussi modifier la hauteur d'antenne du mobile qui est fixée à 2,00 mètres par défaut en lui donnant la valeur 0,00. Si cette manipulation n'est pas faite, la hauteur du mobile restera 2,00 mètres sous la position réelle.

En effet, lors des premiers essais avec le chariot configuré au GPS, un écart vertical d'environ -2,00 mètres apparaissait systématiquement entre la position mesurée et la position du projet, alors qu'avec la station totale cet écart ne dépassait jamais 2 cm. En changeant des paramètres de hauteur d'instrument sur le logiciel Amberg Rail ou directement dans le menu « lever » du GPS, aucune solution ne paraissait résoudre ce problème. Suite à un échange avec l'assistance Leica, le problème a été résolu à partir des paramètres du récepteur.

II.4.5 Paramètres de communication

Afin d'établir la connexion du GPS avec le logiciel Amberg Rail, il convient d'en définir préalablement les paramètres de communication, puis s'assurer que des ports sont disponibles sur l'ordinateur pour l'usage du logiciel (ports disponibles de 1 à 20). Il est possible de changer leur numéro si les seuls disponibles, vont au delà de 20. Quatre ports sont nécessaires à la connexion de l'ensemble des instruments: chariot, profilomètre, TPS, GPS. La station totale est connectée à l'ordinateur par Bluetooth ou par une radio branchée au chariot.

Dans les options du logiciel Amberg Rail, les réglages de communication à effectuer pour le GPS sont :

- Port COM ; sélectionner le port COM utilisé pour la communication entre l'ordinateur et le GPS. Un port COM est donné par défaut (port COM12) mais celui-ci est rarement disponible. Dans ce cas, il faut en sélectionner un autre (souvent entre 16 et 20).
- Débit en « bauds » ; sélectionner le débit en bauds utilisé pour la communication entre l'ordinateur et le GPS installé sur le chariot. Ce débit doit correspondre à celui défini sur le GPS.
- Parité ; sélectionner la parité. La parité par défaut est « aucune ».
- Bit de données ; sélectionner le bit de données. Celui par défaut est de 8.
- Bit d'arrêt ; sélectionner le bit d'arrêt. Celui par défaut est de 1.

II.4.6 Méthode GNSS applicable RTK

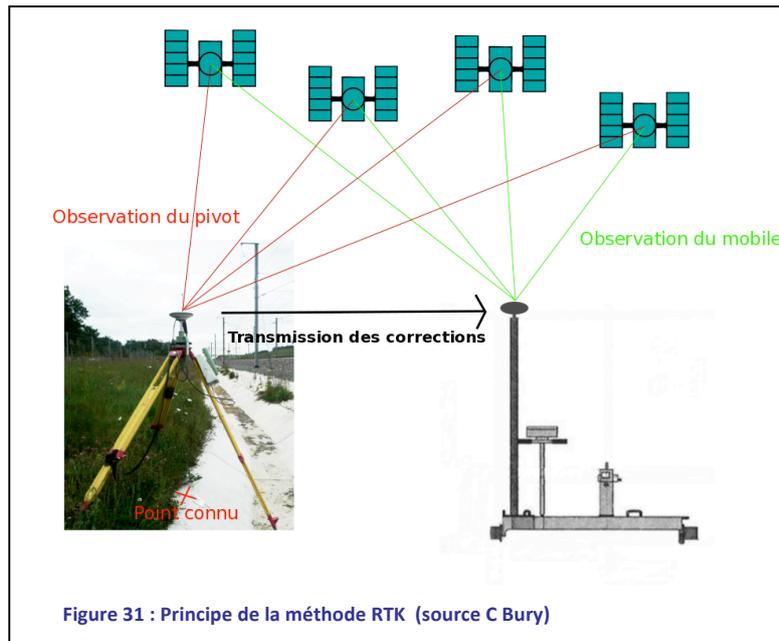
La méthode proposée par le logiciel Amberg Rail est la méthode **Real Time Kinematic**. Il paraît opportun d'en décrire le principe et sa mise en place sur le terrain.

Principe : La figure 31 illustre la méthode.

Le mobile calcule en temps réel la ligne de base le séparant de sa station de référence (base ou pivot) placée sur un point connu du chantier.

Le pivot transmet en temps réel ses corrections sur la ligne de base au mobile qui les reçoit et les applique à ses propres observations, afin de déterminer sa position centimétrique.

Le rattachement du pivot en post-traitement est inutile si le pivot est déjà connu en coordonnées.



Phase terrain :

La phase terrain consiste à mettre en place le pivot sur un point connu du chantier permettant la réalisation d'observations GNSS de qualité. Il convient ensuite de mesurer la hauteur d'antenne, puis d'installer le moyen de communication avec le récepteur mobile (radio ou télécom). Il est également nécessaire de fixer la position du pivot en entrant les coordonnées du point (ou en mode naturel avec « ICI » si la position du point n'est pas connue) et démarrer l'enregistrement des données. Ensuite, il faut mettre en marche le mobile et vérifier la communication avec le pivot ainsi que le flux de corrections, puis s'assurer que le système fixe les ambiguïtés entières. A ce stade, il est nécessaire de réaliser plusieurs initialisations successives par retournement de la canne. On réalise ensuite le levé en stationnant sur une période de quelques secondes par point.

La classe de précision théorique de cette méthode est de 2 à 5 cm. Ce degré de précision est adapté pour des relevés de voies en fonction de leur catégorie et du niveau d'exigence du Maître d'Ouvrage. C'est parfois le cas pour un relevé avant des travaux de réaménagement de voies ou certaines missions à l'étranger où la demande d'une précision millimétrique n'est pas systématiquement requise.

Le protocole proposé dans le cadre du travail de fin d'études consiste à utiliser le couple « GPS + chariot GRP 3000 » dans l'objectif de diminuer le temps d'intervention en parvenant dans la limite du possible à des résultats et des degrés de précision les plus proches de la méthode « TPS + chariot GRP 3000 ».

Suite à l'adjonction du GPS au chariot, après en avoir testé les paramètres, les connexions et le fonctionnement, les essais développés au chapitre suivant ont pour objectif d'évaluer le nouveau mode opératoire envisagé pour certaines opérations topographiques en milieu ferroviaire.

III LE PROTOCOLE D'EXPERIMENTATION

Le protocole d'expérimentation a pour but de modifier le mode opératoire actuel dans lequel le positionnement du chariot GRP 3000 est donné par un suivi au tachéomètre. Une série de tests doit permettre de vérifier ce même positionnement par des mesures GNSS. Il convient ensuite de comparer et d'analyser les résultats, puis d'en déduire les limites d'application envisageables.

III-1 PRÉSENTATION DES DIFFÉRENTS TESTS

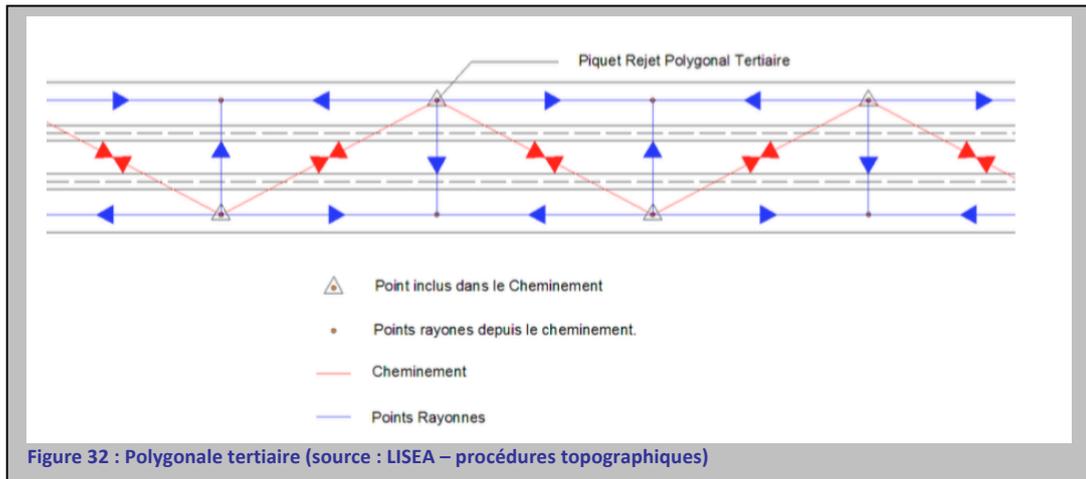
Les tests ont été réalisés sur le site de la LGV SEA après que la phase de récolement ait été validée. La voie est donc parfaitement en place au moment de l'acquisition des données. Ce travail sur les voies nécessite des autorisations et des mesures de sécurité particulières. Les tests ne pouvant être réalisés qu'en fin de journée après autorisation du chef de chantier élémentaire (CCE), il convient d'assurer une sécurité suffisante autour de la zone de travail puisqu'à cette période de la journée, des trains spéciaux et d'autres engins ferroviaires circulent sur la voie pour rentrer à la base « travaux ». Pour des raisons de sécurité, à chaque test un responsable d'activité (RA) est systématiquement présent dans la zone lors de l'intervention. Un salarié de l'entreprise MIRE S.A.S participe également aux essais. Par le biais de ces tests, le travail de recherche a pour but essentiel de vérifier les évolutions possibles du mode opératoire actuel.

Le canevas de référence se compose de la « *polygonale planimétrique emprise* » et de la « *polygonale altimétrique plateforme* ».

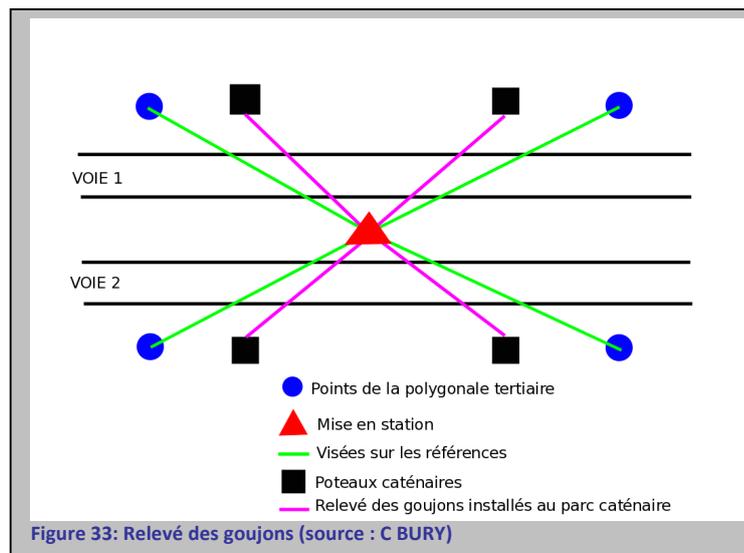
- **Le canevas planimétrique emprise** est constitué de points intervisibles distants d'environ 200 mètres, implantés le long de la ligne nouvelle (LN). Il permet d'assurer une bonne homogénéité sur l'ensemble de la LN et une cohérence rigoureuse entre la position de la voie et les repères fixés sur les poteaux caténares. Les points sont matérialisés par des rivets sur les ouvrages ou des bornes. La précision absolue entre les points du canevas planimétrique emprise est de $\pm 5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$.

- **Le canevas altimétrique plate-forme** représente une maille de nivellement sur l'ensemble du projet afin d'effectuer le suivi des ouvrages et de la voie. Les repères qui constituent cette maille sont implantés sur des ouvrages fixes et pérennes. La précision absolue des points du canevas plate-forme est de $\pm 2 \text{ mm} \sqrt{L}$ (avec L la longueur du cheminement en km). La plupart de ces points sont identiques à ceux du canevas planimétriques ; ainsi pour un même point, nous avons une bonne précision en planimétrie et altimétrie.

Le canevas de référence est utilisé pour déterminer une polygone tertiaire qui servira de base aux suivis des travaux, elle garantira la cohérence de l'ensemble. La polygone tertiaire sera constituée d'un couple de piquets « rejet » tous les 200 mètres. Le schéma de la figure 32 illustre la procédure.



Ainsi, cette polygone permet de déterminer les coordonnées des goujons présents sur chaque poteau caténaire. Leur position est calculée par la méthode de Pothénot (méthode de calcul par triangulation utilisée pour la détermination d'un point P à partir d'au moins 3 points connus), avec les 4 points de la polygone tertiaire comme l'illustre la figure 33 ci-dessous.



Les écarts moyens quadratiques (EMQ) ne doivent pas excéder 2 mm en X, Y et Z et 0.0015 gon pour l'angle horizontal. La différence sur les coordonnées observées dans les points doubles ne doit pas dépasser 5 mm. Les goujons servent ensuite de référence pour la mise en station de la station totale qui positionnera dans le même référentiel, le chariot GRP en X, Y et Z avec une précision millimétrique.

III.1.1 Test 1 - Vérification et validation du mode opératoire

Le premier test consiste à réaliser un levé de la voie avec le nouveau protocole en utilisant le logiciel Amberg Rail, puis de comparer en temps réel, les écarts par rapport aux données de référence du projet afin de vérifier la cohérence du mode opératoire, ainsi que la connexion des différents équipements.

III.1.2 Test 2 - Comparaison des deux modes opératoires

Le second test a pour but de comparer les mesures prises à partir du chariot depuis la station totale avec celles obtenues par le GPS. Le logiciel Amberg Rail calcule à partir des données brutes des instruments de mesure, la position de l'axe de la voie. En positionnant le chariot sur un emplacement identique, il est alors possible de comparer les coordonnées absolues des deux modes d'acquisition. Dans l'opération de récolement, un marquage est réalisé tous les 10 mètres sur les 2 voies de façon à connaître au droit de chaque point marqué, la position de l'axe de la voie en coordonnées (position entre les deux rails). Il est alors très proche d'un PK arrondi (PK269200, PK269210, PK269220...).

Avec le nouveau protocole et selon la méthodologie décrite antérieurement, le même tronçon de voie est relevé en se plaçant au plus juste sur le marquage déjà fait. Le premier essai correspond à un linéaire de 300 mètres sur la voie 1, du PK 269 200 au PK 269 500.

La précision de la polygonale utilisée pour la mise en station, la distance entre station et prisme (moins de 100 mètres), les instruments de mesure (prisme et station) sont autant de paramètres garantissant la qualité sur le positionnement du prisme. La détermination de l'axe de la voie par cette méthode servira alors de comparaison pour le positionnement par GPS.

Le système GPS1200 est composé d'un pivot et d'un mobile. Comme l'illustre la figure 34, le pivot est placé sur un point du canevas de référence, connu avec précision en Est et Nord dans le système de référence RGF93 avec la projection Lambert 93 et en altitude dans le système altimétrique IGN 69. La position et la qualité du mobile peut être déterminée en temps réel.



Figure 34: Positionnement du pivot
(source C Bury)

Après l'acquisition des données par GPS et TPS (Station Totale), le logiciel Amberg Rail permet de récupérer les coordonnées acquises de l'axe de la voie par ces deux méthodes, que l'on va pouvoir comparer. Il est également possible de récupérer l'écart horizontal pour chaque mesure prise. Il correspond à l'écart planimétrique, perpendiculaire à l'axe de la voie, entre la valeur mesurée et la valeur théorique du projet. Il en est de même avec les écarts verticaux pour chacun des rails (droit et gauche).

III.1.3 Test 3 - Comparaison entre levé en « point unique » et levé en « continu »

Le test suivant reprend la même méthode pratique que le test 2, par contre le levé n'est plus réalisé en « point unique » (stop & go) mais en « continu ». En d'autres termes, il n'y a plus d'arrêt tous les 10 mètres au droit de chaque point marqué sur le rail. L'acquisition de données se fait à présent en continu sans arrêt du chariot et ce, sur l'ensemble du tronçon.

A une fréquence régulière, le logiciel calcule les coordonnées de l'axe de la voie. Cette acquisition dynamique offre des avantages et des inconvénients que nous tenterons d'évaluer dans l'analyse.

Le test est réalisé sur la voie 1 du PK269200 au PK269500, sachant que ce tronçon a déjà été levé au TPS et au GPS lors du test 2.

Il est donc possible de comparer la position du levé en mode continu avec celle du levé à la station totale. Nous pourrions alors quantifier le degré de précision du levé continu en dynamique.

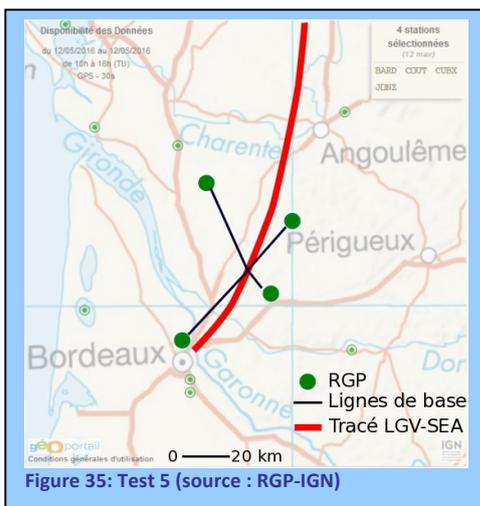
III.1.4 Test 4 - Influence des satellites sur la qualité des coordonnées

Ce test a pour but d'étudier l'influence du nombre de satellites sur la qualité des coordonnées. Les satellites présents dans l'espace tournent constamment autour de la terre. Nous captons les signaux des satellites que le récepteur peut observer depuis sa position. Pour les applications de type RTK, il est nécessaire de capter un minimum de 5 satellites en GPS seul et 6 satellites en GPS et GLONASS (4 GPS et 2 GLONASS). La bonne répartition des satellites va également influencer la qualité des résultats, elle peut être traduite par un indicateur de DOP (Dilution Of Precision). Le nombre de satellites va varier selon l'heure à laquelle les mesures sont prises et également en fonction d'autres critères développés dans l'analyse de ce test 4.

Par conséquent, le test consiste à réaliser plusieurs levés au GPS sur un même tronçon de la voie 1, du PK169200 au PK169500 soit 300 mètres, à des heures différentes de la journée et de comparer les écarts de coordonnées sur l'ensemble du levé. Le premier levé a été réalisé le 11 mai 2016 à 15h et le second le 12 mai 2016 à 9h.

III.1.5 Test 5 - Capacité du post-traitement

Ce test a pour but d'étudier les possibilités que le post-traitement peut apporter aux mesures. Le logiciel Amberg Rail accepte uniquement les coordonnées GPS pour lesquelles les ambiguïtés entières sont résolues et les coordonnées de navigation pures ne sont pas stockées. La méthode RTK utilise le principe de double différence par mesure de phase. Les ambiguïtés entières apparaissent dans ces différences qui sont utilisées dans les logiciels de calcul. Il est donc nécessaire d'avoir deux antennes qui observent les mêmes satellites simultanément.



En faisant du post traitement, d'autres méthodes GNSS peuvent être appliquées au protocole expérimental étudié dans ce travail. En effet, des stations permanentes comme celles du RGP (Réseau GNSS permanent) peuvent être exploitées pour calculer les coordonnées du pivot et en déduire celles du mobile.

Il paraît donc judicieux de réaliser des tests en enregistrant des observations sur le récepteur du mobile et du pivot, puis en calculant leurs coordonnées grâce aux observations des stations du RGP récupérées. Idéalement, il faut disposer de trois stations permanentes plaçant le pivot central au barycentre d'un triangle quasi-équilatéral. La figure 30 localise les stations RGP à proximité et encadrant le site d'expérimentation.

Le logiciel Amberg Rail affecté au chariot ne permet pas de repositionner (sur l'axe de la voie) des mesures brutes acquises par GPS. Les coordonnées résultantes seront donc celles du haut de l'antenne du mobile placée sur le chariot.

Nous tenterons de trouver dans ce test les translations à appliquer pour déterminer les coordonnées de l'axe de la voie à partir de celles du mobile.

Une comparaison pourra alors être établie entre les coordonnées GPS (post-traitées puis translattées) et les coordonnées TPS de l'axe de la voie, pour chaque point pris sur un tronçon de voie ferrée. Pour se faire, nous enregistrons simultanément un point directement sur le récepteur mobile et un autre avec le tachéomètre pointé sur le prisme du chariot (enregistré avec le logiciel Amberg Rail). La figure n°31 décrit le test appliqué sur le terrain.

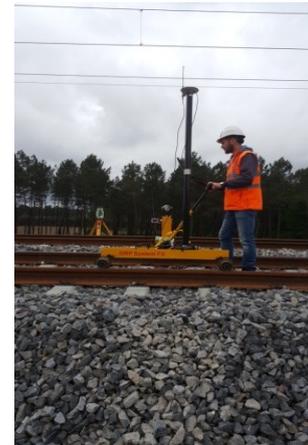


Figure 36 : Test post-traitement (source C Bury)

III-2 LES RÉSULTATS ET L'EXPLOITATION DES TESTS

III.2.1 Test 1 – Vérification du mode opératoire

Le logiciel Amberg Rail, après avoir accepté la connexion des instruments et GPS au chariot, est opérationnel. Toutefois, il est indispensable de positionner un pivot et d'établir une connexion avec le mobile du chariot selon la méthode RTK.

Le logiciel nous donne en temps réel des informations sur la géométrie interne de la voie et sur le positionnement du chariot GRP. La capture d'écran ci-contre de la figure 37 indique les informations suivantes :

- Distance au dernier point
- Valeur d'odomètre
- Ecartement
- Dévers
- Qualité de la mesure GPS
- Nombre de satellites observés
- PK
- Ecart en position
- Ecart hauteur

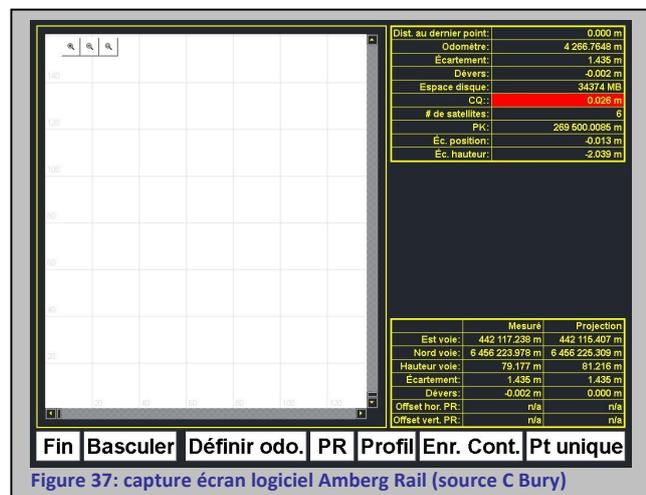


Figure 37: capture écran logiciel Amberg Rail (source C Bury)

Les mesures réalisées sont d'une qualité acceptable compte tenu de la méthode appliquée (environ 2cm à 3cm dans le cas présent). Cependant, l'information qui nous interpelle concerne l'écart en hauteur. En effet, sur cet emplacement, il est de -2.039 mètres par rapport au projet alors que cette valeur devrait s'approcher de 0. Il est évident que l'erreur ne vient pas du projet, puisque lors du récolement, aucune alerte n'indique un tel écart. Il a donc fallu chercher et comprendre d'où venait cette erreur constante d'environ -2.00 mètres pour chacune des mesures.

C'est finalement dans les configurations du récepteur mobile qu'il fallait modifier les paramètres de hauteur d'instrument. Les mesures suivantes sont alors corrigées de cette erreur et les écarts, en comparaison avec le projet, correspondent à la réalité.

III.2.2 Test 2 – Comparaison des deux modes opératoires

A chaque marque sur le rail, les coordonnées sont déterminées pour les deux protocoles. On peut alors en déduire, les écarts planimétriques et altimétriques à chaque PK relevé, en faire une moyenne et définir un écart type pour la série de mesures. Voici les formules utilisées :

$$\begin{aligned}
 \text{Ecart planimétrique} &= \sqrt{((E(\text{TPS}) - E(\text{GPS}))^2 + (N(\text{TPS}) - N(\text{GPS}))^2)} \\
 \text{Ecart altimétrique} &= \text{Altitude}(\text{TPS}) - \text{Altitude}(\text{GPS}) \\
 \text{Variance} &= \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \\
 \text{Ecart type} &= \sqrt{\text{Variance}}
 \end{aligned}$$

Ainsi, une moyenne est évaluée sur les écarts à partir du relevé de tronçon de voie. Voici les résultats pour le levé de la voie 1 du PK 269200 au PK 269500 :

Écart Moyen planimétrique (m)	Écart Moyen altimétrique (m)
0,011	0,022
Écart type planimétrique (m)	Écart type altimétrique (m)
0,007	0,009

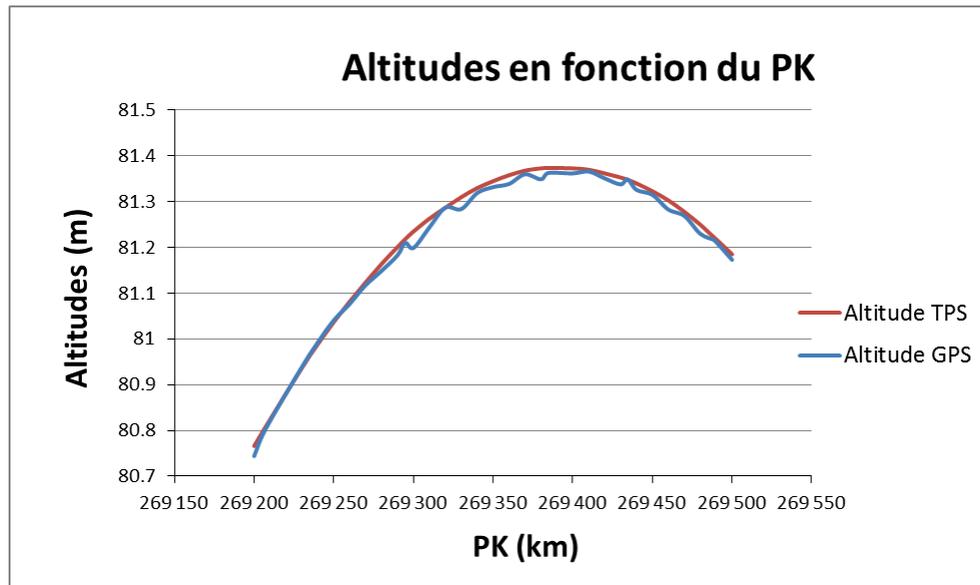
Tableau 1 : Ecarts sur comparatif des deux modes opératoires - Voie 1

Les écarts moyens en planimétrie et altimétrie sont très satisfaisants compte tenu de la précision de la méthode de positionnement par GPS. Ces résultats peuvent s'expliquer par la proximité du pivot avec le mobile.

En effet, la distance séparant les deux antennes varie entre 400 et 700 mètres selon la position du mobile lors du levé. Cette courte ligne de base est un élément important à prendre en compte pour garantir une qualité optimale du positionnement du mobile.

L'écart en position planimétrique (tableau 1) est de 11 millimètres +/- 7 millimètres et en altimétrie de 22 millimètres +/- 9 millimètres. Le positionnement altimétrique est toujours plus dégradé compte tenu de la géométrie globale entre les satellites et le récepteur.

Comme le montre le graphe n°1 ci-dessous, l'altitude mesurée par GPS est irrégulière par rapport à la mesure acquise par TPS qui est nettement plus lisse et proche de l'axe réel de la voie.



Graphique 1 : Comparatif valeur TPS - GPS

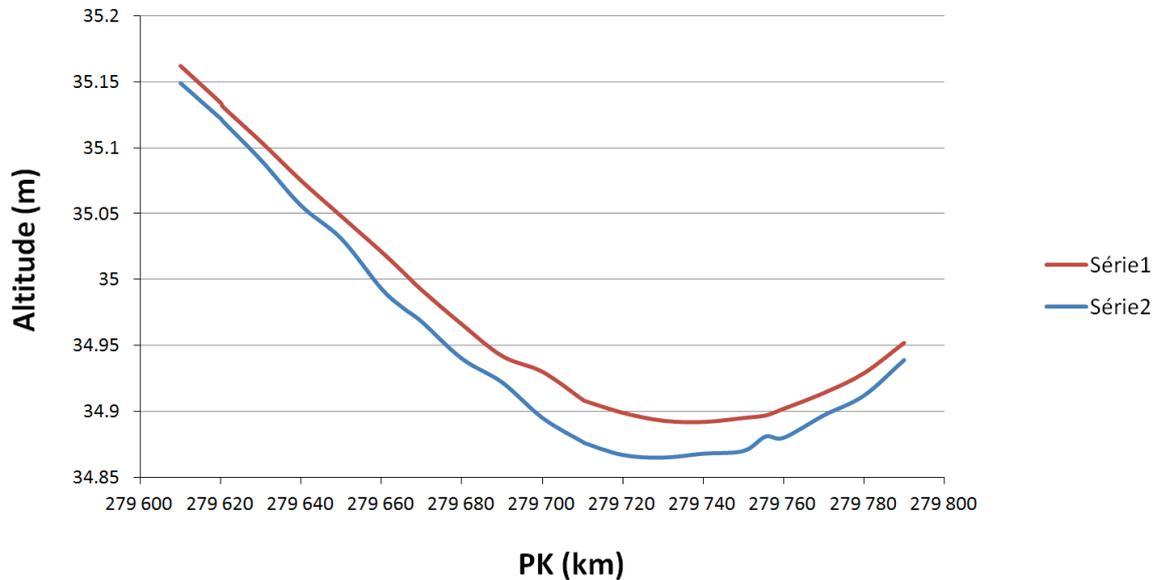
Un second levé, suivant le même protocole, mais sur un autre tronçon de la LGV, voie 2 du PK279610 au PK279790, a donné des résultats semblables au premier essai (tableau 2). Le pivot est également placé sur un point connu du canevas de référence, à une distance d'environ 200 mètres du mobile. Voici les résultats des écarts de positionnement ainsi que les écarts types entre les mesures acquises par TPS et celles obtenues par GPS.

Écart Moyen planimétrique (m)	Écart Moyen altimétrique (m)
0,008	0,022
Écart type planimétrique (m)	Écart type altimétrique (m)
0,007	0,007

Tableau 2 : Ecart sur comparatif des deux modes opératoires – Voie 2

L'écart altimétrique est constant sur l'ensemble du levé et l'écart-type, d'une valeur de 7 mm, reste faible. Il en résulte une bonne cohérence sur cette composante. Le graphe 2 ci-dessous représente les altitudes acquises par les deux protocoles en fonction des PK.

Altitudes en fonction du PK

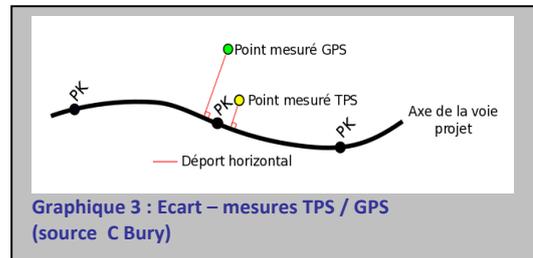


Graphique 2 : Comparatif valeurs TPS - GPS

Par comparaison à l'essai précédent, nous constatons que sur ce tracé la courbe des altitudes est plus lisse et que l'oscillation est plus faible.

La courbe GPS indique une valeur constante d'environ 2 cm sous l'altitude calculée par le tachéomètre. Une des explications possible de cette cohérence peut se traduire par le nombre de satellites captés lors des levés. Pour le premier levé, 6 étaient observables tandis que pour le second, 8 satellites étaient captés par l'antenne. L'influence constatée du nombre de satellites sur la qualité des coordonnées est détaillée dans l'analyse du test 4.

Un test similaire à ce dernier est réalisé à partir des écarts de déport récupérés dans le logiciel Amberg Rail. Cet écart correspond à l'écart horizontal entre l'axe de la voie du projet et le point mesuré comme l'illustre le schéma du graphique 3. En théorie, un point levé sur le chariot avec la station totale et un autre pris avec le GPS sur le même PK, ont une position relative considérée comme confondue, d'autant plus, si l'axe du projet est linéaire. Le fait de comparer l'écart de déport entre les deux modes d'acquisition par rapport à un même axe théorique permet de diminuer l'erreur due à l'écart d'emplacement sur le PK (la position relative). En effet, avec le chariot il est difficile de se placer avec exactitude sur le même point pris en TPS et en GPS, malgré toutes les précautions de positionnement.

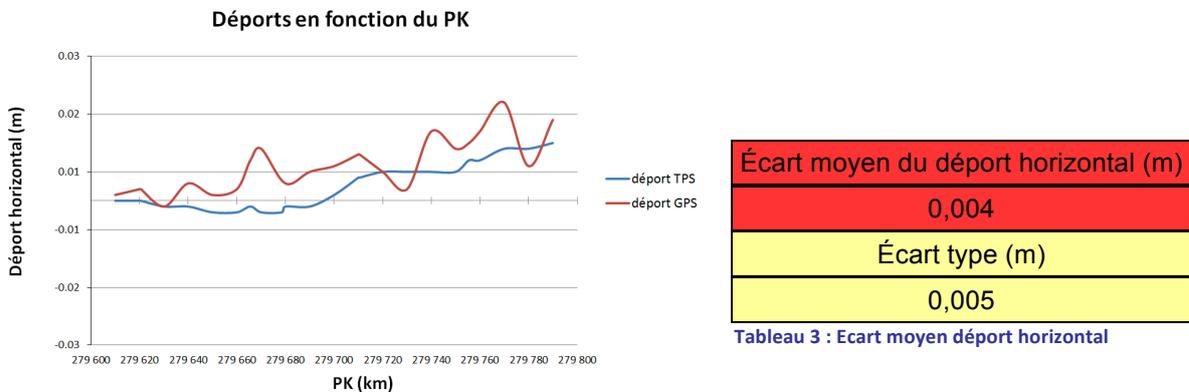


Graphique 3 : Ecart - mesures TPS / GPS (source C Bury)

Dist. au dernier point:	0.000 m
Odomètre:	9 288.2520 m
Écartement:	1.436 m
Dévers:	-0.002 m
Espace disque:	34269 MB
CQ::	0.022 m
# de satellites:	7
PK:	278 719.9948 m
Éc. position:	-0.011 m
Éc. hauteur:	-0.037 m

Figure 38: Capture d'écran/logiciel Amberg Rail (source C Bury)

Néanmoins, cet écart de PK peut être défini, puisqu'à chaque point pris sur Amber Rail, une position PK-référencée du chariot est calculée à partir du projet, comme l'indique également la figure 38 de la capture d'écran ci-dessus.



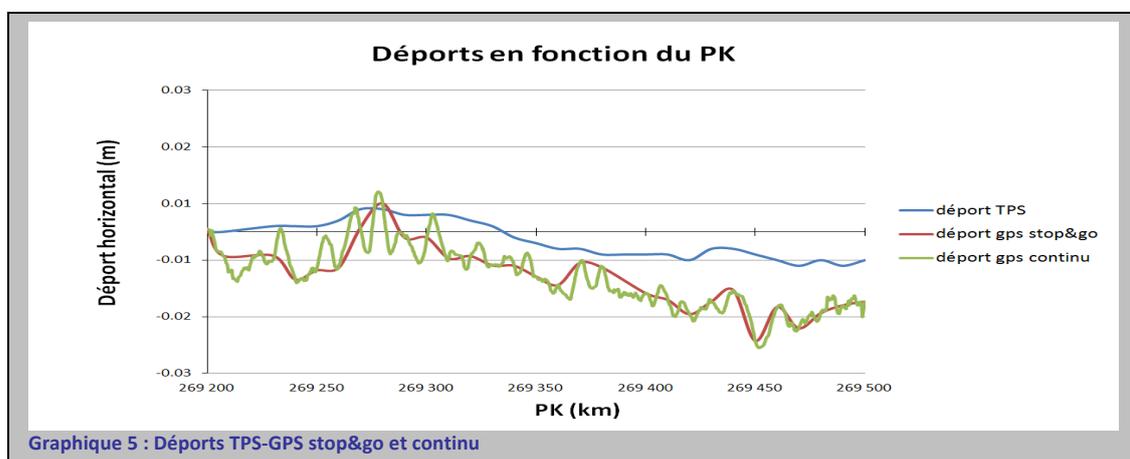
Graphique 4 : Déports TPS -GPS

Les résultats déduits de l'écart de déport horizontal sont logiquement plus faibles que ceux de l'écart en planimétrie. A titre d'exemple, sur le levé de voie 1 (PK269200 au PK269500) où l'écart en planimétrie est en moyenne de 11 mm +/- 7mm, l'écart de déport horizontal est quant à lui de 4 mm +/- 5mm. En comparant les valeurs de déport pour chacun des modes d'acquisition, les résultats sont d'une meilleure précision.

III.2.3 Test 3 – Comparaison entre levé en « point unique » et levé en « continu »

Le levé en mode continu a été réalisé avec la fréquence d'échantillonnage par défaut du logiciel Amberg Rail, soit 10 mesures par seconde. Sur un tronçon de 300 mètres, du PK269200 au PK269500 sur voie 1, et à une vitesse constante d'environ 3km/h, une quantité importante de mesures (3600 mesures environ) est acquise pour analyser la forme du tracé.

Dans cette analyse, il est intéressant de comparer les déports horizontaux par rapport au projet, des levés TPS et GPS (en stop&go et en continu) car ce sont ces valeurs qui évaluent le mieux la précision des différentes méthodes.

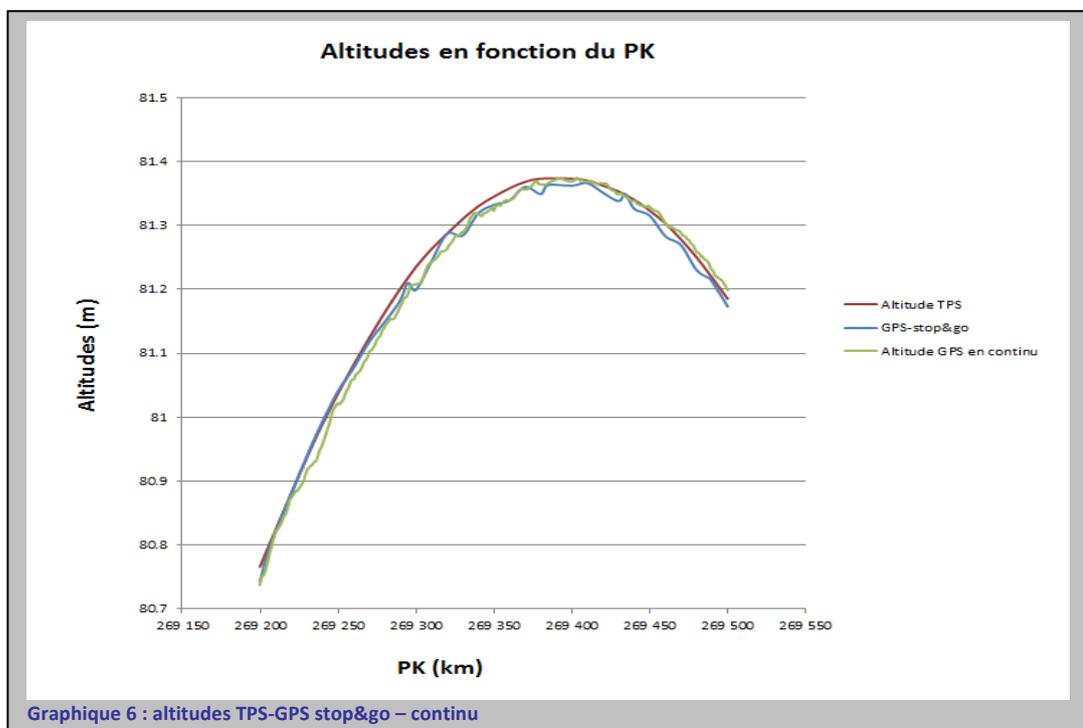


Le graphe n°5 représente les déports, mesurés pour chaque méthode par rapport au projet, en fonction de l'avancement du chariot sur la voie. Le déport TPS reste proche du projet tout au long du tracé et garde un aspect linéaire et continu sans variation « brusque ». Le déport GPS en stop&go a une allure semblable au déport TPS. Il est plus important, mais reste cependant en dessous de +/-3 cm sur sa globalité. Quant au déport en GPS continu, il varie beaucoup plus que les deux autres déports, mais reste dans le même ordre de grandeur que celui du GPS. Les nombreuses oscillations s'expliquent par la quantité de mesures acquises par cette méthode. Cependant, ces oscillations sont centrées sur la courbe qui représente le déport GPS en point unique.

La précision du test est donc confirmée sur la position en planimétrie entre les méthodes GPS de relevés en point statique et dynamique. Ces résultats sont intéressants, puisqu'ils permettent d'assurer une précision relative à la méthode RTK, pour le levé en dynamique.

S'agissant de la composante verticale, un comparatif est réalisé entre l'altitude mesurée par la station totale et les deux méthodes de levé en GPS. On peut déduire des résultats et de l'allure des courbes du graphe n°6 ci-dessous que la précision de l'altitude en levé dynamique est du même ordre de grandeur qu'en stop&go, c'est-à-dire d'environ 2 à 3 cm pour nos tests, en la comparant à l'altitude TPS.

Le levé en continu permet de ne pas s'arrêter sur le terrain et donc de gagner du temps. On place le chariot sur le point de départ puis on avance à vitesse constante (vitesse de marche) jusqu'au point final. Cependant, les quantités de données stockées par ce mode opératoire peuvent s'avérer être une contrainte selon le type de travail à réaliser, principalement dans le cas où des traitements de mesures après l'acquisition devient nécessaire.



Remarque : les mesures GPS en stop&go et en statique ont été acquises les mêmes jours à des heures proches pour éviter des erreurs liées aux satellites.

III.2.4 Test 4 – Influence des satellites sur la qualité des coordonnées

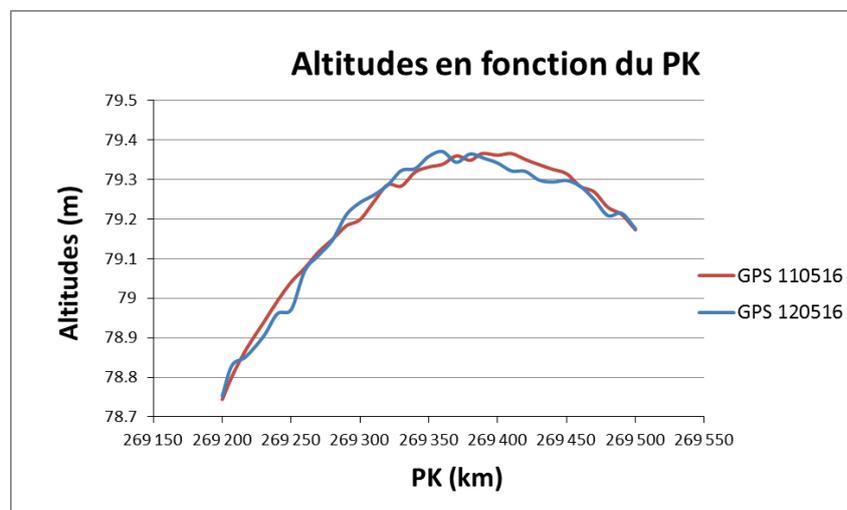
En utilisant toujours le même protocole et la même méthode GNSS en RTK, la position de l'axe de la voie est déterminée pour les deux levés évoqués précédemment sur un tronçon de 300 mètres de la LGV. Ainsi, nous pouvons calculer les écarts entre les deux levés et en déduire l'influence des satellites sur la qualité des coordonnées, comme le mentionne le tableau 4 ci-dessous.

Écart planimétrique moyen (m)	Ecart altimétrique moyen (m)
0,011	0,022
Écart type planimétrique (m)	Écart type altimétrique (m)
0,005	0,027

Tableau 4: influence des satellites sur la qualité des coordonnées

Les écarts en altimétrie sont plus importants qu'en planimétrie. Il en est de même pour l'écart type en altimétrie qui, dans ce cas, est de 2.7 cm. Cette valeur est justifiée par l'application de la méthode GNSS. La comparaison concerne deux levés GPS à des heures différentes : 11 mai à 15h et 12 mai à 9h

Le graphe 7 ci-dessous permet de comparer les altitudes des levés en fonction du PK du tracé.



Graphique 7 : Comparatif altitudes GPS voie 1 – influence satellites

Les altitudes sont relativement irrégulières sur l'ensemble du tracé, alors qu'en réalité l'axe de la voie est parfaitement lisse. Cette inexactitude sur la composante est propre à la méthode GNSS. Les résultats ne sont donc pas incohérents. Par ailleurs, les courbes des altitudes se chevauchent à plusieurs reprises, alors que l'écart n'est pas constant comme pour la comparaison entre GPS et TPS du test 2.

Une estimation du DOP permet aussi de vérifier que le positionnement est d'une précision acceptable (figure 34). Ce sera d'ailleurs le cas pour l'ensemble des levés effectué avec le GPS lors de la phase expérimentale.

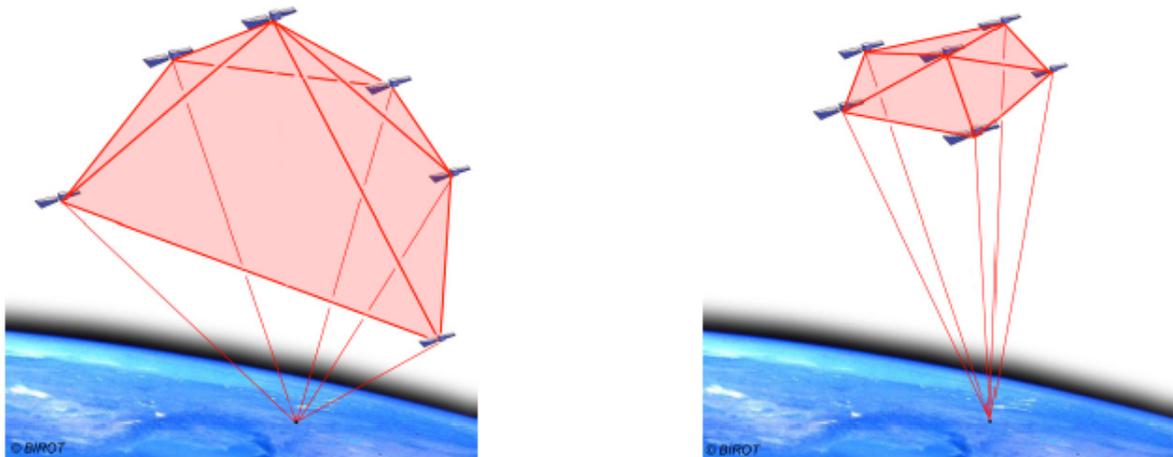


Figure 39 : Configuration géométrique des satellites impliquant un bon GDOP (à gauche) et un mauvais DOP (à droite) – (Source : Méthodes de travail dans les réseaux GNSS)

D'autres paramètres restent à prendre en compte car en effet, les satellites peuvent être très bien placés dans l'espace sans pour autant qu'une mesure puisse être effectuée. Pour garantir de bonnes observations, il faut une zone de levé dégagée et dépourvue d'obstacles pouvant perturber la mesure. Les bâtiments et la végétation peuvent être source de masque GNSS lors de levé sur le milieu ferroviaire. Ce critère doit être intégré dans les opérations topographiques en général et du chantier en particulier. Lors des tests décrits ci-dessus, aucun élément de ce genre n'a perturbé les mesures. En effet, un nouveau projet tel que la LGV SEA nécessite de nettoyer l'emprise du projet et par conséquent, d'y soustraire la végétation en place. En revanche, les règles environnementales et l'impact du projet sur la biodiversité imposent des mesures compensatoires sur tout projet en particulier de cette envergure.

A partir des diverses contraintes évoquées, la qualité des coordonnées dépend de la disponibilité des satellites captés sur le lieu d'intervention au moment de l'acquisition des données. Néanmoins, l'augmentation du nombre de satellites devrait permettre d'améliorer à terme, la qualité d'acquisition des données.

III.2.5 Test 5 – Capacité du post-traitement

Le test consiste tout d'abord à faire un levé avec le GPS placé sur le chariot, sans positionnement du pivot sur un point connu du canevas comme lors des tests précédents. Il est placé sur un point quelconque et ses coordonnées seront calculées en post-traitement. Les observations sont alors enregistrées sur le récepteur mobile. En outre, le logiciel prend un point sur le chariot avec la station qui déterminera la position de l'axe de la voie pour chaque point acquis par le mobile.

Sur le tronçon du PK 278640 au PK 278810, les points levés au GPS et à la station ont été enregistrés. Il est important de noter que la zone du test est située dans des conditions optimales pour que le moins d'erreurs possibles soient engendrées par la pente ou le dévers. La zone levée est donc sans courbe ni pente.

Lorsque les données GPS brutes sont récupérées dans le récepteur mobile, nous pouvons calculer les coordonnées avec le logiciel RTKlib ou Leica Géo Office (LGO). Les données du mobile sont converties au format RINEX (Receiver Independent EXchange Format), permettant d'utiliser les fichiers de données d'observation du mobile, dans les logiciels. Les fichiers d'observation et de navigation des antennes RGP les plus proches sont récupérés sur le site de l'IGN, en prenant des précautions sur le choix de la date et de l'heure des observations, puisqu'elles doivent être en concordance avec celles acquises par le mobile. Les antennes « Coutras », « Bardenac », « CUBX » et « Jonzac » encadrent la zone de levé et sont situées dans un rayon inférieur à 50 km du mobile. Les paramétrages étant réglés, nous pouvons lancer le calcul et récupérer les coordonnées, ainsi que des informations sur leur qualité. Les coordonnées en WGS84 sont alors récupérées puis transformées en RGF93 avec le logiciel CIRCE. En effet, ce logiciel permet de convertir des coordonnées géographiques ou cartographiques d'un système à un autre. A partir du logiciel, la projection Lambert 93 est sélectionnée car elle correspond à celle utilisée sur le chantier.

Une fois les coordonnées dans le bon système de référence, il convient d'appliquer les translations suivant les 3 axes. Dans le certificat d'inspection du producteur, intégré *en Annexe 3*, les paramètres mesurés correspondent à des distances de la géométrie interne du chariot par rapport à un point interne au chariot (qui ne représente pas l'axe de la voie). Ces valeurs servent à la calibration du chariot, mais elles n'ont pas pour objectif, un positionnement par rapport à l'axe de la voie. A partir de ces paramètres internes au chariot et des schémas donnés dans le certificat, la déduction des translations en X, Y, Z entre l'antenne du mobile et l'axe de la voie est établie dans le référentiel du chariot. On déduit les résultats suivants :

$$TX = -\frac{E}{2} + X_{\text{TrolleyPos(GPS)}} = -0.6047 \text{ m}$$

$$TY = -Y_{\text{TrolleyPos(GPS)}} + Y_{\text{TrolleyPos(TPS)}} = 0.1900 \text{ m}$$

$$TZ = -Z_{\text{TrolleyPos(GPS)}} = -1.9110 \text{ m}$$

Avec :

- E: écartement de la voie (m)
- $X_{\text{TrolleyPos(GPS)}}$, $Y_{\text{TrolleyPos(GPS)}}$, $Z_{\text{TrolleyPos(GPS)}}$, $Y_{\text{TrolleyPos(TPS)}}$: les résultats de l'inspection géométrique.

Les translations ne peuvent être appliquées qu'au référentiel du chariot. Elles ne sont donc pas affectées directement aux coordonnées de l'antenne. A partir des données du projet entré dans le logiciel Amberg Rail, on peut récupérer des informations déduites des coordonnées du mobile comme le déport et le numéro de PK. On applique la translation TX au déport, la translation en TY à la valeur du PK relatif à la position de l'antenne et TZ à l'altitude du point. Nous obtenons alors des nouvelles valeurs de déport, de PK et d'altitude pour chaque position du mobile. A partir de celles ci, le logiciel Amberg Rail peut recalculer les coordonnées de l'axe de la voie dans le système de référence RGF93.

Si on compare les coordonnées GPS translâtées avec celles acquises par TPS, voici les écarts qui en résultent (tableau 5) :

Écart Moyen planimétrique (m)	Écart Moyen altimétrique (m)
0,027	0,039
Écart type planimétrique (m)	Écart type altimétrique (m)
0,015	0,017

Tableau 5 : comparatif des écarts TPS – coordonnées translâtées

Les translations sont appliquées dans le cas présent sur une voie sans pente ni courbe avec un écartement de 1435mm entre l'intérieur des 2 rails. Les résultats sont normalement impactés par l'écartement de la voie, le dévers et l'inclinaison de la pente (ces deux dernières paramètres sont nuls lors de ce test). Il s'agit alors d'appliquer à chaque translation et selon les 3 composantes, les valeurs de la géométrie de la voie.

Les résultats du test sont satisfaisants et correspondent à la classe précision de la méthode GPS. Ce test 5 n'est pas sans intérêt pour certains cas spécifiques, en particulier à l'étranger ou en d'autres situations lorsqu'il n'y a pas de point connu à proximité du chantier pour positionner le pivot. Parfois, il n'est pas envisageable non plus de créer et de calculer une polygonale de précision à proximité de la voie ferrée, la solution peut consister à se rattacher à des antennes permanentes.

En faisant du post-traitement comme décrit ci-dessus avec une ou plusieurs antennes permanentes et en appliquant des translations en lien avec la géométrie de la voie, on peut alors déduire l'axe de la voie. Cependant, les traitements sont assez longs et il faut prendre des précautions en appliquant les translations dès lors que la géométrie de la voie fait apparaître dévers et pente.

III.2.6 Récapitulatif et Synthèse des tests

Le 1° test vérifie les informations du GPS après son installation et sa connexion aux équipements du chariot, ainsi que la conformité des données par rapport aux valeurs justes du projet. L'écart mesuré (2 cm en moyenne) correspond au seuil admissible pour cette méthode GPS.

Le 2° test réalisé sur un linéaire de 300m, puis de 180m, il compare les résultats obtenus pour les deux modes opératoires (GPS-TPS) et selon les mêmes repères en PK (point kilométrique). Dans le meilleur des cas étudiés, l'exploitation des données présente un écart planimétrique de 8 mm et un écart altimétrique de 22 mm, avec un écart type de 7mm sur ces deux composantes. Compte tenu de la méthode de positionnement par GPS, les résultats obtenus sont satisfaisants.

Le 3° test consiste à vérifier la faisabilité d'acquisition de données en continu, contrairement au test 2 qui nécessite un point d'arrêt tous les 10 mètres. Le test 3 a été réalisé avec une fréquence de 10 mesures par seconde. Les écarts entre les levés GPS et le levé TPS restent dans des seuils de tolérance identiques à ceux du test 2, soit un écart moyen de 2 à 3 cm. Le test 3 confirme donc la précision relative de la méthode RTK pour le levé en dynamique.

Le 4° test confirme l'influence des satellites sur la qualité des coordonnées. Deux mesures ont été réalisées au GPS sur le même tronçon, mais à des moments différents. La qualité des résultats est donc directement influencée par le nombre de satellites observés et leur emplacement dans l'espace.

Le 5° test propose une variante à la définition de l'axe de la voie ferrée à partir d'une ou plusieurs antennes RGP (Réseau GNSS permanent) sans que le pivot soit positionné sur un point connu. Un post-traitement des données permet de calculer les coordonnées du mobile et de translater ses coordonnées pour définir l'axe de la voie. Les écarts en planimétrie et altimétrie sont légèrement plus importants du fait du post-traitement et des erreurs liées aux translations. Cependant, les résultats sont satisfaisants et correspondent à la classe de précision de la méthode GPS.

L'analyse multicritères du chapitre suivant, présente les avantages et inconvénients de chaque scénario en fonction du mode opératoire ciblé.

III-3 ANALYSE COMPARATIVE

III.3.1 analyse multicritères

ANALYSE MULTICRITERES		
CRITERES	Protocole liant chariot et tachéomètre	Protocole liant chariot et GPS
Matériel	1 voiture / 1 tachéomètre / 3 prismes / 3 trépieds / 1 système GNSS / 1 chariot GRP 3000 / 1 profilomètre / 1 ordinateur / 1 radio / batteries / 1 mètre / EPI + installations de sécurité /	1 voiture / 2 trépieds / 1 système GNSS / 1 chariot GRP 3000 / 1 mat / 1 profilomètre / 1 ordinateur / batteries / 1 mètre / EPI + installations de sécurité /
Phases terrain	Polygonale de précision : 1 point tous les 200 m Positionner les points du canevas par méthode GNSS en mode statique Mise en station + Levé au chariot	Positionner le pivot sur un point connu Levé au chariot
Personnel	3 personnes pour la polygonale 1 personne pour le levé GPS de la polygonale 2 personnes pour le levé au chariot	1 personne pour positionner le pivot 2 personnes pour le levé au chariot
Contraintes terrain	Extérieur et intérieur (tunnel) Par soleil, temps nuageux, mais la pluie peut perturber la mesures	Extérieur uniquement et sans masque Par tous les temps
Sécurité	Haut risque : travail directement sur la voie ou à proximité Mise en place des mesures obligatoires pour assurer la sécurité	Haut risque : travail directement sur la voie ou à proximité Mise en place des mesures obligatoires pour assurer la sécurité
Types de mesures	Positionnement absolu et relatif / écartement / dévers / flèches / gauche	Positionnement absolu et relatif / écartement / dévers / flèches / gauche
Précision du positionnement absolu	Millimétrique: dépend de la précision de la polygonale, de la qualité de la mise en station, du matériel	Centimétrique: dépend de la précision du pivot, de la longueur de la ligne de base, du nombre de satellites et de leur positionnement dans l'espace
Types de travaux	Etudes d'avant projet / Toutes les passes de bourrage / Implantation des ouvrages / Récolement de la voie et des installations ferroviaires (ADV, caténares, signalisations...) / Contrôle et étude de gabarit / Mesures de l'environnement de la voie	Etudes d'avant projet / Première passe de bourrage / Implantation des ouvrages / Récolement d'installations ferroviaires (caténares, signalisations...) / Mesures de l'environnement de la voie
Temps pour 1 km de levé en moyenne le temps d'accès aux voies dans une journée est de 3h	Polygonale de précision: 6 points = 2 jours Levé en mode statique : 4 points = 2 jours Relevé au chariot: 200 mètres par stations = 2 jours Traitement: 1 jour	Installation du pivot: 30min Relevé au chariot: 1/2 journée Traitement: 1 jour ou plus si post traitement
Temps pour 10 km de levé	Polygonale de précision: 51 points = 15 jours Levé en mode statique : 4 points = 2 jours Relevé au chariot: 200 mètres par stations = 12 jours Traitement: 3 jour	Installation du pivot: 30min Relevé au chariot: 1 à 2 jours Traitement: 1 jour ou plus si post traitement

III.3.2 Synthèse et Analyse

Les essais de la phase expérimentale permettent de confirmer la faisabilité du nouveau protocole et d'établir une comparaison entre les deux modes opératoires.

L'analyse multicritères qui en résulte présente les avantages et les inconvénients des deux procédés. Les critères ont été choisis principalement en fonction de l'objectif recherché. Il concerne essentiellement la précision et le temps d'acquisition des données.

L'évaluation consiste à croiser l'ensemble des paramètres qui nous semble incontournables comme aide à la décision. A partir de ces éléments, l'entreprise MIRE S.A.S doit être en mesure d'apprécier l'opportunité ou non d'appliquer cette méthode, d'en connaître les degrés de précisions, les domaines d'application envisageable, le gain en moyen humain et matériel, ainsi qu'une estimation du temps d'intervention.

Il ressort de cette analyse que les deux protocoles remplissent pleinement leur objectif premier, à savoir permettre précisément de déterminer la géométrie interne de la voie, positionner la voie et cartographier son environnement.

Les principales différences entre les deux protocoles concernent le travail à réaliser avant le levé, la précision du positionnement, les types de travaux pour lesquels ces protocoles sont exploitables, le temps global pour réaliser un levé et donc le gain financier que cela engendre.

Une analyse multicritères, *en Annexe 4*, a également été réalisée pour comparer l'ARTIX aux protocoles du GRP 3000.

III-4 BILAN ET PERSPECTIVES

III.4.1 Bilan

Les recherches, les études théoriques, la formation sur ce matériel topographique et les expériences sur le terrain ont permis de comprendre et de mettre en place l'intégralité du protocole liant le système GRP3000 à un système GNSS. Les tests réalisés et le traitement des données ont permis d'effectuer des analyses comparatives entre les deux protocoles, notamment sur la précision du positionnement absolu du chariot. L'analyse multicritères a permis d'apprécier et de limiter les capacités de chacun des protocoles. Sur des critères communs, les protocoles présentent des avantages et des inconvénients qu'il paraît important de clarifier.

Concernant le travail préalable au relevé avec le chariot GRP, il faut obligatoirement réaliser une polygone de précision dans le protocole avec le tachéomètre. En effet, cette polygone servira à la détermination des coordonnées de la station qui donnera ensuite la position absolue du chariot GRP. Cette polygone est souvent densifiée par des goujons présents sur les poteaux caténaux. Dans le cas du protocole positionnant le chariot par mesures GNSS, le pivot doit être idéalement placé sur un point connu. Il peut être placé sur un point existant à proximité du chantier (quelques kilomètres) ou rattaché en post-traitement à des antennes permanentes. Sinon, il faut réaliser une polygone préalablement au relevé au chariot qui peut être moins dense que celle réalisée pour le premier protocole. En effet, un point connu tous les 10 kilomètres suffirait pour ce protocole.

La précision du positionnement absolu est bien connu avec une station totale, il est garanti « millimétrique » mais dépend aussi de la qualité de la précision de la polygonale. Le protocole, mis à l'essai avec le GPS, est applicable avec la méthode RTK qui a théoriquement une précision comprise entre 2 et 5 cm. La précision des mesures GNSS dépend de nombreux facteurs décrits dans ce mémoire. Ils permettent d'assurer la meilleure précision possible pour se rapprocher de la réalité. Les tests justifient la précision théorique. Les résultats, à moins de 2 centimètres en planimétrie et moins de 3 centimètres en altimétrie, sont très satisfaisants.

Le type de travaux pouvant être réalisé avec ces protocoles est directement lié au matériel topographique et à la précision du positionnement absolu du chariot. Le logiciel calcule l'axe de la voie qui est une donnée fondamentale pour beaucoup de missions sur le domaine ferroviaire. A partir de cette précision, on peut déduire les travaux applicables pour les protocoles. Comme décrit dans l'analyse multicritères, le protocole de positionnement par tachéomètre peut réaliser pratiquement tous les travaux topographiques sur la voie ferrée, alors que le positionnement par GPS, limite les interventions. Les travaux concerneront principalement la reconnaissance de la voie pour les études d'avant-projet, l'implantation d'installations ferroviaires (la signalisation, les tableaux et pancartes d'indication, les ouvrages) et le récolement de ces installations. Le récolement de la voie n'est pas envisageable avec cette méthode, puisqu'il exige un niveau de précision millimétrique.

Le temps d'acquisition est calculé dans sa globalité, de la mise en place du canevas jusqu'au relevé de la voie. En prenant en compte le temps d'accès aux voies et l'ensemble du travail permettant un levé de 1 km de voie ferrée, il en ressort que le levé au chariot et GPS est 5 fois moins consommateur de temps que le levé par tachéomètre. Ce gain de temps est considérable.

Directement lié au gain de temps, l'aspect financier est un critère significatif dans cette option. Sur un linéaire de quelques kilomètres, il est vrai que ce bénéfice aura peu de conséquence, mais à grande échelle (plusieurs dizaines de kilomètres) alors, la rentabilité sera nettement plus appréciable.

Même si le protocole mis en place dans ce travail de fin d'études ne peut pas être utile à toutes les missions topographiques sur le domaine ferroviaire, son application reste utile pour certains types de travaux et l'adjonction du GPS au chariot GRP procure des avantages à prendre en considération. De plus, le protocole proposé est exploitable par l'entreprise, il peut alors être adapté aux logiciels d'exploitation de la société MIRE S.A.S.

III.4.2 Perspectives

La mise en place du nouveau protocole par adjonction d'un GPS au chariot GRP 3000 a permis de comprendre son fonctionnement, d'établir les limites de sa précision, définir les domaines sur lesquels il peut s'appliquer, puis de réfléchir à des améliorations possibles de son application.



III.4.2.1 Les logiciels d'exploitation de la société MIRE S.A.S

Un des objectifs lié à ce nouveau protocole est le développement interne vers les logiciels d'exploitation de l'entreprise. En effet, l'une de ses activités consiste au développement de logiciels spécifiques pour ses besoins internes, mais elle développe également cette activité en partenariat avec la SNCF ou à la demande d'autres gestionnaires et clients.

Nous pouvons citer deux logiciels pour lesquels la mesure GPS apporterait une information supplémentaire et utile:

PK-Express: Ce logiciel permet de référencer en PK les objets de l'environnement ferroviaire. Le développement d'un système d'acquisition vidéo se base sur le chariot GRP pour créer un programme d'acquisition d'images où chaque cliché est PK-référencé en post-traitement. Ainsi équipé, le chariot peut alors mesurer les paramètres de la voie, mais également filmer l'environnement. Par la suite, la société MIRE S.A.S s'est penchée sur le géo-référencement de ces images à partir d'autres caméras intégrant un GPS. Dans ce protocole, les coordonnées ne peuvent pas être intégrées au logiciel Amberg Rail de traitement des données du chariot GRP. En effet, celui-ci n'accepte que la configuration avec les systèmes Leica GPS1200 ou GPS500, ainsi qu'avec une station totale. La précision relative du chariot ne peut donc pas être déduite de la précision absolue donnée par le GPS embarquée dans les caméras. De plus, la précision de la position de ce GPS n'est que métrique.

Avec le nouveau protocole de positionnement par mesures GNSS élaboré dans ce mémoire, l'information de la position absolue de chaque cliché prise par les caméras pourrait être intégrée. Ainsi, les informations de la géométrie de la voie sur cette même position seraient accessibles. Dans ce cas, la position PK-référencée au moment de la prise d'un cliché pourrait être déduite de la position absolue grâce aux calculs du logiciel Amberg Rail. La position (relative ou absolue) des clichés serait alors connue avec une précision centimétrique et pourrait ainsi compléter l'acquisition des données, voire apporter des réponses à des besoins spécifiques.

Armatix: ce logiciel permet la création de schémas d'armement par l'intermédiaire de boîtes de dialogues, créant automatiquement un fichier sur le logiciel AutoCad. Chaque schéma d'armement représente tous les éléments liés à la voie (ballast, traverses, rails, caténaires...), le tracé en plan et le profil en travers. Les schémas sont dessinés à partir des données acquises par le profilomètre du chariot GRP, sur une position relative de la voie, généralement tous les 10 mètres. Dernièrement, les photos acquises par le logiciel PK-Express ont pu être intégrées au schéma d'armement donnant une information supplémentaire grâce à la visualisation de l'environnement sur une position donnée. Grâce au nouveau protocole et selon les explications précédentes, chaque schéma d'armement pourrait être PK-référencé de manière précise.



III.4.2.2 L'amélioration de la précision

Parmi les pistes de progrès, il est évident qu'une amélioration de la précision serait d'un grand intérêt, elle permettrait d'élargir le champ d'utilisation de ce protocole.

En complément au pivot, l'exploitation de plusieurs antennes permanentes connues avec précision, constituant un réseau de lignes de base, pourraient alors servir à la détermination précise des coordonnées du mobile.

De plus, en stationnant plus longtemps sur les points d'extrémité du levé, leur position serait alors plus proche de la position exacte de l'axe de la voie. On pourrait alors ajuster tous les points intermédiaires qui se rapprocheraient plus de l'axe de la voie.

Prenons l'exemple de l'analyse faite au test 2. La composante altimétrique se situe avec un écart constant d'environ 2 cm sous l'axe réel de la voie, alors que l'écart en planimétrie est d'environ 7 mm coté déport. En appliquant une constante de + 2 cm sur l'altitude et - 7 mm en planimétrie sur chaque point, la position serait alors plus proche de l'axe de la voie sur l'ensemble du levé. Toutefois, il faut être prudent et ne pas généraliser ces corrections. Elles seront différentes pour chaque levé du fait des éléments extérieurs et de l'heure à laquelle est effectué le levé qui influent sur la position. Néanmoins, ces résultats exploitables en relatif peuvent nous donner avec précision l'allure des courbes et des pentes de la voie. Le gain sur la précision absolue pourrait permettre la réalisation d'autres missions topographiques.

Une autre solution porterait sur l'ajout d'une centrale inertielle au dispositif de positionnement. La centrale inertielle permettrait une meilleure précision du positionnement, puisqu'elle intègre des capteurs de haute précision de type accéléromètres et gyromètres. Ce protocole permettrait d'utiliser le chariot dans des zones jusqu'alors inexploitable avec le GPS, à savoir les tunnels où les zones de fortes végétation ou urbanisation. Le positionnement de la voie serait déterminé en tout point et la mesure GNSS permettrait de recalibrer la position lors des dérives de la centrale. Cette solution offre un plus grand rendement et une meilleure précision sur le terrain, mais engendre des coûts d'investissement plus importants.

III.4.2.3 Méthodologie et formation du personnel

Ce travail de fin d'études a naturellement pour objectif de rendre durable le nouveau protocole mis en place. Il s'agit donc en phase finale de rédiger une notice explicative détaillée avec l'ensemble des dispositifs de mise en œuvre. D'abord, les configurations sur chaque instrument intervenant dans le protocole seront précisées, les branchements à réaliser entre chaque appareil seront décrits puis l'utilisation du logiciel Amberg Rail avec ce nouveau mode opératoire sera expliquée.

Toutes les étapes utiles aux opérations de terrain et au levé de la voie seront abordées, permettant ainsi de garantir le seuil de précision.

Enfin et sous forme de formation, la méthodologie pourrait être déclinée sur le terrain en présence de plusieurs opérateurs.

CONCLUSION

Le Travail de Fin d'Etudes constitue un tremplin idéal entre la profession et son apprentissage, entre la pratique et la théorie. Le sujet proposé par l'entreprise MIRE S.A.S et l'expérience qui en résulte m'ont paru en parfaite adéquation avec cette phase intermédiaire de fin d'études vers une orientation professionnelle exigeant de la rigueur.

L'objet de ce mémoire est de proposer un nouveau protocole de relevé ferroviaire par adjonction d'un GPS au chariot GRP 3000 et de comparer ce mode opératoire aux pratiques actuelles. Dans ce contexte, le travail de recherche porte essentiellement sur le paramétrage du couple GPS-Chariot, la réalisation d'une série de tests, leur exploitation et leur analyse, puis d'établir une étude comparative entre le procédé actuel et envisagé.

La phase d'expérimentation a permis de quantifier la faisabilité et la fiabilité du nouveau protocole, le respect des seuils de tolérance admissible et l'intérêt de sa mise en œuvre dans le cadre de travaux topographiques sur l'emprise du domaine ferroviaire.

En effet, l'évolution de la technologie, de la vitesse en matière de transport par voie ferrée nécessite des moyens de contrôle extrêmement fiables, tant pour les opérations de construction que pour la maintenance des infrastructures.

Dans un contexte de compétitivité croissante, le géomètre doit mettre en place des outils adaptés aux exigences du Maître d'Ouvrage, en termes de précisions, de rapidité d'exploitation et d'intervention, mais également dans le respect des consignes de sécurité qu'exige toute intervention sur le domaine ferroviaire.

L'usage du chariot GRP 3000 et son protocole d'utilisation actuel par l'entreprise MIRE S.A.S répond parfaitement aux différents niveaux d'exigence. En revanche, le couple tachéomètre et système mobile est parfois contraignant, notamment pour des linéaires importants d'acquisition de données.

L'expérimentation a permis d'étudier une solution alternative d'optimisation et d'en vérifier les seuils de tolérance. Les avantages incontestables de ce procédé dans le fonctionnement et le délai d'intervention sur site sont démontrés. En revanche et même si les résultats obtenus sont acceptables pour certaines catégories de missions topographiques, la méthode de levé reste moins précise, elle ne répond pas au niveau d'exigence qu'imposent certaines prestations comme le récolement de la voie, dont l'exactitude ne saurait accepter une marge d'imprécision.

Ce mémoire présente volontairement certains paragraphes sous forme de méthodologie. Une synthèse en est extraite. Elle sera remise à l'entreprise MIRE S.A.S, sous forme de notice opérationnelle permettant l'application du protocole dans l'usage du chariot GRP 3000 et d'un GPS embarqué. En effet, le protocole est particulièrement adapté aux levés topographiques linéaires et répétitifs, dans le cadre d'études préalables à la réhabilitation d'une voie, dans le suivi de certaines phases de travaux ne nécessitant pas une précision millimétrique ou encore dans le récolement de superstructures annexes à la voie.

En comparaison aux méthodes traditionnelles effectuées par des moyens lourds type convoi de mesures ou d'autres systèmes mobiles équipés de scanner laser, le chariot GRP 3000 offre un potentiel intéressant pour la plupart des opérations topographiques sur le domaine ferroviaire. Equipé d'un GPS et pour certaines opérations, il présente de véritables perspectives d'évolution en termes de rapidité d'acquisition, intérêt majeur pour l'exploitant et la disponibilité des infrastructures.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Travaux universitaires

DUPUIS B. Lasergrammétrie mobile : Etude et utilisation d'un système mobile de cartographie 3D en milieu ferroviaire. Mémoire de Travail de Fin d'Etudes, ESGT, 2014, 64 pages.

JACQUIN A. Qualification de la précision de données topographiques issues d'acquisitions par méthode scanner laser dynamique ferroporté au sein de la SNCF. Mémoire de Projet de Fin d'Etudes, INSA Strasbourg, 2015, 75 pages.

CHAQUART Q. Intégration des systèmes d'acquisition de données topographiques par scanner laser dynamique dans le processus de mesure et de contrôle des gabarits de la SNCF. Résumé de Projet de Fin d'Etudes, INSA Strasbourg, 2014, 4 pages.

GABORIT R. Equipement d'un chariot de mesures ferroviaires Leica-Amberg GRP3000 de caméras vidéos 2D en vue d'obtenir un film géo-référencé en PK. Résumé de Projet de Fin d'Etudes, INSA Strasbourg, 2011, 4 pages.

PASCAL A. Tachéométrie Mobile : Elaboration d'un dispositif de mesures et Traitements des données. Mémoire de Travail de Fin d'Etudes, ESGT, 2011, 63 pages.

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

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

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

Articles de périodiques électroniques

LEGROS R., MOREL L., VIGUIER F., BIROT F., 2011. Méthodes de travail dans les réseaux GNSS. Revue XYZ, n°129, 5 pages.

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

CHAPAS P., 2012. Voie ferrée – Composantes, construction et maintenance. Infrastructure ferroviaire et Matériel roulant, TRP3050, 8 pages.

Site web

SNCF Réseau: <http://www.sncf-reseau.fr/fr>

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

LGV SEA: <http://www.lgv-sea-tours-bordeaux.fr>

Geodetic Metrology and Engineering Geodesy: <http://www.geometh.ethz.ch/research/track>

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

MIRE SAS: <http://www.miretopo.com>

Ouvrages et guide technique

LEGROS R., MOREL L., VIGUIER F., BIROT F., 2013. Les méthodes de travail dans les réseaux GNSS, 78 pages, rapport final.

TSO. Notice d'utilisation – Chariot de mesure de voie à visée laser – ARTIX, 10 pages.

AMBERG TECHNOLOGIES, 2015. Amberg Tamping, 8 pages.

AMBERG TECHNOLOGIES, 2014. Amberg Clearance GRP3000, 2 pages.

AMBERG TECHNOLOGIES, 2012. Amberg Rail 2.0 – Guide de l'utilisateur, 78 pages.

AMBERG TECHNOLOGIES, 2010. Amberg Rail – Des solutions plus efficaces, plus souples et plus complètes, 16 pages.

AMBERG TECHNOLOGIES, 2010. Amberg Tamping Plus – GRP 1000/3000, 2 pages.

AMBERG TECHNOLOGIES, 2007. GRP3000 – The versatile system for railway surveying, 4 pages.

LISEA, 2015, Ensemble du projet SEA – Procédure – Travaux topographiques, 23 pages

LISEA, 2013, Ensemble du projet SEA - Note technique, 106 pages

Documents d'entreprises

MIRE SAS, 2014. Le GRP 3000 pour les nuls, 20 pages

MIRE SAS. Présentation de l'entreprise, 33 fiches



LISTE DES FIGURES-TABLEAUX-GRAPHES

Figure 1	Profil en travers d'une voie ferrée	Page 8
Figure 2	Ecartement du rail	Page 9
Figure 3	Dévers	Page 9
Figure 4	Flèche	Page 9
Figure 5	Chantier ferroviaire	Page 12
Figure 6	Test matériel GPS	Page 13
Figure 7	Opération RVB	Page 14
Figure 8	Relevage et dressage	Page 15
Figure 9	Phase de contrôle	Page 17
Figure 10	Phase de contrôle	Page 17
Figure 11	Chariot mobile ARTIX	Page 17
Figure 12	Relevé quai de gare	Page 18
Figure 13	Opération LGV-SEA	Page 18
Figure 14	Mise en œuvre ballast	Page 19
Figure 15	Profil en travers	Page 20
Figure 16	Caractéristiques Voie ferrée	Page 20
Figure 17	Levé profil au chariot GRP	Page 21
Figure 18	Station positionnée avant levé	Page 22
Figure 19	Levé à la canne	Page 23
Figure 20	Chariot de mesure	Page 24
Figure 21	Définition des angles d'orientation	Page 28
Figure 22	Chariot GRP 3000	Page 29
Figure 23	Positionnement par TPS	Page 31
Figure 24	Positionnement par TPS	Page 31
Figure 25	Repères VTC-CTC	Page 31
Figure 26	GRP positionné en X et Y	Page 32
Figure 27	GRP positionné en X et Z	Page 32
Figure 28	Equipements du chariot GRP 3000+GPS	Page 33
Figure 29	Translation GPS	Page 34
Figure 30	Translation TPS	Page 34
Figure 31	Principe méthode RTK	Page 36
Figure 32	Polygonale tertiaire	Page 38
Figure 33	Relevé goujons	Page 38
Figure 34	Positionnement du pivot	Page 39
Figure 35	Test 5	Page 40
Figure 36	Test post-traitement	Page 41
Figure 37	Capture écran logiciel Amberg Rail	Page 41
Tableau 1	Ecart/comparatif des deux modes opératoires – voie 1	Page 42
Graphe 1	Comparatif valeurs TPS – GPS / Voie 1	Page 43
Tableau 2	Ecart/comparatif des deux modes opératoires – voie 2	Page 44
Graphe 2	Comparatif valeurs TPS – GPS / Voie 2	Page 44
Graphe 3	Ecart mesures TPS – GPS	Page 44
Figure 38	Capture écran logiciel Amberg Rail	Page 44
Graphe 4	Dépôts TPS – GPS	Page 45
Tableau 3	Ecart moyen du dépôt horizontal	Page 45
Graphe 5	Dépôts TPS – GPS stop&go et continu	Page 45
Graphe 6	Altitudes TPS – GPS stop&go et continu	Page 46
Tableau 4	Influence des satellites sur la qualité des coordonnées	Page 47
Graphe 7	Comparatif altitudes GPS - Voie 1/Influence satellites	Page 47
Figure 39	Configuration géométrique des satellites	Page 48
Tableau 5	Comparatif des écarts TPS / coordonnées translitées	Page 49

ANNEXES

Annexe 1 : Fiche contrôle qualité chantier (ou « Fiche de bourrage ») à Saint Etienne - Pont de l'âne.

Annexe 2 : Notice d'utilisation - ARTIX

Annexe 3 : Certificat d'inspection du GRP 3000 – Géométrie interne du chariot

Annexe 4 : Analyse multicritères intégrant l'ARTIX

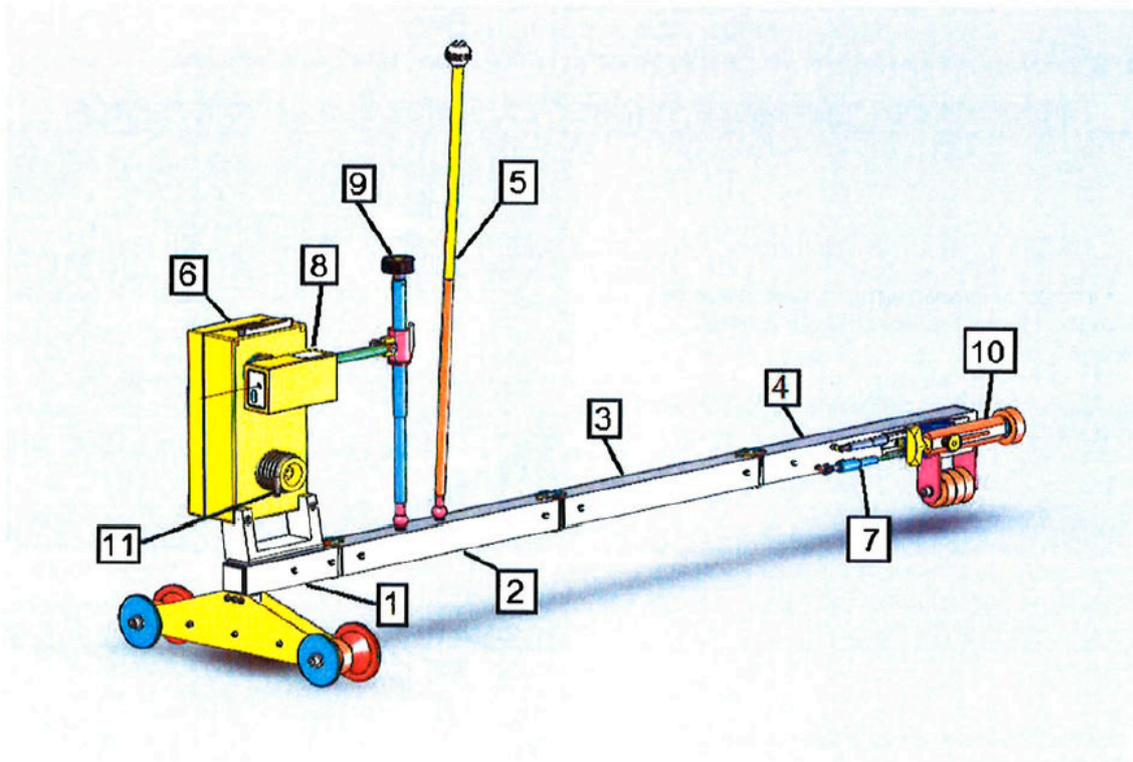
ANNEXE 1

		1- FICHE CONTRÔLE QUALITE CHANTIER IMPLANTATION THEORIQUE DE LA VOIE MORET à LYON - POINT DE L'ANE VOIE 1 - ADV 15a										Date : 09/03/2016 Relevé du 08/03 Niv: Voie: 1				
N° chantier Client		INFP Ligne RAV Saint-Etienne														
PK	piquet chantier	Dressage relevé (08/03)	Ripage	Dressage Final	Entraval	Niveau Relevé(08/03)	Relevage	Niveau Final	Dévers relevé (08/03)	Dévers	Flèche	Sens Courbe	File ref niv	Ave en plan projet	Profil en long projet	Obs.
503+846.58										-26		D	D			
503+852.16	Origine pente											D	D		Pente -1.08 % L=27.29m	Origine pente
503+856.76				-3.590						-22		D	D			
503+866.76	V1.230.R.1							13		-27		D	D			Origine arc
503+874.43	Origine arc									-32	46.6	D	D			
503+876.83	V1.220.R.1			-3.183		0	20	20	-28	-32	46.6	D	D			Changement de pente
503+879.45	Changement de pente									-32	46.6	D	D			FRP
503+879.74	FRP									-32	46.6	D	D			
503+886.85	V1.210.R.1			-2.684		21	27	48	-23	-25	37.3	D	D			OSP/ORP (inflexion)
503+896.82	V1.200.R.1			-2.334		42	20	62	-15	-17	24.2	D	D			FRP
503+906.74	V1.190.R.1			-2.133		57	7	64	-5	-8	11.2	D	D			
503+915.26	ORP/ORP (inflexion)									0	0.0	-	G			
503+916.49	V1.180.R.1			-2.093		49	14	63	2	0	1.6	G	G			
503+919.75	FRP									0	5.9	G	G			FRP
503+926.64	V1.170.R.1			-2.117		40	17	57	0	0	5.9	G	G			
503+936.68	V1.160.R.1			-2.128		61	18	79	1	0	5.9	G	G			
503+946.60	V1.150.R.1			-2.124		52	20	72	0	0	5.9	G	G			
503+956.53	V1.140.R.1			-2.101		75	18	93	0	0	5.9	G	G			
503+959.70	Origine arc									0	0.0	-	G			Origine arc
503+966.50	V1.130.R.1			-2.070		66	20	86	0	0	0.0	-	G			
503+966.84	PRA15A			-2.071		64	15	87	-5	0	0.0	-	G			
503+976.60	V1.120.R.1			-2.074		73	15	88	-2	0	0.0	-	G			
503+986.44	V1.110.R.1			-2.090		85	12	97	2	0	0.0	-	G			
503+996.33	V1.100.R.1			-2.110		79	16	95	2	0	0.0	-	G			
504+000.00	PK 504									0	0.0	-	G			
504+005.92	V1.90.R.1			-2.123		82	6	88	5	0	0.0	-	G			
504+016.49	V1.80.R.1			-2.161		84	1	85	1	0	0.0	-	G			
504+026.28	V1.70.R.1			-2.195		72	7	79	0	0	0.0	-	G			
504+026.91	Changement de pente									0	0.0	-	G			Changement de pente
504+036.51	V1.60.R.1			-2.212		74	14	88	0	0	0.0	-	G			
504+046.30	V1.50.RP.1			-2.253		80	14	94	0	0	0.0	-	G			
504+056.54	V1.40.R.1			-2.247		53	16	69	-1	0	0.0	-	G			
504+066.54	V1.30.R.1			-2.255		38	16	54	0	0	0.0	-	G			
504+076.55	V1.20.R.1			-2.251		27	13	40	-2	0	0.0	-	G			
504+086.53	V1.10.R.1			-2.222		27	15	42	0	0	0.0	-	G			
504+096.31	V1.0.R.1			-2.200		31	11	42	-1	0	0.0	-	G			
504+106.28	V1.0.R.1			-2.158		44	9	53	0	0	0.0	-	G			
504+116.33	V1.20.R.1			-2.097		35	15	50	1	0	0.0	-	G			
504+116.43	Origine arc									0	0.8	G	G			Origine arc
504+126.21	V1.30.R.1			-2.076		38	19	57	0	0	0.8	G	G			
504+136.26	V1.40.R.1			-2.089		51	16	67	0	0	0.8	G	G			
504+146.22	V1.50.R.1			-2.344		-39	15	-24	0	0	0.8	G	G			
504+149.41	Changement de pente									0	0.8	G	G			Changement de pente
dans le sens des PK croissants : le rail est plus haut que le rejet DV > 0 la voie doit être relevée Relevage > 0 la voie doit être relevée DH > 0 le rejet est à droite de la voie Ripage > 0 la voie doit être déplacée vers la droite dévers > 0 Rail droit plus haut																


DESCRIPTION DE L'ENSEMBLE
CHARRIOT DE MESURE DE VOIE ET D'ECARTEMENT : ARTIX
Appareil de Relevé de Terrain Informatisé

Le charriot de mesure est fourni avec une mallette de rangement. Il comporte les éléments suivants.

Chaque charriot est identifié par une plaque gravée fixée au charriot. Sur cette plaque figure l'année de construction et le numéro d'identification du charriot.

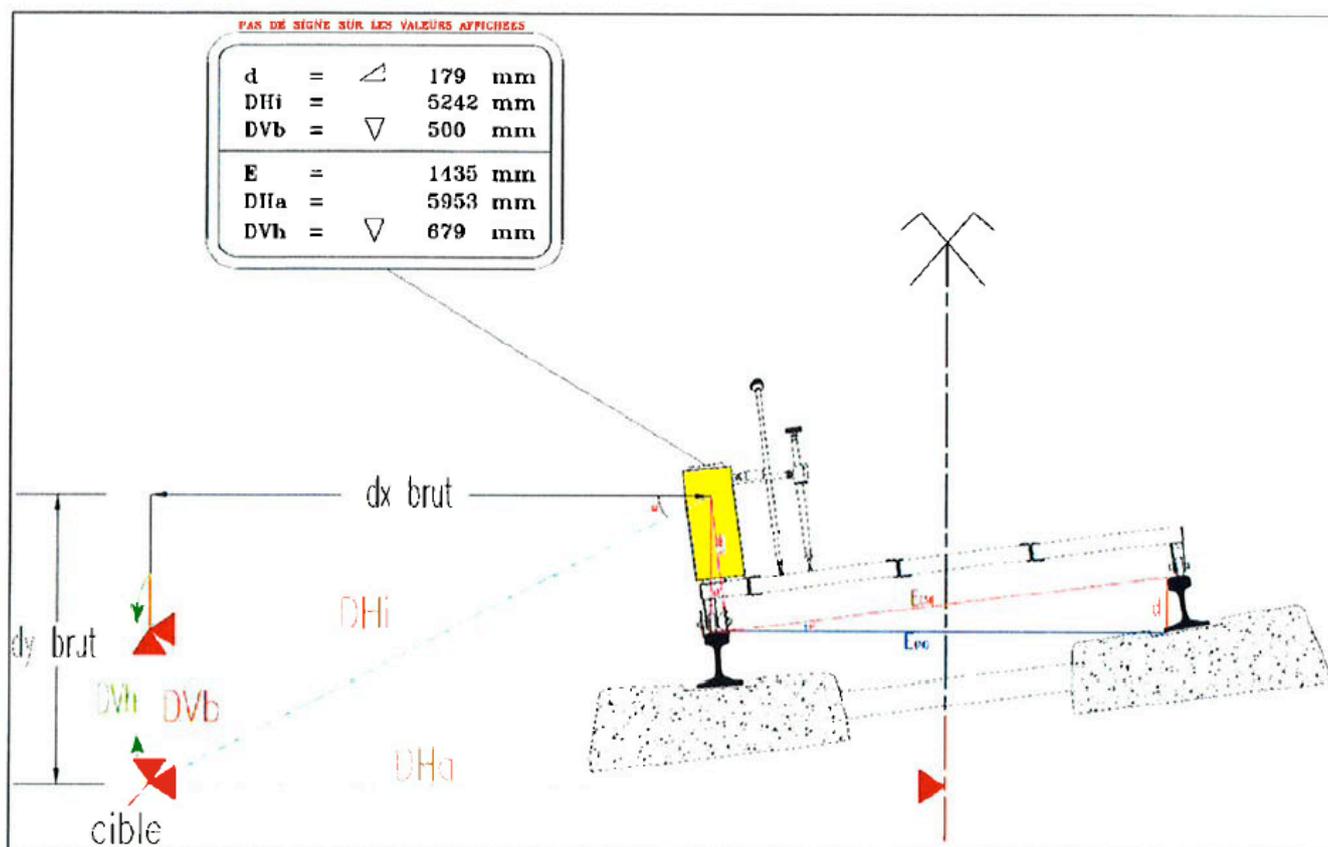


Ce dispositif de mesure se compose de :

- 1 - Support viseur
- 2 - Support tige
- 3 - Le module voie normale : permet de passer le charriot d'une voie dite normale à une voie métrique en retirant le module de voie normale.
- 4 - Support capteur
- 5 - Barre de poussée : permet de déplacer le charriot longitudinalement sur la voie.
- 6 - Module de traitement des informations : analyse les valeurs relevées par les capteurs.
- 7 - Capteur d'écartement de voie
- 8 - Télémètre Laser
- 9 - Barre de réglage verticale : permet de régler l'angle du viseur laser
- 10 - Roue de mesure d'écartement de voie : permet de retransmettre au capteur d'écartement de voie les variations.
- 11 - Câble de connexion du Capteur d'écartement de voie.

CALIBRATION ET EXPLOITATION DU SYSTÈME

Se référer à l'annexe 1 pour les procédures de calibration et d'exploitation du système.
Ci-dessous, schéma de principe de mesure et conventions de signes et d'affichage.



- E Ecartement 3d (mm) - Valeur absolue
- D Dévers (mm) - Si boîtier en file basse $d < 0$
- DHi Distance horizontale référencée intérieur rail file boîtier (mm) - valeur absolue
- DHa Distance horizontale référencée à l'axe réel de la voie (mm) - valeur absolue
- DVb Distance verticale référencée file basse (mm) - Si cible en dessous de la file basse $DVb > 0$
- DVh Distance verticale référencée file haute (mm) - Si cible au-dessus de la file basse $DVh < 0$

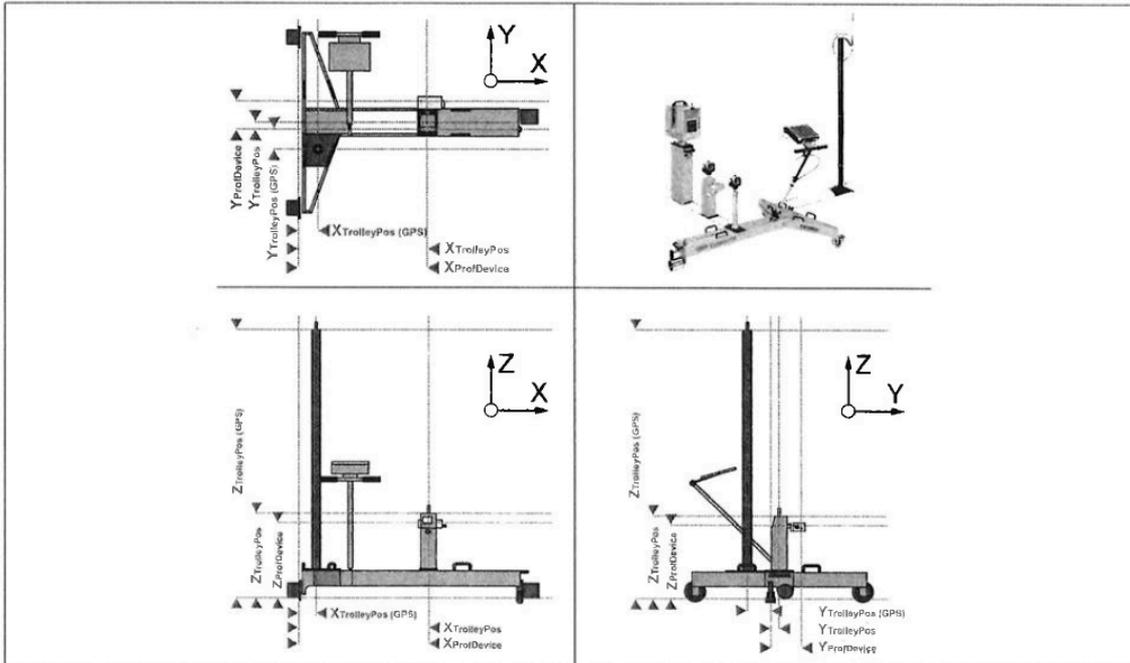
IMPORTANT : Le système autorise la continuité de prise de mesures malgré l'absence de branchement du câble d'alimentation du capteur de déplacement ainsi que la non application de la roue d'écartement.

En revanche, un message « **Défaut Capteur Dep** » apparaîtra sur l'écran et les valeurs de E, DHa seront automatiquement mises à zéro.

Le dévers de voie sera calculé toujours selon l'angle mesuré par l'inclinomètre chariot mais sur une longueur d'application de 1435mm par défaut.

Producer Inspection Certificate

Product: GRP 3000 Nominal gauge: 1.435m Trolley SNo: 3612
 Config. name: GRP3000_1.435m
 Prof. device type: Amberg Profiler 100 FX Prof. device SNo: 467



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

Your order No.:
 Inspection date: 04.07.2013

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 3000 **Nominal gauge:** 1.435m **Trolley SNo:** 3612
Config. name: GRP3000_1.435m
Prof. device type: Amberg Profiler 100 FX **Prof. device SNo:** 467

Inspection results

Wheel wear 03.07.2013

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 03.07.2013

Parameters considering wheel wear

X_{TrolleyPos} = 0.8405m s = 0.0mm
Y_{TrolleyPos} = 0.0484m s = 0.0mm
Z_{TrolleyPos} = 0.5722m s = 0.1mm

X_{ProfDevice} = 0.8405m s = 0.3mm
Y_{ProfDevice} = 0.1824m s = 0.3mm
Z_{ProfDevice} = 0.5127m s = 0.3mm

Parameters measured

X_{TrolleyPos} = 0.8405m s = 0.0mm
Y_{TrolleyPos} = 0.0484m s = 0.0mm
Z_{TrolleyPos} = 0.5722m s = 0.1mm

X_{ProfDevice} = 0.8405m s = 0.3mm
Y_{ProfDevice} = 0.1824m s = 0.3mm
Z_{ProfDevice} = 0.5127m s = 0.3mm

Gauge 03.07.2013

Nominal gauge: = 1.4350m
Sensor origin position: = 1.4026m s = 0.0mm
Scale factor of gauge sensor: = 630000incs/m

Cant angle sensor / super elevation 03.07.2013

Cant angle additional constant s1: -0.0075 rad
Cant angle additional constant s2: -0.0043 rad
Resulting cant angular correction: -0.0059 rad
s = 0.0000 rad
s = 0.0 mm on a gauge of 1.4350m

Odometer 03.07.2013

Odometer pulses: 190.986 pulse/m



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

Page 2

Producer Inspection Certificate

Product: GRP 3000 **Nominal gauge:** 1.435m **Trolley SNo:** 3612
Config. name: GRP3000_1.435m
Prof. device type: Amberg Profiler 100 FX **Prof. device SNo:** 467

Profiling device angular additional constants **03.07.2013**

Prof. device type: Amberg Profiler 100 FX

Additional constant v-angle: -0.0005 rad

The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurements multiplied by the factor $k=2$, which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%

CERTIFICATE

We hereby certify that the product described has been tested and complies with the inspection results as stated above.

Amberg Technologies AG
Trockenloostrasse 21
8105 Regensdorf
Switzerland

Jens-Peter Thorenz
Application Engineer



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

Page 3

ANNEXE 4

ANALYSE MULTICRITERES			
CRITERES	Protocole liant chariot et tachéomètre	Protocole liant chariot et GPS	Artix
Matériel	1 voiture / 1 tachéomètre / 3 prismes / 3 trépieds / 1 système GNSS / 1 chariot GRP 3000 / 1 profilomètre / 1 ordinateur / 1 radio / batteries / 1 mètre /EPI + installations de sécurité /	1 voiture / 2 trépieds / 1 système GNSS / 1 chariot GRP 3000 / 1 mat / 1 profilomètre / 1 ordinateur / batteries / 1 mètre / EPI + installations de sécurité /	1 voiture / 1 chariot ARTIX / 1 télémètre / batteries / 1 mètre / EPI + installations de sécurité /
Phases terrain	Polygonale de précision : 1 point tous les 200 mètres Positionner les points du canevas par méthode GNSS en mode statique Mise en station + Levé au chariot	Positionner le pivot sur un point connu Levé au chariot	Levé au chariot
Personnel	3 personnes pour la polygonale 1 personne pour le levé GPS de la polygonale 2 personnes pour le levé au chariot	1 personne pour positionner le pivot 2 personnes pour le levé au chariot	2 personnes pour le levé au chariot
Contraintes terrain	Extérieur et intérieur (tunnel) Par soleil, temps nuageux, mais la pluie peut perturber la mesures	Extérieur uniquement et sans masque Par tous les temps	Extérieur et intérieur (tunnel) Par tous les temps
Sécurité	Haut risque : travail directement sur la voie ou à proximité Mise en place des mesures obligatoires pour assurer la sécurité	Haut risque : travail directement sur la voie ou à proximité Mise en place des mesures obligatoires pour assurer la sécurité	Haut risque : travail directement sur la voie ou à proximité Mise en place des mesures obligatoires pour assurer la sécurité
Types de mesures	Positionnement absolu et relatif / écartement / dévers / flèches / gauche	Positionnement absolu et relatif / écartement / dévers / flèches / gauche	Positionnement relatif à l'aide d'un marquage préalable / écartement / dévers / gauche
Précision du positionnement absolu	Millimétrique: dépend de la précision de la polygonale, de la qualité de la mise en station, du matériel	Centimétrique: dépend de la précision du pivot, de la longueur de la ligne de base, du nombre de satellites et de leur positionnement dans l'espace	Pas de positionnement absolu
Types de travaux	Etudes d'avant projet / Toutes les passes de bourrage / Implantation des ouvrages / Récolement de la voie et des installations ferroviaires (ADV, caténaires, signalisations...) / Contrôle et étude de gabarit / Mesures de l'environnement de la voie	Etudes d'avant projet / Première passe de bourrage / Implantation des ouvrages / Récolement d'installations ferroviaires (caténaires, signalisations...) / Mesures de l'environnement de la voie	Première passe de bourrage / Implantation des ouvrages / Récolement d'installations ferroviaires (caténaires, signalisations...) / Mesures de l'environnement de la voie
Temps pour 1 km de levé <i>(En moyenne le temps d'accès aux voies dans une journée est de 3h)</i>	Polygonale de précision: 6 points = 2 à 3 jours Levé en mode statique : 6 points = 3 jours Relevé au chariot: 200 mètres par stations = 2 jours Traitement: 1 jour	Installation du pivot: 30min Relevé au chariot: 1/2 journées Traitement: 1 jour ou plus si post traitement	Pas de levé de voie possible en absolu

Proposition d'un protocole de relevé ferroviaire par adjonction d'un GPS au chariot GRP 3000

Mémoire de soutenance de Diplômes d'Ingénieur ESGT – Clément BURY

RÉSUMÉ

La société MIRE S.A.S réalise une importante part de son activité sur le domaine ferroviaire. Pour répondre au cahier des charges des clients, les interventions sur le terrain nécessitent la détermination avec précision de la géométrie et la position de la voie. Dans ce contexte, MIRE SAS propose un Travail de Fin d'Etudes dont l'objectif est d'étudier une méthode de relevé ferroviaire alternative aux pratiques actuelles dans le but d'augmenter la cadence de production. Le travail réalisé à partir d'un système mobile d'acquisition de données (chariot GRP 3000) équipé d'un GPS 1200 a permis d'effectuer des tests dont les seuils de tolérance sont acceptables pour certaines missions topographiques au moindre niveau de précision. La méthode permet aussi de réduire significativement le temps d'acquisition des données et donc le coût de l'intervention. L'expérimentation et son protocole constituent alors en milieu ferroviaire, une option envisageable pour le géomètre.

Mots clés : Système mobile, domaine ferroviaire, Chariot GRP, GPS, Caractéristiques voie ferrée, Précision, Seuils de tolérance

ABSTRACT

The MIRE S.A.S company carries out a significant part of its activity in the railway field. To meet the customers' specifications, the interventions on the field require that the geometry and track position be accurately determined. In this context, the MIRE SAS company suggests working on an intership whose aim is to study a method of topographic railway account to replace current practices, in order to increase the production rate. The work based on systems called Mobile Mapping Systems (GRP 3000) equipped with a GPS 1200 has permitted to perform tests whose thresholds of tolerance are acceptable for some topographical missions that can stand a lower level of accuracy. The method also allows to significantly reduce the time of data acquisition and therefore the cost of the intervention. Thus, the experimentation and its protocol constitute a good option for the land surveyor in a railway environment.

Key words: Mobile Mapping System, railway field, Trolley GRP, GPS, Accuracy, Thresholds of tolerance



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

RÉSUMÉ DU MÉMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le **DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM**

Spécialité : Géomètre et Topographe

par

Clément BURY

Proposition d'un protocole de relevé ferroviaire par adjonction d'un GPS au
chariot GRP 3000

Soutenu le 04 Juillet 2016

JURY

PRESIDENT : M. Stéphane DURAND

MEMBRES : M. Olivier BOUSQUET
M. José CALI, Professeur référent
M. Philipp CLAUSEN
M Christophe DUPRÉ
M. Pierre GUSMANO, Maître de stage
Mme. Valérie RENAUDIN
M. Max RUFFO
M. Jérôme VERDUN

I - INTRODUCTION ET OBJECTIFS DE L'ETUDE



La société **MIRE S.A.S** est une entreprise de topographie spécialisée dans les domaines de l'instrumentation, de l'auscultation automatique, de la lasergrammétrie terrestre 3D, de l'interférométrie et des **études ferroviaires**. Elle intervient sur l'infrastructure ferroviaire au niveau national et international pour y effectuer des travaux topographiques principalement dans le domaine de la conception, du suivi des travaux et du récolement. Afin de répondre au mieux aux attentes de ses partenaires, MIRE S.A.S s'est équipée de matériel topographique de haute précision : l'acquisition de six **chariots GRP 3000** ces dernières années fut la solution retenue pour les levés précis de l'environnement ferroviaires et de sa géométrie. Ce système mobile de cartographie détermine et contrôle la position de la voie dans le respect des tolérances admissibles, il décèle les écarts de position lors de la pose et de la maintenance des rails et il identifie les objets à proximité de la voie. Le mode opératoire actuel permet de déterminer **la position absolue** du chariot sur le rail par le biais d'un **tachéomètre**. Les deux équipements sont complémentaires, le chariot intègre plusieurs capteurs capables d'acquérir la géométrie interne de la voie et son logiciel de traitement permet de déterminer le positionnement de l'**axe de la voie**. En revanche, le procédé est consommateur de temps puisqu'il nécessite de nombreuses interventions répétitives sur le terrain. Or, la préoccupation essentielle de l'exploitant du domaine ferroviaire est de réduire les délais d'immobilisation de l'infrastructure.

A partir de ce constat et du mode opératoire actuel, l'objectif de ce TFE sera de proposer un mode opératoire de relevé ferroviaire, permettant de s'affranchir de la station totale par **adjonction d'un GPS** au système mobile. Le protocole devra présenter la méthodologie d'adaptation du chariot et son paramétrage, les tests et les analyses. Enfin, un bilan permettra à l'entreprise MIRE S.A.S d'évaluer la pertinence et la faisabilité d'un tel mode opératoire, dans ses différentes missions d'acquisition de données en milieu ferroviaire.

II - CONTEXTE ET DOMAINE D'INTERVENTION

En France, le réseau ferré représente 30 000 km de voies irriguant l'ensemble du territoire. Les paramètres géométriques de la voie sont définis par un référentiel technique et ils répondent à des niveaux d'exigence élevés compte tenu des impératifs en termes de sécurité.

Aussi, ce travail de réflexion nécessite au préalable, la **découverte du milieu** d'intervention tant au niveau de la structure d'accueil que sur le domaine ferroviaire, puisque la proposition de protocole doit être opérationnelle et apporter des réponses crédibles aux attentes de la société MIRE S.A.S.

Compte tenu de la spécificité du domaine d'intervention et des méthodes de levé qui s'y rattache, cette démarche nécessite alors un **apprentissage** des pratiques actuelles et du matériel utilisé. Ainsi, le stage sera l'occasion de découvrir différents chantiers en France et d'y pratiquer les diverses missions topographiques, notamment dans le cadre de Renouvellement de Voie et de Ballast (RVB). La phase d'expérimentation sera menée quant à elle, sur la construction d'une Ligne à Grande Vitesse (LGV), en parallèle avec la phase de récolement de l'infrastructure dont participe MIRE S.A.S.



Figure 1 Chariot GRP + station totale (source C Bury)

III - MATERIEL ET PARAMETRAGE

Ces dernières années, les progrès en géodésie spatiale ont contribué au développement de système mobile de plus en plus performant dans le domaine de la topographie. Les moyens utilisés sur l'infrastructure ferroviaire varient selon le **type de prestations** à réaliser comme la construction de nouvelles voies type LGV ou encore les opérations de RVB pour la maintenance du réseau ferré.

Différentes analyses montrent que les systèmes mobiles terrestres présentent un **bon compromis entre rapidité d'intervention et précision**. L'entreprise MIRE S.A.S s'est équipée de divers systèmes mobiles permettant l'acquisition de données à partir de chariot se déplaçant sur la voie ferrée. Selon la demande,

l'équipement peut être couplé à une « station totale » permettant ainsi d'effectuer des relevés précis, comme l'exige notamment le récolement de la voie après travaux. En fonctionnement idéal, la station totale est positionnée à partir d'une polygonale de précision. Elle permet de localiser sur une emprise d'environ 200m, la position du chariot en X,Y,Z à l'aide d'un prisme installé sur ce dernier.

Les tests nécessaires à la définition du protocole sont réalisés en installant un **GPS 1200 sur le chariot GRP 3000**. La solution technologique n'étant pas « plug and play », un **paramétrage des différents appareils** est alors indispensable pour établir la **connexion** des équipements entre eux. La méthode de positionnement GNSS proposée par le logiciel (Amberg Rail) associé au chariot GRP 3000, est la méthode **Real Time Kinematic**. Un pivot doit alors être placé à proximité du levé sur un point connu, afin de transmettre en temps réel ses corrections au mobile qui les applique à ses propres observations, afin d'en déterminer sa position centimétrique.

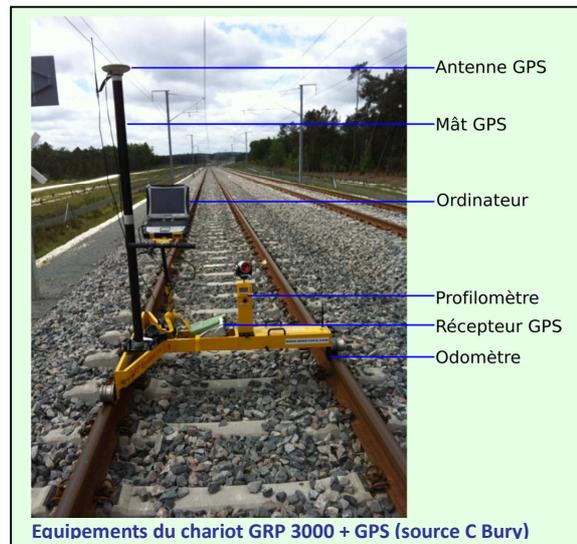
Lorsque le GPS est en service, il donne la position du chariot et permet alors de **s'affranchir de la station totale** et des diverses interventions de terrain pour les mises en station.

Les tests et analyses permettront ensuite d'évaluer les capacités et les limites de chacun des protocoles, ainsi que l'opportunité de décliner cette méthode sur des missions topographiques en milieu ferroviaire. Les principaux critères de comparaison sont le **temps d'acquisition**, la **précision** et les **types de prestations** pour lesquels le matériel peut être utilisé.

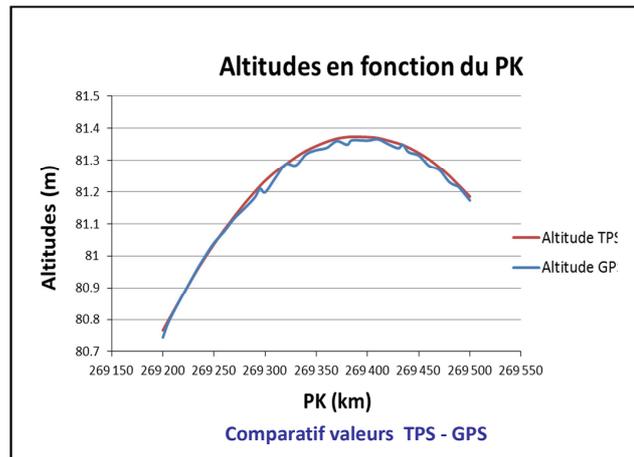
IV - TESTS, ANALYSES ET BILAN

La proposition d'un protocole et sa mise en place nécessite des essais et leur analyse. Le mémoire se limite à la présentation de 5 tests représentatifs de l'étude.

Le 1° test vérifie les informations du GPS après son installation et sa connexion aux équipements du chariot, ainsi que la conformité des données par rapport aux valeurs justes du projet. L'écart mesuré (2 à 3cm en moyenne) correspond au seuil admissible pour cette méthode GPS.

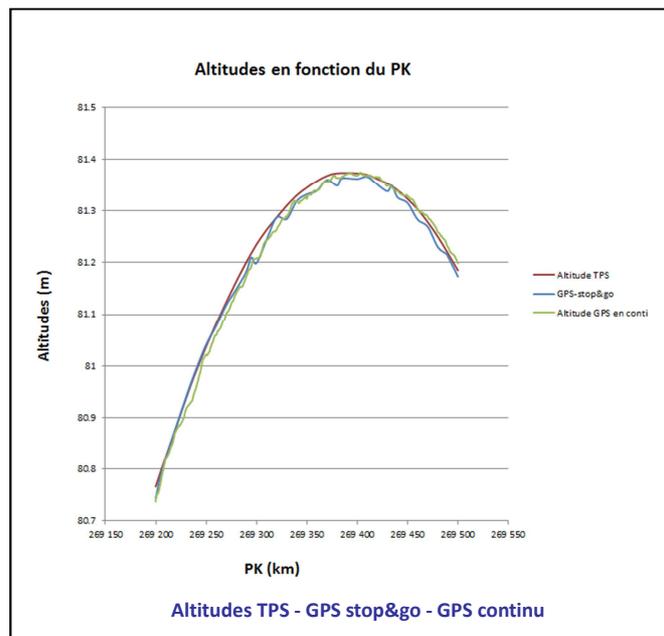


Le 2° test réalisé sur plusieurs linéaires de 300m, compare les résultats obtenus pour les deux modes opératoires (GPS-TPS) et selon les mêmes repères en PK (point kilométrique), pris en « stop&go » tous les 10 mètres. On se base alors sur le positionnement par suivi tachéométrique, dont la précision est millimétrique, pour déterminer la qualité du positionnement par GPS. L'exploitation des données sur le 1° tronçon présente un écart moyen de 11mm en planimétrie avec un écart type de 7mm et un écart moyen de 22mm en altimétrie avec un écart type de 9mm. Compte tenu de la méthode de positionnement par GPS, les résultats obtenus sont satisfaisants, mais perfectibles.



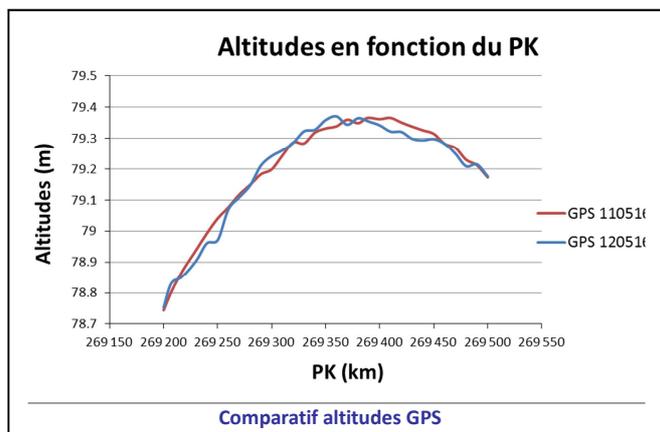
En effet, le même protocole réalisé sur un second tronçon présente des résultats plus intéressants. Dans ce second cas, 8 satellites étaient captés par l'antenne GPS contre 6 dans le premier cas. L'écart moyen en planimétrie passe alors de 11 à 8 mm tandis qu'en altimétrie l'écart moyen reste de 22mm. Les satellites captés sur l'emprise du levé ont un impact sur la qualité des coordonnées. Le test 4 permettra de vérifier ce point.

Le 3° test consiste à vérifier la faisabilité d'acquisition de données en continu, contrairement au test 2 qui nécessite un point d'arrêt tous les 10 mètres. Le test 3 a été réalisé sur le même tronçon (linéaire de 300 m) que le test 2 avec une fréquence de 10 mesures par seconde. Les écarts entre le levé GPS en « stop&go » et en « continu » sont similaires avec des oscillations plus marquées pour le levé en continu liées à la quantité de données acquises. Les écarts entre les levés GPS et le levé TPS restent dans des seuils de tolérance assimilables à ceux du test 2, soit des écarts maximum de 2 à 3 cm en altimétrie et planimétrie. Le test 3 confirme donc la précision relative de la méthode RTK pour le levé en dynamique.



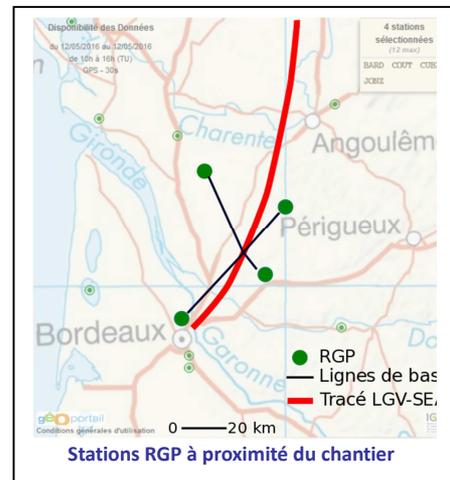
En comparaison au test 2, cette méthode permet de gagner du temps sur la phase d'acquisition des données pour une précision identique.

Le 4° test confirme l'influence des satellites sur la qualité des coordonnées. Deux mesures ont été réalisées au GPS sur le même tronçon, mais à des moments différents. L'analyse met en avant des irrégularités sur les courbes d'altitudes alors que l'axe de la voie



mesurée au TPS est en réalité parfaitement lisse. Comme l'illustre les courbes ci-dessus, le nombre des satellites et leur positionnement dans l'espace influent directement sur la qualité des résultats. L'augmentation de nombre de satellites devrait à terme, améliorer l'acquisition et l'exploitation des données.

Le 5^o test propose une variante à la définition de l'axe de la voie ferrée à partir d'une ou plusieurs stations permanentes, comme celles du RGP (Réseau GNSS permanent), sans que le pivot soit positionné sur un point connu. En effet, tous les chantiers n'ont pas forcément un point connu en coordonnées à proximité. Un post-traitement des données permet de calculer les coordonnées de l'antenne du mobile et de les translater pour définir l'axe de la voie. Les écarts en planimétrie et altimétrie sont légèrement plus importants du fait du post-traitement et des erreurs liées aux translations qui dépendent de la géométrie interne de la voie. Cependant, les résultats sont satisfaisants et correspondent à la classe de précision de la méthode GPS.



Dans la mise en œuvre d'un nouveau protocole d'acquisition de données sur la voie ferrée, le bilan de ces différents essais montre que l'adjonction d'un GPS1200 au chariot GRP 3000 présente des avantages significatifs en délai d'acquisition avec des seuils de tolérance acceptables respectés.

V - CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Tout d'abord, ce travail de fin d'études et particulièrement celui qui m'a été confié par la structure d'accueil, constitue un véritable tremplin vers le milieu professionnel. Sa mise en œuvre permet aussi d'appréhender la rigueur qu'exige la profession de géomètre, ainsi que la découverte de missions spécifiques du métier tel que les travaux topographiques en milieu ferroviaire.

La particularité de ce domaine est sa linéarité, ainsi que le niveau d'exigence du gestionnaire de l'infrastructure, tant sur la sécurité que sur la qualité des prestations.

Le mode opératoire actuel permet d'atteindre les degrés de précision exigés. Néanmoins, l'objet du TFE consiste à proposer à l'entreprise MIRE S.A.S un protocole permettant d'optimiser la phase d'acquisition et d'en tester les limites admissibles. Après avoir paramétré et connecté le matériel, les différents tests réalisés sur un tronçon de la LGV SEA, présentent des résultats notoires. Cependant, à ce stade de recherche, la méthode n'est pas exploitable sur une opération de récolement de voie aux exigences millimétriques.

En l'état, le protocole mis en place et la méthodologie décrite dans le mémoire permet d'ores et déjà d'être exploitée à partir d'une fiche opérationnelle. En effet, pour des opérations topographiques nécessaires aux levés d'avant projet, de récolement de superstructures ou dans le suivi de certaines phases de travaux exigeant une précision centimétrique, le mode opératoire correspond à un compromis intéressant entre rapidité d'acquisition et précision.

L'adjonction d'un GPS 1200 au chariot GRP 3000 et le protocole qui en résulte, répond à l'objectif ciblé et constitue une solution alternative qui dorénavant, peut être exploitée par l'entreprise MIRE S.A.S.

Proposition d'un protocole de relevé ferroviaire par adjonction d'un GPS au chariot GRP 3000



Une entreprise multi-métiers et spécialisée sur le domaine ferroviaire, nécessitant du matériel performant en précision et en temps d'acquisition pour répondre au mieux aux attentes des clients.

Le travail sur le nouveau protocole a mettre en place devra répondre aux questions suivantes: Quel gain de temps par rapport aux pratiques actuelles? Quelle précision? Sur quelles missions est-il applicable?



Protocole actuel: Positionnement par suivi tachéométrique
Principe:
- Réaliser une polygonale de précision
- Mettre en station le tachéomètre
- Lever au chariot (200m)

Protocole étudié: Positionnement par GPS
Principe:
- Stationner le pivot sur un point connu
- Lever au chariot (plusieurs kilomètres)



Les tests consistent à analyser la faisabilité et la fiabilité du nouveau mode opératoire. Ils sont réalisés sur le site de la Ligne à Grande Vitesse Sud-EuropeAtlantique.

Le 1° test vérifie les informations du GPS après son installation et sa connexion aux équipements du chariot, ainsi que la conformité des données par rapport aux valeurs justes du projet. L'écart mesuré en plani et alti (2 à 3 cm en moyenne) correspond au seuil admissible pour la méthode GNSS appliquée: le RTK.

Le 2° test, réalisé sur plusieurs linéaires de 300m, compare la position de l'axe de la voie obtenue pour les deux modes opératoires (GPS et TPS) et selon les mêmes repères en PK (point kilométrique). L'exploitation des données présente en moyenne un écart planimétrique d'environ 2 cm et un écart altimétrique de 2,5 cm entre les mesures. Compte tenu de la méthode de positionnement par GPS, les résultats obtenus sont satisfaisants.

Le 3° test consiste à vérifier la faisabilité d'acquisition de données en continu, contrairement au test 2 qui nécessite un point d'arrêt tous les 10m. Le test 3 a été réalisé avec une fréquence de 10 mesures par seconde. Les écarts entre les levés GPS et le levé TPS restent dans des seuils de tolérance identiques à ceux du test 2, soit un écart moyen de 2 à 3 cm. Le test 3 confirme donc la précision relative de la méthode RTK pour le levé en dynamique et permet un gain de temps considérable.

Le 4° test confirme l'influence que les satellites peuvent avoir sur la qualité des coordonnées. Deux levés ont été réalisés au GPS sur le même tronçon, mais à des moments différents. La qualité des résultats obtenus sur les levés augmente en fonction du nombre de satellites observés et leur répartition dans l'espace.

CRITERES	Protocole liant chariot et tachéomètre	Protocole liant chariot et GPS
Matériel	1 tachéomètre / 3 prismes / 3 trépieds / 1 système GNSS / 1 chariot GRP 3000 / 1 profilomètre / 1 ordinateur	2 trépieds / 1 système GNSS / 1 chariot GRP 3000 / 1 mat / 1 profilomètre / 1 ordinateur /
Phases terrain	Polygonale de précision : 1 point tous les 200 mètres Positionner les points du canevas par méthode GNSS en mode statique Station libre - Levé au chariot	Positionner le pivot sur un point connu Levé au chariot
Contraintes terrain	Extérieur et intérieur (tunnel) Par soleil, temps nuageux, mais la pluie peut perturber la mesure	Extérieur uniquement et sans masque Par tous les temps
Types de mesures	Positionnement absolu et relatif / écartement / dévers / flèches / gauche	Positionnement absolu et relatif / écartement / dévers / flèches / gauche
Précision du positionnement absolu	Millimétrique: dépend de la précision de la polygonale, de la qualité de la mise en station, du matériel	Centimétrique: dépend de la précision du pivot, de la longueur de la ligne de base, du nombre de satellites et de leur positionnement dans l'espace
Types de travaux	Etudes d'avant projet / Toutes les passes de bourrage / Implantation des ouvrages / Récolement de la voie et des installations ferroviaires (ADV, caténaires, signalisations...) / Contrôle et étude de gabarit / Mesures de l'environnement de la voie	Etudes d'avant projet / Première passe de bourrage / Implantation des ouvrages / Récolement d'installations ferroviaires (caténaires, signalisations...) / Mesures de l'environnement de la voie
Temps pour 1 km de levé en moyenne le temps d'accès aux voies dans une journée est de 3h	Polygonale de précision: 6 points = 2 à 3 jours Levé en mode statique : 6 points = 3 jours Relevé au chariot: 200 mètres par stations = 2 jours Traitement: 1 jour	Installation du pivot: 30min Relevé au chariot: 1/2 journées Traitement: 1 jour ou plus si post traitement
	Très avantageux	Avantageux
	Neutre	Contraignant
		Très contraignant

Le 5° test propose un positionnement de l'axe de la voie ferrée à partir d'une ou plusieurs antennes RGP, sans que le pivot soit positionné sur un point connu. Un post-traitement des données permet de calculer les coordonnées de l'antenne et de translater ses coordonnées pour définir l'axe de la voie. Les écarts en planimétrie (3cm) et altimétrie (4cm) sont légèrement plus importants que les test 2, du fait du post-traitement et des erreurs liées aux translations.

L'expérimentation a permis d'étudier une solution alternative d'optimisation de levé topographique en milieu ferroviaire et d'en vérifier les seuils de tolérance. Les avantages incontestables de ce procédé dans le fonctionnement et le délai d'intervention sur site sont démontrés. En revanche et même si les résultats obtenus sont acceptables pour certaines catégories de missions topographiques, la méthode de positionnement reste moins précise que par suivi tachéométrique, elle ne répond pas au niveau d'exigence qu'imposent certaines prestations comme le récolement de la voie (précision millimétrique). Toutefois, des pistes de progrès sur les systèmes mobiles de cartographie sont envisageables et permettront à terme de trouver le meilleur compromis entre précision et rapidité d'acquisition.