

# levé statique et dynamique de profil par méthode GPS différentiel temps réel



M. Hallé - Ingénieur division topographie - SNCF  
Communication présentée au Congrès FIG (Brighton)

## PRÉSENTATION DU CHANTIER DE RÉGÉNÉRATION

La première ligne à grande vitesse à avoir été construite en France, la ligne T.G.V. Paris Sud-Est entre Paris et Lyon, est empruntée quotidiennement par 180 T.G.V. La voie (rail, traverse, ballast) est un élément essentiel de la grande vitesse. Elle contribue par sa tenue et son comportement à la sécurité, à la fiabilité et au confort.

Depuis 1981, cette voie a supporté 130 milliards de voyageurs au kilomètre; à partir de l'an 2000, avec la mise en service du T.G.V. Méditerranée, elle supportera 30 % de trafic supplémentaire. Pour s'y préparer, un chantier de nuit pour la régénération de cette ligne s'est ouvert le 18 mars 1996 sur 220 kilomètres (fin des travaux prévue pour 2001).

En 2006, l'ensemble de la Ligne à Grande Vitesse (L.G.V.) Paris Sud-Est sera rénové.

La régénération de la ligne consiste principalement à soulever la voie, à aspirer le vieux ballast pour le remplacer par du ballast neuf et à changer les traverses usées. Le ballast est ensuite stabilisé, tassé et égalisé à plusieurs reprises.

## MESURES TOPOGRAPHIQUES

Le renouvellement du ballast d'une ligne T.G.V. nécessite la connaissance de la position planimétrique et altimétrique de la voie ainsi que la position des poteaux caténaïres qui définissent le gabarit de la voie à respecter.

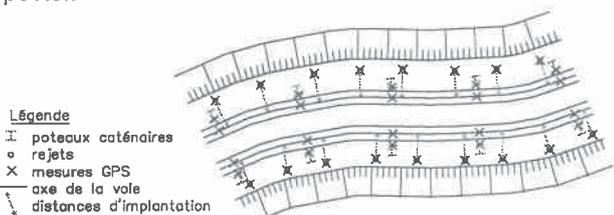


Fig. 1 - Points à mesurer

Ces éléments levés sont destinés à établir une nouvelle étude de tracé qui est réalisée avant les travaux de régénération.

Pour positionner la voie (en altimétrie et en planimétrie) pendant les travaux, des repères appelés rejets, matérialisés par des tiges métalliques, sont enfoncés dans le sol au bord de la voie.

Ces rejets, connus en 3 dimensions, servent à guider les machines sur le nouveau tracé par des mesures de distances (figure 2). Ils sont implantés sur les deux pistes de la voie, à environ 3 mètres du rail extérieur et espacés tous les 40 mètres en alignement et 20 mètres en courbes.

Ils permettent aussi de contrôler la position de la voie après les travaux.

## LES CANEVAS DISPONIBLES

Après chaque construction d'une Ligne à Grande Vitesse, des canevas planimétrique et altimétrique sont mis en place et destinés aux travaux de maintenance.

La densité du canevas planimétrique réalisé par polygonation est un point tous les 300 mètres environ. Ces points polygonaux sont fixés dans le socle en béton des poteaux caténaïres, d'un côté ou de l'autre de la voie, selon la visibilité.

En plus, un point connu en planimétrie est placé sur les ouvrages d'art (pont-route) avec une densité moyenne d'un pont tous les 2 à 3 kilomètres.

Ce canevas est rattaché au système de projection national : le système N.T.F. (Nouvelle Triangulation Française) ou système Lambert.

Le canevas altimétrique est moins dense. Les repères de nivellement, rattachés au N.G.F. (Nivellement Général de la France), sont fixés dans les ouvrages stables en béton (piles des ponts, caniveaux, buses d'écoule-

ment,...). Il y a environ un point connu en Z tous les 1 à 2 kilomètres le long de la voie.

### PRÉCISIONS DEMANDÉES

Pour les mesures topographiques, les précisions suivantes ont été définies :

#### En planimétrie :

- +/- 1 cm par rapport au canevas,
- +/- 5 mm entre points contigus.

#### En altimétrie :

- +/- 1 mm entre points contigus.

### OPÉRATIONS OPTIQUES

Avant l'utilisation du G.P.S., les mesures topographiques étaient réalisées de la manière suivante :

- La première opération est le nivellement de la voie et de la piste, par profil en travers, à 10 mètres de chaque poteau caténaire côté Sud, tous les 50 mètres environ.

Les profils sont mesurés par un nivellement direct afin de pouvoir assurer une précision millimétrique.

Cette opération est effectuée de nuit pour des raisons de sécurité lorsqu'il n'y a pas de train en circulation. Elle permet notamment de quantifier l'épaisseur de ballast à changer.

Une étude de profil en long est faite à partir de ce nivellement afin d'améliorer le tracé des voies avant les travaux.

- La seconde opération, effectuée de nuit, consiste à lever l'axe des deux voies ainsi que la position des poteaux caténaires. Les mesures sont réalisées avec un tachéomètre, en stationnant les points du canevas.

- La troisième opération consiste à déterminer en trois dimensions la position des rejets mis en place en priorité du côté de la voie qui sera renouvelée en premier.

Les mesures des rejets sont effectuées de jour par nivellement direct et par mesures tachéométriques à partir des deux stations encadrantes afin d'assurer une précision de 1 cm en planimétrie par rapport au canevas et de 5 mm entre deux rejets consécutifs.

La connaissance des coordonnées permet de calculer les distances d'implantation de la voie par rapport aux rejets. Celles-ci sont remises à l'entreprise de pose de voie qui réalise les travaux de régénération.

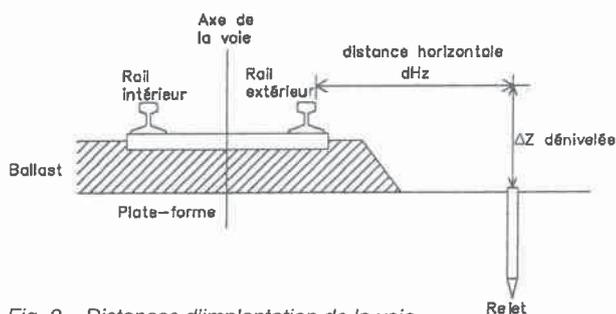


Fig. 2 — Distances d'implantation de la voie

## OPÉRATIONS G.P.S. TEMPS RÉEL

### Avant propos

Le chantier de la régénération de la L.G.V. a tout d'abord été, pour le G.P.S. Temps Réel, un chantier d'évaluation des possibilités du matériel, en conditions opérationnelles.

Plus de 20 kilomètres de zones communes ont été mesurés en méthodes optiques et G.P.S., ce qui nous a permis de valider l'utilisation du G.P.S. Temps Réel pour des travaux nécessitant une précision planimétrique de +/- 10 millimètres par rapport au canevas de référence.

Sur les 20 kilomètres nous avons obtenu une précision altimétrique de +/- 10 à 20 millimètres. Cette précision est fonction du nombre de points altimétriques connus qui définissent le géoïde local.

La précision obtenue ne convenant pas pour la précision recherchée de +/- 1 millimètre, la suite de ce rapport est consacrée principalement aux déterminations planimétriques par mesures G.P.S. qui ont remplacé les mesures tachéométriques.

L'altimétrie est toujours déterminée par nivellement direct.

La constellation de satellites disponibles permet de lever des points pratiquement au droit des ponts.

### CONFIGURATION DU MATÉRIEL

Le matériel utilisé sur ce chantier est composé de trois antennes bi-fréquences Leica système 300 en configuration 2 mobiles et 1 référence, équipées de modems radio d'une puissance de 1 W.

L'utilisation du matériel en mode temps réel a été choisie afin d'éliminer les temps de calculs. L'absence de calculs post-traités simplifie l'utilisation du G.P.S. et permet à un personnel peu formé d'utiliser le matériel.

Les temps de mesure des points sont environ 2 minutes pour une initialisation sur 5 satellites des stations mobiles et 3 à 4 secondes par point sans coupure de signal avec au moins 4 satellites.

Afin de maintenir parfaitement l'antenne verticale sur les points mesurés, nous avons équipé nos cannes porte-antenne d'un bi-pod. L'utilisation de ce bi-pod a amélioré la précision des mesures de 3 millimètres.

### MESURES G.P.S. TEMPS RÉEL

#### MISE EN PLACE DU RÉFÉRENTIEL G.P.S.

Les mesures topographiques peuvent être réalisées par mesures G.P.S. ou par mesures optiques. Il est donc nécessaire que toutes les mesures utilisent le même référentiel qui est composé des points du canevas sur les supports caténaires.

Les mesures G.P.S. étant réalisées dans le système WGS 84, nous avons dû établir des formules de transformation entre le système cartésien et le système plan Lambert.

Le type de transformation choisi est une transformation qui dissocie la planimétrie de l'altimétrie (2D + 1).

Afin de minimiser les résidus de transformation sur les points connus (< 2 cm), nous établissons des formules de transformation par zones de 2 à 4 kilomètres.

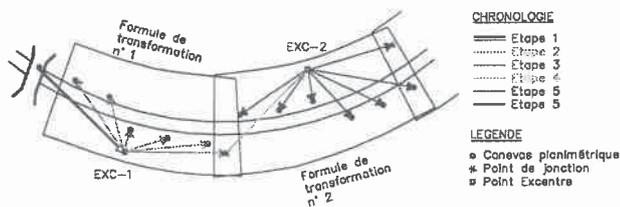


Fig. 3 – Élaboration des formules de transformation

Pour des problèmes de transmission de radio homologuée, les zones mesurent généralement 2 kilomètres.

Sur chaque zone, nous mesurons l'ensemble des points connus en planimétrie et altimétrie, ainsi que des points de contrôle appartenant à deux zones consécutives, à partir d'un point excentré (figure 3).

Ce point excentré a été déterminé à 10 mètres près en WGS84, à partir d'un point connu en Lambert, transformé en WGS84. Il est situé sur un ouvrage d'art. Son emplacement dans les emprises S.N.C.F. a été choisi de telle sorte que :

- le point est facile d'accès en milieu de zone,
- le point est sans masque,
- le point est en hauteur et domine si possible la zone,
- le point est sans risque apparent de problème de multi-trajet.

Les points de jonction appartenant à deux zones consécutives permettent de contrôler la continuité des zones.

Une fiche signalétique est établie par zone afin de repérer l'emplacement de l'excentré et de contrôler le calcul de la transformation.

Les formules de transformation WGS84 → LAMBERT servent à l'ensemble des mesures G.P.S. par zone.

### LEVÉ DE L'AXE DES VOIES

Le levé de l'axe des voies est réalisé de nuit, sans circulation de train, à l'aide d'une règle à lever qui définit l'axe, et sur laquelle est placée l'antenne G.P.S.

Une fois la station de référence mise en place et la formule de transformation choisie suivant la zone, il est possible de mesurer l'axe de la voie en coordonnées planes Lambert.

Les voies sont mesurées séparément ou en même temps en fonction de la circulation des trains.

Une seule détermination est réalisée par profil.

Afin de contrôler les mesures G.P.S. sur la voie, des mesures sur chaque point connu de la polygonale sont faites en cours d'avancement et après l'initialisation de l'appareil.

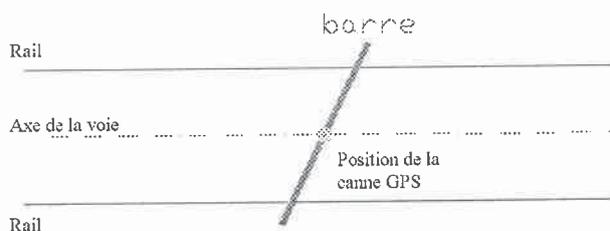


Fig. 4 – Utilisation d'une règle à lever

### LEVÉ DES POTEAUX CATÉNAIRES

Une distance minimale appelée le gabarit est à respecter entre le bord du poteau caténaire et l'axe de la voie.

La position du bord intérieur du poteau permet de contrôler le gabarit pour un nouveau tracé étudié.

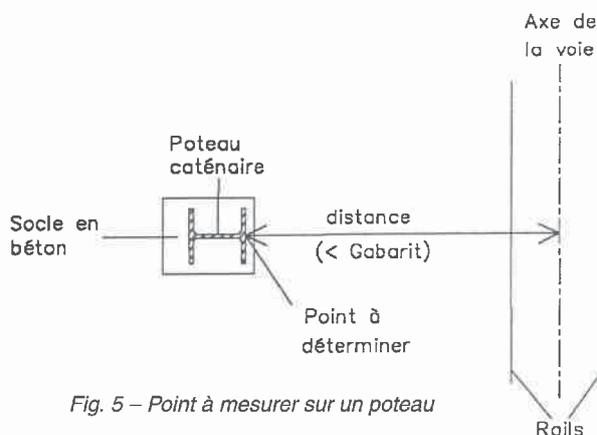


Fig. 5 – Point à mesurer sur un poteau

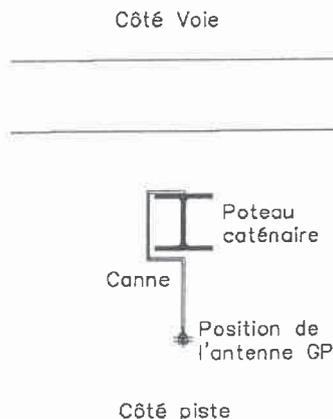


Fig. 6 – Schéma de la canne à lever

Le G.P.S. ne permettant pas une mesure directe du bord intérieur du poteau (impossibilité de coller l'antenne sur le poteau caténaire), nous avons réalisé une canne permettant des mesures avec un excentrement précis.

La position réelle du poteau caténaire est ensuite calculée soit :

- par rapport à deux poteaux, de direction perpendiculaire à la voie.
- par rapport à deux poteaux contigus de direction parallèle à la voie.

Les poteaux caténares sont mesurés une seule fois, de jour ou de nuit.

Afin de contrôler les mesures G.P.S. sur les poteaux caténares, des mesures sur chaque point connu de la polygonale sont faites en cours d'avancement et après l'initialisation de l'appareil.

Dès que la voie et les poteaux caténares sont levés, un dessin sous D.A.O. Autocad est généré afin de vérifier graphiquement les mesures.

### LEVÉ DES REJETS

Pour chaque zone, les rejets sont déterminés en Aller et Retour. L'écart entre les deux déterminations ne doit pas excéder 2 cm.

Afin de contrôler les mesures G.P.S. sur les rejets, des mesures sur chaque point connu de la polygonale sont faites en cours d'avancement et après l'initialisation de l'appareil.

Les rejets étant calculés en 3 dimensions, nous pouvons contrôler la mesure G.P.S. en comparant l'altimétrie G.P.S. avec le nivellement direct des points.

Si les dénivelées altimétriques G.P.S. correspondent aux dénivelées obtenues par nivellement direct, cela signifie qu'il n'y a pas de multi-trajet sur le signal G.P.S. et que les mesures planimétriques sont bonnes.

### AMÉLIORATIONS DU GPS TEMPS RÉEL PAR RAPPORT À L'OPTIQUE

L'utilisation du G.P.S. Temps Réel permet d'améliorer la qualité et la productivité des travaux dans les domaines suivants :

#### Effectifs :

- *mesures en tachéométrie* : 3 personnes (opérateur, porte prisme, rotation de trépieds)
- *mesures G.P.S.* : 2 personnes (de part et d'autre de la L.G.V.)

#### Conditions atmosphériques

- *mesures en tachéométrie* : les mesures optiques nécessitent une bonne visibilité. En été, la température engendre des effluves qui ne permettent pas de travailler toute la journée. De même, des conditions de brouillard sont très pénalisantes.

- *mesures G.P.S.* : le G.P.S. n'est quasiment pas influencé par des conditions atmosphériques particulières.

#### Rapidité

- *mesures en tachéométrie* : la mesure des rejets de part et d'autre de la L.G.V. nécessite deux porte-prismes ou deux interventions.

- *mesures G.P.S.* : avec uniquement deux opérateurs, les rejets sur chaque côté de la voie, sont mesurés en même temps.

*Ce mode opératoire permet également une bonne homogénéité des rejets, ce qui augmente la qualité de la position planimétrique de la voie.*

#### Gain de productivité

Sur les 40 premiers kilomètres effectués et malgré le temps passé à déterminer les différentes zones de mesures, nous avons doublé les distances de mesures

avec le G.P.S. Temps Réel par rapport aux mesures optiques.

Contrairement à la méthode tachéométrique où il est nécessaire de stationner chaque point de la polygonale caténaire tous les 300 mètres pour réaliser deux levés (voies-caténares + rejets), le G.P.S. Temps Réel permet des mesures rapides avec une seule station pour 2 km, dès que les transformations des zones sont faites.

Les avancements obtenus sur la Ligne à Grande Vitesse sont :

- levé de la voie : 4 km par nuit de 3 à 5 h effectives,
- levé des poteaux caténares : 6 km par jour,
- levé des rejets : 4 km par jour.

### APPLICATIONS SUR LIGNES NOUVELLES

L'application sur la L.G.V. nous a permis de mieux maîtriser les possibilités du G.P.S. Temps Réel en fonction de sa précision.

Les travaux topographiques sur une Ligne Nouvelle en construction peuvent être réalisés par G.P.S. Temps Réel dans la gamme de précision évoquée précédemment.

Hormis tous les travaux de contrôles possibles en G.P.S. et très faciles à mettre en œuvre (contrôle de Terrain Naturel, d'entrées en terre,...), nous envisageons son utilisation dans le domaine de l'implantation des points caractéristiques de la voie (points tous les 200 mètres, points particuliers) avec une précision centimétrique.

Le contrôle planimétrique de la pose de voie peut être aussi envisagé, en statique ou en dynamique, à condition d'avoir un très bon canevas de référence.

### CONCLUSION

Le chantier de la régénération de la L.G.V. nous a permis de constater, en condition terrain, que le G.P.S. Temps Réel est parfaitement adapté pour réaliser des mesures avec une précision planimétrique de +/- 1 cm par rapport à un canevas précis.

La précision de l'altimétrie est fonction de la connaissance du géoïde local.

Un utilisateur de G.P.S., quel que soit son mode opératoire, ne peut pas intervenir sur le signal reçu par les récepteurs G.P.S. Boite noire inviolable, le récepteur peut fournir dans de très rares cas une position erronée à plusieurs dizaines de centimètres près. Il est donc nécessaire de prévoir un mode opératoire permettant de s'affranchir de ces mesures erronées qui proviennent généralement d'un multi-trajet du signal au moment de la mesure.

Un doublement des mesures de points avec une initialisation sur des lieux différents, peut mettre en évidence une mesure fautive.

Enfin, pour améliorer la précision du signal G.P.S., il faudrait concevoir un système de mesure à 3 antennes permettant, en temps réel à partir de 2 antennes positionnées sur des points connus, de corriger l'antenne mobile des fluctuations de positionnement constatées sur les antennes fixes.