

analyse qualitative d'une voie ferrée par levé dynamique GPS

Philippe Hallé – SNCF – Division de topographie



Le Profilomètre

Description et principe de fonctionnement

Le profilomètre ferroviaire est un appareil de mesure dynamique qui lève la position de l'axe de la voie en tenant compte de plusieurs informations :

- Observations GPS,
- Données de corrections GPS en provenance d'une station de référence,
- Données inclinométriques : dans les sections courbes, la voie est fréquemment en dévers et le plan de roulement est rarement horizontal,
- Données extensométriques : dans les portions courbes, l'écartement de la voie est plus important qu'en alignement.

Basé sur le principe de la mesure GPS différentielle Temps Réel "RTK-PDGPS", utilisée en mode cinématique, le profilomètre est composé d'une station de référence (mise en station sur un point connu) et d'une composante mobile appelée SURVER.

Le système est constitué principalement d'une antenne GPS, d'une liaison radio, de capteurs (inclinomètre et extensomètre) et d'un ordinateur embarqué.

Données fournies

Le profilomètre permet l'acquisition d'informations par profil environ métrique suivant la cadence d'enregistrement et la vitesse de déplacement.

Chaque levé génère cinq fichiers :

- Un fichier graphique de type binaire contenant un tracé théorique interpolé par une courbe Spline dont la section de base est paramétrable par l'utilisateur.
- Un fichier de données dans lequel sont enregistrées, toutes les secondes, l'ensemble des mesures effectuées par les deux capteurs.
- Trois fichiers résultats de type ASCII dont :
 - Un fichier résultats comprenant notamment les coordonnées planes réduites à l'axe exprimées dans le système N.T.F. ou autres, le dévers, l'écartement ainsi que la position de l'antenne au-dessus d'une file de rail,
 - Un fichier erreurs donnant des informations sur la précision des mesures,
 - Un fichier protocole enregistrant l'ensemble des paramètres actifs durant la mesure ainsi que les différents messages d'information ou d'incidents survenus pendant le levé.

Contexte

Introduction

L'acquisition et le développement du profilomètre sont inscrits à la Division Topographique de la SNCF dans une perspective d'amélioration de la connaissance et de la maintenance des voies ferrées. Ces domaines nécessitent une description simple et complète de la géométrie à destination de Services d'études et des informations sur la qualité de la voie, géoréférencée, pouvant assurer une intervention rapide des brigades d'entretien de la voie.

Pour y parvenir, nous avons été amenés à développer deux applications ferroviaires distinctes :

- La première consiste à adapter les mesures du profilomètre au calcul de flèches pour détecter des défauts éventuels de la voie.
- La seconde application est développée dans le but de décomposer le tracé en une succession d'éléments géométriques (droite, cercle ou clothoïde) à partir du semis de points obtenu. Le traitement des données met en évidence la géométrie réelle de la voie et les déformations de celle-ci en la comparant à la position théorique calculée. Les écarts entre le levé et les éléments géométriques calculés nous permettent d'évaluer la qualité de la géométrie de la voie.

Cette application associée à la connaissance de la géométrie d'origine de la voie nous renseigne des mouvements de celle-ci lors des différentes interventions de maintenance.

Compte tenu de la mesure GPS et des précisions souhaitées (subcentimétrique en plan et millimétrique en nivellement), ces applications sont utilisées à ce jour uniquement en planimétrie.

Calcul de flèches par profilomètre ferroviaire

Méthodes actuelles

Outre des mesures directes réalisées sur le terrain par des agents de brigades, il existe des véhicules d'auscultation de la voie "les voitures MAUZIN". Ces voitures sont capables d'enregistrer les flèches et d'autres mesures, toujours en relatif, en vraie grandeur et en temps réel, sur une base de 33 mètres. Les résultats sont fournis à partir de capteurs qui sont en contact avec la voie. Les voitures peuvent être intégrées dans des trains de voyageurs et circuler à une vitesse de 160 km/h. Les caractéristiques des deux méthodes sont les suivantes :

Mesures directes :

- Équipe de 3 personnes,
- Cordes de 20 mètres avec des profils tous les 10 mètres. La mesure est réalisée à partir d'un fil en acier calibré tendu

aux extrémités et d'une lecture directe sur une règle au milieu de la corde ainsi matérialisée.

- **Avantages :**
 - Mesure précise quand la méthodologie prévue est respectée,
 - Intervention possible à tout moment.
- **Inconvénients :**
 - Pénibilité d'intervention : la mesure est au niveau du rail,
 - Lenteur d'avancement,
 - Faute de lecture ou de transcription, erreur de tension ou de positionnement, possibles.

Mesures Mauzin :

- Cordes de 33 mètres,
- Enregistrement mécanique transcrit sur papier et disponible sous la forme de fichiers texte,
- **Avantages :**
 - Pas de risques d'insécurité pendant l'intervention sur la voie,
 - Rapidité d'avancement,
- **Inconvénients :**
 - Disponibilité des voitures faible : la périodicité des mesures est de 4 à 6 mois sur les lignes classiques. Pour les LGV le suivi est plus fréquent, de 15 jours à 1 mois, et suffisant pour la maintenance des voies.

Le non respect des flèches constantes en courbe se traduit par des problèmes de confort ressentis par les voyageurs.

Méthode nouvelle

Méthode de calcul

Le levé issu du profilomètre ne fournit pas directement les valeurs de flèches mais un semis de points connus en coordonnées (X, Y). Nous avons été amenés à développer un logiciel permettant d'automatiser les calculs.

Les résultats concernant les flèches de dressage (ripage de la voie en plan) montrent une fiabilité comparable à celle de flèches mesurées manuellement ou enregistrées par la voiture Mauzin.

Principales fonctionnalités du programme

- Recaler le tracé en abscisse kilométrique, après le levé. Le PK n'est pas toujours visible sur le terrain, au démarrage du levé.

Des modifications dans le fichier texte des résultats sont possibles à l'aide d'un tableur mais l'intervention manuelle dans les fichiers est toujours à éviter.

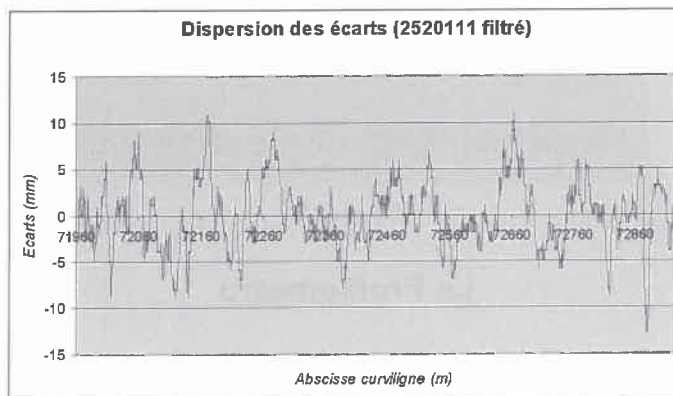
À présent, la seule contrainte à respecter sur le terrain est de faire correspondre le sens des PK croissants avec le sens de parcours du profilomètre.

- Modifier les paramètres : plusieurs calculs sont ainsi possibles à partir du même fichier pour des longueurs de corde et des pas de calcul différents (une fourchette de 1 à 50 mètres est proposée par l'intermédiaire d'une jauge).
- Générer et visualiser des graphiques au sein de l'application représentant, en fonction de l'abscisse curviligne :
 - les flèches de dressage calculées,
 - les flèches verticales calculées avec une précision centimétrique,
 - les valeurs d'écartement mesurées,
 - les valeurs de dévers mesurées.
- Imprimer et visualiser le fichier d'origine, le fichier contenant les flèches et les graphiques.

Précision

Une étude comparative des flèches entre les différentes méthodes de mesure (SURVER, mesure directe et Mauzin) et des tracés théoriques de voies nouvelles nous a permis de quantifier une précision de 3 mm.

Cette précision est atteinte par le fait que le calcul de flèches provient d'une différence de mesures GPS distantes de quelques dizaines de mètres et d'un lissage préalable du semis de points obtenu par la méthode de la moyenne mobile (sur quatre points avec un recoupement de deux points). Le bruit de la mesure est fortement diminué sur une courte distance, ce qui n'aurait pas été le cas sur des longueurs plus grandes comme l'atteste le graphe de dispersion des écarts.



Graphe de dispersion des écarts sur 1 km

Nous avons constaté sur plusieurs levés que le positionnement dépend d'une ondulation avec des pics pouvant atteindre 2 centimètres, sur une période de 150 mètres environ.

Avantages de la méthode

Cette méthode permet d'obtenir une liste de flèches, avec un pas et une longueur de corde paramétrables, accompagnée d'une visualisation graphique. Les variations constatées dans les alignements et les cercles identifient précisément et rapidement les zones où la géométrie n'est pas respectée, pouvant conduire à des problèmes d'entretien de la voie.

Elle est un complément aux mesures actuelles qui ne peuvent pas toujours être mises en œuvre, faute de disponibilité.

Décomposition du tracé ferroviaire en éléments géométriques

Objectifs

À partir du semis de points connus en (X, Y), il s'agit de retrouver la succession d'éléments géométriques constituant le tracé. Pour cela, il est nécessaire de :

- Concevoir des tests de reconnaissance pour identifier l'élément à calculer,
- Filtrer le semis car la densité de points et d'informations enregistrée s'avère importante (1 250 points par kilomètre en moyenne),
- Choisir une méthode d'ajustement permettant de minimiser les écarts.

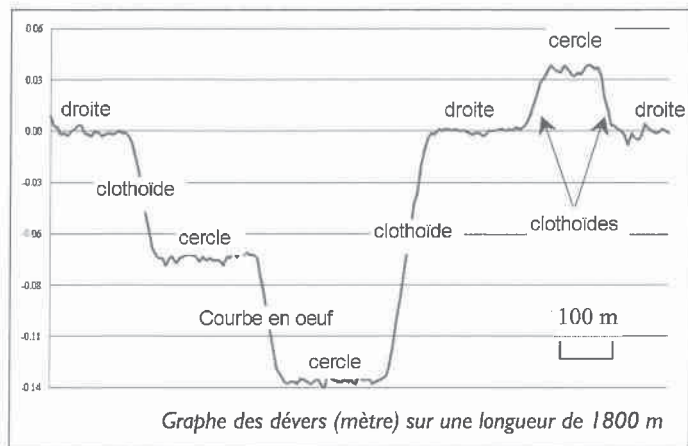
Méthode de reconnaissance des éléments

L'ordre des éléments n'étant pas connu à l'avance, la variation de dévers est le critère de sélection retenu en utilisant des valeurs limites propres à chaque figure. Une fois identifiés, les cercles des moindres carrés et les droites de régression sont calculés. Sont ensuite insérés les raccordements progressifs du type clothoïde, courbe à point d'inflexion et courbe en œuf. (cf. Graphe ci-contre).

Résultats et précision

La décomposition du tracé se présente sous la forme d'un tableau dans lequel nous trouvons toutes les informations relatives à la géométrie planimétrique de la voie, à savoir :

- La nature de l'élément calculé (droite, cercle, élément de raccordement),



- Point kilométrique,
- Coordonnées (X, Y) des extrémités de chaque élément,
- Longueur de chaque élément,
- Pour un cercle: coordonnées du centre et rayon, ainsi que le dévers moyen,
- Pour une clothoïde: le paramètre A.

Trace en Plan: Eléments Géométriques Calculés - Fichier: 0507002C					
Km Origine	Type Elément	Rayon ou Para	Km Extrême	X Origine	Y Origine
	Dévers Moyen	X Centre	X Extrême	Y Origine	Y Extrême
123911.847	ALIGNEMENT		125107.210		
902463.864			901322.554		
148886.204	1195.363		149169.489		
125107.210	CLOTHOÏDE	218.239	125155.502		
901322.554			901275.734		
149169.489	46.292		149181.316		
125155.502	CERCLE	966.265	125711.540		
901275.734	0.131	901532.844	900806.702		
149181.316	556.038	150133.478	149466.069		

Résultat de la décomposition

Dans le cas d'un tracé rectiligne, nous obtenons des écarts types de l'ordre de 5 millimètres par rapport au tracé moyen,

Tableau de Contrôle des Ecartés en Plan - Fichier: 0507002C									
Km Pt Levé	X Pt Levé	Y Pt Levé	Km Pt Rebal	X Pt Rebal	Y Pt Rebal	Ecart (m)	+ Ec < 1 cm	- Ec > 1 cm	
124921.441	901502.042	149125.492	124921.631	901502.646	149125.508	-0.018	>		
124931.442	901483.126	149127.858	124931.631	901483.131	149127.879	-0.024	>>		
124941.441	901483.410	149130.225	124941.631	901483.416	149130.249	-0.025	>>>		
124951.440	901473.694	149132.590	124951.630	901473.701	149132.619	-0.030	>>>>		
124961.442	901463.976	149134.945	124961.630	901463.966	149134.988	-0.042	>>>>>		
124971.443	901454.262	149137.324	124971.631	901454.270	149137.359	-0.036	>>>>>>		
124981.443	901444.545	149139.688	124981.631	901444.555	149139.729	-0.042	>>>>>>>		
124991.443	901434.826	149142.051	124991.631	901434.840	149142.099	-0.049	>>>>>>>>		
125001.445	901425.112	149144.419	125001.632	901425.124	149144.466	-0.051	>>>>>>>>>		
125011.443	901415.394	149146.776	125011.631	901415.409	149146.836	-0.064	>>>>>>>>>>		
125021.445	901405.677	149149.137	125021.631	901405.694	149149.208	-0.073	>>>>>>>>>>>		
125031.445	901395.961	149151.503	125031.631	901395.979	149151.578	-0.077	>>>>>>>>>>>>		
125041.445	901386.244	149153.867	125041.632	901386.264	149153.945	-0.083	>>>>>>>>>>>>>		
125051.446	901376.526	149156.234	125051.632	901376.548	149156.318	-0.086	>>>>>>>>>>>>>>		
125061.447	901366.812	149158.601	125061.632	901366.833	149158.688	-0.089	>>>>>>>>>>>>>>>		
125071.446	901357.096	149160.968	125071.632	901357.119	149161.058	-0.092	>>>>>>>>>>>>>>>>		
125081.446	901347.381	149163.337	125081.632	901347.403	149163.427	-0.093	>>>>>>>>>>>>>>>>>		
125091.445	901337.665	149165.705	125091.632	901337.688	149165.797	-0.085	>>>>>>>>>>>>>>>>>>		
125101.445	901327.953	149168.086	125101.632	901327.973	149168.167	-0.084	>>>>>>>>>>>>>>>>>>>		
125111.447	901318.247	149170.462	125111.632	901318.258	149170.537	-0.047	>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>		
125121.447	901308.549	149172.830	125121.632	901308.546	149172.917	0.013	<		
125131.447	901298.859	149175.198	125131.632	901298.841	149175.326	0.075	<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<		
125141.449	901289.160	149177.513	125141.632	901289.147	149177.785	0.132	<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<		
125151.447	901279.518	149180.490	125151.633	901279.471	149180.314	0.182	<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<		
125161.448	901269.872	149183.129	125161.639	901269.818	149182.933	0.203	<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<		
125171.448	901260.247	149185.841	125171.637	901260.192	149185.650	0.189	<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<		
125181.449	901250.651	149188.655	125181.640	901250.593	149188.464	0.201	<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<		
125191.448	901241.071	149191.523	125191.641	901241.025	149191.374	0.186	<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<		
125201.452	901231.522	149194.493	125201.643	901231.488	149194.382	0.117	<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<		
125211.448	901222.008	149197.571	125211.643	901221.980	149197.486	0.080	<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<		
125221.449	901212.529	149200.756	125221.644	901212.505	149200.566	0.074	<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<		
125231.449	901203.077	149204.021	125231.645	901203.063	149203.582	0.041	<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<		
125241.449	901193.863	149207.394	125241.645	901193.658	149207.374	0.022	<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<		
125251.451	901184.285	149210.865	125251.645	901184.283	149210.851	0.005	<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<		
125261.451	901174.980	149214.527	125261.644	901174.947	149214.442	0.081	<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<		
125271.462	901165.692	149218.234	125271.646	901165.646	149218.119	0.125	<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<		
125281.462	901156.409	149221.951	125281.647	901156.383	149221.885	0.088	<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<		

Visualisation des écarts par rapport au tracé calculé

indiquant une faible dispersion. En courbe, la répétabilité des mesures est excellente: les coordonnées du centre et le rayon sont déterminés avec une précision inférieure à 3 centimètres.

Intérêts de la décomposition

Avant la réalisation de cette application de décomposition en éléments géométriques, les bureaux d'études intervenaient sur le tracé à partir d'un levé de l'axe de la voie par profil au mieux de 10 mètres, réalisé par méthodes conventionnelles (levés tachéométriques ou par GPS Temps réel). Le travail consiste à intégrer précisément des éléments théoriques dans le semis de points, sans analyse particulière.

La faible densité de points n'est ainsi pas suffisante pour restituer une géométrie rigoureuse reflétant la qualité actuelle de la voie.

La décomposition du tracé ferroviaire permet en premier lieu d'améliorer la connaissance de la géométrie réelle de la voie. Pour obtenir une détermination fiable, il est indispensable de lever des éléments géométriques sur au moins 100 mètres à chaque extrémité du levé.

Les piquets de courbe représentant les points particuliers de début et fin de raccordement planimétrique (ORP et FRP) sont généralement implantés le long des voies. Dans le cas où ils sont endommagés ou ont disparu, il est difficile de les rétablir sans l'intervention d'un géomètre. Notre application permet de localiser ces points avec une précision inférieure à 10 mètres. Cette précision est suffisante pour permettre aux engins d'entretien de la voie de réaliser correctement les travaux de maintenance.

Il est en outre possible de comparer le tracé théorique de la pose et le tracé actuel recalculé, afin d'identifier tous les mouvements dans le temps.

Le calcul des écarts entre les points levés et le tracé calculé permet enfin d'évaluer la qualité de la géométrie de la voie. Le tableau ci-dessous indique, en fonction du Point Kilométrique, les coordonnées des points levés et de ces mêmes points rabattus sur le tracé calculé. Les écarts sont inscrits numériquement et représentés sous forme de flèches pour faciliter la visualisation.

Les points levés se trouvent à **droite** du tracé calculé

Les points levés se trouvent à **gauche** du tracé calculé

Calcul de gauche

Outre les deux applications développées, le profilomètre ferroviaire permet de calculer des valeurs de gauche qui est un critère de qualité de la géométrie de la voie: il s'agit d'une variation de dévers exprimée en mm/m. et mesurée sur une base donnée.

Si les valeurs calculées dépassent des seuils quantifiés, des interventions de maintenance ou des ralentissements de vitesse sont mis en place immédiatement.

Ces seuils se traduisent principalement par des risques de sécurité sur la circulation des trains.

Le gauche identifie un défaut court sur une file de rail.

Des essais comparatifs avec la voiture Mauzin et un engin anglais de relevé relatif de la voie ont donné des résultats comparables et satisfaisants.

Conclusion

La mesure différentielle GPS en temps réel permet de générer des semis de points denses, précis et immédiatement exploitables sur plusieurs kilomètres.

Au-delà de la position de la voie en absolu, le profilomètre ferroviaire et ses applications sont des outils d'aide à la décision. Ils facilitent grandement la connaissance de la voie, tant en amont dans la préparation d'opérations d'entretien de la voie, qu'en aval dans la vérification de travaux réalisés.

De plus la diversité des informations nous fait envisager des gains de temps importants dans l'analyse de la qualité de la voie et dans le respect de la géométrie sans faire appel à des compétences diverses.

Le bruit de la mesure plus important sur la composante altimétrique freine actuellement nos développements et nous oblige à des interventions fréquentes en nivellement direct.

Olivier Reis

Ingénieur géomètre-topographe ENSAI Strasbourg

Diplômé de l'Institut de traducteurs et d'interprètes (ITI) de Strasbourg

9, rue des Champs F-57200 SARREGUEMINES

Téléphone : 03 87 98 57 04 Télécopie : 03 87 98 57 04 E-mail : o.reis@infonie.fr

**Pour toutes vos traductions d'allemand et d'anglais en français en
topographie - géodésie - photogrammétrie - SIG - cartographie - GPS**

Reinhart Stölzel

Ingénieur géomètre-topographe

Interprète diplômé de la Chambre de commerce et d'industrie de Berlin

9, rue de l'Europe - F-67560 ROSHEIM

Téléphone : 00 33 3 88 49 24 14 E-mail : Stoelzel@t-online.de

**Pour toutes vos traductions de français et d'anglais en allemand en
topographie - géodésie - chemin de fer - routes**

Paul Newby

Membre de la Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS)

Diplômé des universités de Cambridge (géographie) et de Londres (photogrammétrie)

9 Merrytree Close, West Wellow, Romsey, Hants SO51 6RB GB

Téléphone : 00 44 1794 322 993 Télécopie : 00 44 1794 324 354 E-mail : xav40@dial.pipex.com

**Pour toutes vos traductions de français en anglais en
topographie - géodésie - GPS - SIG - cartographie - photogrammétrie - télédétection**

Des topographes traducteurs à votre service