



Bilan d'un levé de ligne à grande vitesse par profilomètre ferroviaire Adaptation au TGV Méditerranée

*Stéphanie Beets - Ingénieur ENSAIS
Division de Topographie SNCF Paris*

La Division de Topographie de la SNCF utilise le Profilomètre Ferroviaire Geo++® SURVER depuis 1999, dans le cadre du développement d'applications de levé dynamique de voie, dans le but de répondre à des contraintes très spécifiques de l'activité ferroviaire, notamment en ce qui concerne la surveillance et la maintenance des voies ferrées, qu'elles soient classiques ou à Grande Vitesse.

Nous avons abordé dans notre dernier article l'analyse qualitative d'une voie ferrée, au travers de l'utilisation de nouvelles applications dans le traitement des données acquises (voir XYZ n°85 pages 35 à 38), à savoir le calcul automatique de flèches et la décomposition du tracé en éléments géométriques, développées en réponse aux besoins exprimés par les Etablissements avec lesquels nous travaillons et dans un souci d'innovation.

Nous nous proposons à présent de dresser le bilan de l'ensemble des opérations qu'il est possible de mettre en œuvre avec le profilomètre, et ce dans le cadre d'un levé particulier : celui d'une Ligne à Grande Vitesse (LGV).

Dans cette optique, après un bref rappel sur le fonctionnement du système et une présentation de la LGV Méditerranée, nous précisons les objectifs de l'étude, puis la mise en place des outils de traitement nécessaires. Les parties suivantes concernent les interventions de terrain et le traitement qui en découle, ainsi qu'une synthèse des résultats obtenus.

Contexte des travaux réalisés

Rappels sur le fonctionnement du système

Il s'agit d'un système de mesure dynamique, constitué d'une station de référence et d'une composante mobile, chacune équipée d'un capteur GPS bifréquence.

La composante mobile, Geo++® SURVER (figure 1), sert de support au MicroPort, l'ordinateur embarqué équipé du logiciel de traitement Geo++-GN_BAHN/PM, dans lequel s'effectuent tous les calculs nécessaires au positionnement et à la détermination de la géométrie de la voie.

Il s'agit d'un logiciel de positionnement différentiel Temps Réel, utilisé en mode cinématique. Les données



Fig. 1 : Geo++® SURVER

sont traitées par combinaison de phase et pseudo-distance, le mode de calcul utilisé se rapprochant de la trajectographie. Le profilomètre ferroviaire calcule, à la cadence d'une seconde, les coordonnées de l'axe de la voie au niveau du plan de roulement, avec une précision de ± 8 mm.

L'antenne étant placée au-dessus du bord supérieur de l'une des files de rail, les mesures d'écartement et de dévers sont nécessaires pour réduire les coordonnées à l'axe, exprimées dans le système N.T.F. (Nouvelle Triangulation de la France). Des cap-

teurs, calibrés lors de chaque intervention, sont ainsi utilisés (un inclinomètre et un extensomètre). Nous obtenons alors un semis de points très dense (tous les 80 cm environ).

A propos du TGV Méditerranée...

Commençons par présenter brièvement la LGV Méditerranée. Sa construction est une entreprise dont le lancement des premières études à la demande du gouvernement date de janvier 1989. En mai 1999 sont

posés les premiers mètres de rail, en octobre 2000 ont débuté les circulations des premières rames d'essais. La maîtrise d'ouvrage relève du Réseau Ferré de France, la maîtrise d'œuvre étant confiée à la Direction de la Ligne Nouvelle TGV Méditerranée de la SNCF. La mise en service commercial de la ligne date du 10 juin 2001.

La LGV représente 250 km de ligne à double voie, entre Valence et Nîmes ou Marseille. Notre intervention couvre la zone présentée sur la figure 2, soit 100 km de ligne. Trois lignes composent la LGV :

- **Ligne 752** (Valence-Marseille) entre Mongragon et Cavaillon jusqu'à la base travaux de Cheval Blanc sur 70 km,
- **Ligne 834** (Valence-Nîmes), la branche partant des angles en direction de Nîmes sur 25 km,
- **Ligne 836**, la branche Grand Sud, permettant la liaison entre Nîmes et Marseille sur 5 km.

Sur ce tracé, le Triangle des Angles au niveau d'Avignon est impressionnant de complexité, puisqu'il représente le point de concours et de croisement des lignes. Les croisements appelés sauts de mouton en sont l'illustration.

Le profilomètre dans le cadre du projet

Objectifs

Notre intervention survient lors de la finalisation de la LGV, c'est-à-dire suite aux travaux de superstructure. A ce stade, notre tâche consiste à vérifier que la voie implantée par les entreprises de Génie Civil, est bien posée par rapport à la position théorique du tracé d'implantation : en effet, les voies (V1 et V2) sont implantées à 2.40 mètres de l'axe de la plate-forme.

Outre cet aspect récolement, une partie des mesures réalisées s'inscrit dans le cadre du repérage planimétrique et altimétrique de la voie. Pour cela sont réalisées des mesures de nivellement et de gabarit (on entend par gabarit la distance horizontale entre le bord extérieur du rail et diverses installations ferroviaires tels



Fig. 2 : Le tracé du TGV Méditerranée

que les poteaux caténaires), qui seront en effet exploitées ultérieurement en vue de la maintenance de la ligne.

Pour répondre à ce double objectif de récolement et de repérage géométrique, une méthodologie particulière de levé et de traitement, adaptée à la LGV et plus particulièrement au TGV Méditerranée a dû être mise en place.

Les mesures réalisées concernent les points situés au droit des poteaux caténaires (présents en moyenne tous les 40 mètres), des bornes jaunes d'ORP-FRP (Origine et Fin de Raccordement Parabolique, en plan), des bornes vertes d'ORC-FRC (Origine et Fin de Raccordement

Circulaire, en profil en long), matérialisant les raccordements du tracé, ainsi que les bornes blanches de PRA (Pointe Réelle d'Appareil). La figure ci-contre rappelle ces éléments.

Mise en place des outils de traitement

Il s'agit là d'une intervention que nous n'avons pas l'habitude de traiter : méthode de levé et outils de traitement n'existent pas. Il s'agit donc dans un premier temps de mettre en place et d'adapter le matériel en fonction des éléments à fournir, et mettre en œuvre une chaîne de traitement adéquate.

1. La base théorique
Afin de contrôler la position de la voie,



les éléments théoriques d'implantation de la ligne sont indispensables car ils serviront de référence. Ceux-ci ont été répertoriés dans une "base" dans laquelle est ensuite intégré l'ensemble des mesures, pour en déduire les écarts existants et les informations de maintenance.

Cette base, programmée en Visual Basic, comprend ainsi par défaut les informations théoriques suivantes pour chaque profil :

- position kilométrique (PK),
- type et numéro du point levé (CAT : caténaire, ORP, FRP, ORC et FRC),
- distance théorique par rapport à l'axe de la plate-forme,
- coordonnées (X,Y) de l'axe de la plate-forme,
- coordonnées (X,Y) de l'axe de la voie traitée (V1 ou V2),
- altitude des files de rail de la voie concernée (rail intérieur et extérieur),
- épaisseur du champignon.

Elle est destinée à recevoir les informations issues des différents levés, dans des champs prévus à cet effet :

- PK voie,
- (X,Y) de l'axe de la voie,
- Dévers et écartement,
- Altitude des 2 files de rail,
- Altitude du repère sur le poteau caténaire,
- Distance inclinée mesurée par le distancemètre (cf paragraphe suivant).

Lorsque la base est complète, les derniers champs de résultat sont complétés par calcul. Le traitement est complexe car toutes les données dépendent les unes des autres. Ainsi, nous retrouvons :

- Le PK réel des points levés,
- La distance rabattue à l'axe de la plate-forme, à partir des coordonnées de l'axe de la voie,
- La dénivellée entre le rail extérieur et le repère caténaire,
- La distance horizontale (ou gabarit) Rail-Caténaire ou Rail-Borne.

2. L'adaptation du profilomètre au levé de gabarit

Le but de cette adaptation matériel est d'obtenir la distance horizontale d'une installation ferroviaire (caténaire ou borne) au bord extérieur du rail. Dans cette optique, notre équipe a adapté un distancemètre laser, couplé à un terminal d'enregistrement du type Husky, sur

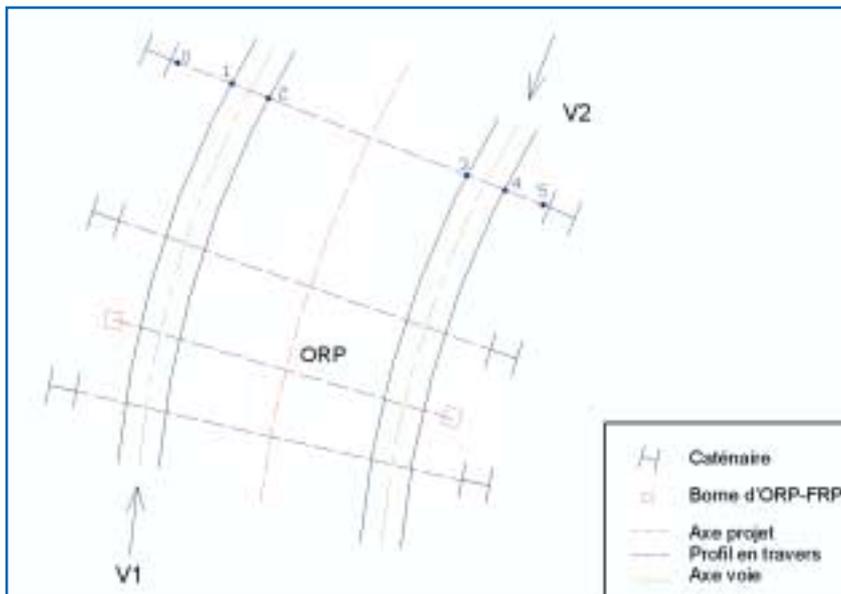


Fig. 3 : Représentation des éléments constitutifs d'une voie ferrée



Fig. 4 : Adaptation du distancemètre

le mat du profilomètre (photo ci-contre).

Le distancemètre est orienté vers l'extérieur et fixé directement sur le mat. Le rabattement à l'horizontal impose le choix de constantes, et donc une position fixe du système par rapport au mat, ce qui implique que lors du levé, ce dernier soit placé au-dessus de la file de rail extérieure.

En outre, le distancemètre doit être placé suffisamment haut pour s'affranchir de toute contrainte dans le

cas d'un dévers maximal (180 mm sur LGV) pour un écartement moyen de 1.435 m.

Ainsi, le rabattement à l'horizontal tient compte du dévers de la voie, de l'écartement, de la largeur du champignon (dans notre cas, il s'agit de LRS UIC60 de 72 mm de largeur), de la hauteur du distancemètre par rapport au plan de roulement (constante de fixation sur le mat) et enfin de la dénomination de la voie levée (voie 1 ou voie 2).

Les interventions terrain

Une quarantaine d'interventions ont été nécessaires sur environ 200 kilomètres de voie, entre février et avril 2001.

Sur chaque voie, les mesures sont réalisées par zone de 2 à 3 kilomètres de long (correspondant à la portée des radios utilisées). La référence est placée au centre de la zone. Le SURVER est poussé sur la voie à une vitesse de 2 à 3 km/h. Compte tenu de l'arrêt du système au droit de chaque point, le rendement s'élève à 1 kilomètre de levé de voie par heure.

Les mesures sont rattachées au canevas existant, exprimé en coordonnées Lambert III. Cette polygonale "plate-forme" est constituée de points distants de 300 mètres environ, matérialisés par des rivets implantés sur la piste.

Chaque intervention forme en fait

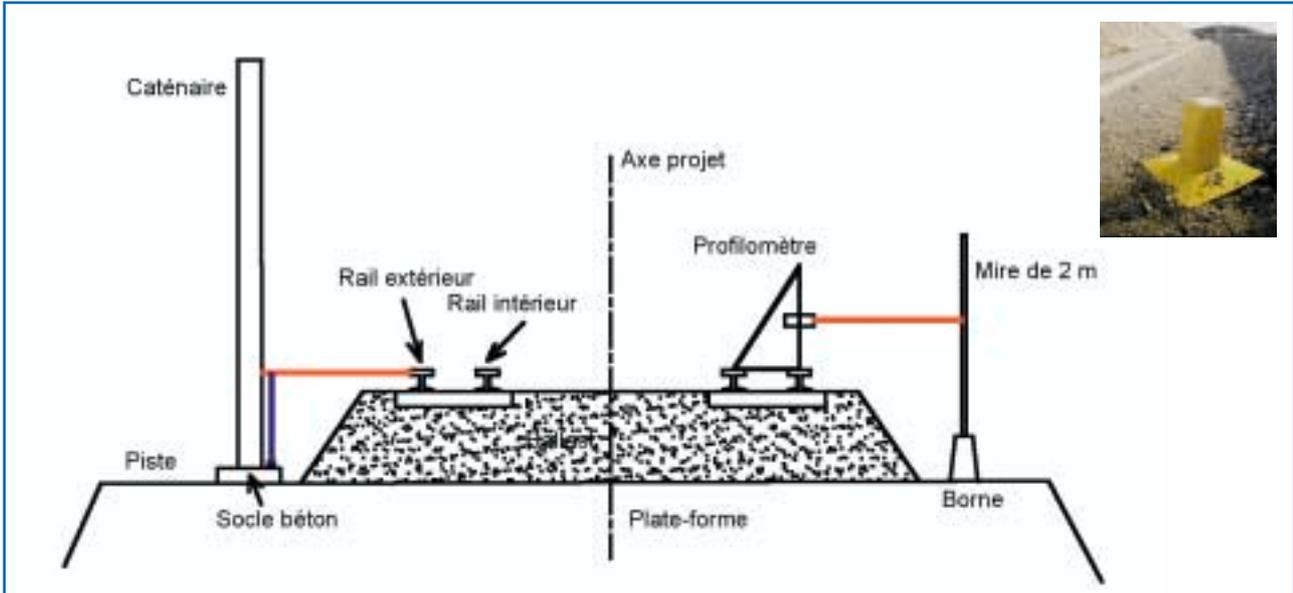


Fig. 5 : Eléments constitutifs de la voie et levé de gabarit et de dénivellation

une boucle : le levé démarre en face la station de référence, par exemple sur V1 et progresse sur 1.5 km environ dans le sens des PK croissants. Le profilomètre est alors placé en voie 2 et le levé repart sur 3 km dans le sens des PK décroissants. Enfin, de retour sur V1, la boucle se termine sur le point de départ (ce point nous donne une fermeture).

Dans la mesure du possible, nous intervenons en continu, sans laisser de secteurs à traiter ultérieurement. Cependant, la prévision de notre planning d'avancement dépendait entièrement des lieux et dates du programme général des essais de montée en vitesse. Un plan de ligne, sur lequel sont reportées les zones levées, permet de visualiser l'avancement des travaux.

En moyenne, six kilomètres de voie furent levés par journée d'intervention (3 km ligne), et ceci dépendant :

- des conditions météo (pluie ou fort mistral),



Fig. 6 : Méthodologie de levé d'une borne

Sur chaque voie, les mesures sont réalisées par zone de 2 à 3 kilomètres de long (correspondant à la portée des radios utilisées). La référence est placée au centre de la zone. Le SURVER est poussé sur la voie à une vitesse de 2 à 3 km/h. Compte tenu de l'arrêt du système au droit de chaque point, le rendement s'élève à 1 kilomètre de levé de voie par heure. Les mesures sont rattachées au canevas existant, exprimé en coordonnées Lambert III. Cette polygonale "plate-forme" est constituée de points distants de 300 mètres environ, matérialisés par des rivets implantés sur la piste.



- de la position, la densité et la facilité d'accès : les emprises TGV sont closes et des "accès-voiture" sont prévus le long du tracé, répartis au mieux tous les 1.5 km,
- des problèmes liés aux mesures de sécurité et de protection des agents,
- des avaries matériels (mauvaise réception due à la proximité de relais sous-station),
- de l'état d'avancement de la pose des bornes.

Différents types de mesure sont réalisés :

- Position planimétrique de l'axe de la voie.
- Le nivellement direct de la voie avec un niveau NA2000, par profils en travers de 6 points (2 points matérialisés par des repères sur le socle des caténaires et 4 files de rail), rattaché au système NGF. Compte tenu du bruit de la mesure GPS plus important sur la composante altimétrique, des interventions en nivellement direct sont nécessaires pour atteindre une précision millimétrique.
- La mesure du gabarit (précision de 3 à 4 mm) : sur les caténaires, la distance est directement prise à l'axe de la face intérieure du poteau. Quant aux bornes, celles-ci sont implantées au niveau de la piste. Une mire, recouverte d'un ruban noir dans le but de rendre visible le point lumineux, est alors placée dessus. Des mesures ponctuelles directes à la chaîne ont permis de contrôler la fiabilité du système.

La majeure partie des travaux fut réalisée de jour, et fut achevée de nuit

Type de fichier	Nom adopté
Profilomètre (*.GK1)	01602V1 : 3 chiffres (PK du pivot) + 2 chiffres (2 ^e fichier ouvert) + V1 (identification de la voie)
Nivellement (*.NIV)	59159301 : 3 chiffres (PK début) + 3 chiffres (PK fin) + 2 chiffres (1 ^{er} fichier ouvert)
Disto (*.GAB)	07020102 : 3 chiffres (date : 7 février 2001) + 2 chiffres (ici, 2 ^e fichier ouvert)

tableau 1

(notamment pour les opérations de nivellement), du fait de la densification des essais TGV à partir du 3 mai.

Un complément tachéométrique fut nécessaire dans les tunnels de Bonpas, Saint Génies et sous la tranchée couverte au niveau de la sortie de la gare d'Avignon.

Résultats

Traitement

Suite à ces opérations sur le terrain, la chaîne de traitement intervient. Elle suppose tout d'abord une organisation rigoureuse, surtout lors de la sauvegarde des données. Nous avons pour cela opté pour une arborescence bien précise, permettant une hiérarchisation exploitable des données, à savoir un répertoire par ligne, pour chaque ligne des répertoires par lot, et pour chaque lot :

- un répertoire contenant les fichiers de nivellement (commun aux deux voies),
- un répertoire V1 et un répertoire V2 dans lesquels on trouve les fichiers issus du disto et du profilomètre ainsi que la base correspondante.

Les noms de fichiers sont conçus de telle sorte qu'ils soient facilement identifiables (voir le tableau 1).

Les fichiers sont transférés et sauvegardés par journée de travail. Puis les fichiers sont importés dans la base, qui centralise l'ensemble des données et gère la mise en correspondance des points théoriques et levés, par le biais du PK (pour le profilomètre et les fichiers de nivellement) et du numéro de caténaire (pour les gabarits).

Le calcul des cellules de résultats est rendu possible à partir du moment où la base est complète.

Résultats finaux

A partir de la base de données sont édités deux types de tableau de résultats, concernant respectivement le récolement et le repérage géométrique de la voie.

Les résultats sont alors fournis sous forme de 3 fichiers Excel, un fichier par ligne, chaque fichier contenant 4 feuilles :

- Deux feuilles concernant le récolement (en V1 et V2),
- Deux feuilles concernant le repérage de la voie pour la maintenance (en V1 et V2).

Sur la totalité du chantier, 5270 profils-voie ont été traités.

1. Le récolement

Ce tableau permet d'évaluer la position de la voie dans les 3 dimensions, à travers les écarts :

- De la distance rabattue à l'axe par rapport à la théorie,
- De nivellement des deux files de rail.

2. Le repérage géométrique

Ce tableau indique le PK rabattu réel, le gabarit mesuré, l'altitude du repère situé sur l'ancrage du caténaire et de la file de rail extérieur (dont on

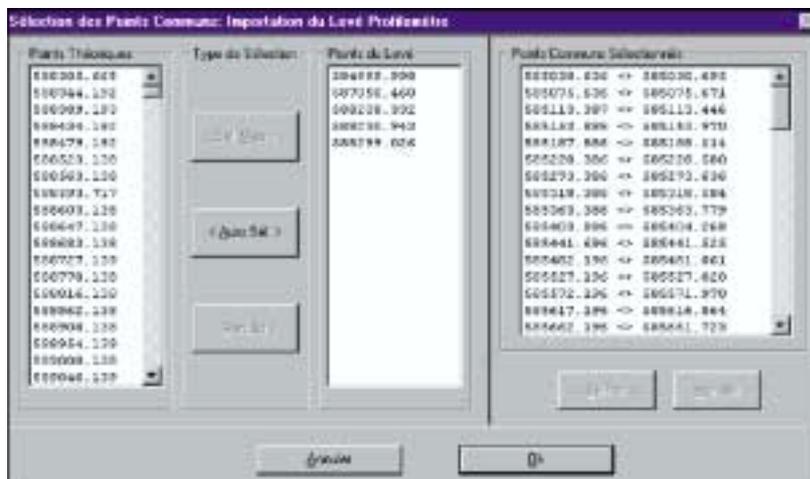


Tableau2 : Mise en correspondance points levés-points théoriques (ici pour le profilomètre)

VALEURS THEORIQUES							VALEURS LEVEES CALCULEES			ECARTS (mètres)		
Km	Type	Dis/AxeP	X Axe Voie	Y Axe Voie	Z Int.	Z Ext.	Dis/AxeP	Z Int.	Z Ext.	Dist.	Z Int.	Z Ext.
585871.386	CAT	-2.400	788088.709	218278.506	46.318	46.175	-2.397	46.295	46.151	0.003	-0.023	-0.024
585911.820	CAT	-2.400	788092.488	218238.261	46.298	46.155	-2.399	46.273	46.129	0.001	-0.025	-0.026
585952.321	CAT	-2.400	788096.486	218197.971	46.278	46.135	-2.396	46.260	46.116	0.004	-0.018	-0.019
585992.820	CAT	-2.400	788100.695	218157.703	46.258	46.115	-2.399	46.241	46.096	0.001	-0.017	-0.019
586033.321	CAT	-2.400	788105.116	218117.457	46.237	46.094	-2.402	46.219	46.076	-0.002	-0.018	-0.018
586073.821	CAT	-2.400	788109.749	218077.236	46.217	46.074	-2.398	46.193	46.051	0.002	-0.024	-0.023

tableau 2 : Tableau de résultats (récolement) – Lot 21 – Voie 1 – Ligne 752



déduit la dénivelée) et enfin l'écart kilométrique entre la position théorique et le PK réel.

Conclusions et perspectives

Plusieurs campagnes de mesure ont d'ores et déjà été réalisées avec le profilomètre, dans plusieurs régions en France, et notamment dans le cadre d'études relatives à la réouverture de ligne au service voyageur, au récolement de voie, à la modification de tracé, au raccordement du TGV Est sur ligne existante, et le dernier chantier en date concerne le TGV Méditerranée, objet de notre article.

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 la connaissance de la voie, en amont dans la préparation d'opérations d'entretien de la voie (comme les renouvellements de voies et ballast), ainsi qu'en aval dans la vérification de travaux réalisés, ce qui nous concerne ici.

Les informations de repérage géo-

VALEURS THEORIQUES			VALEURS LEVEES / CALCULEES					
Km	Type	N°	Km Rabat.	Dist. Hz.	Z Repère	Z Rail Ext	Delta Z	Delta Km
585030.636	CAT	585 030 01 0	585030.708	2.300	46.116	46.594	0.478	-0.072
585075.636	CAT	585 075 03 0	585075.697	2.292	46.035	46.570	0.535	-0.061
585113.387	CAT	585 113 05 0	585113.475	1.972	46.033	46.542	0.509	-0.088
585153.886	CAT	585 153 07 0	585154.012	2.176	46.308	46.514	0.206	-0.126
585187.886	CAT	585 187 09 0	585188.165	2.105	46.257	46.494	0.237	-0.279
585228.386	CAT	585 228 11 0	585228.646	2.317	45.961	46.474	0.513	-0.260
585273.386	CAT	585 273 13 0	585273.715	2.307	45.929	46.456	0.527	-0.329
585318.386	CAT	585 318 15 0	585318.677	2.304	45.928	46.434	0.506	-0.291
585363.386	CAT	585 363 17 0	585363.884	2.306	45.891	46.411	0.520	-0.498
585403.886	CAT	585 403 19 0	585404.387	2.286	45.887	46.391	0.504	-0.501

tableau 3 : Tableau de résultats (repérage géométrique)

métrique permettront aux agents de maintenance de contrôler la position de la voie par rapport aux poteaux caténaires, par chaînage du gabarit et mesure de la dénivelée entre le repère et le rail.

Certes, le personnel doit être formé à son principe mais l'utilisation conjointe du profilomètre et du distancemètre améliore le rendement pour plusieurs raisons :

- Rapidité de la prestation, compte tenu de la densité d'informations recueillies par ce système intégré, en une seule passe :
 - position planimétrique de la voie, dévers, écartement,
 - gabarit des installations ferroviaires.

→ ce qui se traduit par une réduction du nombre d'interventions sur le terrain et ainsi un gain en terme de productivité.

- Rentabilité accrue des opérations :
 - sur le terrain : l'agent s'affranchit d'un certain nombre de mesures directes et de leur transcription sur un carnet de terrain, qui sont source

de faute,

- au niveau du traitement, la gestion des différentes données est automatique : le calcul des gabarits à l'horizontale tient compte du dévers et de l'écartement enregistrés par le profilomètre.

- Système évolutif : possibilité d'améliorer à nouveau le produit pour l'adapter à de nouveaux travaux.

Ainsi, le profilomètre ferroviaire a permis de réaliser un levé linéaire de près de 200 km de voie, sur une quarantaine d'interventions, tout en s'adaptant aux contraintes éventuelles que l'on peut rencontrer sur le parcours et à la configuration du terrain (masques, etc ...).

Si le profilomètre est opérationnel dans son fonctionnement, l'adaptation matérielle et logicielle est en constante évolution. Ce chantier fut ainsi l'occasion d'évaluer à grande échelle les capacités du système et de montrer qu'il est possible de combiner plusieurs types de mesure sur un même appareil. C'est éga-