

L'IMPLANTATION DE LA VOIE AVEC ± 1 MM DE PRÉCISION DANS LE TUNNEL CFF DU GRAUHOLOK. UN RECORD ?

H.-R. Riesen, H.-R Herren, CFF

RÉSUMÉ

Le tunnel du Grauholz servira, dès 1995, à décharger le trafic ferroviaire de l'est de la gare de Berne, un nœud important dans le réseau des Chemins de Fer Fédéraux Suisses (CFF).

La pose de la voie avec une précision au millimètre visait plusieurs buts techniques, notamment celui d'acquérir de l'expérience dans la perspective de la réalisation des grands projets de traversées alpines. Tous les objectifs fixés ont été atteints.

ZUSAMMENFASSUNG

Der Grauholztunnel wird ab 1995 der Entlastung des Bahnverkehrs im Osten der Stadt Bern, ein wichtiger Knoten im Netz der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB), dienen.

Mit dem Ziel einer Gleisverlegung mit mm-Präzision verfolgten die SBB verschiedene technische Ziele, unter anderem die Erfahrungssammlung in Hinsicht auf die Realisierung der grossen Bahn-Alpentransversalen. Die gesetzten Ziele wurden alle erreicht.

SUMMARY

The Grauholztunnel, operational in 1995, will contribute to absorb the rail traffic in the eastern part of Bern, an important node of the Swiss Rail Network (SBB).

With a ± 1 mm track set out, SBB had different technical aims, in particular, to gather experience for the on-coming big Alp-Crossing Rail projects. All the aim were reached.



1. INTRODUCTION

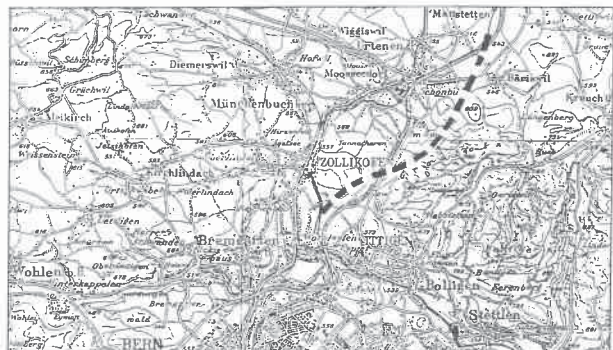
Le tunnel du Grauholz, actuellement en voie d'achèvement, est un tronçon de nouvelle ligne du réseau des Chemins de Fer Suisses (CFF). Dès 1995 il permettra d'augmenter la capacité ferroviaire à l'entrée Est de Berne, un important nœud ferroviaire des CFF.

Ce nouveau tronçon en tunnel, dont la superstructure des voies n'est pas ballastée, mais bétonnée est réalisé en préalable aux grands projets de nouvelles transversales alpines. Il revêt plusieurs intérêts techniques :

- Servir à gagner de l'expérience en prévision de la réalisation des futurs projets de traversées ferroviaires alpines.
- Permettre de mieux connaître le comportement dynamique des véhicules circulant sur une superstructure non ballastée.
- Minimiser les travaux d'entretien par une pose de voie géométriquement parfaite.

La précision imposée pour la pose des voies était extrême. Positionner les rails à ± 1 mm signifie travailler à la limite de la précision exigée pour certaines composantes de la voie comme par exemple l'espacement des attaches de rail sur les traverses en béton.

Le but de cette contribution est de décrire comment un travail géométrique très précis et fiable, associé à l'utilisation de CORAIL (pour "CONtrôle RAIL"), un nouveau logiciel performant pour le contrôle de l'implantation de précision des voies, a permis d'atteindre l'objectif fixé.



Extrait de la carte 1:100.000 du projet Grauholz. Reproduit avec l'autorisation de l'office fédéral de topographie du 07.10.1994.

2. LE MANDAT DE MESURE ; TRAVAUX EFFECTUÉS

Le tunnel du Grauholz est conçu pour une vitesse de 200 km/h. Les écarts entre la position définitive de la voie bétonnée et le tracé théorique doivent être inférieurs à :

- ± 3 mm pour le tracé en plan et le profil en long;
- ± 2 mm pour le dévers;
- 0.5 ‰ pour le gauche.

Pour garantir ces exigences, les géomètres CFF ont imposé au mandataire de travailler avec une précision de ± 1 mm. Les travaux de mesure suivants ont été effectués :

- Levé de la voie et montage de précision à son emplacement théorique (travail de jour).
- Contrôle du positionnement et éventuel ajustage, en respectant rigoureusement la tolérance exigée (durant la nuit).
- Réception de la voie bétonnée comme justificatif de la précision exigée (la nuit).

Ces travaux s'appuient sur les coordonnées des repères de voie, calculées préalablement dans un réseau de points fixes.

Tous les calculs d'implantation et de contrôle ont été effectués directement sur le terrain à l'aide du programme CORAIL développé par les Chemins de Fer Fédéraux.

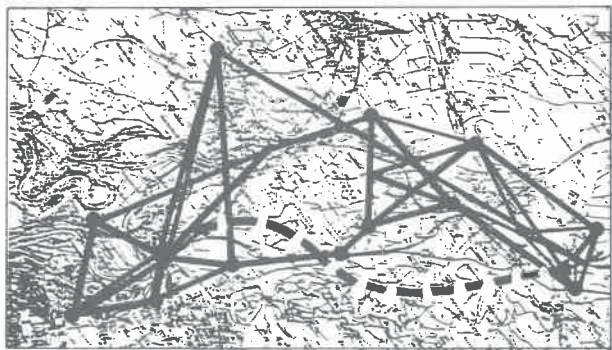
3. LES BASES DE LA MESURE TOPOMÉTRIQUE

Généralités

Pour réaliser le tracé projeté du nouveau tunnel, il a d'abord fallu déterminer un réseau de base en surface qui a servi d'appui au réseau d'avancement souterrain.

Réseau de base

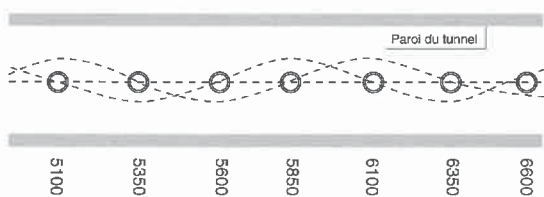
Le réseau de surface du tunnel CFF du Grauholz a été déterminé en 1986 sans utiliser alors les nouvelles techniques de positionnement par GPS. Pour des raisons de topographie et de couverture du sol, ce réseau revêtait un caractère mixte sous forme de réseau et de cheminement polygonal.



Réseau d'avancement

Par une conception de visées chevauchantes, le réseau souterrain d'avancement a été conçu selon des critères d'optimisation économique tout en garantissant une excellente fiabilité sur le plan des mesures.

Schéma du réseau d'avancement avec des mesures chevauchantes



Exemple : Mesures de la station km 5600 : Visées vers
5100
5350
5850
6100

Après le percement, les mesures du réseau d'avancement ont été compensées rigoureusement. Les coordonnées des points fixes ont ainsi pu être déterminées avec une précision relative très élevée de :

$$\begin{aligned} m_x &\leq 1 \text{ mm} \\ m_y &\leq 1 \text{ mm} \\ m_h &\leq 1 \text{ mm} \end{aligned}$$

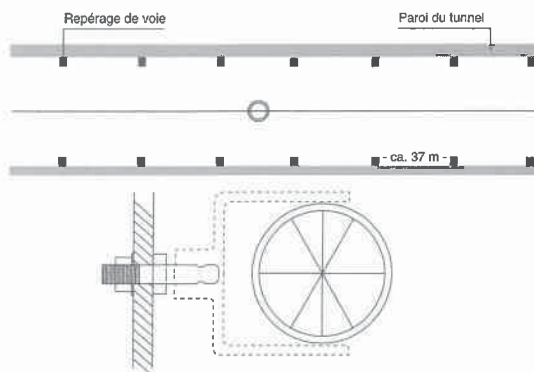
Repérage de la voie

Les points du repérage de voie déterminés par rapport aux points fixes du réseau d'avancement servent de réfé-

rences fixes pour piqueter les tracés ferroviaires ou déterminer en tout temps et à chaque endroit la position de la voie.

Les goudons bétonnés tous les 37m. de part et d'autre dans les pieds-droits du tunnel, permettaient de poser directement le prisme réflecteur.

Schéma du repérage de voie par stationnement libre :



4. EXIGENCES DE PRÉCISION

La précision imposée pour la pose de la voie est spécifiée par l'erreur moyenne a priori, admise comme tolérance pour le réglage de la voie. Nous différencions ci-dessous deux notions de précision :

a) La précision absolue

Elle est définie par rapport aux points fixes (l'erreur moyenne des coordonnées). La tolérance imposée est de $\pm 1,5 \text{ mm}$ en situation et en altimétrie.

b) La précision de pose relative

Cette valeur quantifie la précision de la voie par rapport aux points de contrôles avoisinants.

La voie a été réglée à l'aide de barres de montage disposées tous les 1.8 mètres le long de la voie. Il a ainsi été possible d'assurer une précision de pose inférieure à $\pm 1 \text{ mm}$ en plan et en altimétrie et de garantir le dévers et le gauche dans le même ordre de précision.

Les outils de mesure utilisés permettent de contrôler directement la précision absolue. La précision relative ne peut que partiellement être contrôlée directement.

| | |
|--|---|
| Contrôle planimétrique et altimétrique de l'axe de la voie | -> Valeurs correctives fournies par CORAIL |
| Dévers - | -> Lecture sur le dispositif de mesure de la règle SOLA |
| Gauche | -> Contrôle numérique indirect |

5. MODELE STOCHASTIQUE

La précision de positionnement dépend de plusieurs facteurs. Ceux mentionnés ci-après ont un caractère prépondérant :

a) La précision des repères de voie

L'erreur moyenne sur les coordonnées compensées, issue du calcul de réseau est de $\pm 1,0 \text{ millimètre}$ pour les coordonnées en plan (σ_L) et en altimétrie (σ_H).

b) La qualité des mesures

Des mesures de contrôles préalables faites dans le tunnel (p. ex. lors de la vérification des gabarits de support de la voie) ont fourni les valeurs empiriques suivantes :

| | |
|-------------------|---|
| Directions | $\sigma_r = 6\text{cc}$ |
| Angles de hauteur | $\sigma_H = 6\text{cc}$ |
| Distances | $\sigma_D = 1\text{ mm} + 1\text{ ppm}$ |
| Centrage | $\sigma_Z = 0,3\text{ mm}$ |

c) La portée des visées (le périmètre de mesure)

La distance max. des points visés est estimée à partir de la précision d'orientation de la station libre. Dans notre cas, elle était de l'ordre de 40-45m.

d) L'influence des erreurs systématiques

Celles-ci doivent être soigneusement éliminées par des méthodes d'observation adéquates en prenant les précautions suivantes :

- contrôle du distance-mètre avant la campagne (constante d'addition)
- détermination journalière des erreurs d'instruments
- contrôle de l'excentricité des réflecteurs
- ajustage du système d'horizontalisation du dispositif de mesure de dévers de la règle SOLA

6. LE RÉSULTAT DU CALCUL À PRIORI

L'analyse à priori confirme les faits suivants :

a) La précision de la station libre

Comme prévu, le calcul à priori confirme que la surdétermination élevée de la station libre permet d'obtenir la géométrie donnée du réseau avec l'excellente précision du positionnement que voici :

| | |
|-----------------------|-----------------------|
| $m_x = 0,9\text{ mm}$ | $m_h = 0,5\text{ mm}$ |
| $m_y = 0,8\text{ mm}$ | $m_o = 15\text{ cc}$ |

b) La précision des points de contrôle sur la voie

La détermination par des vecteurs des points de contrôle s'est toujours faite par détermination simple. Les points implantés à la limite du domaine de mesure (situés à environ 40 m de la station) sont contrôlés à partir des stations avoisinantes. Ceci a permis d'exclure toutes les fautes d'orientation planimétriques et altimétriques. En règle générale, les écarts m_q entre les deux déterminations étaient inférieurs au 1 mm.

| |
|--|
| $m_d \leq 2\text{ mm}$ (erreur sur la distance) |
| $m_R \leq 1\text{ mm}$ (erreur transversale) |
| $m_h \leq 1\text{ mm}$ (mesure altimétrique trigonométrique) |

c) La précision relative

La précision relative imposée ($m_q \leq 1\text{ mm}$) entre points de contrôles voisins (espacés de ~1.8m) a pu être garantie.

7. DISPOSITIF DE MESURE

Sur la base des résultats du calcul à priori, le dispositif de mesure suivant a été adopté :

a) Instrumentation

- Théodolite d'ingénieur avec $\sigma_R \leq 3\text{cc}$ et éventuellement un compensateur d'axe des tourillons
- Appareil de mesure électronique des distances avec $\sigma_D \leq 1\text{ mm}$
- Lecture du dévers avec une précision $\leq 1\text{ mm}$.

b) Dispositif de mesure/contrôles préalables

- Rattachement à au moins 6-8 repères de voie
- Calage précis
- Contrôles journaliers des erreurs instrumentales
- Distance maximale des visées de 40-45m
- Mesure en position I (contrôle en position II)

c) Volume des mesures

- Par station, environ 45 points de contrôles
- Longueur du tronçon couvert par une station 80-90 m
- Temps de mesure requis par station: env. 1-1.5h
- Avance journalière avec deux équipes 600-800 m

8. LES RÉSULTATS DES CONTRÔLES (RÉCEPTION DU TRAVAIL)

Les écarts de la position de la voie sont déterminés **directement sur le terrain**. CORAIL fournit à l'opérateur les correctifs de la position de la voie en plan et en altimétrie.

Après les opérations préparatoires

- du chargement de la géométrie dans l'ordinateur de terrain et
- de la mesure de la voie enregistrée sur l'ordinateur de terrain,

le programme CORAIL calcule et affiche les écarts latéraux et verticaux de l'axe de la voie.

Puis l'ordinateur de terrain affiche :

- la valeur du dévers
- le kilométrage et le numéro du point

Ces résultats ont été notés manuellement sur le protocole de station.

Lors des deux contrôles finaux (avant/après le bétonnage) un protocole a été établi afin de permettre :

- le suivi permanent des tronçons contrôlés et la mise en évidence d'éventuelles discontinuités planimétriques, altimétriques et de gauche.
- l'appréciation de la qualité des tronçons réceptionnés et l'établissement systématique d'un protocole des problèmes rencontrés.
- une première évaluation immédiate des résultats sur le terrain.
- une comparaison de la position de la voie avant et après le bétonnage.

La seconde évaluation sur la base de mesures enregistrées a été effectuée ultérieurement par les services spécialisés des CFF.

Malheureusement, on n'a pas pu enregistrer automatiquement les résultats de l'évaluation de terrain.

9. EXPÉRIENCES DE LA CAMPAGNE DE MESURE

Le choix des dispositions de mesures a permis d'obtenir les résultats recherchés. Au niveau de la précision, aucun écart significatif n'a été constaté sur le terrain entre ce que prévoyait l'analyse à priori et les résultats de l'implantation. Par la suite, nous résumerons quelques détails techniques de la campagne de mesure.

a) L'utilisation des instruments

Le choix d'un théodolite d'ingénieur avec les caractéristiques de précision évoquées plus haut s'est avéré judicieux. La précision générale de 1 mm exigée pour le piquetage, ne peut être obtenue qu'à condition de soumettre préalablement l'instrument à un contrôle. Des soins tout particuliers doivent être consacrés au distance-mètre et au système d'horizontalisation de la règle SOLA.

Les contrôles journaliers sont obligatoires pour mettre en évidence :

- L'erreur de collimation horizontale
- L'erreur d'index
- L'excentricité des réflecteurs
- La stabilité du trépied
- La nivelle torique de la règle à dévers SOLA.

b) Règle SOLA (dispositif de mesure du dévers des CFF)

Ce dispositif de centrage spécialement développé pour la mesure directe de la position de l'axe de la voie a également fait ses preuves. Il est utile de contrôler régulièrement (toutes les deuxièmes stations) le dispositif de mesure du dévers. Un contrôle indépendant par nivellement géométrique ou trigonométrique est recommandé.

Si la règle SOLA dispose d'une nivelle ajustée, le dévers peut être mesuré avec une précision de 0,5 mm. Cette règle est nettement supérieure au système "Adapteur" conçu pour les contrôles de files de voie indépendantes.

Il est judicieux en utilisant la règle SOLA, de respecter les points suivants :

- Travailler avec une nivelle torique ajustée (contrôle indépendant)
- Poser soigneusement la règle et contrôler sa position sur les rails
- Veiller au pivotage centrique du réflecteur (même position de l'axe lors du pivotement à 180°)

c) Les opérations de mise en station

Le calage précis du théodolite s'est effectué avec l'aide des angles de hauteur ce qui a aussi permis de connaître l'erreur résiduelle de l'axe des tourillons.

Les résultats du calcul de la station libre étaient examinés avant de commencer les contrôles. Les exigences étaient les suivantes :

| | |
|---|--|
| Précision de positionnement de la station | ≤ 1 mm (en situation et en altimétrie) |
| Orientation de la station | ≤ 20 cc |
| Écarts résiduels aux points de rattachement | ≤ 1 mm |

De rares fois, ces écarts ont atteint 2 mm pour des questions d'arrondis.

Les résultats du calcul de station libre ont été relevés sur le protocole de station. Il s'agissait notamment de noter les résultats de contrôles d'instruments de mesure.

d) Mesures de contrôle

La mesure d'un point de contrôle à l'axe de la voie s'est effectuée par détermination simple. La visée en une seule position de la lunette, corrigée des erreurs instrumentales, est très économique à condition que les exigences suivantes soient respectées :

- visée centrée ≤ 0,4 mm
- position centrée du réflecteur
- règle SOLA ajustée
- pose contrôlée de la règle SOLA

L'utilisation simultanée de deux théodolites a permis de contrôler quelques points en limite de périmètre de mesure et de certifier ainsi la fiabilité du dispositif. Les résultats suivants ont été obtenus :

- Les valeurs correctives d'un point mesuré simultanément peuvent différer jusqu'à 1,5 mm.
- Ces valeurs maximales sont enregistrées dans la zone périphérique des domaines de mesure à 35-40m de chaque station.
- Les différences résultent des incertitudes d'orientation cumulées de chaque station.
- Lors des changements de station, il faut attacher beaucoup d'attention aux points en bordure du périmètre de mesure. Si nécessaire, on compense les écarts, à condition d'éviter les "sauts" supérieurs à 1 mm.

e) Temps requis

Le contrôle de la voie dans le tunnel de 6.1 km. de long a porté sur les opérations suivantes :

- Le contrôle avant le bétonnage
- Le contrôle après le bétonnage

| | Nombre de stations | Nombre de points | Temps requis (total) |
|--------------------------|--------------------|------------------|-------------------------|
| Côté Jura (Voie gauche) | 165 | 6800 | 30 jours (deux équipes) |
| Côté Alpes (Voie droite) | 160 | 6800 | 22 jours (deux équipes) |

Le rendement dépend de la précision du pré-positionnement de la voie durant la journée. Une équipe posait environ 320-360m de voie par jour. Elle était composée de : un opérateur, un aide, un protecteur.

10. RECOMMANDATIONS POUR LES FUTURS TRAVAUX GÉODÉSIQUES DE VOIES

Des travaux géométriques du tunnel du Grauholz, on peut tirer en résumé les enseignements suivants :

1. Le réseau des points fixes doit être établi avec une précision et une fiabilité élevées et homogènes. Pour assurer des erreurs inférieures au millimètre en situation et en altimétrie une densité de points fixes espacés d'environ

Implantations en tunnel (3ème CITOP) - Implantations en tunnel

37 m s'est avérée optimale.

2. Un contrôle préalable approfondi de tous les appareils de mesure est indispensable. Durant la campagne, des contrôles périodiques sont impératifs. La précision de mesures doit être inférieure à 1 mm.

3. Le stationnement libre est rattaché à au moins 7-9 points fixes pour assurer une précision d'orientation $\leq 18''$. La longueur de visée maximale vers les points de contrôle est de 40 à 50m.

4. Il faut éliminer toutes les erreurs systématiques.

5. Le contrôle final s'effectue par de bonnes conditions de visibilité et en dehors des périodes d'activité du chantier.

6. L'implantation des points dans les zones de transition entre deux stations se traite avec un soin tout particulier. Des écarts au-delà de 1 mm ne sont pas tolérés.

7. Garantir la qualité des mesures nécessite de travailler rapidement et avec soin.

11. CONCLUSION (PAR T. ERIGE CFF)

Tous les objectifs fixés pour les travaux géométriques dans le tunnel CFF du Grauholz ont été atteints.

Pour ce faire il aura fallu réunir :

- Un TRAVAIL de QUALITE - celui décrit dans ce texte
- Un OUTIL ADEQUAT - le logiciel CORAIL.

L'expérience tirée de ce travail doit maintenant être transposée dans la pratique. A court terme, ce sont les améliorations à apporter dans le secteur de l'instrumentation de contrôle et d'implantation qui seront les plus utiles.

Il est vraisemblable qu'ainsi, de futurs travaux d'implantation de haute précision des voies bénéficieront directement de l'expérience acquise dans le cadre de ce travail unique, réalisé par les CFF dans le tunnel du Grauholz.

Remerciements à :

• Monsieur *Jean-Jacques Stuby*, géomètre à l'Arrondissement I des CFF à Lausanne.

Ses idées et son travail de développement ont donné naissance au logiciel CORAIL, élément clé à la base de l'implantation de précision de la voie dans le tunnel du Grauholz.

• Monsieur *Andreas Künzle*, responsable CFF de la voie du secteur de Berne.

Sa présentation compétente du système CORAIL est à l'origine de l'abandon des méthodes classiques à la faveur de la nouvelle approche d'implantation de voie, réalisée avec succès dans le tunnel du Grauholz.

• Messieurs *Georg Hejda* et *Heinz Rickli*, responsables CFF des travaux de voie effectués dans le tunnel du Grauholz. C'est à partir de leur accord bienveillant que l'idée de cette publication a pu être développée.

Bibliographie

CORAIL, le contrôle de la voie au théodolite par "station libre". Diaporama CFF, 1994.

T. Engel, J.-J. Stuby. CORAIL : Le lien entre le projet géométrique de la voie et sa réalisation sur le terrain. XX. FIG Congress, Melbourne, 03.94. 1s open rail session.

Adresse de l'auteur principal, géomètre mandaté par les CFF pour l'implantation de la voie dans le tunnel du Grauholz

Riesen & Stettler AG
Ingenieur- Und Vermessungsbüro
Zentrumsplatz 14
3322 Schönbühl-Urtenen
Tél. : 0 031/859 67 11

