

# Les puits de Sedrun

TUNNELS

**A Sedrun, le percement du tunnel de base du Gothard s'effectue à partir de deux puits d'une profondeur de 800 m chacun. Le transfert de la planimétrie, de l'altimétrie et de la direction de la surface jusqu'au bas des puits est réalisé avec des méthodes différentes et indépendantes les unes des autres, de façon à garantir le respect des exigences imposées en matière de précision et de fiabilité.**

Le percement du tunnel de base du Gothard s'effectuant simultanément depuis cinq sites, le maître de l'ouvrage a fixé les écarts maximaux admissibles pour les jonctions : 25 cm longitudinalement et transversalement et 12,5 cm en altitude. Les géomètres considèrent ces valeurs comme des tolérances géodésiques servant à déduire les précisions planimétriques (10 cm) et altimétrique (5 cm) nécessaires.

Les deux puits de Sedrun sont surmontés d'une caverne reliée à la vallée du Rhin antérieur par une galerie d'une longueur d'un kilomètre (fig. 1). Les difficultés à garantir les exigences élevées du maître de l'ouvrage sont donc encore

accrues par la complexité du système des puits. L'objectif est de transférer avec précision la planimétrie, la direction et l'altimétrie au fond des puits, ceci avec une fiabilité aussi élevée que possible.

Les travaux de mensuration des NLFA doivent utiliser des méthodes différentes et aussi indépendantes que possible, ceci pour optimiser la modélisation des sources d'erreur (pré-analyse) et éliminer les erreurs systématiques. Cette démarche s'applique naturellement au tronçon de Sedrun. Si les méthodes de descente de points par voies optique et mécanique se sont imposées d'emblée pour le transfert de la planimétrie, la recherche d'une méthode indépendante pour le contrôle du transfert des azimuts gyroscopiques utilisés pour la direction a été plus délicate : c'est finalement la technique des mesures inertielles - utilisée en première mondiale - qui a permis de mener ce contrôle à bien.

## Transfert de la planimétrie et de l'altimétrie

### Descentes de points au plomb optique

Réalisées au printemps 2002 dans le puits I et en janvier 2004 dans le puits II, les descentes de points au plomb optique dans un puits de 800 m exigent une parfaite visibilité. Plusieurs heures avant l'exécution de l'opération, la ventilation a été réglée pour créer un « courant d'air descendant » dans les puits, l'air frais poussé vers le fond dissipant ainsi tout brouillard éventuel le long du puits.

Pour accroître leur précision et leur fiabilité, les descentes ont été effectuées dans trois couloirs différents, à l'aide d'une lunette nadirale *Leica* d'une résolution de 1:200 000 (fig. 3). Des prismes équipés de diodes lumineuses servant de cibles au fond des puits étaient placés sur des points implantés par des coordonnées approchées. Les écarts étaient observés selon quatre positions et les corrections transmises par radio à l'opérateur se trouvant au fond du puits. Tant au fond qu'en tête de puits, la position des trois trépieds était relevée depuis une station, en intégrant des points fixes du réseau du tunnel.

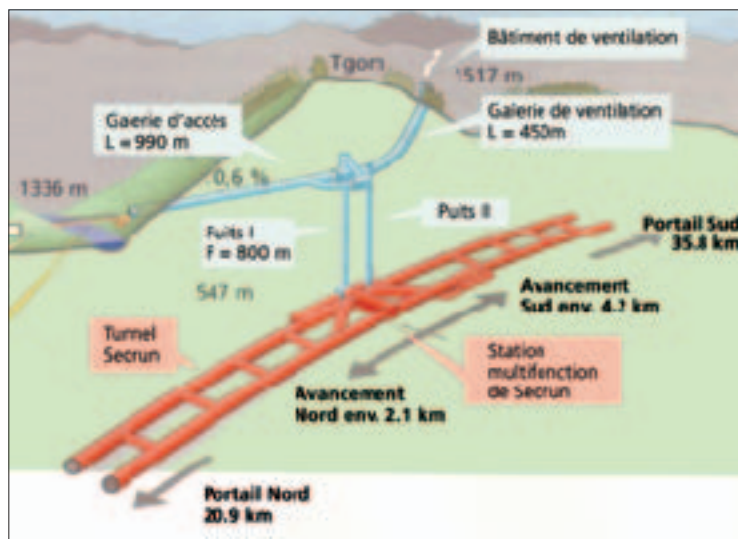


Fig. 1 : Les puits de Sedrun (Document AlpTransit)

Fig. 2 : Descente de points par voie mécanique, échange des poids

Fig. 3 : Lunette nadirale montée sur trépied ; on distingue les ouvertures dans le sol permettant la visée dans le puits

Pour chacune des descentes, le transfert de l'altitude s'est fait avec un distancemètre électronique, en mesurant la distance verticale entre le fond du puits et sa tête. Un dispositif spécial permettait de viser un réflecteur monté sous le trépied positionné en tête de puits. Les différences d'altitude mesurées dans les deux puits ne différaient que de quelques millimètres.

#### Descentes de points par des moyens mécaniques

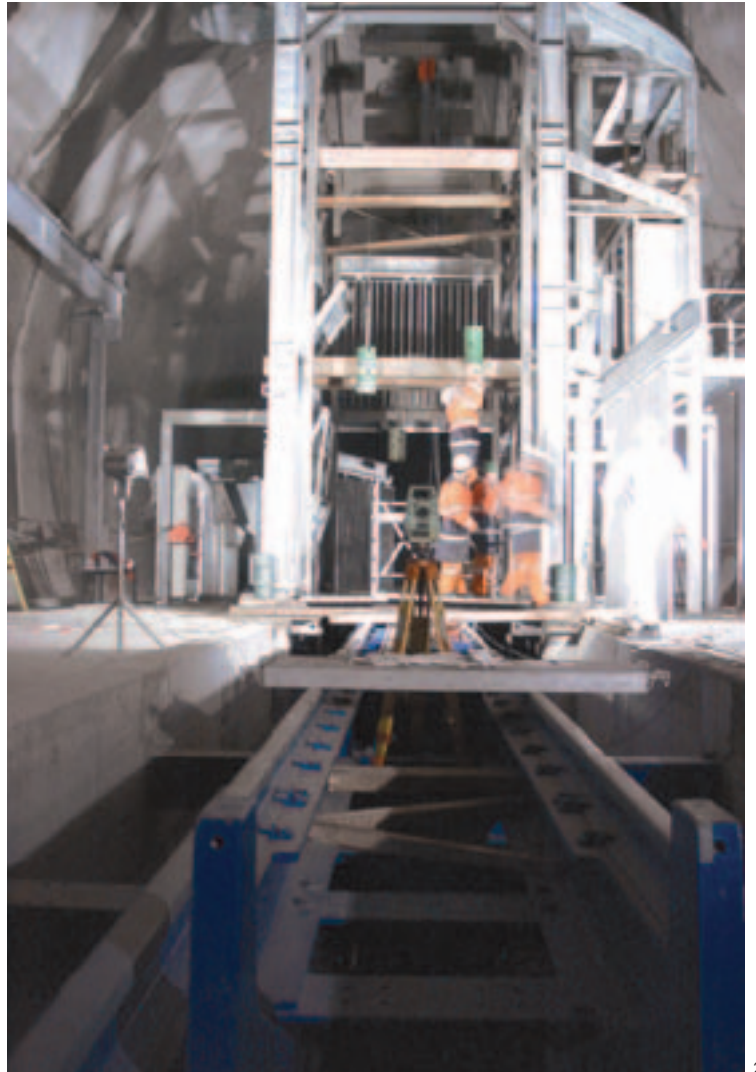
Peu de temps après la première descente au plomb optique, la société *DBE Gorleben* a réalisé une descente de points par voie mécanique dans le puits I, toujours selon trois couloirs distincts. Une journée complète fut nécessaire pour l'installation des treuils, des poulies et la descente des fils. Les trois poids - près de 390 kg par fil - purent être placés en fin de journée et les mesures eurent lieu le lendemain, après un temps de stabilisation d'environ douze heures.

Pour chacun des poids, on a mesuré dix points de rebroussement, avec deux théodolites situés sur des stations distinctes. Deux autres série de mesures furent effectuées, tout d'abord en réduisant les poids à environ 190 kg, puis en utilisant à nouveau les poids de 390 kg (fig. 2). Le recours à des poids différents permet de minimiser les erreurs dues aux courants d'air, au suintement de l'eau ou à la courbure du fil, autant de facteurs qui font dévier le fil de sa position théorique.

#### Exploitation et résultats

Lors de la descente d'un point, la déviation de la verticale exerce une influence directe sur la précision des coordonnées et doit donc impérativement être prise en compte (voir encadré en page 9). La direction de la verticale étant incurvée, les valeurs de correction à appliquer en tête de puits et au fond ne sont pas identiques. Les composantes de la déviation de la verticale ont été déterminées à partir du modèle géoïde suisse *Geoid98*<sup>1</sup> (Marti, *swisstopo*).

<sup>1</sup> La précision des déviations de la verticale déduite de ce modèle est de l'ordre de 0,3 mgon

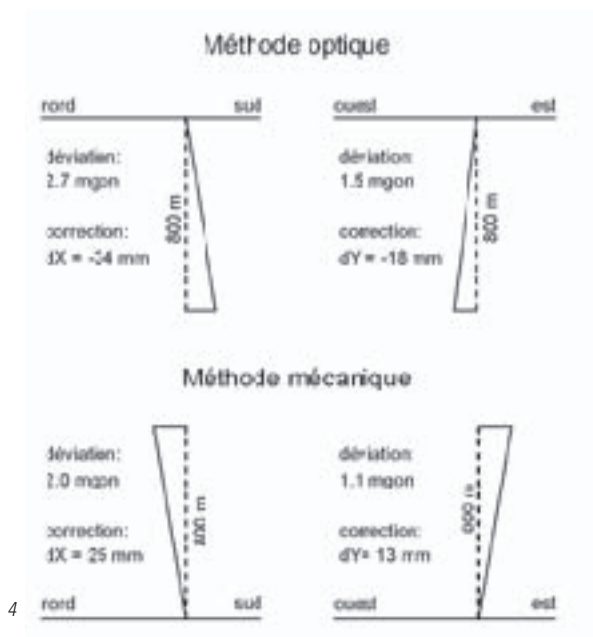


2



3

Fig. 4 : Déviation de la verticale



Les composantes pour les points concernés avec les corrections qui en découlent sont présentées sur la figure 4.

Il faut signaler que les deux descentes de points - optiques et mécaniques - se fondent sur le même modèle de géoïde, elles ne constituent pas des méthodes totalement indépendantes, puisque les éventuelles erreurs systématiques du modèle restent indétectables.

Le calcul de la précision interne de la descente de points au plomb optique s'est d'abord basée sur la comparaison du triangle défini en tête de puits avec celui dessiné 800 mètres plus bas par les points descendus dans les trois couloirs. Pour chacun des deux puits, la précision interne était de 4 mm. A cela s'ajoute l'incertitude inhérente à la déviation de la verticale, estimée à 0,3 mgon, soit environ 4 mm sur 800 m. La précision de la descente des points au plomb optique dans les puits de Sedrun est donc de l'ordre de 6 mm.

Pour la descente de points par voie mécanique, la combinaison des résultats des séries de mesures faites avec des poids différents ont permis de procéder à deux déterminations distinctes de la position théorique des points. Les écarts maximaux entre ces deux exploitations sont de 10,2 mm pour la première station et de 1,5 mm pour l'autre. L'évaluation de la précision s'appuie ici aussi sur la comparaison directe entre les deux triangles - en tête et au fond du puits -, en tenant compte de la précision des composantes de la déviation de la verticale. Les analyses de la descente de points par voie mécanique aboutissent à une précision de 5 mm.

La compensation globale du réseau a intégré les résultats des différentes descentes de points et les a combinés avec les

mesures de rattachement effectuées en tête et au fond du puits. Les mesures au distancemètre électronique, effectuées du fond du puits en direction de sa tête lors de la descente de point au plomb optique, définissent le transfert des altitudes tandis que les azimuts gyroscopiques mesurés lors d'une autre campagne de mesure assurent le transfert de l'orientation. Une analyse des différentes descentes de points au sein de la compensation globale souligne la qualité des résultats : des variantes de la compensation ne tenant compte que de la descente optique ou de la descente par voie mécanique dans le puits I, conduisent à des différences de coordonnées horizontales au fond du puits d'à peine 2 mm [2]<sup>2</sup>.

### Transfert de la direction

Les puits I et II n'étant distants que de 38 m, les descentes de points permettraient de déterminer un azimut avec une précision de l'ordre de 20 mgon. Une telle précision est toutefois insuffisante, puisque les calculs de la préanalyse exigeaient une valeur maximale de 1,5 mgon.

### Azimuts gyroscopiques

La définition de la direction de percement au fond des puits s'est effectuée au moyen d'azimuts gyroscopiques, mesurés à l'aide du *Gyromat 2000* de l'EPFZ (fig. 5). Cet appareil est ce qu'on appelle un gyroscope « chercheur de nord ». A l'intérieur du gyroscope, une masse suspendue est en rotation à grande vitesse et le mouvement de précession de la Terre conduit cette masse à osciller autour de la direction du nord géographique, parallèlement à l'axe de rotation de la Terre. Cet instrument est donc capable de s'orienter où qu'il soit (sauf à proximité des pôles) sans aucune référence externe.

La précision du gyroscope dépend de la température ambiante. Les écarts entre la température à laquelle l'azimut de référence dans le réseau du portail est mesuré et celle à laquelle s'effectuent les mesures ultérieures dans le tunnel peuvent être très conséquents. Il est donc impé-

<sup>2</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article

Fig. 5: Gyromat 2000, le gyroscope « chercheur de nord » de l'EPFZ

Fig. 6: Unité de mesures inertielles avec miroirs

Fig. 7: Mesures d'autocollimation au fond du puits

ratif de procéder à des étalonnages réguliers de l'instrument dans la chambre d'essai en température dont dispose l'EPFZ.

Dans le tunnel, si la répétition des mesures permet d'accroître leur précision et leur fiabilité, elle n'est pas à même d'éliminer les éventuels écarts systématiques. Un modèle de masse de bonne qualité est donc indispensable pour estimer de façon aussi réaliste que possible la déviation de la verticale des stations de mesure. Ici aussi, c'est le modèle de *swisstopo* qui a été utilisé. La répétition des mesures a permis d'atteindre une précision d'environ 1,3 mgon, inférieure à la valeur exigée de 1,5 mgon.

#### Mesures inertielles

Actuellement, la méthode de mesures inertielles représente la seule possibilité réaliste pour un contrôle indépendant des azimuts gyroscopiques. Une collaboration entre l'université technique (TU) de Munich et l'EPFZ a permis d'utiliser pour la première fois un système inertiel dans le cadre d'un transfert de direction de haute précision. Cet instrument de la société *iMAR* intègre trois couples accéléromètre-gyroscope, perpendiculaires deux à deux, l'accéléromètre et le gyroscope de chaque couple étant coaxiaux.

Après une phase d'initialisation de quelques minutes - réalisée au repos et servant à déterminer l'orientation de départ -, les translations et les rotations de l'unité sont enregistrées et intégrées pendant ses déplacements, permettant de la sorte de mesurer avec une grande précision l'angle de rotation entre deux positions.

A Sedrun, l'unité de mesure était fixée sur une plaque métallique, solidaire du transporteur à bande du puits (fig. 6). Celui-ci a alors effectué plusieurs allers-retours à grande vitesse (16 m/s) entre le fond et la tête du puits. Au niveau supérieur et au niveau inférieur, un tachéomètre stationné face au puits mesurait la direction de miroirs montés sur la plaque métallique, pour la transférer dans le réseau géodésique du tunnel. Lors de chacun des arrêts du transporteur à bande en tête ou au fond du puits, l'orientation des miroirs était mesurée par autocollimation (fig. 7): le



5



6



7

réticule du tachéomètre est mis en coïncidence avec son image dans le miroir, permettant ainsi un doublement de la précision par rapport à des mesures de direction conventionnelles.

On peut se représenter le dispositif de mesure retenu comme un cheminement polygonal rattaché au niveau de la tête et du fond du puits au réseau du tunnel. Chaque angle du polygone est déterminé pour partie par autocollimation - par moitié au niveau supérieur et au niveau inférieur -, l'angle de rotation entre la tête et le fond du puits étant fourni par le système inertiel (fig. 8).

Deux séries de mesures comportant chacune cinq allers-retours ont été effectuées en avril 2004 et en janvier 2005, pendant que le chantier était à l'arrêt.

#### Exploitation et résultats

Les deux séries de mesures inertielles ont fait l'objet d'une exploitation séparée. Cette exploitation est complexe et s'effectue en plusieurs étapes [1]. Pour les deux campagnes de mesure, la moyenne des trajets de mesure et leur combinaison avec les mesures par autocollimation ont révélé un écart de direction entre la tête et le fond du puits. La précision interne du transfert de la direction - calculée à partir de tous les trajets de mesure - est de 1,5 mgon, une valeur similaire à celle de 1,3 mgon obtenue avec le gyroscope.

La comparaison avec le réseau du tunnel reposant sur les mesures gyroscopiques fait apparaître un écart de +0,7 mgon pour la première série de mesures et de +3,7 mgon pour la deuxième, soit une valeur moyenne de +2,2 mgon. Les tests statistiques montrent qu'on ne peut déduire aucune valeur de correction pour les mesures gyroscopiques. Cependant, les mesures inertielles ont indéniablement rempli leur mission : servir de méthode de contrôle indépendante et accroître le niveau de fiabilité. La technique de mesure

inertielle présente en outre la particularité d'être moins soumise à l'influence de la déviation de la verticale que la technique de mesure gyroscopique.

#### Des méthodes fiables

Les descentes de points dans les puits de Sedrun ont confirmé qu'il était possible d'atteindre la valeur de 24 mm délivrée par la préanalyse. Le transfert des altitudes par des mesures électroniques de distances effectuées verticalement ne pose aucun problème. La fiabilité du transfert de la direction a été fortement accrue grâce à deux types de mesure différents, les azimuts gyroscopiques et la méthode inertielle, et l'implantation du tunnel vers le nord et vers le sud peut se faire sur cette base pour les deux premiers kilomètres. Au delà, des nouvelles mesures gyroscopiques seront nécessaires.

Si le tronçon de Sedrun du tunnel du Gothard innove en matière de génie civil, il ouvre également de nouvelles perspectives au domaine de la géodésie. La descente de points au plomb optique sur une profondeur de 800 m et les mesures inertielles de haute précision pour le transfert de la direction constituent des premières mondiales. L'excellente collaboration entre le consortium en charge des travaux de mensuration, les ingénieurs géomètres d'AlpTransit AG et les Hautes écoles a permis à tous les intervenants d'acquérir une expérience exceptionnelle.

Adrian Ryf, ing. dipl. EPF  
Institut de Géodésie et Photogrammétrie  
ETH Hönggerberg, CH - 8093 Zurich

Theresa Neuhierl, ing. dipl. TU München  
Lehrstuhl für Geodäsie, Technische Universität München  
Arcisstrasse 21, D - 80290 Munich

Ivo Schätti, ing. dipl. EPF  
Grünenfelder und Partner AG  
Denter Tumas 6, D - 7013 Domat/Ems

#### Références bibliographiques:

- [1] T. NIEUHIERL : « Eine neue Methode zur Richtungsübertragung durch Koppelung von Inertialmesstechnik und Autokollimation », Dissertation, TU München, 2005
- [2] I. SCHÄTTI, A. RYF : « Hochpräzise Lotung im Schacht Sedrun des Gotthard-Basistunnels », *Geomatik Schweiz*, 7/2004

#### Les participants aux travaux de mensuration

Le consortium VI-GBT (groupement d'ingénieurs géomètres pour le tunnel de base du Saint-Gothard), dirigé par le bureau d'ingénieurs Grünenfelder basé à Domat/Ems, s'est vu confier la responsabilité de la conception et de l'exécution de l'ensemble des travaux de mensuration nécessaires dans le cadre de l'implantation principale du tunnel de base du Saint-Gothard.

Les tâches d'une certaine complexité ont fait l'objet d'une collaboration entre le consortium VI-GBT, les ingénieurs géomètres d'AlpTransit, l'EPF Zurich et l'Université technique (TU) de Munich.

