

Zeitschrift: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

Band: 93 (1995)

Heft: 4: ETHZ : Departement Geodätische Wissenschaften = EPFZ : Département des sciences géodésiques

Artikel: Méthodes géodésiques et modèles mathématiques pour l'implantation des nouvelles transversales alpines

Autor: Carosio, Alessandro / Reis, O.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-235146>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 27.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Méthodes géodésiques et modèles mathématiques pour l'implantation des nouvelles transversales alpines

A. Carosio, O. Reis

Les CFF ont donné mandat à l'EPFZ pour mener des études relatives aux modèles mathématiques à appliquer, pour définir la qualité des méthodes géodésiques à mettre en oeuvre, dans le cadre du percement d'un nouveau tunnel de base du St-Gothard, long de 57 km et épine dorsale du projet AlpTransit. Le calcul de simulation global effectué a ainsi permis de tester les niveaux de précision et surtout de fiabilité offerts par un réseau de référence, dont la partie souterraine a fait l'objet d'une attention particulière. En effet, du fait de la longueur du tunnel, des mesures gyroscopiques doivent venir renforcer les mesures conventionnelles. Cependant, dans une zone montagneuse telle que le massif du St-Gothard, l'influence du champ de pesanteur terrestre, irrégulièrement variable, ne peut être négligée; une étude expérimentale a donc été menée sur l'impact de cette influence sur les gisements gyroscopiques. La précision à laquelle ils peuvent être intégrés au calcul de simulation en a été déduite et les calculs correspondants effectués. Les résultats en sont ici brièvement présentés.

Im Rahmen des Durchschlages der 57 km langen Gotthardbasislinie, welche das Kernstück des AlpTransit Projektes darstellt, wurde die ETH Zürich von der SBB beauftragt, mathematische Modelle und daraus resultierende geodätische Methoden zu untersuchen. Die durchgeführte Präanalyse erlaubte es insbesondere, die Genauigkeit und vor allem die Zuverlässigkeit eines Referenznetzes zu testen. Dem unterirdischen Anteil dieses Netzes wurde besondere Aufmerksamkeit geschenkt, da wegen der Länge des Tunnels die konventionellen Messungen durch Kreiselazimute verstärkt werden müssen. Eine Untersuchung, die auf effektiv durchgeführten Messungen basierte, wurde demzufolge unternommen. Dies erlaubte es, die Genauigkeit mit welcher die Kreiselazimute in die Präanalyse eingeflossen sind, festzulegen und die entsprechenden Berechnungen durchzuführen. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden im folgenden Artikel vorgestellt.

Le FFS hanno conferito al Politecnico di Zurigo il mandato di effettuare delle ricerche relative ai modelli matematici applicabili per definire la qualità dei metodi geodetici da utilizzare per la perforazione della nuova galleria di base del Gottardo, lunga 57 km e asse portante del progetto Alp Transit. Il calcolo della simulazione globale ha permesso di verificare i livelli di precisione e affidabilità offerti da una rete di riferimento, la cui parte sotterranea è oggetto di una specifica attenzione. Infatti, a causa della lunghezza della galleria, le misurazioni convenzionali devono essere accompagnate da misurazioni giroscopiche. Tuttavia, in una zona montagnosa come quella del Gottardo non va sottovalutata l'influenza del campo di gravità terrestre, irregolarmente variabile. Di conseguenza, si è provveduto a lanciare una ricerca sperimentale sull'impatto di questi influssi sugli azimut giroscopici. Questo ha permesso di determinare la precisione con cui questi ultimi possono essere integrati nel calcolo simulato e di effettuare i relativi calcoli. In questo articolo si presentano i risultati dello studio.

1. Les nouvelles lignes ferroviaires alpines

1.1 Aperçu général

De par sa position géographique, la Suisse est une importante plaque tournante des transports et un pays de transit au cœur de l'Europe. Elle est donc touchée de plein fouet par l'augmentation du trafic international (doublement prévu à l'horizon 2020). Afin d'éviter la saturation d'un

réseau déjà actuellement surchargé et pour maintenir les nuisances qui lui sont inhérentes (bruit, gaz d'échappement, ...) à un niveau encore tolérable, la Suisse a décidé de lancer le projet de «nouvelles lignes ferroviaires à travers les Alpes» [1]. Deux tunnels de base passant sous le St-Gothard (long de 57 km) et le Lötschberg (long d'environ 30 km) en constituent l'épine dorsale. Leur réalisation permettra de ramener la durée du parcours Bâle - Milan à 3 heures [2].

1.2 Le tunnel de base du St-Gothard

Le tunnel ferroviaire existant, long de 15 km, fut creusé il y a un siècle, à plus de 1100 m d'altitude. La densité du trafic ayant considérablement augmenté depuis lors, cet ouvrage est proche de la saturation. De plus, les longues rampes d'accès nécessaires pour atteindre l'altitude du tunnel ralentissent le trafic. C'est pourquoi le percement d'un nouveau tunnel de base est devenu indispensable. Il sera percé à une altitude telle (environ 500 m) qu'elle ne nécessite pas de rampes d'accès, aura de ce fait une longueur de 57 km et impliquera le forage de puits d'aération de 800 m de profondeur. Cet ouvrage étant de loin le plus ambitieux de tout le projet, une attention toute particulière lui est dévolue. Les CFF, maîtres d'œuvre du projet, ont ainsi décidé la formation de groupes de travail, par disciplines techniques, chacun étudiant pour son domaine spécifique les difficultés liées à la réalisation d'un tel ouvrage et les moyens de les surmonter. Un groupe de travail géodésie fut ainsi mis en place.

1.3 Les travaux menés dans le cadre du rapport d'avant-projet

Le groupe de travail géodésie avait pour but de fixer le cadre technique et organisationnel dans lequel doivent s'effectuer les travaux topographiques. Il a donc recensé les travaux à exécuter et étudié les moyens de les mener à bien, permettant de localiser les points critiques nécessitant un examen approfondi. Il a aussi procédé à une analyse globale sous forme d'une simulation de réseau pour établir les exigences que les offres des entreprises contractantes devront satisfaire, les méthodes géodésiques à employer étant laissées à la libre appréciation des entrepreneurs. Ces travaux, confiés à l'IGP du fait de la participation du prof. Dr. A. Carosio au groupe de travail géodésie, sont décrits dans le rapport d'avant-projet, document de base pour la mise au concours des travaux topographiques.

Les études menées se concentrent sur les modèles mathématiques à appliquer pour définir la qualité des méthodes géodésiques à mettre en oeuvre. Le calcul de simulation global a permis de tester les niveaux de précision et de fiabilité offerts par un réseau de référence. Le second paragraphe présente brièvement le modèle de calcul, les indicateurs de précision et de fiabilité utilisés et les considérations ayant prévalu lors de la modélisation du réseau. Celle-ci, pour le réseau souterrain, ne peut faire appel qu'aux méthodes de mesure conventionnelles, appuyées par des mesures gyroscopiques rendues indispensables par la longueur du tunnel. Dans une zone montagneuse telle que le massif du St-Gothard, l'influence du champ de pesanteur terrestre, irrégulièrement variable, ne peut être négligée. L'étude expé-ri-

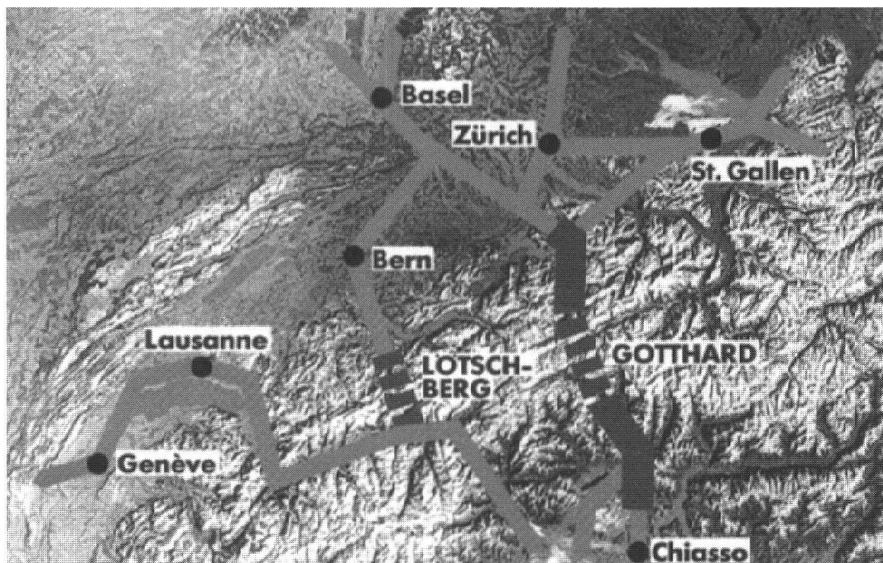


Fig. 1: Représentation schématique des nouvelles lignes ferroviaires à travers les Alpes [2].

mentale menée sur l'impact de cette influence sur les gisements gyroscopiques fait l'objet du troisième paragraphe, dont la précision à laquelle ces derniers peuvent être intégrés à la simulation se déduit; enfin, les résultats de ces calculs sont présentés au quatrième paragraphe.

2. Modèle mathématique du calcul de simulation

2.1 Qu'entend-on par simulation de réseau?

Quand un réseau a une configuration complexe et qu'il nécessite différents types de mesures, le simple bon sens ne peut permettre seul d'apprécier la suffisance des moyens qui doivent être mis en oeuvre pour garantir les précisions demandées [3]. Pour le suppléer, on dispose d'outils mathématiques et statistiques permettant d'étudier différentes configurations possibles pour le réseau. On peut alors comparativement en analyser les résultats, desquels se dégagera le meilleur compromis possible entre les buts à atteindre et les moyens d'y parvenir.

2.2 Modèle de calcul

Un calcul de simulation se passe avant que la moindre observation n'ait été effectuée sur le terrain. Il nécessite un outil de calcul adéquat tel qu'un logiciel de compensation. Celui utilisé, LTOP, de l'Office fédéral de topographie (Berne) se base sur la méthode des observations médiates et traite séparément planimétrie et altimétrie. Certaines parties du logiciel, dont la fiabilité, furent développées à notre institut. Pour exécuter le calcul, limité à la planimétrie, le logiciel doit disposer d'informations relatives aux modèles fonctionnels et stochastiques envisagés.

2.2.1 Le modèle fonctionnel

Les renseignements suivants sont nécessaires pour former la matrice des coefficients des équations aux erreurs (notée A)

- le statut de chaque point du réseau (fixe ou nouveau)
 - les coordonnées approchées de ces points
 - les mesures prévues et leur type
- Concernant celles-ci, une combinaison quelconque des types suivants doit être possible:
- directions
 - distances
 - coordonnées GPS (devenues la base du réseau de référence extérieur)
 - azimuts astronomiques
 - mesures gyroscopiques (selon la longueur du tunnel ou en cas de départ de galerie depuis un puits)

Les coordonnées GPS sont traitées, pour ce qui est de la planimétrie dans LTOP, par la méthode des séries de coordonnées [4]. Les mesures gyroscopiques sont, du point de vue physique, équivalentes aux azimuts astronomiques. Il est tenu compte dans le modèle de la présence d'une correction d'addition inconnue de l'instrument et d'une distorsion locale du système de coordonnées, sous forme d'une inconnue d'orientation Z, commune à toutes les mesures d'une même période.

2.2.2 Le modèle stochastique

Pour former la matrice des poids (notée P), il faut estimer la précision à laquelle les observations seront faites. Le calcul de simulation est tributaire de la qualité de

cette estimation, qui ne pose aucun problème pour les directions et les distances. Dans le cas de coordonnées GPS, elle est fonction de la durée d'observation, de l'extension du réseau et, ce qui est inhabituel, de la méthode de calcul utilisée dans les prétraitements. Un procédé approprié permet d'atteindre une précision centimétrique en planimétrie pour des distances allant jusqu'à 100km, millimétrique localement (1km). L'estimation de la précision des mesures gyroscopiques fera l'objet d'un développement ultérieur plus complet.

2.3 Les indicateurs de précision

La précision est caractérisée par un écart type ou dans le cas d'une variable à 2 dimensions (point de coordonnées Y, X) par une ellipse d'erreur, que l'on peut déterminer à priori, et qui est définie par son demi grand-axe, son demi petit-axe et le gisement du demi grand-axe. Les formules, bien connues, peuvent être trouvées dans [5]. La précision de la position relative de 2 points est quant à elle caractérisée par l'ellipse d'erreur relative (cf. aussi [5]).

2.4 Les indicateurs de fiabilité

Un réseau est considéré comme fiable s'il permet la détection de fautes grossières éventuelles avec une probabilité suffisante ou, en d'autres termes, si les fautes non détectées sont assez petites pour n'avoir aucune influence préjudiciable. Les travaux du professeur hollandais W. Baarda, basés sur la statistique mathématique, ont ouvert la voie à une quantification de la fiabilité, grâce à un certain nombre d'indicateurs également calculés par le logiciel LTOP [6].

2.4.1 La fiabilité interne

Elle concerne les observations proprement dites et s'analyse, dans le cadre d'une simulation à l'aide des indicateurs suivants, pour lesquels on pourra se référer à [5], [7]:

- l'indicateur de fiabilité locale ou redondance partielle z_i indique la participation de la mesure concernée à la surdétermination du réseau.
- la faute limite ∇l_i de chaque observation exprime la plus petite faute grossière que l'on peut encore détecter tout en admettant de courir un risque de 8% (erreur de 2ème type) de ne pas la déceler [7].

2.4.2 La fiabilité externe

Sous l'hypothèse qu'il n'existe qu'une seule faute, on peut déterminer l'influence d'une faute ∇l_i sur les coordonnées de chaque point nouveau du réseau ou sur la position relative de 2 points. Cette possibilité supplémentaire a été développée

dans le cadre du calcul de simulation et intégrée à LTOP.

2.5 Calcul de simulation et détermination de l'erreur de percement d'un tunnel

2.5.1 Définition de l'erreur de percement

L'erreur effective de percement est la contradiction qui apparaît lorsqu'on calcule séparément et à partir de chaque extrémité du tunnel la position du point de jonction [8]. On peut la décomposer selon:

- une composante verticale, suivant la verticale du lieu
- une composante longitudinale, le long de l'axe du tunnel
- une composante transversale, perpendiculairement à l'axe du tunnel

La composante verticale ne sera pas traitée dans le cadre de cet article (cf. §2.2). Il ne sera question que de la planimétrie et plus particulièrement de la composante transversale.

2.5.2 Critères de précision et de fiabilité

L'erreur de percement est une grandeur calculable à posteriori à partir des mesures effectives.

La valeur ainsi obtenue n'est en fait qu'une réalisation particulière de la variable aléatoire «erreur de percement», pour laquelle précision et fiabilité doivent être déterminées.

Dans le cas de la précision, l'ellipse d'erreur relative entre deux points coïncidant (le point de jonction défini tel qu'en 2.5.1) est indépendante du référentiel et du positionnement choisis [7] et est calculable par LTOP. Les écarts types sur les écarts longitudinaux et surtout transversaux s'en déduisent alors simplement (cf. [9], [10]). Dans le cas de la fiabilité, l'influence d'une faute ∇_i sur la différence de coordonnées entre les 2 points à la jonction est indépendante du positionnement choisi [11].

2.5.3 Modélisation du réseau souterrain

Le dispositif de mesure retenu se déduit des objectifs à atteindre (précision et fiabilité) et des contraintes inhérentes à l'exigüité d'un tunnel. Les premiers imposent de mettre en place un réseau garantissant un niveau de contrôle suffisant, par une surdétermination, les secondes ne laissent que peu d'alternatives quant aux moyens d'y parvenir. Dans [12], 4 solutions sont proposées, dérivant toutes de manière plus ou moins complexe d'un cheminement polygonal. Elles sont représentées à la figure 2.

S'ils permettent de garantir un contrôle interne du réseau satisfaisant, ces dispositifs sont insuffisants en matière de pré-

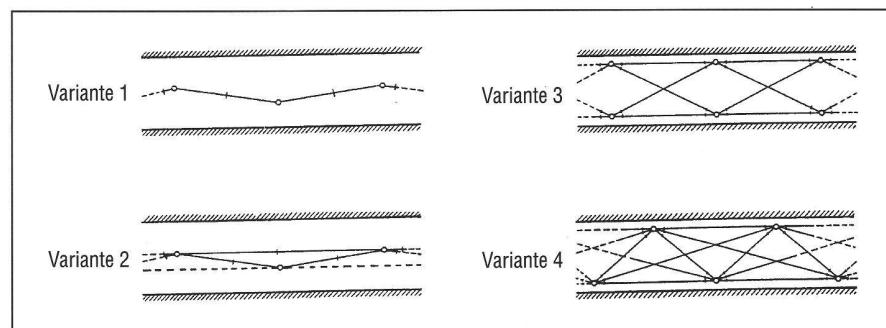


Fig. 2: Exemples de solutions possibles pour le réseau souterrain [12].

cision, dès lors que le tunnel prévu dépasse une certaine longueur. On complètera donc le réseau par des déterminations indépendantes de gisements à l'aide d'un gyroscope.

D'après [12], un dispositif tel que celui de la variante 2 (cf. Fig. 2) renforcé par des mesures gyroscopiques assure un niveau de précision et de fiabilité satisfaisants, le surcroît de travail inhérent à la complexité des variantes 3 et 4 n'est pas en rapport avec le gain de précision qu'elles entraînent. Elles impliquent de plus l'utilisation de consoles murales, faisant intervenir le problème de la réfraction, évité si les points sont situés au centre du tunnel (variante 2).

L'efficacité de ce dispositif repose sur une utilisation optimale du gyroscope, impliquant l'élimination préalable de toutes les erreurs possibles, autres qu'aléatoires. L'influence du champ de pesanteur terrestre irrégulièrement variable (déviation de la verticale) mérite de ce point de vue une attention toute particulière dans une zone aussi sensible que le massif du St. Gotthard. C'est pourquoi l'étude menée dans cette zone avec le Gyromat 2000 de Deutsche Montan Technologie, Bochum (temps de mesure: 8 minutes, précision nominale: 7cc) acquis par l'IGP fait l'objet du prochain paragraphe.

3. Mesures gyroscopiques et déviation de la verticale

3.1 Traitement des mesures gyroscopiques

Comme déjà mentionné au §2.2.1, les mesures gyroscopiques sont équivalentes à des azimuts astronomiques. Les calculs de compensation étant effectués dans le système de projection national, les réductions suivantes permettent de passer aux gisements en projection [13]:

- la correction du mouvement du pôle (pôle actuel -> pôle CIO, Conventional International Origin)
- la réduction à la corde
- la convergence des méridiens

– les corrections instrumentales (étalonnage, température) et l'inconnue d'orientation (cf. 2.2.1)

– la correction de la déviation de la verticale

Les précisions suivantes peuvent être apportées, concernant ces réductions:

– la correction due au mouvement du pôle est négligeable (inférieure à 1cc).

– la convergence des méridiens et la réduction à la corde se font par l'intermédiaire de formules de calcul propres à la projection considérée; elles peuvent donc toujours être déterminées à une précision suffisante. La réduction à la corde est par ailleurs négligeable pour de courtes distances.

– les corrections d'étalonnage et de température sont automatiquement apportées aux mesures par l'instrument, le domaine de correction de l'inconnue d'orientation a été décrit au §2.2.1. Les éventuelles corrections résiduelles doivent être suffisamment petites pour être négligées, ce qui demande évidemment à être prouvé.

– la déviation de la verticale est l'angle entre la verticale du lieu et la normale à l'ellipsoïde de référence. Cette correction permet de passer d'un azimut astronomique à un azimut géodésique, selon:

$$A = \alpha - \eta \cdot \tan \varphi - (\xi \cdot \sin \alpha - \eta \cdot \cos \alpha) \cdot \operatorname{ctg} z \quad (1)$$

où

α est l'azimut astronomique

A est l'azimut géodésique

η est la composante est-ouest de la déviation de la verticale

ξ est la composante nord-sud de la déviation de la verticale

φ est la latitude géographique

z est la distance zénithale vers le point visé

Dans le cas d'un tunnel, où les visées sont quasiment horizontales, $\operatorname{ctg} z \approx 0$, (1) se simplifie selon:

$$A \approx \alpha - \eta \cdot \tan \varphi \quad (2)$$

Systèmes d'information géographique et théorie des erreurs

La correction à apporter à l'azimut devient de ce fait indépendante de l'azimut lui-même et ne dépend plus que de la composante est-ouest de la déviation de la verticale et de la latitude géographique. En Suisse, cette dernière varie entre 45° et 48° , donc $1.00 < \tan \varphi < 1.11$. La correction de la déviation de la verticale est donc de l'ordre de grandeur de sa composante est-ouest, qui dans les Alpes, peut présenter des variations importantes (30cc, voire davantage).

Outre la précision de la mesure gyroscopique, c'est la précision à laquelle la composante est-ouest de la déviation de la verticale peut être définie qui est déterminante, les autres corrections à apporter pouvant être soit négligées, soit calculées, donc toujours obtenues à un niveau de précision suffisant.

3.2 La détermination des composantes de la déviation de la verticale

Elle peut s'effectuer à une précision de 3cc, voire mieux, par comparaison des coordonnées astronomiques et des coordonnées géodésiques du point considéré (détermination de la latitude et de la longitude astronomiques du point au moyen d'un théodolite ou d'une caméra zénithale) selon:

$$\varphi_A - \varphi_G = \xi \quad (3)$$

$$(\gamma_A - \gamma_G) \cos \varphi = \eta \quad (4)$$

Cela suppose que des mesures astronomiques puissent être effectuées au point considéré, ce qui est évidemment impossible dans un tunnel, où la connaissance de η est néanmoins indispensable à la réduction des mesures gyroscopiques. La seule alternative possible est donc d'utiliser un modèle mathématique pour la définir. La Suisse dispose d'un modèle astrogéodésique du géoïde depuis 1978, fourni, entre autres informations, les composantes de la déviation de la verti-

cale en n'importe quel point du pays (y compris sous terre), avec un écart type de 3cc en surface. La modélisation se fait grâce à un modèle numérique de terrain à mailles de 500 m pour la topographie, tient compte de la discontinuité de Mohorovic entre le manteau et la croûte terrestre, de la lithosphère et de la masse très dense du corps d'Ivréa. L'écart entre composantes calculées et mesurées par voie astronomique est connu pour une centaine de points, ce qui permet d'améliorer considérablement le modèle.

3.3 Les travaux de recherche menés par l'EPF Zurich

La campagne de mesure menée par l'EPF Zurich au cours de l'été 1992 a permis de tester la précision effective des mesures gyroscopiques (et de leur réduction dans le système de projection) pour s'assurer de la validité des hypothèses formulées dans le cadre des calculs de simulation. Celles-ci ne sont correctes que si la précision effective de l'instrument correspond aux indications fournies par le constructeur, que si les composantes de la déviation de la verticale calculées à l'aide du modèle du géoïde sont d'une précision suffisante (y compris sous terre) et que si les influences restantes non prises en compte sont effectivement négligeables. A cette fin, 2 cheminement polygonaux, renforcés par des mesures gyroscopiques, ont été mesurés dans la région du St-Gothard. Le premier simule un réseau de tunnel à ciel ouvert sur une longueur de 8.6 km, le second, de 7.9 km de longueur, a été mesuré dans le tunnel de service du tunnel routier du St-Gothard. Une description complète de ces travaux et des résultats qu'ils ont permis d'atteindre peut être trouvée dans [14]. Nous nous contenterons ici d'indiquer la démarche suivie:

– détermination de tout ou partie des points du cheminement par des mesures indépendantes (GPS, rattachement

à un réseau existant,...) pour obtenir des coordonnées de référence de ces points.

– calcul du cheminement proprement dit de 4 manières différentes:

1. sans mesures gyroscopiques et sans correction de la déviation de la verticale
2. sans mesures gyroscopiques et avec correction de la déviation de la verticale
3. avec mesures gyroscopiques et sans correction de la déviation de la verticale
4. avec mesures gyroscopiques et avec correction de la déviation de la verticale

– comparaison de ces 4 déterminations sur la base des critères suivants:

- test du modèle, précisions à priori-à posteriori pour les différents types de mesures
- différence de coordonnées aux points communs cheminement-réseau de référence
- précision de la détermination des coordonnées

De cette comparaison pour les 2 cheminements, il ressort clairement que le calcul 4 fournit les meilleurs résultats alors que le calcul 3 conduit aux plus mauvais, particulièrement en ce qui concerne les différences de coordonnées entre points communs cheminement-réseau de référence. Les figures 3 et 4 en fournissent l'illustration.

Compte-tenu des précisions de détermination des points, les différences de coordonnées constatées pour les calculs 1, 2 et 4 par rapport à la référence ne sont pas significatives, celles constatées pour le calcul 3 le sont; deux remarques s'en déduisent:

- la non prise en compte de la déviation de la verticale conduit évidemment à des résultats faux, ce qui incite à penser qu'il vaut mieux s'abstenir d'ajoin-

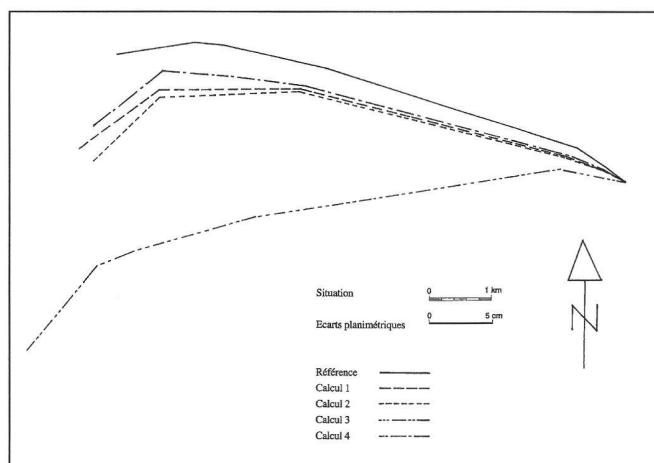


Fig. 3: Différences de coordonnées pour le tunnel simulé à ciel ouvert.

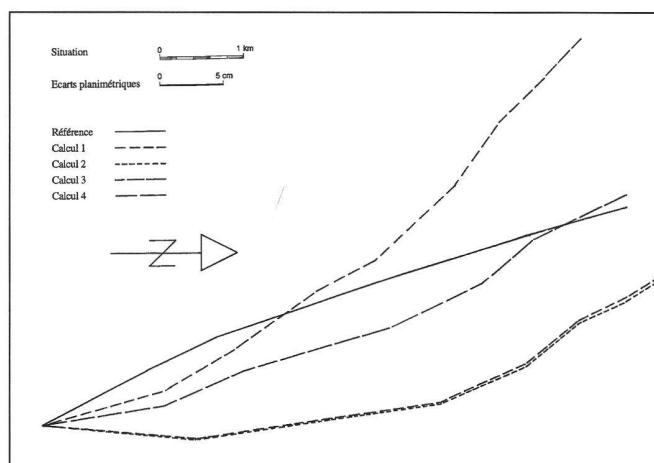


Fig. 4: Différences de coordonnées pour le réseau du tunnel de service du tunnel routier du St-Gothard.

dre des mesures gyroscopiques au réseau si celles-ci n'ont pas au préalable été corrigées de l'influence de la déviation de la verticale. Cette remarque ne peut s'appliquer qu'aux 2 réseaux calculés, où la déviation de la verticale est variable.

- l'hypothèse selon laquelle les composantes de la déviation de la verticale peuvent aussi être obtenues pour des points situés sous terre et à une précision suffisante avec le modèle de calcul utilisé est confirmée; Cette remarque ne peut s'appliquer qu'au réseau du tunnel de service du tunnel routier du St-Gothard, sa généralisation devrait faire l'objet d'une étude plus approfondie.

Le gain de précision fourni par les mesures gyroscopiques est considérable. Pour le dernier point du premier cheminement, le demi grand-axe de l'ellipse d'erreur atteint 134 mm pour le calcul 2, 33 mm pour le calcul 4. Pour le dernier point du second cheminement, ces valeurs atteignent 275 mm pour le calcul 1, 40 mm pour le calcul 3. L'adjonction de mesures gyroscopiques est ainsi justifiée.

La comparaison à priori-à posteriori des précisions confirme la valeur de 7cc pour les mesures gyroscopiques. En effet, l'estimation à priori était de 8cc (7cc pour la mesure et 3cc pour η , cf. 3.2); les valeurs à posteriori étaient de 7cc pour le premier cheminement (calcul 4) et de 5cc pour le second cheminement (calcul 4). Les résultats du calcul vont faire l'objet du prochain paragraphe.

4. Résultats du calcul de simulation

4.1 Tracé de la ligne de base

Le calcul de simulation a été effectué début 1992, alors que le tracé définitif du tunnel n'était pas encore fixé. Diverses solutions étaient alors envisagées (cf. [15]), l'une d'entre elles a servi de base au calcul (cf. Fig. 5). La profondeur des puits de Tujetsch I et II est d'environ 800 m, celle du puits de Polmengo d'environ 300 m. Une galerie de sondage est en voie de creusement à partir de Polmengo pour localiser l'endroit le plus favorable pour traverser la couche de la Piora-Mulde, de perçement très délicat. De plus amples informations relatives au tracé figurent dans [16].

4.2 Le réseau

Limité à la planimétrie (cf. 2.2), il regroupe le réseau de surface, datant du début des années 70 et en partie contrôlé en 1992 (cf. [17]), le réseau souterrain et la liaison entre les deux. Le réseau de surface ayant été conçu pour une autre variante du projet, une densification dans les secteurs des portails et des puits devra être entreprise. Pour la simulation, la liai-

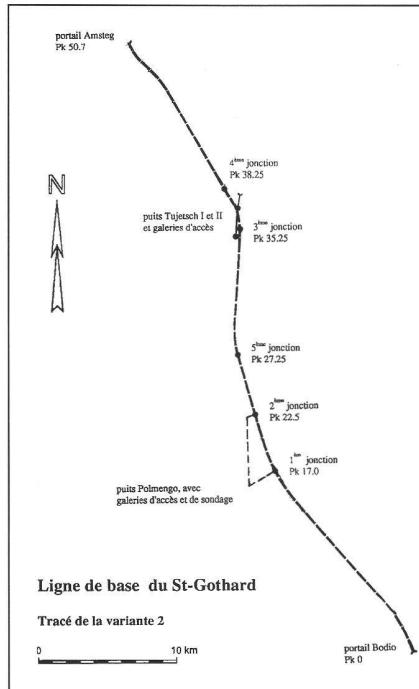


Fig. 5: Tracé de la variante 2 et points de jonction prévus.

son est figurée par des visées directes entre le point du portail (ou du puits) et les 3 ou 4 points du réseau de surface les plus proches. Des mesures GPS, sur à chaque fois deux de ces points sont prévues en complément. Le réseau souterrain couvre le tunnel, les galeries d'accès et les puits, conformément au modèle du § 2.5.3. La distance entre points consécutifs est de 500 m en ligne droite, de 250 m dans les courbes. Des mesures gyroscopiques, toutes les 8 stations vers le point précédent et le point suivant renforcent le dispositif. La liaison entre les niveaux inférieurs et supérieurs des puits est simulée par des différences de coordonnées (suivant les deux axes du repère) entre leurs centres respectifs. La méthode par laquelle cette liaison sera assurée en pratique n'est pas encore définie; des études sont en cours. L'orientati-

on au niveau inférieur est fournie par les seules mesures gyroscopiques.

4.3 Conditions de calcul

5 tronçons (voir Fig. 5) ont été définis à partir du calendrier prévisionnel de perçement (cf. [16]). Un calcul séparé a été effectué pour chacun d'entre eux, tenant compte de toutes les mesures faites jusqu'à la date de la jonction. En fixant le PK 0 au portail sud (Bodio), on a défini :

- tronçon 1: BODIO - POLMENGO, jonction au PK 17
- tronçon 2: POLMENGO - PIORA-MULDE, jonction au PK 22.5
- tronçon 3: TUJETSCH I - TUJETSCH II, jonction au PK 35.25
- tronçon 4: AMSTEG - TUJETSCH I, jonction au PK 38.25
- tronçon 5: TUJETSCH II - PIORA-MULDE, jonction au PK 27.25

Les 5 réseaux calculés sont des réseaux libres (un point fixe et un gisement). Les autres points sont tous nouveaux, déterminés par des observations des types suivants, aux précisions indiquées:

- directions: 3cc
- mesures gyroscopiques: 7cc
- distances: 2 mm + 2 mm / km
- différences de coordonnées: 10 mm pour une profondeur d'environ 500 m (descente de base dans les puits)
- mesures GPS: 10 mm

Les tests statistiques et la détermination des rectangles de fiabilité se font sur la base de valeurs de 2.5 pour l'erreur résiduelle normée w_i et de 1% pour l'erreur de 2ème type β . La déviation de la verticale, est intégrée dans LTOP sous forme d'une correction à apporter aux observations, donc à caractère systématique. Elle ne peut effectivement s'effectuer qu'à posteriori. La préanalyse ne prenant en compte que les erreurs aléatoires, fait l'hypothèse que cette correction a déjà été apportée aux observations concernées (cf. aussi § 3.).

tronçon	NA (mm)	NB (mm)	GIS (NA)	MFA (mm)	MFB (mm)	GIS(MFA)
Bodio - Polmengo	231.8	171.9	253.8 g	91.9	24.1	54.3 g
Polmengo - Piora	203.1	161.6	0.0	58.3	17.4	94.6
Tujetsch I - Tujetsch II	68.3	68.3	100.0	24.0	19.7	93.2
Tujetsch I - Amsteg	152.7	26.1	256.5	83.6	16.8	65.6
Piora - Tujetsch II	155.5	19.9	95.5	83.2	16.5	95.2

Tab.1: Résultats des calculs de simulation.

Systèmes d'information géographique et théorie des erreurs

4.4 Valeurs à respecter

- 10 cm pour l'écart-type de l'erreur de percement (composante transversale). Sur le tronçon le plus long (17 km) cela correspond à 5.8 mm par km de tunnel percé, soit un peu plus que la valeur fixée pour le tunnel sous la Manche (4.4 mm par km de tunnel percé, cf. [18]).
- 25 cm pour la demi-longueur d'un rectangle de fiabilité (absolu pour un point du réseau souterrain ou relatif pour la jonction).

4.5 Résultats

Les résultats, tronçon par tronçon, des calculs effectués sont rassemblés dans le tableau 1 où NA et NB sont les dimensions du rectangle (demi-longueur, demi-largeur), GIS(NA) le gisement de la direction NA et MFA, MFB, GIS(MFA) les éléments de l'ellipse d'erreur relative à la jonction. Les calculs de simulation effectués ont eu pour but principal de prouver que les limites fixées au §4.4, tant en ce qui concerne les écarts types que les indicateurs de fiabilité, pouvaient être partout respectées pour le réseau de référence envisagé. Cet objectif a été partout atteint, le premier tronçon, le plus long, s'avérant à cet égard le plus critique.

5. Conclusion

Le calcul de simulation effectué, l'étude relative à l'influence de la déviation de la verticale sur les mesures gyroscopiques, ainsi que d'autres études dont il n'a pas été question dans le présent article, ont permis d'établir les exigences que les entreprises en charge des travaux topographiques du tunnel de base du St-Gothard auront à respecter et leur fournissent des indications quant aux moyens d'y parvenir, libre à eux d'en tenir compte ou pas. Ils devront en tous les cas fournir la preuve que les méthodes qu'ils préconisent

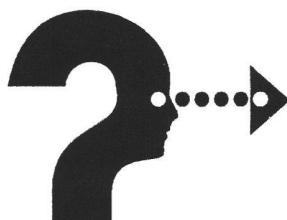
permettent d'atteindre les objectifs fixés, et ceci assez rapidement; la procédure de mise au concours des travaux topographiques pour le projet de «nouvelles lignes ferroviaires à travers les Alpes» a en effet été lancée au courant du mois de septembre, le début des travaux effectifs de percement étant prévu pour le courant de l'année 1996.

Bibliographie:

- [1] collectif: NLFA: nouvelle ligne ferroviaire à travers les Alpes, publié par le Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie, juillet 1992.
- [2] collectif: AlpTransit, publié par le Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie, mai 1990.
- [3] M. Mayoud: Métrologie géodésique des grands accélérateurs de particules, Revue XYZ No 50, janvier 1992.
- [4] A. Carosio: La combinaison de mesures terrestres et par satellite dans les réseaux planimétriques, Mensuration, Photogrammétrie, Génie rural, novembre 1992.
- [5] A. Carosio: Fehlertheorie und Ausgleichsrechnung, Band I, Vorlesungs-script, 1992.
- [6] H. Dupraz: Les contrôles de qualité pour les travaux topographiques en Suisse, Revue XYZ No 59, 2^e trimestre 1994.
- [7] A. Carosio: La théorie de la fiabilité dans le domaine de la mensuration, T. Bur-nand: Le modèle de fiabilité de la mensuration nationale suisse, Fiabilité dans la mensuration: journée d'étude du 16 mars 1990, ETH-Hönggerberg Zurich, Rapport IGP No 169.
- [8] P. Gerber: Die Genauigkeit freier Netze in kartesischer Darstellung und ihre Anwendung zur Absteckung langer Stollen, Thèse de doctorat No 5722, EPFZ, 1977.
- [9] K. Rinner: Über die zweckmässige Anlage von Tunnelnetzen, VII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessungen hoher Präzision, TH Darmstadt 1976.
- [10] U. Schor: Absteckung langer Tunnel, Rapport IGP No 205, septembre 1992.
- [11] J. van Mierlo: Hypothesentests und Zuverlässigkeitssaussagen in Tunnelnetzen, VIII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung 1980, Zurich.
- [12] J. Krüger, W. Niemeier: Genauigkeits- und Zuverlässigkeitssanalyse bei der Anlage von Tunnelabsteckungsnetzen, IX. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Graz, 1984.
- [13] M. Zanini: Hochpräzise Azimutbestim-mung mit Vermessungskreiseln, Rap-port IGP No 209, décembre 1992.
- [14] M. Zanini, R. Stengele, M. Plazibat: Kreiselazimute in Tunnelnetzen unter Einfluss des Erdschwerefeldes, Rap-port IGP No 214, mars 1993.
- [15] Ingenieurgemeinschaft GBT: Gotthard-Basistunnel, Tunnelkonzepte: zusammenfassender Bericht, Office fédéral des transports, AlpTransit, août 1991.
- [16] O. Reis: Calculs de simulation pour la ligne de base du St-Gothard, Rapport IGP No 231, janvier 1994.
- [17] O. Reis: Die Überprüfung des Gott-hardbasisnetzes, Rapport IGP No 224, juin 1993.
- [18] N. Korritke, T. Wunderlich: Le gyromat, un gyrothéodolite de grande précision et son emploi dans l'Eurotunnel, Revue XYZ No 40, juillet 1989.

Adresse des auteurs:

Prof. Dr. A. Carosio, O. Reis
Institut de Géodésie et de Photogrammétrie
Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich
CH-8093 Zurich



Wohn- und Büroeinrichtung / Bürotechnik

- K + E Vertretung (LEROY, HERCULENE, STABILENE etc.)
- Fax- und Kopiergeräte, allgem. bürotechn. Geräte / Systeme

Vermessungstechnik

- Laser- und Nivelliergeräte
- Kabellichtlote / Längenmessgeräte
- allgem. Vermessungszubehör

Wernli & Co

Telefon 064 - 81 01 75
Fax 064 - 81 01 76

Dorfstrasse 272
5053 Staffelbach