

MÉTHODES GÉODÉSIQUES ET MODELES MATHÉMATIQUES POUR L'IMPLANTATION DES NOUVELLES TRANSVERSALES ALPINES

A. Carosio, O. Reis
IGP EPF Zurich, Suisse

ABSTRACT *

In connection with the drilling of a new 57km long St Gothard tunnel forming the backbone of a planned new trans-Alpine rail link, the Swiss Federal Railways instructed the Swiss Federal Institute of Technology Zurich to make studies of mathematical models for the definition of quality of the geodetic work required. The simulation computations have enabled tests of the levels of precision, and especially of reliability, offered by a reference network whose underground portion has been given particular attention. Because of the length of the tunnel, gyroscopic observations are required in addition to conventional methods. However, in a mountainous area such as the St Gothard range, the effects of variations in the earth's gravity field are not negligible. Experiments have been carried out on the effects of such variations on gyroscopic azimuths. The accuracy with which these can be integrated into the network simulations has been deduced and the corresponding calculations have been done. The results are briefly presented.

(*)The english version of this paper is also available and can be obtained from our institute.



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].

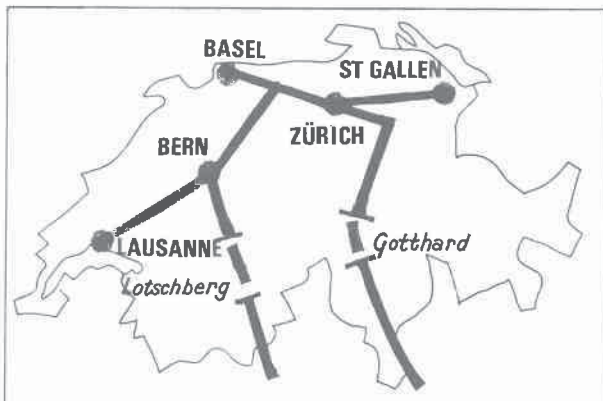


Fig. 1 - Représentation schématique des nouvelles lignes ferroviaires à travers les Alpes [2]

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 Chemins de Fer Fédéraux (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 pour cela recensé les travaux à exécuter et étudié les moyens de les mener à bien, permettant ainsi de localiser les points critiques requérant un examen plus 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 cependant laissées à la libre appréciation des entrepreneurs. Ces travaux, confiés à notre institut 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 œuvre. Le calcul de simulation global a ainsi permis de tester les niveaux de précision et de fiabilité offerts par un réseau de référence. Le second paragraphe, après une brève présentation du modèle de calcul, détaille les indicateurs utilisés, de précision et surtout de fiabilité, et présente 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 expérimentale 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. MODELE MATHEMATIQUE 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 œuvre 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 (Bern) 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 100 km, millimétrique localement (1 km). 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. Cette dernière est définie par la connaissance de son demi grand-axe a, de son demi petit-axe b et du gisement ω du grand-axe, dont les formules bien connues (cf. [5] par exemple) ne font intervenir que σ_0 , écart type de l'unité de poids et les éléments q_{xx} , q_{xy} et q_{yy} de la matrice des cofacteurs des inconnues (notée Q_{xx}) pour le point correspondant, où :

$$Q_{xx} = (A^T P A)^{-1} \quad (1)$$

Dans le cas d'ellipses d'erreur relatives, entre par exemple 2 points P_1 et P_2 , tels que :

$$\Delta x = x_2 - x_1 \quad (2)$$

$$\Delta y = y_2 - y_1 \quad (3)$$

il faut remplacer x par Δx et y par Δy dans les formules de calcul selon :

$$q_{\Delta x \Delta x} = q_{x_1 x_1} - 2 q_{x_1 x_2} + q_{x_2 x_2} \quad (4)$$

$$q_{\Delta y \Delta y} = q_{y_1 y_1} - 2 q_{y_1 y_2} + q_{y_2 y_2} \quad (5)$$

$$q_{\Delta x \Delta y} = q_{x_1 y_1} - q_{y_1 x_2} - q_{x_1 y_2} + q_{x_2 y_2} \quad (6)$$

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 :

■ l'indicateur de fiabilité locale ou redondance partielle z_i , indiquant la participation de la mesure concernée à la surdétermination du réseau, mathématiquement exprimée par [7] :

$$z = \frac{q_{vv}^{(ii)}}{q_{ii}^{(ii)}} \quad (7)$$

où z_i est l'indicateur de fiabilité locale pour la $i^{\text{ème}}$ observation

$q_{vv}^{(ii)}$ est le $i^{\text{ème}}$ élément diagonale de la matrice des cofacteurs des erreurs résiduelles, $Q_{vv} = Q_{ii} - A Q_{xx} A^T$

$q_{ii}^{(ii)}$ est le même élément de la matrice des cofacteurs des observations, Q_{ii} inverse de la matrice des poids P

z_i peut varier de 0 à 1 (ou de 0 à 100%), $z_i = 0$ indique le cas d'une observation non contrôlée, $z_i = 0.5$ celui d'une double mesure et $z_i = 1$ celui d'une mesure infiniment bien contrôlée [7].

■ la faute limite ∇_{li} de chaque observation. Sa détermination suppose la connaissance préalable des éléments suivants (cf. aussi [5], [7]) :

- le test statistique et la méthode prévus pour le contrôle des résultats.

- la valeur limite w_{\max} de w_i (erreur résiduelle normée, rapport du résidu à son écart type cf. [5], [7]), au-delà de laquelle la probabilité qu'il y ait une faute est suffisamment grande pour pouvoir rejeter le test (ex. $w_{\max} = 2.5$ correspond à une erreur de 1^{er} type $\alpha = 1\%$ pour un degré de liberté = 1). L'erreur de 1^{er} type α est la probabilité de rejeter H_0 (hypothèse selon laquelle l'observation l_i ne contient pas de faute grossière) quand elle est juste.

- l'erreur de 2^{ème} type est la probabilité β d'accepter H_0 à tort, en présence d'une erreur dépassant la valeur limite fixée.

Les relations entre ces différents éléments sont représentées à la figure 2.

On peut dès lors définir ∇_{li} , exprimant la plus petite faute grossière que l'on peut encore détecter tout en admettant de courir un risque de $\beta\%$ de ne pas la déceler [7]. De la Fig. 2, on a :

$$\delta = w_{\max} + d \quad (8)$$

$$\nabla_{li} = \frac{\sigma_{vi}}{z_i} \cdot \delta = \frac{\sigma_{vi}}{\sqrt{z_i}} \cdot \delta \quad (9)$$

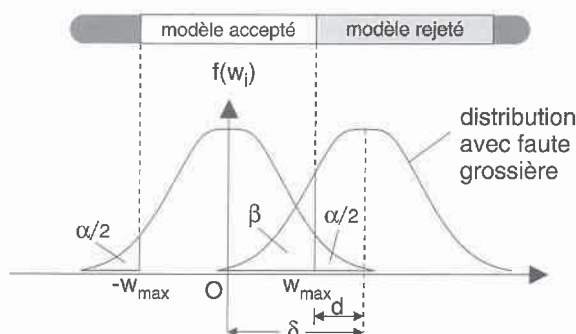


Fig. 2 - Domaines d'acceptation et de rejet du modèle

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 ∇_{li} sur les coordonnées de chaque point nouveau du réseau. En effet, dans le

cas de la méthode des observations médiates, les inconnues s'expriment sous la forme vectorielle :

$$x = (A^T P A)^{-1} \cdot A^T P \cdot l \quad (10)$$

où x est le vecteur des inconnues et l celui des observations

Si l'on remplace l par le vecteur ∇_{li} composé d'éléments nuls sauf le $i^{\text{ème}}$ terme, l'influence de cette faute limite sur les coordonnées des nouveaux points du réseau s'exprimera par :

$$N = (A^T P A)^{-1} \cdot A^T P \cdot \nabla_{li} \quad (11)$$

Le vecteur déplacement en chaque point se déduit alors des informations contenues dans le vecteur N , à savoir ∇x et ∇y en chaque point nouveau. En répétant le même processus pour chacun des $(n-1)$ ∇_{li} restants, on obtient un faisceau de n vecteurs en chaque point nouveau.

Il est possible également de déterminer l'influence d'une faute grossière ∇_{li} sur la position relative de 2 points. Il suffit pour cela de combiner les informations du vecteur N pour ces 2 points, relatives à chaque fois à la même faute grossière ∇_{li} . Il en résultera un faisceau de n vecteurs relatifs à la différence de coordonnées entre ces 2 points. Cette possibilité supplémentaire a été développée dans le cadre du calcul de simulation et intégrée à LTOP.

Pour faciliter la lisibilité de la représentation graphique de cet indicateur de fiabilité, le faisceau de vecteurs (rapporté à un point ou à la position relative de 2 points) est figuré par un rectangle orienté. On désigne alors par N_A le vecteur ayant la plus grande norme et par N_B la plus grande composante perpendiculaire à N_A . Le gisement du vecteur N_A fournit l'orientation du rectangle, indépendante de l'orientation du système de coordonnées dans lequel on travaille.

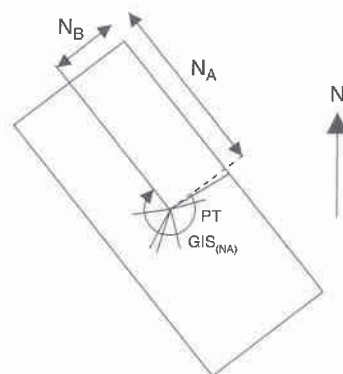


Fig. 3 - Représentation graphique des rectangles de fiabilité

2.5 Le calcul de simulation appliqué à la 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 a 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 peut être déterminée par LTOP. Les écarts types sur les écarts longitudinaux et surtout transversaux s'en déduisent alors simplement [9], [10]. Dans le cas de la fiabilité, l'influence d'une faute ∇_{ij} 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 d'une part des objectifs à atteindre (précision et fiabilité) et d'autre part des contraintes inhérentes à l'exiguïté d'un tunnel. Les premiers imposent de mettre en place un réseau garantissant un niveau de contrôle suffisant, donc 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 4.

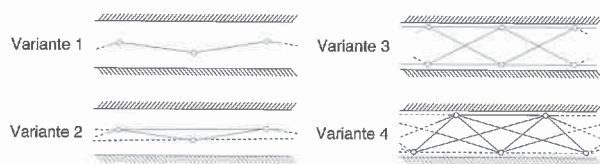


Fig. 4 - exemples de solutions possibles pour le réseau souterrain [12].

S'ils permettent de garantir un contrôle interne du réseau satisfaisant, ces dispositifs sont insuffisants en matière de précision, dès lors que le tunnel prévu dépasse une certaine longueur. En effet, si l'on considère un cheminement polygonal simple, on peut établir la relation [9], [10] :

$$t_x = t_0 + \sum_{i=1}^x \beta_i - (x - 1) \cdot 200''$$

où t_x est la direction du $x^{\text{ème}}$ côté du cheminement polygonal ; t_0 est la direction initiale d'orientation ; β_i est le $i^{\text{ème}}$ angle du cheminement

Par application de la loi de propagation des erreurs, il en découle la relation suivante concevant les écarts types, fonction linéaire de x :

$$\sigma_x^2 = \sigma_0^2 + x \cdot \sigma_\beta^2 \quad (13)$$

Pour atténuer l'influence de x , on complète le réseau par des déterminations indépendantes de gisements à l'aide d'un gyroscope, dont l'emploi se justifie à partir du moment où :

$$\sigma_{\text{gyro}} \leq \sigma_x \quad (14)$$

donc, au niveau du nombre des côtés du cheminement, lorsque :

$$x \geq \frac{\sigma_{\text{gyro}}^2 - \sigma_0^2}{\sigma_\beta^2} \quad (15)$$

D'après [12], un dispositif tel que celui de la variante 2

(cf. Fig. 4) 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 toutefois sur une utilisation optimale du gyroscope, ce qui implique que toutes les erreurs possibles, autres qu'aléatoires, soient préalablement éliminées. 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-Gothard. C'est pourquoi l'étude expérimentale menée dans cette zone avec le Gyromat 2000 de Deutsche Montan Technologie, Bochum (temps de mesure : 8 minutes, précision nominale : 7'') acquis par notre institut 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 suffisamment faible pour qu'on puisse la négliger (inférieure à 1'').
- 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 déjà été décrit au §2.2.1. Les éventuelles corrections résiduelles doivent alors 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. L'application de cette correction permet de passer d'un azimut astronomique à un azimut géodésique, selon :

$$A = \alpha - \eta \tan \varphi - (\xi \cdot \sin \alpha - \eta \cdot \cos \alpha) \cdot \cotg z \quad (16)$$

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, $\text{ctg } z \approx 0$, (16) se simplifie donc selon :

$$A \approx \alpha - \eta \tan \varphi \quad (17)$$

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 ($30''$, voire davantage).

Outre la précision de la mesure gyroscopique elle-même, 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 soit être 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 $3''$, 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 :

$$\varphi_A - \varphi_G = \xi \quad (18)$$

$$(\lambda_A - \lambda_G) \cos \varphi = \eta \quad (19)$$

Cela suppose cependant 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 calculer. La Suisse dispose d'un modèle astro-géodésique du géoïde depuis 1978, fournissant, entre autres informations, les composantes de la déviation de la verticale en n'importe quel point du pays (y compris sous terre), avec un écart type de $3''$ 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'Ivrea. 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 cheminements 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, alors que 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 consomma les différences de coordonnées entre points communs cheminement-réseau de référence. Les figures 5 et 6 en fournissent l'illustration.

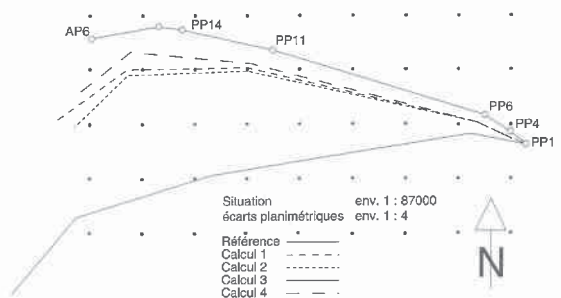


Fig. 5 - Différences de coordonnées pour le tunnel simulé à ciel ouvert

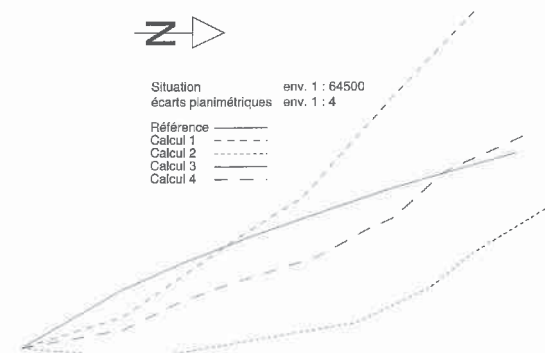


Fig. 6 - Différences de coordonnées pour le réseau du tunnel de service du tunnel routier du St-Gothard

Compte-tenu des précisions atteintes dans la 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'adjoindre 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 cependant 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 également être obtenues pour des points situés sous terre et à une précision suffisante avec le modèle de calcul utilisé est ici confirmée. Cette remarque ne peut cependant 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 entraîné par les mesures gyroscopiques est considérable. Pour le dernier point du premier cheminement, le demi grand-axe de l'ellipse d'erreur atteint 1, 34 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. La nécessité de renforcer le cheminement par des mesures gyroscopiques est ainsi justifiée.

La comparaison des précisions estimées a priori et obtenues a posteriori, confirme la valeur de $7''$ pour les mesures gyroscopiques. En effet, l'estimation a priori était de $8''$ (donnée par $7''$ pour la mesure elle-même et $3''$ pour la composante Est-Ouest de la déviation de la verticale, cf. 3.2) ; pour le premier cheminement et pour le calcul 4, la valeur a posteriori était de $7''$, pour le second cheminement et pour le calcul 4, la valeur a posteriori était de $5''$. Le calcul prendra donc une valeur de $7''$ en compte, ses résultats font 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 (décrites dans [15]) et l'une d'entre elles a servi de base au calcul (variante 2, cf. Fig. 7). La profondeur des puits de Tujetsch I et II est d'environ 800 m, celle du puits de Polmengo d'environ 300 m. Il est prévu de creuser une galerie de sondage à partir de Polmengo pour localiser l'endroit le plus favorable pour traverser la couche de la Piora-Mulde, de percement 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 simula-

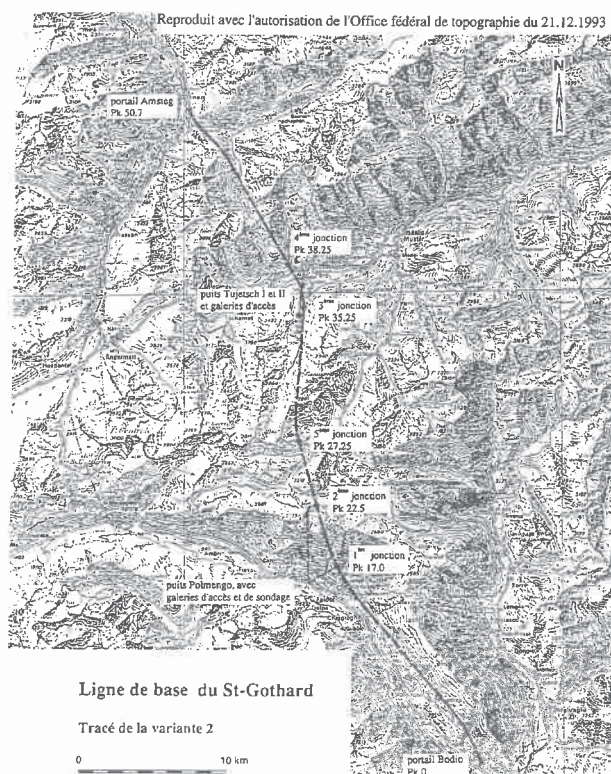


Fig. 7 - Tracé de la variante 2 et points de jonction prévus

tion, la liaison 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'orientation au niveau inférieur est fournie par les seuls mesures gyroscopiques.

4.3 Conditions de calcul

5 tronçons (voir Fig. 7) ont été définis à partir du calendrier prévisionnel de percement (cf. [16]). Un calcul séparé a été effectué pour chacun d'entre eux, tenant compte de toutes les mesures faites jusque'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 3^{cc}
- mesures gyroscopiques 7^{cc}
- distances 2 mm + 2 mm / km
- différences de coordonnées 10 mm pour une profondeur d'environ 500m
(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 2^{ème} 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 préanalyses ne prenant en compte que les erreurs aléatoires, fait l'hypothèse que cette correction a déjà été apportée aux observations concernées (cf. aussi § 3).

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 caractéristiques de l'ellipse d'erreur relative à la jonction.

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

Tableau 1- Résultats des calculs de simulation

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

Les calculs de simulation effectués, 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 exi-

gences 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 N°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 Vorlesungsscript, 1992
- [6] H. Dupraz Les contrôles de qualité pour les travaux topographiques en Suisse Revue XYZ N°59, 2è trimestre 1994
- [7] A. Carosio T. Burnand La théorie de la fiabilité dans le domaine de la mensuration 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 N° 169
- [8] P. Gerber Die Genauigkeit freier Netze in kartesischer Darstellung und ihre Anwendung zur Absteckung langer Stollen Thèse de doctorat N° 5722, EPFZ, 1977
- [9] K. Rinner Ueber die zweckmässige Anlage von Tunnelnetzen VII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessungen hoher - Präzision, TH Darmstadt 1976
- [10] U. Schor Absteckung langer Tunnel Rapport IGP N° 205, septembre 1992
- [11] J. v. Mierlo Hypothesentests und Zuverlässigkeitsaussagen in Tunnelnetzen VIII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung 1980, Zurich
- [12] J. Krüger, W. Niemeier Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsanalyse bei der Anlage von Tunnelabsteckungsnetzen, IX. Internationale Kurs für Ingenieurvermessung, Graz, 1984
- [13] M. Zanini Hochpräzise Azimutbestimmung mit Vermessungskreiseln Rapport IGP N° 209, décembre 1992
- [14] M. Zanini R. Stengele M. Plazibat Kreiselazimute in Tunnelnetzen unitaire Einfluss des Erdschwere-fendes Rapport IGP N° 214, mars 1993
- [15] Ingenieur-gemeinschaft 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 N° 231, janvier 1994
- [17] O. Reims Die Ueberprüfung des Gotthardbasissetzes Rapport IGP N° 224, juin 1993
- [18] N. Korritke T. Wunderlich Le gyromat, un gyrothéodolite de grande précision et son emploi dans l'Eurotunnel Revue XYZ N° 40, juillet 1989

Adresse des auteurs

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