

Géodésie et contrôle géométrique des ouvrages souterrains d'un grand accélérateur de particules

M. MAYOUD, Ingénieur ESGT, Post-Graduate ITC, Chef du groupe de Géodésie Appliquée du CERN
M. HAYOTTE, G. TROUCHE, Géomètres Principaux, Responsables de la Topométrie Souterraine

I - INTRODUCTION

La construction d'un accélérateur de particules exige une très grande précision de mise en place des composants de la machine : de proche en proche, le positionnement doit être assuré à 0,1 mm près (1σ) et la précision absolue de l'anneau doit être aussi bonne que possible. Cette géométrie de l'accélérateur est rigoureusement fixée par les paramètres du système de confinement magnétique, qui déterminent l'orbite théorique du ou des faisceaux de particules.

Le contour géométrique ainsi défini n'est pas modifiable. Il ne peut donc s'accommoder d'aucune manière des éventuelles déformations imposées par l'ouvrage de génie civil. D'autre part, des raisons économiques conduisent à dimensionner plutôt faiblement les galeries, et cela augmente les risques de problèmes topologiques lors de l'installation de l'accélérateur et de ses infrastructures. C'est pourquoi des tolérances géométriques extrêmement sévères ont été imposées aux tunnels et cavernes du LEP.

S'appuyant sur la longue expérience particulière du Groupe de Géodésie Appliquée, ces tolérances ont été spécifiées aux frontières du possible, mais en fournissant un ensemble de données initiales parfaitement cohérent et en définissant précisément les moyens techniques permettant d'y parvenir, dans une bonne collaboration entre les géomètres du CERN et ceux des entreprises. Les marges des erreurs admissibles ont été fixées aussi bien pour le stade brut ou semi-fini que pour l'ouvrage fini, afin de garantir les épaisseurs minimales de béton.

Sans détailler ici l'ensemble des spécifications, il convient néanmoins de mentionner les tolérances suivantes :

- le tunnel brut ou semi-fini doit être tel que son axe réel soit toujours dans un cercle de tolérance $\varnothing 16$ cm centré sur l'axe théorique de référence, en garantissant l'épaisseur minimale de béton sur toute section et le libre passage d'un gabarit minimum $\varnothing 3,60$ m (figure 1) ;
- le rayon des tunnels finis est tolérancé à ± 1 cm ;
- la chape finale des ouvrages est définie à $+ 0, - 1$ cm ;
- les puits, cavernes et ouvrages annexes sont tolérancés à $+ 1, - 3$ cm.

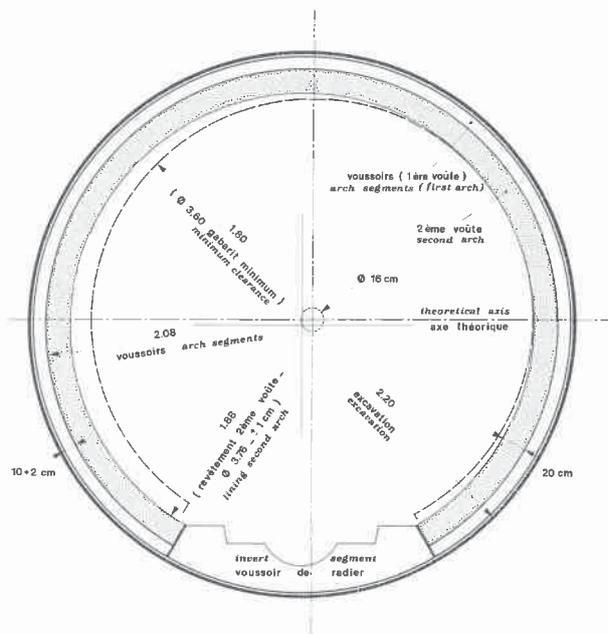


Figure 1 : Tolérances géométriques - Tunnel Principal.

Dans le soutien apporté aux entreprises, les objectifs et les prestations de la Section Topométrie Souterraine du Groupe de Géodésie Appliquée ont été essentiellement motivés par les considérations suivantes :

- fournir des données géodésiques et un ensemble de points de référence aussi irréprochables que possible, afin que cette qualité garantisse un maximum de confiance et de crédibilité dans les diverses opérations de forage et de construction ;
- préserver les intérêts du CERN quant à la conformité géométrique des ouvrages par des contrôles rigoureux à divers stades des travaux ;
- limiter les risques d'erreurs - donc de conflits - par des contrôles préventifs, opportuns et judicieux, qui facilitent la tâche des entreprises.

II - INFRASTRUCTURE GEODESIQUE EN SURFACE ET EN FOND DE PUIITS

Les exigences propres à la géométrie de l'accélérateur nécessitaient un réseau géodésique de surface d'une très grande précision, qui a été maté-

réalisé par des piliers stables, dotés d'une isolation thermique et d'un système de centrage forcé. Ce réseau a été mesuré à l'aide d'un distancemètre électronique à deux lasers modulés, le Terramètre, d'une précision de 10^{-7} (1 mm à 10 km).

La détermination des altitudes a été effectuée par un réseau maillé de nivellement de haute précision, représentant environ 80 km de cheminements, pour rattacher l'ensemble des piliers. Des mesures gravimétriques ont été prises aux nœuds des boucles de nivellement, afin de calculer les corrections orthométriques afférentes à chaque segment.

Enfin, en raison de la proximité de la haute chaîne du Jura, une étude complète des déviations de la verticale a été entreprise. Ce phénomène physique résulte des anomalies gravimétriques engendrées par les masses topographiques, avec pour effet de générer des déformations notables des surfaces équipotentielles. Les altérations locales de la gravité affectent non seulement les calculs géodésiques (et surtout l'altimétrie absolue, qui perd toute cohérence) mais aussi les mesures d'orientations au gyroscope, qui sont fortement déviées par les anomalies de gradient. Cette étude du champ de pesanteur a été effectuée par des calculs d'intégration numérique et de collocation dans un modèle de masse (figure 2), complétés par des mesures astrogéodésiques à la caméra zénithale.

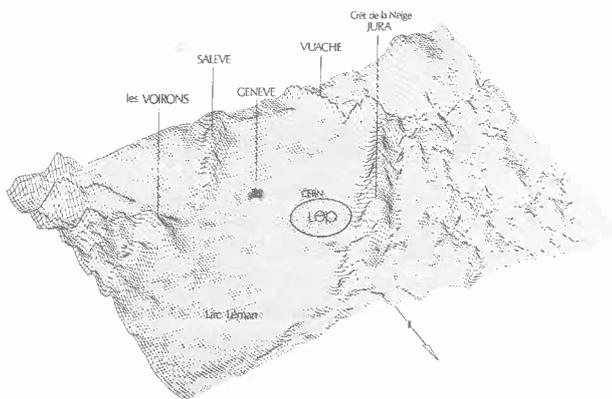


Figure 2 : Modèle de masse local.

L'ensemble de ces opérations a permis de déterminer les piliers géodésiques avec une précision de 2 mm (1σ) dans les trois dimensions, et de connaître les déviations de la verticale à environ 1 seconde d'arc près (soit $5 \mu\text{rad}$ ou $0,0003 \text{ gon}$).

A partir du réseau géodésique principal, des mesures de rattachement sont ensuite effectuées pour calculer les coordonnées de points matérialisés en bordure des puits d'accès. La liaison géodésique entre surface et fond se fait alors par une opération complexe, dans laquelle un triplet de points temporaires est déterminé par un ensemble de mesures spatiales (angles, distances) rattachées à une station de gyro-théodolite, qui détermine les deux premiers piliers du réseau géodésique souterrain (figure 3).

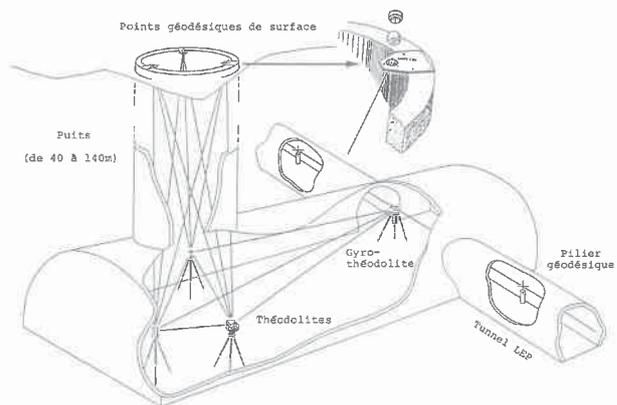


Figure 3 : Liaison géodésique entre surface et tunnel.

La figure ainsi formée est calculée en un seul bloc à l'aide d'un programme de compensation tridimensionnelle par moindres carrés. Cette méthode fiable et précise est parfaitement adaptée aux conditions des chantiers en bas de puits, qui ne permettent pas de matérialiser des points permanents et stables.

Ces premiers piliers, rattachés à la géodésie de surface, servent d'appui à la figure souterraine de référence et constituent les points de contrôle pour le départ ou l'arrivée des tunneliers.

III - REFERENTIEL DE GUIDAGE DES FORAGES

L'expérience acquise lors du percement du SPS (7 km de circonférence, puits espacés de 1 100 m), la maîtrise des développements apportés aux instruments et aux méthodes de gyroscopie géodésique de précision, ainsi que la rareté des firmes ou organismes qualifiés — capables d'assumer les exigences techniques et les contraintes temporelles de ce chantier — ont conduit à ce que le Groupe de Géodésie Appliquée prenne en charge la détermination du référentiel de guidage, sans dégager pour autant la responsabilité des entreprises. Ce choix était le meilleur dénominateur commun entre les intérêts conjugués du Maître d'œuvre et du Maître d'ouvrage.

La ligne de référence des forages est une figure polygonale, dont les sommets sont espacés de 39,50 m (maille cellulaire de l'accélérateur) et matérialisés par des piliers à centrage forcé. Connaissant les coordonnées des piliers les plus proches du front de taille, les géomètres des entreprises peuvent déterminer des points sur potences latérales, destinés à supporter, centrer et orienter le laser de guidage des forages, à hauteur convenable.

La détermination de proche en proche des piliers, au plus près des engins ou tunneliers, résulte d'un ensemble redondant de mesures d'angles, de distances au fil d'invar et aux télémètres électroniques, d'orientations précises au gyro-théodolite, de nivellement direct et indirect, le tout étant traité par moindres carrés par notre programme de compensation tridimensionnelle.

Les mesures au gyroscope chercheur de Nord, dûment effectuées et corrigées de diverses altérations, sont le seul moyen d'orientation de la figure. Elles constituent l'opération la plus délicate et la plus sensible de la géodésie souterraine, surtout dans les tolérances spécifiées pour le tunnel du LEP. Une désorientation systématique de 0,0015 gon (soit 5 secondes d'arc ou $24 \mu\text{rad}$) conduirait en effet au dépassement de l'erreur maximale de 8 cm en fin d'octant, après 3 300 m de forage en antenne.

Deux gyro-théodolites ont été utilisés : le WILD GAK1, automatisé au CERN, et surtout le MOM Gibll, plus précis mais avec un mode opératoire plus long — environ 3 h — et plus complexe (figure 4). Ces instruments délicats étant sujets à des dérives (variations du couple de torsion du ruban de suspension, frottements, effets thermiques, etc.), chaque opération de mesure dans le tunnel doit être encadrée par des mesures d'étalonnage sur le réseau de surface, avant et après. Avec un suivi régulier des instruments et une grande rigueur dans les mesures, on peut obtenir un écart-type de répétition proche de 0,0006 gon. Une telle précision permet d'augmenter l'intervalle des mesures entre piliers, ce qui allège les temps d'intervention dans le tunnel.

Outre les paramètres d'étalonnage et les corrections de dérive, il est essentiel de s'affranchir de l'influence des déviations de la verticale. Nos calculs dans le modèle de masse et les observations astrogéodésiques ont montré que celles-ci pouvaient atteindre 10 secondes d'arc (30 cc) dans la partie de tunnel située sous le Jura. Mais une marge d'incertitude d'environ 1 seconde d'arc (1σ) demeure dans ces évaluations, ainsi que dans la paramétrisation des surfaces équipotentielles et dans le calcul de la courbure des verticales. Selon la source des données, on peut donc trouver des valeurs légèrement différentes aux points de mesure ou d'étalonnage.



Figure 4 : Gyroscope MOM Gibll en station.

En appliquant aux corrections les valeurs de déviation et de courbure des verticales les plus cohérentes, les écarts de fermeture de la polygonale de référence, observés sur les points de contrôle des huit octants forés, ont été les suivants (en mm) :

— planimétrie : + 9, + 12, - 6, + 8, - 10, - 11, + 16, - 3

— altimétrie : + 1, + 1, - 3, - 6, + 2, + 2, - 7, + 4

Ces différences entre le point théorique (issu de la géodésie de surface) et le point réel d'arrivée caractérisent donc la dispersion des erreurs de positionnement après 3 300 m de polygonation gyroscopique en antenne. Une statistique sur ces valeurs donne des écarts-types de 10,5 mm pour la précision (radiale) planimétrique et 4,1 mm pour la précision altimétrique.

Les écarts réels de forage, par rapport à la ligne de référence, sont estimables à partir du contrôle des sections de l'ouvrage.

IV - CONTROLE DE LA GEOMETRIE TRANSVERSALE DES GALERIES ET CAVERNES

Afin de vérifier la section des ouvrages — à l'état brut ou semi-fini — et de garantir que les épaisseurs minimales de béton puissent être respectées, deux méthodes de relevé de la géométrie transversale ont été mises en œuvre. Des moyens rapides, fiables, de précision centrimétrique et à base de matériels simples et robustes ont été recherchés. Ces mêmes techniques ont été utilisées pour le relevé de l'ouvrage fini, aussi bien pour contrôle final avant réception que pour description géométrique complète des ouvrages, sous une forme directement assimilable en CAO.

Pour les galeries, la méthode des photoprofils a été retenue. La section est illuminée par un flash dont une moitié du flux est occultée par une plaque, ce qui crée une zone de contraste découpant clairement le contour transversal (figure 5). Ce flash du système d'éclairage est déclenché par celui de l'appareil photographique (HASSELBLAD SWC/M), qui saisit le profil.

Figure 5 : Photoprofil d'une section sous le Jura.



Le système original (Photosect 40 - ROCKET AB) de cette méthode monophotogrammétrique a été modifié, en vue d'un traitement purement analytique. Quatre tiges porte-cible et une cible centrale matérialisent un ensemble de cinq points, dont les positions (répétitives), connues par micro-triangulation, constituent le référentiel du plan-objet. La mesure des coordonnées-image des points homologues sur les agrandissements permet d'exprimer rigoureusement la relation homographique entre le plan-objet et la photo, quel que soit l'axe de prise de vue. Cette méthode, dite de redressement analytique, est bien plus rapide et plus précise qu'un traitement analogique : en moyenne 3 mn pour la saisie d'un profil et 18 mn pour les opérations de digitalisation, calcul et report. En outre, la précision résultante est améliorée. Divers essais effectués sur un profil-test ont fait ressortir un écart-type radial de 7 mm. Plus de 5 000 photoprofils auront été effectués pour le contrôle des galeries du LEP.

Une analyse des photoprofils effectués sur les vousoirs posés derrière les tunneliers ou sur la gunite permet de caractériser la qualité topométrique du forage - ce qui englobe la précision de transfert de la géométrie entre piliers et supports de laser, et la précision du pilotage proprement dit. Pour les sept octants forés dans la molasse, une statistique sur environ 2 200 sections transversales fait ressortir une moyenne de 8 mm et un écart-type de 33 mm pour les écarts radiaux, pour 13 mm et 39 mm respectivement pour les écarts altimétriques. Cela montre que la maîtrise des tunneliers dans le plan vertical est un peu plus difficile que leur contrôle radial.

La méthode des photoprofils n'est pas précisément applicable à des dimensions de 20 à 25 m (figure 6), ce qui en excluait l'usage pour les cavernes. Pour de telles mesures, la technique des profilomètres électro-optiques est plus appropriée et nous avons eu recours au système FENNEL FET2. Cet appareil est en fait un théodolite électronique doté d'un distancemètre à laser pulsé. La cohérence et la monochromaticité de la lumière émise et réfléchie par un matériau quelconque donne un signal retour suffisant pour se dispenser de l'usage d'un prisme rétro-réflécteur. L'instrument mesure donc directement des rayons de l'ouvrage, dont il mémo-



Figure 6 : Vue d'une grande caverne en cours de réalisation.

rise les coordonnées polaires. Moyennant des étalonnages appropriés à la nature du matériau, on peut obtenir une précision centimétrique de ce système. Le temps d'opération sur le terrain est plus long que pour la photogrammétrie mais le traitement des données est évidemment plus rapide.

V - CONCLUSION

D'autres techniques, parfois originales, ont été mises en œuvre pour des contrôles particuliers (par exemple fût des puits et position des inserts) mais il serait trop long de les évoquer dans cet article.

Beaucoup de vigilance et de soins ont été apportés dans le contrôle régulier de la position et de la géométrie des ouvrages du LEP, en utilisant des méthodes géodésiques parfois très élaborées, pour satisfaire à des exigences extrêmement sévères. Une bonne partie de l'effort étant de toute façon nécessaire à la métrologie d'installation de l'accélérateur, ce travail était au carrefour d'intérêts réciproques entre le CERN et les entreprises, afin d'éviter autant que possible les problèmes topologiques dans la réalisation des ouvrages et la construction de la machine.

Si les précisions exceptionnelles du référentiel de guidage sont redevables à la haute technicité du Groupe de Géodésie Appliquée, il serait injuste de ne pas dire que nos contrôles de maître d'ouvrage nous ont amenés à constater le savoir-faire tout à fait louable des géomètres des maîtres d'œuvre.

Dans un ouvrage aussi complexe, pour une tâche aussi difficile, les ingénieurs et techniciens des entreprises ont accompli un travail excellent, en se dotant des moyens appropriés et en élaborant des méthodes et procédures qui ont prouvé leur efficacité. Au jour le jour, ils ont su réduire à un minimum la part inéluctable d'erreurs géométriques dans les diverses phases de construction.

Par rapport à ce que nous avons connu, l'effort des entreprises du LEP pour le positionnement et la géométrie des ouvrages, ainsi que la collaboration avec les géomètres du CERN, ont été exemplaires. Des résultats remarquables ont été obtenus et aucun problème majeur, à caractère contradictoire ou contentieux, n'est venu troubler sur ce point la bonne réalisation des travaux. Pour un coût rarement supérieur à 1 % du montant des marchés, il est toujours profitable aux entrepreneurs d'ouvrages complexes de se pourvoir d'une bonne équipe de géomètres.

Bibliographie

Burki S., Gurtner W. : *Deviation of the Vertical, CERN Accelerator School "Applied Geodesy for Particle Accelerator", CERN 87-01, 1986.*

Fischer J.C. : *Contribution à l'Automatisation du Gyroscope de Théodolite Wild GAK1 en vue de son utilisation au CERN lors de l'implantation du LEP, Mémoire de Soutenance de Diplôme d'Ingénieur Géomètre, ENSAIS, 1986.*