

Méthode et construction du lien fixe transmanche : méthodes et instruments topométriques

J.-J. MORLOT — Chef du Service Topographique — TML (France)

INTRODUCTION

C'est le 13 août 1986 que la conception et la réalisation du lien fixe TRANSMANCHE et de son système de transport furent confiées au groupement franco-anglais TRANSMANCHE-LINK.

Le projet, long de 50 km, dont 37 sous mer, est constitué de deux tunnels ferroviaires de 7,60 m de diamètre dans lesquels circuleront des navettes entre les terminaux de Coquelles près de Calais et de Folkestone qu'elles relieront en 35 minutes. Celles-ci pourront accueillir tous les types de véhicules avec leurs passagers ainsi que les poids lourds jusqu'à 44 t.

En alternance avec ces navettes, des trains de voyageurs et de marchandises, ainsi que des trains à grande vitesse traverseront le détroit en moins de 30 minutes.

Entre ces deux tunnels ferroviaires, le tunnel de service de 4,80 m de diamètre assurera la sécurité et la ventilation par l'intermédiaire de rameaux transversaux d'un diamètre de 3,30 m, disposés tous les 375 m. D'autre part, afin de limiter l'effet de pistonnement provoqué par le passage des navettes et des trains qui pourront atteindre 160 km/h, des galeries de diamètre 2,20 m relieront les tunnels ferroviaires tous les 250 m. Enfin, deux traversées-jonction, dont l'une est située à 12,4 km du puits de Sangatte et l'autre 18 km plus loin, permettront aux trains de changer éventuellement de tunnels en cas de nécessité. Ces traversées-jonction rassemblent les tunnels ferroviaires dans un ouvrage unique appelé "CROSS OVER".

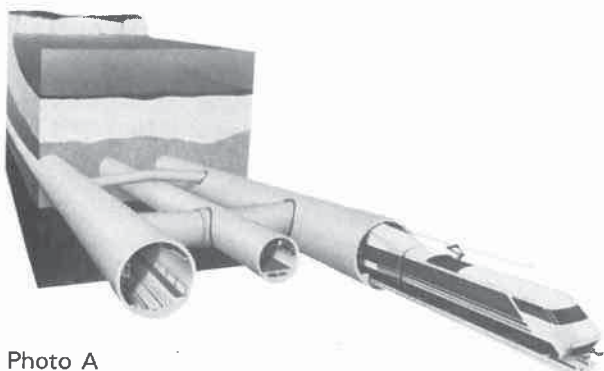


Photo A

LES CONTRAINTES

Différentes contraintes conditionnent le choix des méthodes et des instruments topographiques :

- Le tracé, défini pour satisfaire à la fois à des critères géométriques liés au passage de trains à grande vitesse, à des critères géotechniques et géographiques, ne peut être régulier. Ainsi par exemple, dans la zone du portail et dans celle du crossover, les tunnels ferroviaires se rapprochent pour laisser passer le tunnel de service au-dessus ou au-dessous d'eux avec des rayons réduits à 2 000 m.

- Les tolérances locales de construction de ± 150 mm qui doivent absorber les erreurs inhérentes au guidage et à la conduite des tunneliers, à la définition de la suite d'anneaux, à la fabrication, à la pose, à la déformation des voussoirs et des anneaux.

- Le planning, qui prévoit des avancements mensuels supérieurs à 900 m pour une jonction franco-anglaise du tunnel de service fin octobre 1990, et une liaison ferroviaire fin août 1991 au PK 15,8.

- Enfin, les équipements fixés sur le parement pendant la construction, et ceux définitifs mis en place quelques km seulement en arrière des tunneliers, ainsi que le gabarit des trains de marinage circulant toutes les vingt minutes, réduisent considérablement la surface de la section courante du tunnel ainsi que le temps de travail imparti aux opérations topographiques.

La politique adoptée par TML pour implanter et piloter ces tunnels sans ralentir la production, et malgré ces contraintes inévitables, a été de confier la topographie à des équipes internes à l'entreprise, pour plus de souplesse. Chargés du contrôle qualité de nos opérations, nous avons choisi de faire appel à un spécialiste pour intervenir à des dates-clés de l'avancement de la construction, pour confirmer le respect des tolérances fixées initialement, ou pour les opérations qui nécessitent la mise en œuvre ponctuelle de matériels onéreux et de spécialistes (géodésie spatiale confiée à I.G.N.F.I., cinq interventions de topométrie souterraine sur la durée du chantier confiées à l'Institut des Mines de Bochum).

LE RESEAU TRANSMANCHE

Pour permettre la conception, l'implantation et le contrôle des ouvrages de ce projet "à cheval" sur deux pays, il était essentiel d'utiliser un système de référence unique.

En effet, la représentation en vigueur dans la région de Calais utilise le système Lambert. Nos voisins travaillent en projection cylindrique UTM. Les systèmes altimétriques sont également différents : IGN 69 et NGF pour le Pas-de-Calais, Ordnance Datum Newlyn pour l'Angleterre.

Nous chargeons donc les deux spécialistes que sont l'IGN et son homologue britannique Ordnance Survey (O.S.) d'établir un système de projection spécifique. La projection Mercator Transverse utilisée pour le dernier projet de 1974 est reprise. Le méridien origine est sensiblement au milieu de notre tracé. Pour éviter toutes confusions dans le jeu de coordonnées des points géodésiques existants, obtenues à la suite de campagnes d'observations complémentaires, on effectue une translation des axes qui porte l'intersection du méridien origine $1^{\circ}30' E$ avec le parallèle 49° à $X - 40\ 000\ m$ et $Y - 1\ 000\ m$. Ce jeu de coordonnées est appelé Channel Tunnel Grid 86. Les précisions de l'ordre de $\pm 10\ cm$ sur ces coordonnées sont insuffisantes pour réaliser la jonction franco-anglaise des tunnels sous mer. Aussi, nous demandons à IGN et à

O.S., conformément à notre politique de la qualité, d'effectuer une campagne de contrôle G.P.S. sur dix points du canevas de base, dont deux au moins devaient être visibles depuis le chantier. Le but était d'atteindre une précision de 10^{-6} , et $\pm 5\ cm$ sur le décalage altimétrique entre les systèmes français et anglais.

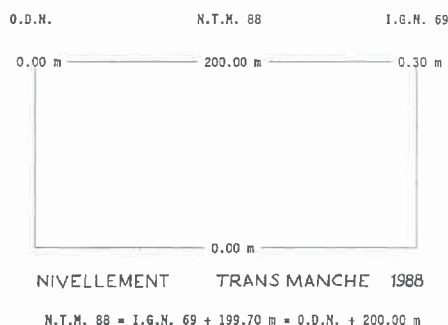
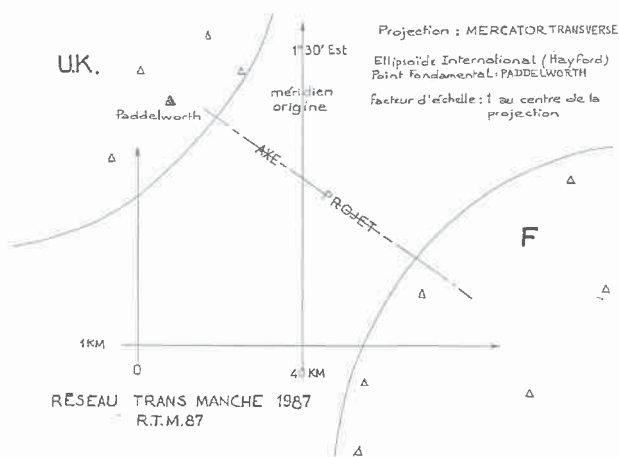
Cette campagne menée fin 1987 donnait lieu à un nouveau jeu de coordonnées dénommé Réseau TRANSMANCHE 87 (RTM 87) avec lequel nous travaillons aujourd'hui. La précision de 10^{-6} était atteinte.

En altimétrie, la valeur du décalage connue jusqu'alors entre les deux systèmes de référence français et anglais était de $0,442\ m$ à $\pm 2\ cm$ près. Cette valeur s'appuyait sur des hypothèses établies par Cartwright et Crease en 1962, obtenues par nivellement hydrodynamique, et le système commun, utilisé au début de la construction s'appelait alors le Channel Tunnel Hight Datum 86 (CTHD 86).

A la suite du contrôle externe demandé à I.G.N./O.S. fin 87, le décalage altimétrique qui a été finalement retenu est de $30\ cm$, moyenne pondérée des estimations obtenues à partir de données marégraphiques, et des observations G.P.S. des campagnes d'août 86 et de décembre 87. L'écart-type a posteriori calculé par I.G.N. est de $\pm 8\ cm$.

Afin de n'utiliser que des altitudes positives sur le projet, nous décidons de l'origine du nouveau système appelé Nivellement TRANSMANCHE 88 (NTM 88) à $200\ m$ sous le zéro du système anglais O.D.N.

Photo D



LE CANEVAS D'APPUI DE SANGATTE

De façon à avoir des points directement utilisables pour les besoins du chantier, il fallait densifier le réseau géodésique et altimétrique.

En planimétrie, cinq points I.G.N. existants et cinq nouveaux points matérialisés par des piliers forment ce canevas complémentaire, à l'intérieur duquel deux réseaux de six piliers augmentent la densité dans la zone du puits et dans celle du portail. Après observation des angles et des distances de ce canevas, le calcul et la compensation en bloc selon les moindres carrés mettent en évidence une précision de $\pm 8\ mm$ sur ces points.

En altimétrie, une maille de $14\ km$, composée de 17 repères de nivellement, relie les repères I.G.N. de Sangatte à ceux de Coquelles. Le but de ce nivellement était de vérifier la stabilité des repères existants et de définir l'altitude de nouveaux repères pour les besoins du chantier. Les fermetures des cheminements sont inférieures au mm .

Ce réseau appelé "canevas d'appui de Sangatte" nous a permis d'implanter le puits, le portail, ainsi que toutes les installations de chantier. Il nous sert surtout d'appui pour la construction et le contrôle des tunnels.

CANEVAS DE SANGATTE

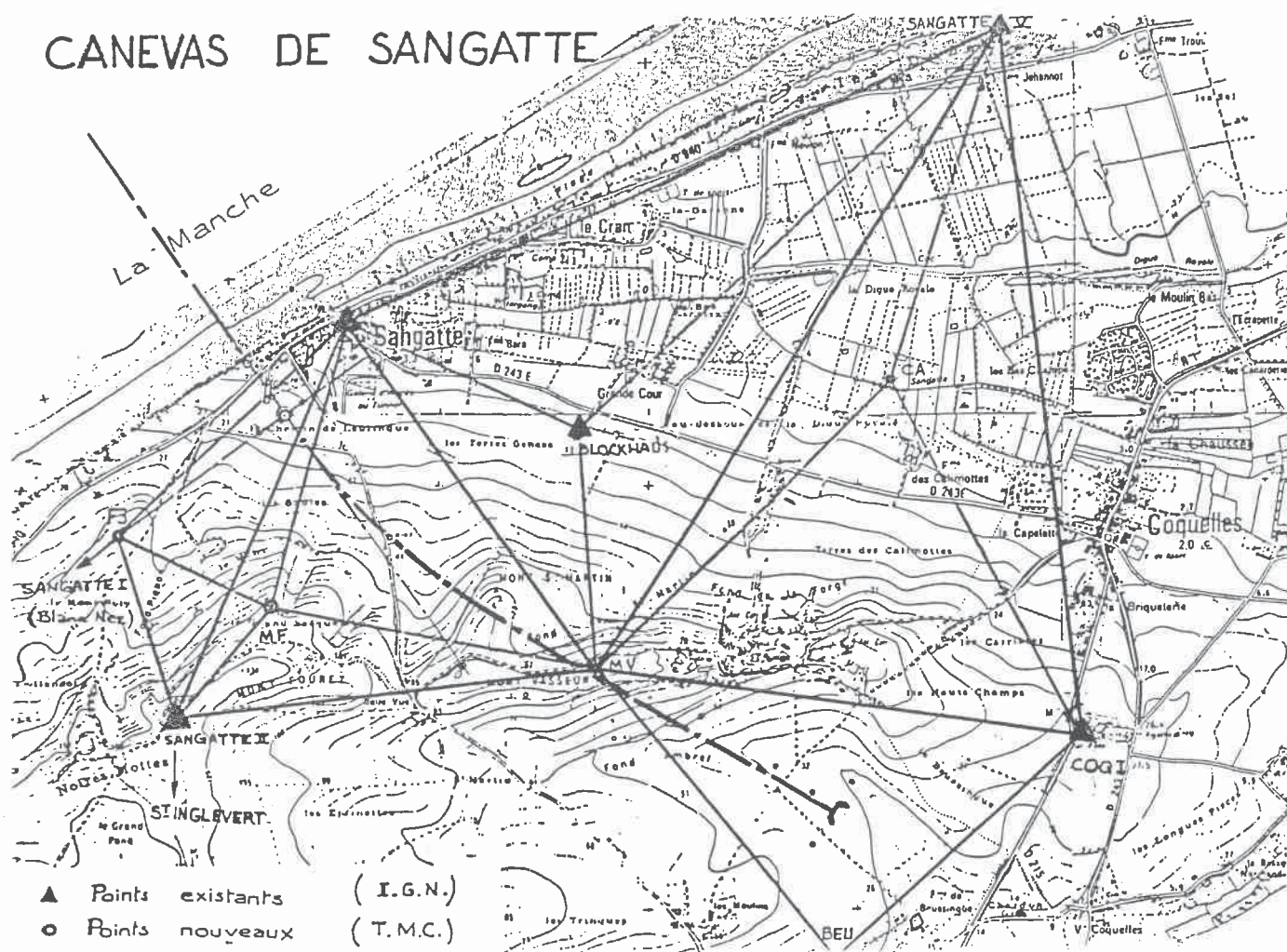
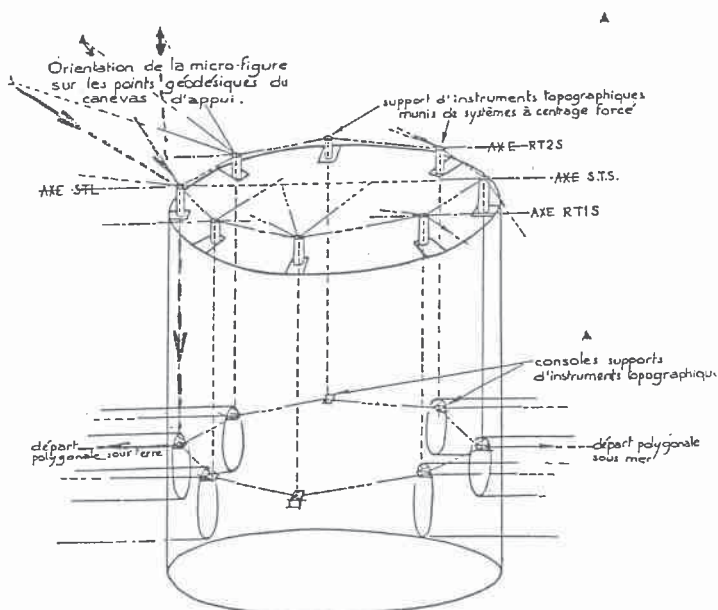


Photo E

LA DESCENTE DE BASE

Le transfert de la géométrie au niveau des tunnels "dans le mm" ne peut se faire que par le puits de SANGATTE. Pour réaliser la descente de base, nous avons mis en place huit tubes métalliques en surplomb au-dessus du puits, au niveau du couronnement, selon les axes des tunnels et un diamètre perpendiculaire. Huit points homologues situés 45 m plus bas ont été positionnés à l'aide d'une lunette nadiro-zénithale. Ils sont solidaires de la paroi, seul élément stable, en voûte des gares, et ont servi à l'orientation des tunnels. L'octogone haut est rattaché aux points du canevas d'appui, et toutes les distances entre ses points ont été mesurées. Les résidus obtenus après compensation de cette trilatération sont inférieurs à 0,5 mm. Le gisement suivant l'axe du tunnel de service a été obtenu à partir de trois cheminements différents à 5 dmgr près.

L'encombrement du puits par les équipements de toutes sortes nous interdisait les visées plongeantes en biais — entre points hauts et points bas —. Nous avons essayé une première méthode qui



Descente de base

Photo F

consistait à observer le point haut dont l'alésage d'1 mm de diamètre était éclairé, à l'aide d'une lunette zénithale montée sur deux plateaux micro-métriques croisés, stationnée sur le point bas. Le but étant alors d'amener le point bas sur la verticale du point haut. Le réglage délicat de la lunette zénithale et le coût de l'équipement nous ont amenés à mettre au point une méthode plus simple, réalisable avec nos instruments, et réitérable pendant la construction des tunnels :

Stationner le point bas avec un théodolite muni d'un oculaire coudé et observer le point haut dans diverses positions du limbe, ce qui est possible en raison du faible écart entre les deux points. On remarque toutefois que les couples observés (α_i , Z_i) suivent une fonction sinusoïdale du type $Z_i = A \cos(\alpha + B) + C$ dont les coefficients A, B, C peuvent être calculés pour obtenir les écarts d et l'orientation α pour chaque point bas. Finalement, la précision obtenue sur ces points est meilleure que $\pm 0,6$ mm, celle du gisement transféré au niveau des tunnels de ± 6 dmgr.

De même, deux méthodes ont été testées pour transférer l'altimétrie :

- Une chaîne étalonnée suspendue et maintenue verticale par un poids tendeur de 5 kg est observée simultanément à l'aide de deux niveaux munis de micromètres, l'un en haut, l'autre au niveau des tunnels. Le contrôle s'effectue par réitération après décalage vertical du ruban et changement de station. Il est à noter l'incidence non négligeable d'une variation de température de 1 à 2°C sur la longueur du ruban.
- Les distancemètres actuels nous permettent de mesurer la dénivelée entre un réflecteur monté sur l'un de nos tubes, et le point bas sur lequel on a stationné un théodolite muni du distancemètre. Des observations de la distance zénithale sur mire centimétrique permettent le calcul de l'altitude de repères scellés dans la paroi du puits.

Les deux méthodes donnent des résultats à $\pm 0,6$ mm près. La dernière est cependant plus pratique.

LES POINTS DE REFERENCE EN TUNNELS

Les points polygonaux et les repères de nivellement scellés en tunnels sont les points de référence pour le guidage des tunneliers. Ils servent aussi à vérifier la géométrie des sections, à implanter les rameaux transversaux, les équipements définitifs et les voies, enfin, à assurer la jonction des tunnels français et des tunnels anglais. Ces points sont mis en place depuis la dernière remorque du train suiveur : consoles amovibles se positionnant sur des parties fixes à l'aide d'un doigt de centrage pour le tunnel de service où les portiques qui suivent le train de foration à 1 km passent à 6 cm seulement du parement — consoles fixes dans les tunnels ferroviaires où les équipements sont moins contraignants.

L'objectif que nous nous sommes fixés au début de ce projet était d'atteindre le PK 14,8 — point de jonction franco-anglais du tunnel de service avec une probabilité de 0,99 d'obtenir un écart transversal inférieur à 20 cm par rapport au tracé projeté, ce qui correspond à une tolérance à 1 de ± 77 mm pour le seul cheminement français, géodésie comprise.

La méthode retenue consiste à observer des modules standards de 375 m, longueur égale à l'entraxe des rameaux de communication. Quatre des six sommets principaux sont stationnés avec un gyrothéodolite choisi pour sa précision de ± 10 dmgr et pour sa rapidité d'emploi. Les six points sont stationnés à l'aide d'un théodolite informatique, les angles sont mesurés à ± 5 dmgr près, les distances à $\pm 0,6$ mm. Six points supplémentaires disposés tous les 47 m forment une polygone secondaire que l'on observe avec les mêmes instruments. Elle permet de s'affranchir de tout systématisme sur les distances, et sert d'appui au cheminement destiné à la détermination des stations de guidage, ainsi qu'au positionnement du profilomètre. Les observations obtenues sont traitées et compensées en bloc par la méthode des moindres carrés. La précision obtenue sur les coordonnées de ces points est meilleure que ± 2 mm dans le module. L'utilisation du gyrothéodolite est indispensable si l'on veut réduire considérablement les effets de la réfraction (de 5 à 20 dmgr par angle), par la mesure d'azimuts directe et réciproque. Il nous permet surtout d'obtenir au PK 1 comme au PK 14, un azimut avec la même précision. De ce choix, l'écart transversal prévisible après 14,8 km de cheminement serait :

$$\sigma = \frac{\pm 10'' \cdot \sin 1'' L}{\sqrt{n}}$$

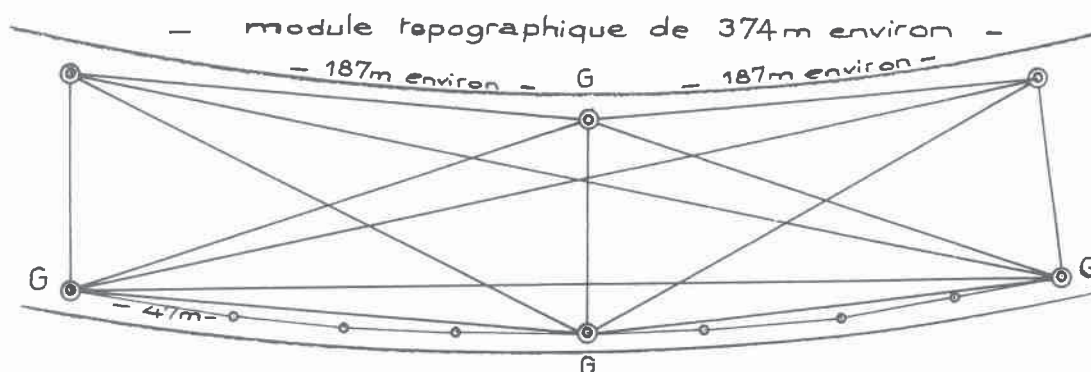
soit ± 37 mm pour un cheminement de 40 côtés de 375 m.

D'autres imprécisions viennent se combiner à ces ± 37 mm : celles affectant les points géodésiques (± 50 mm), les réseaux complémentaires (± 15 mm), la descente de base (± 1 mm), les différentes opérations de topométrie souterraine, qui, composées quadratiquement portent la tolérance (1σ) à ± 77 mm, soit ± 20 cm à $2,58\sigma$ pour nos seuls tunnels français.

L'imprécision résultante d'un cheminement altimétrique de précision — de l'ordre du cm — reste négligeable par rapport à celle de ± 8 cm sur le décalage altimétrique entre les systèmes français et anglais.

Pour absorber un éventuel décalage au point de jonction, il est prévu d'arrêter la foration de façon à laisser entre les tunneliers français et anglais une distance L suffisante pour permettre d'effectuer un forage horizontal à travers la roue de coupe, pour déterminer par mesure directe la position relative des deux fronts de taille. Une courbe de rattrapage éventuelle répondant aux spécifications sera alors calculée pour réaliser la jonction au cm près.

Photo G



LE PILOTAGE ET LA CONSTRUCTION

Le pilotage du tunnelier englobe les méthodes et les moyens topographiques qui permettent la foration du tunnel et la mise en place du revêtement au plus près du tracé théorique, dans les tolérances prévues.

La foration du tunnel au bon endroit est facilitée par l'utilisation d'un système de guidage qui indique au conducteur la position de sa machine en temps réel par rapport au tracé projeté. Le système allemand TUMA est utilisé pour les tunnels "terre" entre le puits et le terminal de Coquelles.

Le système anglais Z.E.D. utilisé sur les tunnels sous mer met en œuvre une cible solide du tunnelier, et situé à 6,70 m en arrière de la tête de coupe, qui reçoit le faisceau émis par une source laser située en arrière, sur une console fixée au parement. Les paramètres de la source laser (coordonnées, gisement et pente du faisceau), la position de la cible par rapport à l'axe du tunnelier, et le tracé à suivre (jeu de coordonnées de points de l'axe) sont introduits dans l'ordinateur du système.

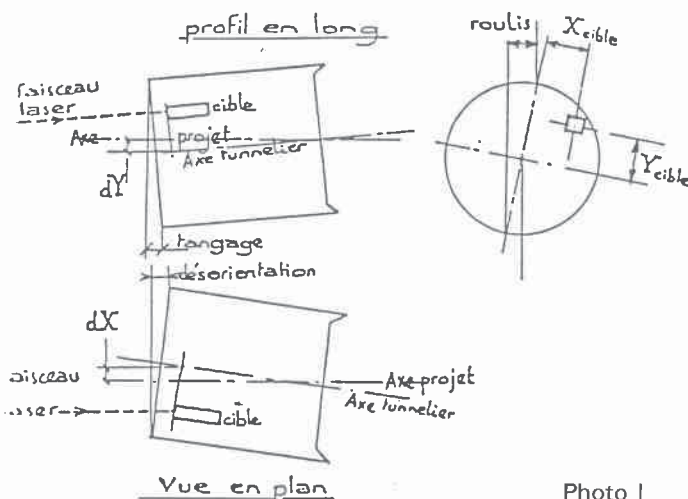
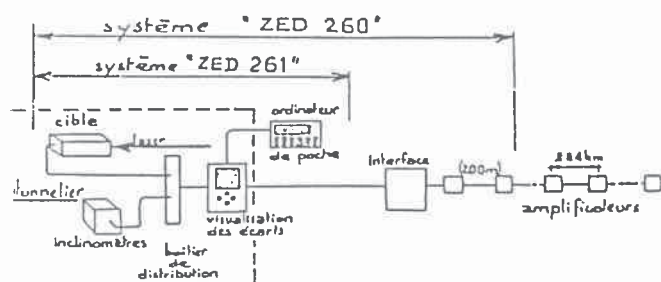


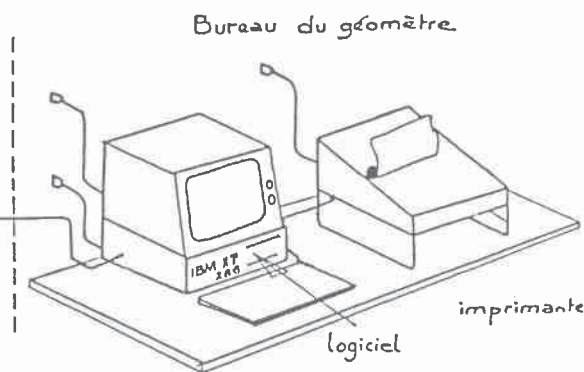
Photo I

Après avoir guidé et foré le tunnel, il s'agit de mettre en place le parement, constitué d'une suite d'anneaux boulonnés entre eux. Chaque anneau est formé de six voussoirs en béton préfabriqués, assemblés dans la jupe du tunnelier. Des brosse

Photo H



La cible détermine le barycentre de l'impact du faisceau sur deux mires parallèles et coaxiales espacées de 30 cm. Le segment de droite ainsi défini est comparé avec le segment théorique. Deux clinomètres à amortissement magnétique mesurent en continu le roulis et le tangage de la machine. Les écarts en mm de la position du tunnelier au droit de la cible et sa tendance à l'avancement sont visualisés dans le poste de conduite. Une impression de ces informations est faite systématiquement à chaque avancement correspondant à la largeur d'un anneau. La source laser est associée ici à un théodolite informatique muni d'un oculaire laser. Une interface du système ZED lit et affiche en temps réel les angles du théodolite — ce qui évite la présence d'un opérateur en permanence.

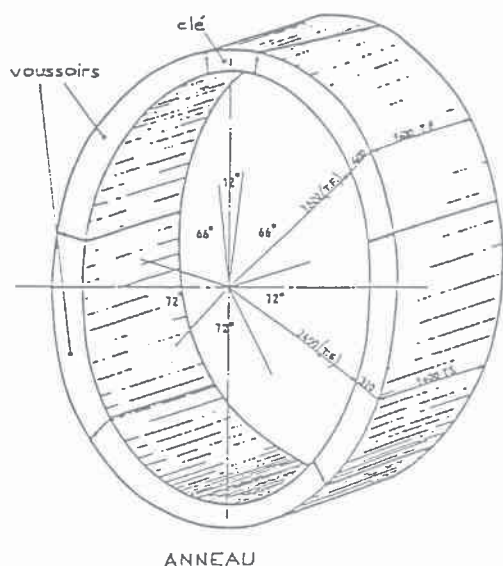


métalliques injectées de graisse sous pression assurent l'étanchéité entre les anneaux et la jupe. Ainsi, le tunnelier est conçu pour construire le tunnel avec une pression hydrostatique pouvant aller jusqu'à 10 bar. Le pincement des anneaux permet de réaliser des courbes de rayons donnés. Mais, en raison du faible jeu (25 mm) entre l'extrados de l'anneau et la jupe, et des contraintes de positionnement des anneaux entre eux et de la clé, une étude de calepinage est nécessaire. En effet, un calepinage théorique prévu à l'avance ne pourrait être utilisé que si le tunnelier suivait parfaitement l'axe théorique. Il est donc nécessaire de définir de nouvelles suites d'anneaux à l'aide d'un programme

de calcul qui tient compte de la déviation accidentelle du tunnelier, du centrage du revêtement dans la jupe, des anneaux en cours d'approvisionnement, et du tracé théorique. Ainsi, 8 distances sont mesurées au mm près, avant et après pose de chaque anneau entre la face avant du dernier anneau posé et une face de référence du tunnelier, ainsi qu'entre l'intrados de l'anneau et la jupe, et ceci selon le diamètre horizontal et vertical. Avec le roulis et la pente de la machine, le géomètre connaît la tendance du tunnelier et en déduit la trajectoire que la machine devra suivre sur les 15 à 20 anneaux suivants.

Cet axe de conduite défini, toutes les combinaisons possibles d'anneaux sont testées pour conserver le meilleur centrage dans la jupe. Lorsque la suite d'anneaux est définie, le programme calcule les valeurs théoriques des mesures à relever suivant les deux diamètres, et édite une fiche de pose que devra respecter le conducteur. Une nouvelle fiche sera éditée lorsque les valeurs mesurées différeront de plus de 20 mm des valeurs prévues.

De façon à éviter toute dérive de l'ensemble tunnelier et anneaux, provoquée par des phénomènes essentiellement dus à la réfraction ou à un mouvement éventuel des anneaux au voisinage des consoles utilisées pour le guidage, nous faisons régulièrement la liaison entre le laser et les points de référence situés derrière le train suiveur long de 250 m. Ce cheminement polygonal le long du train a pour but de déterminer les coordonnées de la source laser et d'en vérifier la stabilité.



LE SUIVI DE LA GEOMETRIE

D'autre part, un suivi journalier des trajectoires prévues et effectives des tunneliers et des anneaux est établi sous forme de graphes à l'échelle (vue en plan et profil). Il permet de vérifier que les limites de tolérance ne sont pas atteintes, de définir une éventuelle courbe de rattrapage, de choisir la position de profils en travers à lever. Ces profils constituent la base du levé tel que construit destiné au tracé définitif des voies. Ils sont réalisés au profilomètre à laser AMBERG.

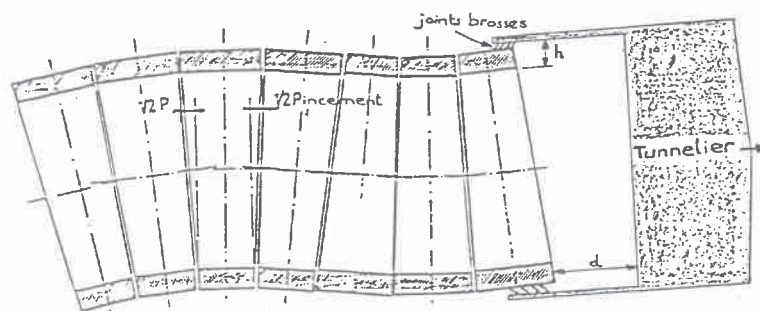
Enfin, différentes sections des tubes réalisés sont auscultées à l'aide d'un distancemètre orientable à fil d'invar pour déterminer la convergence des sections.

CONCLUSION

Les résultats que nous avons obtenus jusqu'à ce jour avec ces méthodes sont encourageants pour l'avenir. En effet, le tunnel de service sous terre long de 3 250 m est terminé. Le tunnelier T4 est sorti le 27 avril au centre du tympan du portail, ouvrage réalisé avant l'arrivée du tunnelier, et que nous avons implanté à partir du canevas de surface.

Les fermetures de nos cheminements mesurées après percement sont de : 17 mm transversalement, 10 mm en longueur et 12 mm en altitude. L'étude de la précision faite a priori prévoyait des valeurs correspondantes (à 1σ) de ± 23 mm, ± 16 mm, et ± 6 mm. Ces résultats valident en quelque sorte nos méthodes pour les tunnels en cours de construction.

Photo J



Système de guidage Z.E.D.