

Etude géométrique des tunnels ferroviaires

M. LABATUT, Ingénieur principal, SNCF/Ouvrages d'Art - Paris

RESUME

L'objet de l'étude géométrique des tunnels ferroviaires est de vérifier l'inscription des gabarits de circulation et/ou de définir les travaux permettant de dégager des gabarits supérieurs ou plus performants. Les relevés de profils sont effectués par des moyens photogrammétriques ou télémétriques, d'une manière statique ou dynamique. Les profils, référencés au relevé des voies (flèches, altitudes) et traités numériquement (scanner pour les photoprofils), sont ensuite analysés par un programme de simulation ayant pour but d'optimiser les actions sur les divers paramètres considérés : modification du tracé ou du dévers, abaissement des voies, retouches à l'ouvrage.

Les anciennes compagnies françaises de chemin de fer puis la SNCF dont le patrimoine de tunnels en exploitation à ce jour, atteint 1 354 ouvrages d'une longueur cumulée de 536 km ont, depuis fort longtemps, été confrontées à l'inscription de gabarits de circulation de plus en plus volumineux dans les débouchés que livrent soit les ouvrages d'art, soit des obstacles divers construits au-dessus ou à proximité des voies.

En effet, les accroissements de vitesse, les augmentations de l'encombrement des matériels roulants, les électrifications, certaines opérations, tant provisoires que définitives, de renforcement des structures en souterrains n'ont pu être réalisés qu'en maîtrisant cette inscription qui, pour raison évidente de sécurité, doit être considérée dans les conditions cinématiques les plus défavorables.

Cette maîtrise consiste, en conséquence, à pouvoir à tout instant, vérifier cette inscription, généralement d'une enveloppe englobant plusieurs gabarits de circulation, sous un ouvrage donné et, dans le cas où elle n'est pas assurée, de déterminer les modifications minimales de tracé, de profil en long des voies ou en dernier recours de la géométrie de l'intrados pour y parvenir.

Une telle vérification a été rendue possible grâce à des moyens de plus en plus perfectionnés dans le relevé des données nécessaires à la connaissance géométrique des ouvrages et dans le traitement de ces données.

LES GABARITS

Les intrados des ouvrages établis au-dessus des voies ferrées doivent être extérieurs ou à la limite tangents au contour, appelé "limite des obstacles", qui est lui-même déterminé en ajoutant certaines

marges aux gabarits des matériels circulant sur la ligne considérée. Ces marges sont fonction à la fois de l'encombrement cinématique du matériel, c'est-à-dire compte tenu de la souplesse de ses suspensions, et de la géométrie de la voie soit par son dévers et ses courbures.

La définition de ces contours a toujours été un compromis entre le désir commercial, régulièrement renouvelé, de faire circuler des convois plus rapides et plus encombrants et l'optimisation des travaux nécessaires au dégagement de ces contours. Ces derniers correspondent exactement à l'enveloppe obtenue par la superposition des divers gabarits de circulation qui intéressent l'ouvrage et qui, suivant les cas, sont rattachés à des matériels nouveaux (1 500 V et 3 000 V continu, 25 KV alternatif) à des gabarits de wagons ou de conteneurs sur plateaux et quelquefois à des transports appelés exceptionnels sur wagons spéciaux.

LES PREMIERS APPAREILS DE MESURE

La vérification du dégagement d'un gabarit ou d'une enveloppe est couramment réalisée, encore aujourd'hui, sur l'ensemble des lignes par la circulation de wagons-mannequins équipés soit de réglets coulissables matérialisant le gabarit ou l'enveloppe testée, soit de bras rabattables dont la mesure continue de l'inclinaison est enregistrée sur une bande papier sous la forme d'une série de profils en long de l'obstacle relevés à différents niveaux, et sur lesquels peuvent être mesurées les distances de chaque point à la voie.

La précision de ces appareils n'excède pas 1,5 cm sur un demi-profil mais peut être jugée suffisante.

Leur utilisateur souffre d'inconvénients :

- un relevé de l'obstacle par demi-profil ce qui nécessite deux passages,
- l'obligation, sur les lignes électrifiées, d'interrompre le courant de traction,
- une lenteur dans la transcription des résultats lorsque l'on passe de la vérification du dégagement, à une succession de nombreux relevés de profils en travers, ce qui est le cas pour l'étude de travaux intéressant soit le tracé des voies soit sa structure puisque se pose, alors, le positionnement des voies par rapport à l'intrados des futures structures,
- l'impossibilité de relever l'intrados au droit des installations caténaires.

LES PREMIERS PROFILOMETRES

Les premiers profilomètres utilisés à la SNCF sont des appareils portables équipés d'un petit générateur laser de faible puissance dont le positionnement peut être résumé ainsi :

Deux miroirs, l'un fixe et l'autre pouvant être déplacé à l'aide d'une vis réglable, projettent deux taches sur l'obstacle à relever.

Un procédé de mesure simple par triangulation permet de calculer la distance de l'appareil à l'obstacle lorsqu'il y a superposition des taches.

Ces appareils ont tous l'inconvénient d'une mise en station longue et délicate.

LA RAME PHOTOPROFIL

Ainsi, en vue de répondre à ses besoins propres en matière de tunnels, le département des ouvrages d'art prit à son compte à partir de 1978, la recherche d'un système rapide basé également sur la technique des photoprofils et qui est aujourd'hui en service.

Un wagon à boogies spécialement aménagé comporte à l'une de ses extrémités, un émetteur laser puissant dont le faisceau est dirigé selon un axe parallèle au châssis du wagon.

Un miroir tournant intercepte ce faisceau pour le projeter, suivant un angle droit, dans un plan rigoureusement perpendiculaire à cet axe.

Une caméra photographique installée dans une cabine située à l'autre extrémité du wagon a son axe optique réglé sur celui de l'émetteur laser.

Elle permet les prises de vue de la trace du plan lumineux si nécessaire au repérage des différentes vues notamment de l'échelle des clichés (cf. figure 1).



Figure 1

A l'issue du passage du wagon, on dispose ainsi d'une série de sections transversales de l'intrados de l'ouvrage.

Les clichés sont pris en circulant sur l'une quelconque des deux voies dans le cas d'un tunnel à double voie, à une vitesse sensiblement égale à 2,5 km/heure, en principe sans arrêt et à raison d'un profil tous les 10 m au minimum si on le désire.

Dans son état actuel l'appareil ne peut relever les zones proches des têtes de tunnel que la nuit.

Le déclenchement des prises de vues peut être soit manuel, soit automatique grâce à une centrale

embarquée de mesure des distances, l'opérateur choisissant entre ces deux types de déclenchement, celui le mieux adapté.

Le dispositif de prise de vues fut une caméra à un objectif qui est aujourd'hui remplacée depuis peu de temps par une caméra à double objectifs spéciaux de façon à permettre la prise simultanée de clichés instantanés (photoprofils en général au 1/2 de sec.) ou en pause (photocastans).

Cette caméra est équipée d'un magasin renfermant deux films constitués par un négatif 35 mm noir et blanc de sensibilité 250 ASA.

LE REPERAGE DES PROFILS

Le repérage des profils par rapport au tunnel est, bien sûr, inévitable.

Il est constitué comme indiqué ci-après.

- Un dispositif embarqué de mesure de distances interprofils qui n'est autre qu'une centrale de distance basé sur le principe de la "roue phénique" qui, placée sur l'un des essieux du wagon, permet de compter le nombre de tours de roue effectués depuis l'origine des relevés.

Les indications fournies par cette centrale sont répercutées à l'armoire lumineuse dont les indications apparaissent sur le cliché, au pupitre du système de commande et à une imprimante.

Il est possible aussi de superposer le signal déclenché par l'opérateur au droit d'une plaque décimétrique par exemple, mais surtout à chaque prise de vues. La précision de ces informations est de 1/500.

- Un repérage dans le tunnel au moyen de repères constitués d'éléments de 10 cm de tube en acier de section carrée scellé à 1,50 m du sol dans la maçonnerie d'un des piliers et dont la trace apparaît sur les clichés.

Ces repères sont rattachés au profil long de la voie existante par un levé topographique classique qui est réalisé peu avant le passage du wagon au moins sur une des piles des rails au droit de chaque repère et généralement sur eux-mêmes.

Du fait que les rails et le repère scellé apparaissent sur les clichés, il est aisé de rattacher entre eux les profils d'un même tunnel (cf. figure 2).

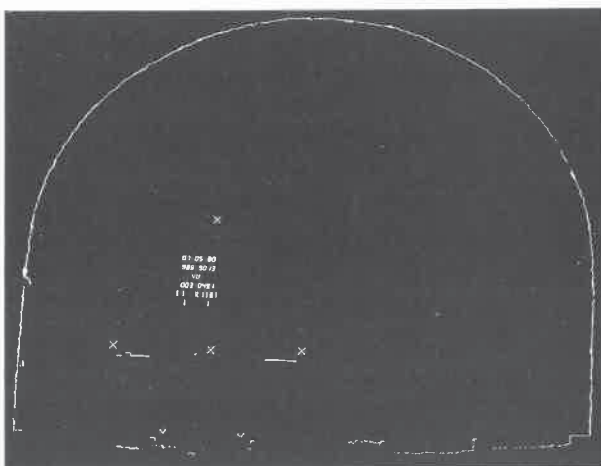


Figure 2

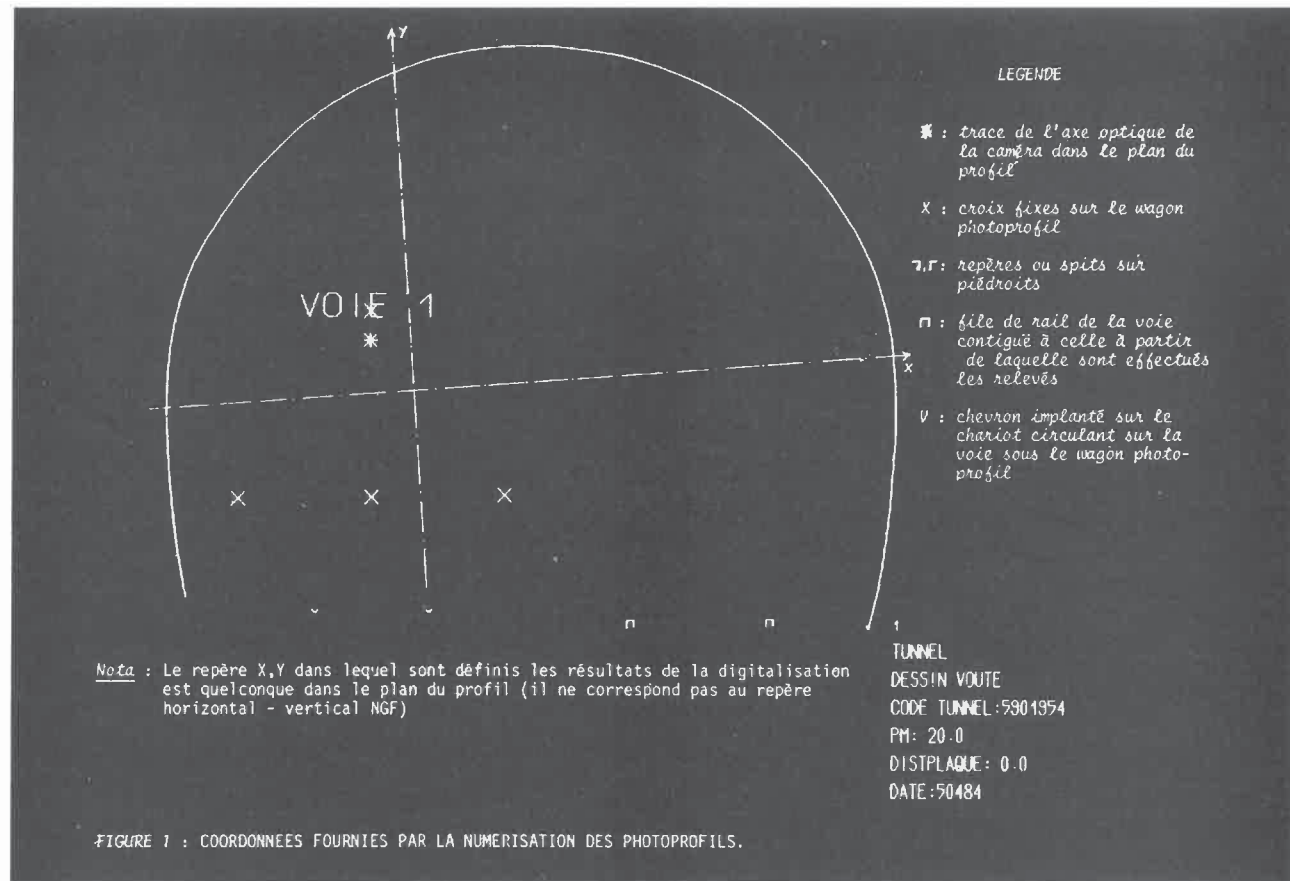


Figure 3

Comme le wagon est équipé, d'une part, d'une pendule qui a tout instant enregistré la direction de la verticale, d'autre part, de quatre choix de calibrage qui définissent la position du wagon et enfin d'un chariot muni au droit des rails circulés de deux chevrons lumineux qui indiquent la position de la face intérieure du rail, il devient possible de fixer respectivement le profil dans le plan transversal à l'axe de l'ouvrage et de le rattacher à la position des rails.

TRAITEMENTS DES CLICHES

Le rouleau photographique 35 mm est traité de façon classique par un laboratoire photographique.

Les négatifs, pour déceler d'éventuelles anomalies sont visionnés avec une visionneuse-tireuse qui restitue des épreuves photographiques sur papier blanc de format 21 × 27 (cf. figure 3).

Ces images sont converties numériquement en "images raster" au moyen d'un scanner. Un programme de reconnaissance analyse chaque image et en extrait les coordonnées significatives (x,y des rails, repères topographiques et suite ordonnée des points décrivant l'intrados).

Ce programme fonctionne sur compatible PC.

LE TRAITEMENT INFORMATIQUE DES ETUDES GEOMETRIQUES EN TUNNEL

A partir des éléments ainsi stockés sur disquette à l'issue de cette numération, il devient possible d'effectuer trois types de traitement dans les tunnels :

- 1) une restitution graphique des profils en travers afin de constituer une bibliothèque,
- 2) une étude d'optimisation de la position des voies et des interventions sur la structure,
- 3) une construction interactive d'anneaux de cintres en tunnel (cf figure 4).

Le deuxième type de traitement, également appelé étude géométrique en tunnel, fait appel tout comme celui des épures, à un programme conversationnel de conception interactive (CAO).

Il consiste :

- en première étape, sans modifier le tracé existant des voies, à rechercher le profil en long le plus haut qui permette de dégager le gabarit imposé. Le profil obtenu est une ligne brisée qu'il faut généralement lisser pour respecter les normes de variation de pente. Il est appelé "profil en long lissé haut" (cf. figure 5) ;

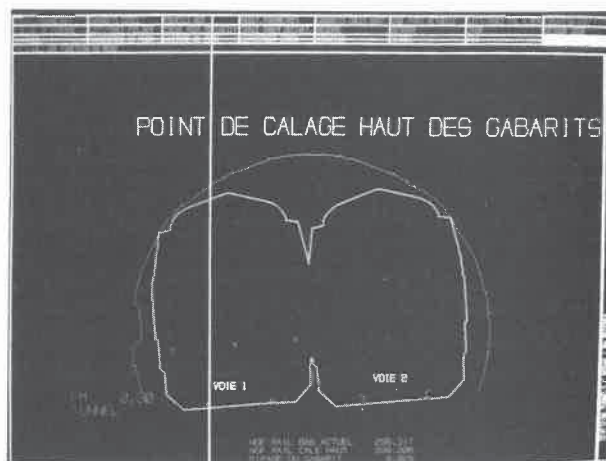


Figure 5

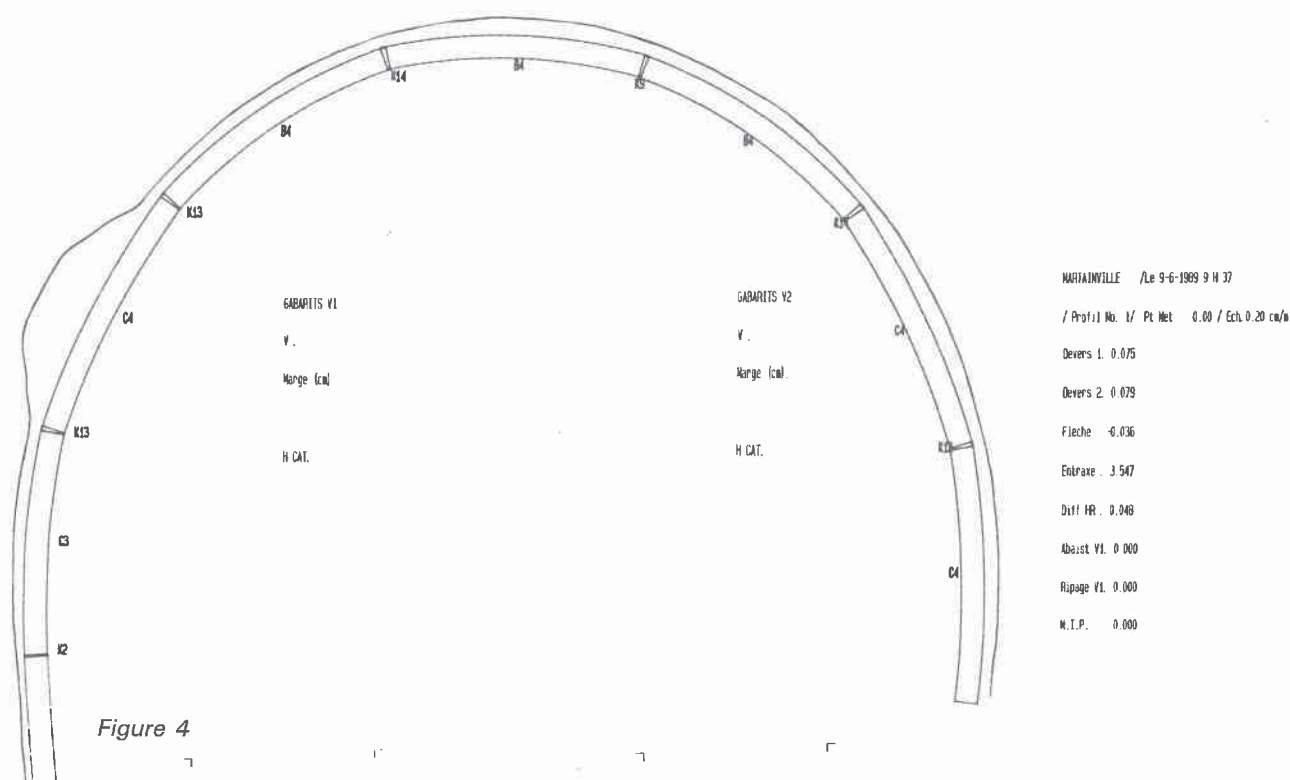


Figure 4

• en deuxième étape, à simuler la circulation du gabarit, ou de l'enveloppe, désiré sur ce profil lissé et à déterminer au droit de chaque photoprofil, les deux déplacements horizontaux les plus grands vers la gauche et vers la droite qui puisse subir ce gabarit avant de rencontrer l'intrados ou l'obstacle (cf. figure 6) ;

— les normes de sécurité et de confort qui réglementent l'implantation des voies ferrées.

Les résultats de cette étude sont édités sous forme de listings de coupes en travers, de planches de fuseaux et de profils en long des voies (cf. figure 7).

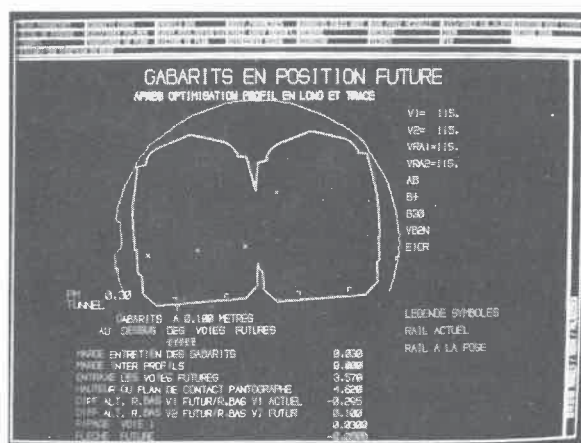


Figure 6

La juxtaposition pour l'ensemble du tunnel de ces deux valeurs de déplacement définit un "fuseau de passage" du gabarit pour le profil en long considéré et le tracé de voie actuel.

• en troisième étape, à modifier le tracé des voies et même le profil en long jusqu'à ce que soit obtenu un compromis satisfaisant entre :

- la nature et l'état de l'ouvrage,
- la géologique du site,
- les travaux envisageables sur la structure et leur coût,
- les travaux en plate-forme et leur coût,

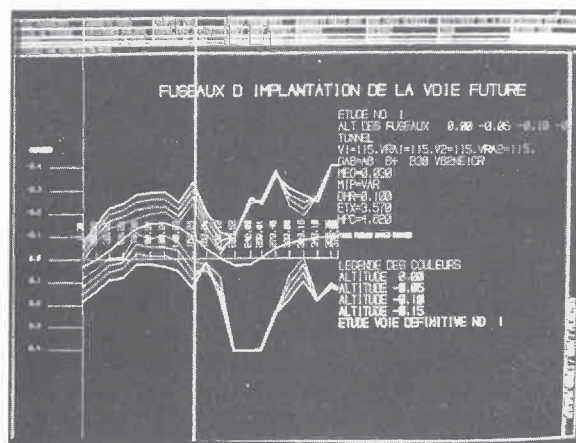


Figure 7

LA PRECISION ET LES MARGES D'ETUDE

La précision à l'issue d'un tel traitement qui fait appel à des relevés in situ et à plusieurs opérations intermédiaires est bien sûr fonction de la précision propre à chacune de ces opérations.

Cette précision d'ensemble pour être maîtrisée a réclamé des optiques spéciales et un aménagement des logiciels pour parvenir à corriger les successives distorsions dues à la prise de vues, aux tirages et aux lectures.

Toutes les vérifications en place de ce traitement effectuées sur les gabarits, étalons, repères, selon la méthode par trilatération au fil d'invar, ont conduit à une précision inférieure à 3 cm pour une ouverture de 8 m.

Lors des relevés pour des raisons bien compréhensibles d'économies, il n'est pas possible de serrer le pas des relevés de profils.

L'équidistance entre profils fixée à 10 m n'est qu'exceptionnellement réduite à 5 voire à 1 m dans les zones déformées ou à rayon prononcé.

Aussi, pour tenir compte des éventuelles variations de la géométrie de l'intrados entre deux profils consécutifs, est-il tenu compte d'une marge appelée marge interprofils, généralement fixée à 3 cm.

Chaque opération de nivellement ou de dressage de voie a pour conséquence d'entraîner de légers déplacements de la position de la voie en altitude ou latéralement. Il s'ensuit la prise en considération d'une marge d'entretien verticale de 5 cm et une marge latérale de 3 cm pour chacune des voies.

Il convient de noter qu'au fur et à mesure de l'exécution de travaux intervenant sur la structure, par la mise en œuvre de nouveaux revêtements par

exemple, des mannequins de chantiers sont régulièrement déplacés pour vérifier le dégagement des gabarits souhaités.

LES PERSPECTIVES

Aujourd'hui, un nouveau procédé de traitement se fait jour. Tant au niveau des prises de vues que du traitement des clichés.

Il consistera, au moyen d'une caméra à deux objectifs, à relever simultanément des clichés instantanés et des clichés en pause ce qui permettra d'obtenir un relevé continu de l'ouvrage.

Comme l'intérieur de la trace de l'image en pause plus épaisse que celle d'un photoprofil, délimite le contour minimal il va s'en dire que dans le futur ce sont ces clichés qui serviront de support aux études géométriques, les clichés instantanés ne servant qu'à positionner les rails.

Un programme, en cours d'élaboration, devrait permettre de relier géométriquement l'ensemble des profils des deux types de clichés. Ainsi, aucune marge interprofil, ne serait prise en compte et la vérification de l'inscription d'un gabarit serait assurée en continuité.

Les essais ont également lieu pour parvenir à relever les têtes de tunnel de jour.

115^e CONGRES NATIONAL DES SOCIÉTÉS SAVANTES AVIGNON, 9-15 AVRIL 1990

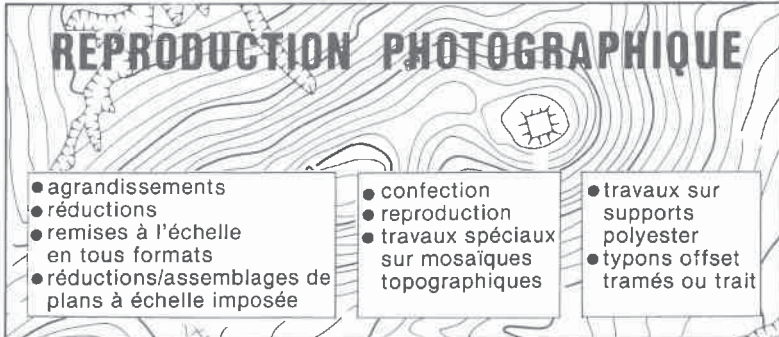
CTHS — Comité des Travaux Historiques et Scientifiques
3-5 boulevard Pasteur - 75015 PARIS
Tél. (1) 40.65.62.57 - (1) 40.65.60.45

Thèmes :

- Perception visuelle et traitement des images.
- Images de l'Univers.
- Images de la Terre.

HISTOIRE DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

Histoire des sciences et des techniques en Provence et dans la France du Sud-Est
Histoire de l'Astronomie en Provence. La mesure des longitudes par Peiresc et ses amis



REPRODUCTION PHOTOGRAPHIQUE

- agrandissements
- réductions
- remises à l'échelle en tous formats
- réductions/assemblages de plans à échelle imposée
- confection
- reproduction
- travaux spéciaux sur mosaïques topographiques
- travaux sur supports polyester
- typons offset tramés ou trait

HAUTE PRECISION




PHOTO-REPROGRAPHIE PHOTO-CARTOGRAPHIE

LES APPLICATIONS DE LA REPRODUCTION TECHNIQUE

5, rue de la Véga
75012 PARIS

(1) **43.47.15.92**

BIBLIOGRAPHIE

sur les ouvrages souterrains et en particulier sur le Tunnel sous la Manche

Nota : des résumés ou extraits de ces ouvrages paraîtront dans le n° 41 d'XYZ

• **OUVRAGES SOUTERRAINS - CONCEPTION, REALISATION, ENTRETIEN**, par A. BOUVARD-LECOANET, G. COLOMBET, F. ESTEULLE chez Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

• **CONNECTION OF THE TWO LEVELLING SYSTEM DATUM IGN 69 AND ODN THROUGH THE CHANNEL BY USING GPS AND OTHER TECHNIQUES.** FIRST INTERNATIONAL WORKSHOP ON GEODESY FOR THE EUROPE-AFRICA FIXED LINK FEASIBILITY STUDIES IN THE STRAIT OF GIBRALTAR, 8-10 mars 1989 - Madrid (Espagne), par P. WILLIS (+), R.F. BORDLEY (*), C. BOUCHER (+), C.E. CALVERT (*), R. CHRISTIE (*), G. PETIT (+).

• **GEODIMETER 140 SMS & COMPUTER AIDED STEERING OF THE TBM (TUNNEL BORING MACHINE) AT THE CHANNEL TUNNEL**, par TUNNELLING GEOTRONICS AB, 1989, Publ. No Geo-0027.

• **LE TUNNEL SOUS LA MANCHE GEOLOGIE ET GEOTECHNIQUE**, sous la direction de Pierre DUFFAUT et Patrick MARGRON, chez Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

• **LE TUNNEL SOUS LA MANCHE - DEUX SIECLES POUR SAUTER LE PAS 1802-1987**, par Jean-Pierre NAVAILLES, chez Epoques - CHAMP VALLON.

• **LE TUNNEL SOUS LA MANCHE.** L'histoire, le cadre juridique, la technique, l'organisation, le mailon manquant, le financement, les retombées sur les régions, la communication, chez Annales des Mines - Mai 1988 - Edition spéciale.

• **USINE MODELE POUR LE TUNNEL SOUS LA MANCHE, BETONS 89 - N° 16**, Janvier 1989, chez Centre d'Information de l'Industrie Cimentière, 41, avenue de Friedland, 75008 Paris.

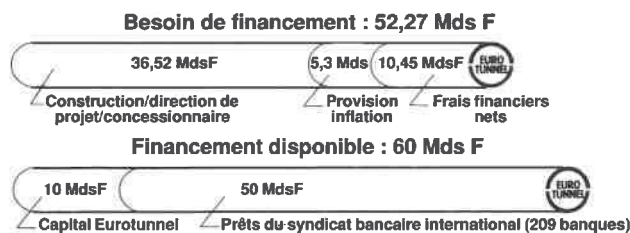
(+) Institut Géographique National (France).

(*) Ordnance Survey (Great Britain).

UN PROJET ENTIEREMENT PRIVÉ

Un financement privé de 60 milliards de F

Eurotunnel a réuni 60 milliards de Francs pour financer le projet, sans aucune aide ni garantie des Etats. C'est le plus grand financement privé du siècle.

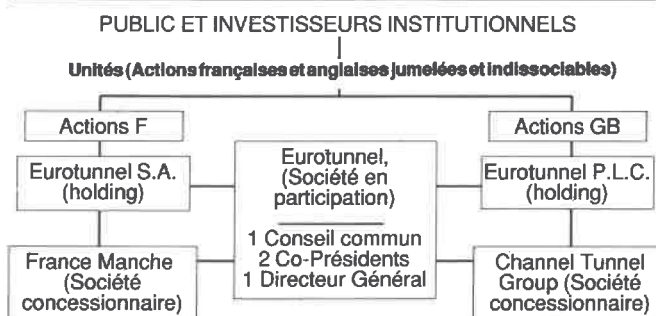


LE GROUPE EUROTUNNEL

Eurotunnel est un groupe privé franco-britannique, formé des sociétés France-Manche (F) et the Channel Tunnel Group (GB). Titulaire d'une Concession de 55 ans (expiration en 2042), il

est chargé de la conception, du financement, de la réalisation et de l'exploitation du Tunnel sous la Manche. Eurotunnel est coté à la Bourse de Paris et au Stock Exchange de Londres.

Actionnaires



Les constructeurs

10 grands constructeurs français et anglais sont chargés de réaliser le projet pour Eurotunnel (Maître d'ouvrage).

