



La ligne 9 du métro de Barcelone

Creusement du tronçon Can Zam - Rio Besòs

Résumé

La ligne 9 du métro de Barcelone est la plus importante infrastructure de transport en cours de construction dans l'aire métropolitaine de Barcelone. Les caractères spécifiques du site ont conduit à prévoir pour l'essentiel du tracé un tunnel de 10,90 m de diamètre intérieur, divisé horizontalement par une dalle intermédiaire qui sépare deux niveaux indépendants, un pour chacun des sens de circulation. Ce système permet de loger à l'intérieur du tunnel lui-même aussi bien les quais des stations que les voies de garage et d'évitement, et les rampes de communication entre voies.

Des procédés originaux ont été développés tout au long des diverses phases du projet et pendant l'exécution des travaux ; ces procédés ont été employés ultérieurement pour la construction d'autres infrastructures souterraines gérées par GISA. Le présent article résume les méthodes utilisées depuis la phase de conception jusqu'à celle des travaux de génie civil, en particulier sur le tronçon Can Zam - Rio Besòs.

Abstract

LINE 9 OF THE BARCELONA METRO;
EXCAVATION OF THE CAN ZAM-RIO
BESÒS SECTION

Line 9 of the Barcelona Metro is the largest transport infrastructure project to be built in the Barcelona metropolitan area over recent years. The specific urban and ground conditions have meant that the majority of the work is designed as a 10.90m diameter tunnel divided by an intermediate slab into two individual levels, one for each direction of travel. This design allows the inclusion of platform areas, siding and passing areas and communication ramps within the same tunnel.

Specific methodologies were developed during the design and construction of the work which have subsequently been used in the construction of other underground infrastructures managed by GISA. The present article gives a summary of the methods applied from the design stage to the civil works, especially on the Can Zam - Rio Besòs section.

Carme DEULOFEU i PALOMAS, Joan SERRATOSA BELLES, Henning SCHWARZ
GISA : GESTIÒ D'INFRAESTRUCTURES SA, BARCELONE

PRÉAMBULE

En 2002, la ligne 9 du métro de Barcelone – encore à l'état de projet – avait fait l'objet d'un premier article en anglais dans la revue TOS [réf. 15]. Maintenant que les travaux battent leur plein, il nous a semblé intéressant de revenir sur ce projet majeur – actuellement le plus gros chantier de métro en Europe – en reprenant un article de C. DEULOFEU paru en espagnol, en avril 2009, dans la Revista de Obras Publicas [réf. 14]. Nous remercions vivement cette revue de nous avoir autorisés à publier cet article en français ; la traduction a été assurée par J. PIRAUD (ANTEA), après quelques retouches et mises à jour de l'auteur.

On remarquera que le tracé de cette ligne 9, tout comme sa justification, ne sont pas sans analogie avec la rocade de métro automatique prévue en proche banlieue parisienne dans le cadre des projets du Grand Paris.

1 - INTRODUCTION

La ligne 9 du métro de Barcelone est la plus importante infrastructure de transport à construire dans le cadre du Plan directeur des infrastructures [réf. 1]. Les communes traversées correspondent à des zones de très grande densité de population de l'aire métropolitaine de Barcelone.

Du Nord au Sud, la ligne 9 traverse les communes de Santa Coloma de Gramenet, Badalona, Barcelone, Hospitalet de Llobregat et Prat de Llobregat. Sa fonction majeure sera de convertir le schéma purement radial du métro de Barcelone en un réseau maillé, qui rapprochera du transport collectif des secteurs non desservis de manière optimale, comme Santa Coloma de Gramenet, Badalona, la zone industrielle et de services de la « Zona Franca », la ville de Prat de Llobregat et les accès à l'aéroport, tout en facilitant les correspondances intermodales ou avec d'autres lignes de métro (cf. fig. 1). Mais c'est également une nouvelle ligne de métro qui améliore les conditions socio-économiques et l'accessibilité de quartiers denses mais mal desservis.

La ligne 9 aura une longueur de 47,8 km.

Parmi ses **52 stations**, 20 seront en correspondance soit avec le métro ou le tramway, soit avec des lignes de banlieue ou des lignes régionales gérées par les *Ferrocarrils de la Generalitat* (FGC), soit avec les lignes interrégionales ou à grande vitesse (RENFE).

Pour sa construction, il a été décidé d'utiliser des tunneliers à pression de terre dans les sols et roches tendres, et des tunneliers convertibles pression de terre/roches dures et vice-versa en fonction de la qualité des terrains traversés. Sur la plus grande partie du tracé, le diamètre intérieur du tunnel est de 10,90 m, ce qui impose un diamètre excavé pouvant atteindre 12,06 m. A l'intérieur de ce tunnel de grand diamètre, on construit une dalle intermédiaire qui permet d'individualiser chaque sens de circulation et surtout de **loger les quais des stations à l'intérieur du tunnel**, sans avoir à excaver de grandes fouilles depuis la surface pour y mettre les stations, ni de grandes cavernes sous le bâti existant (cf. fig. 2).

Ce concept diminue fortement le coût des stations, tout en accélérant le creusement du tunnel principal du fait de la suppression des sujétions liées à la traversée de stations vides. Mais il présente aussi de nombreux

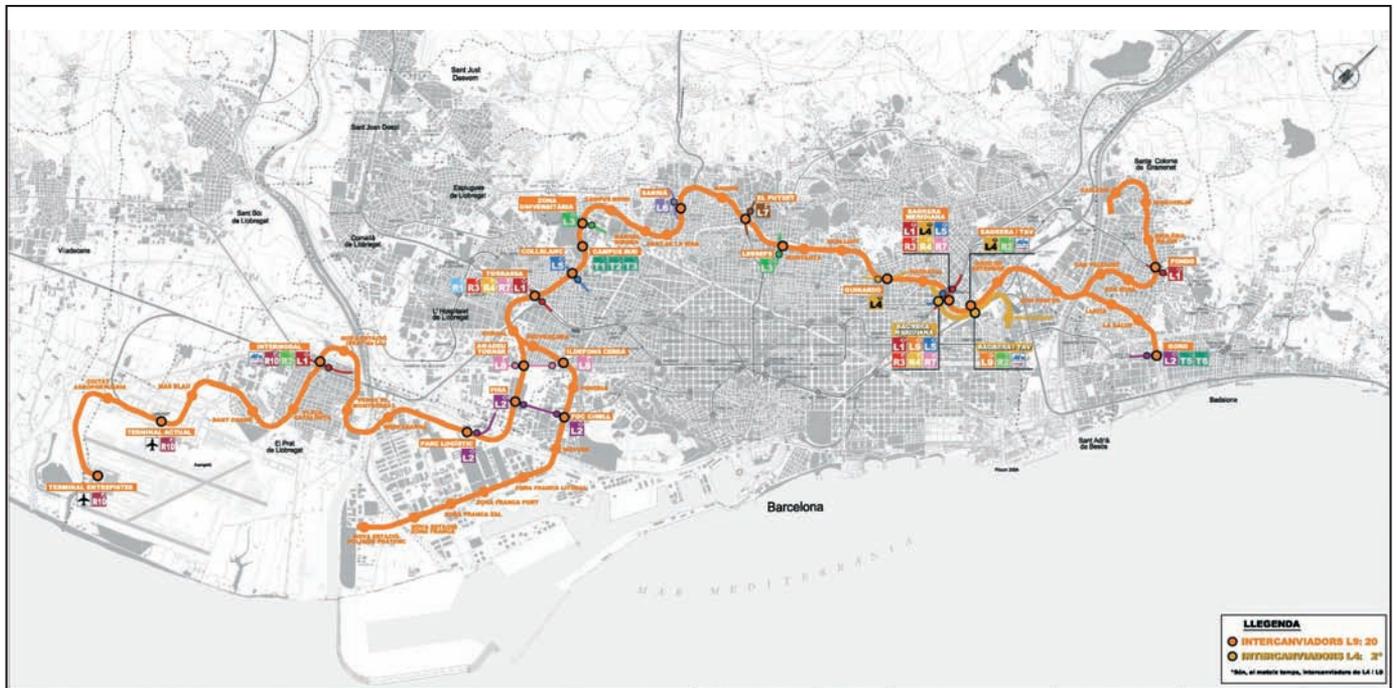


Fig 1 - Tracé de la ligne 9

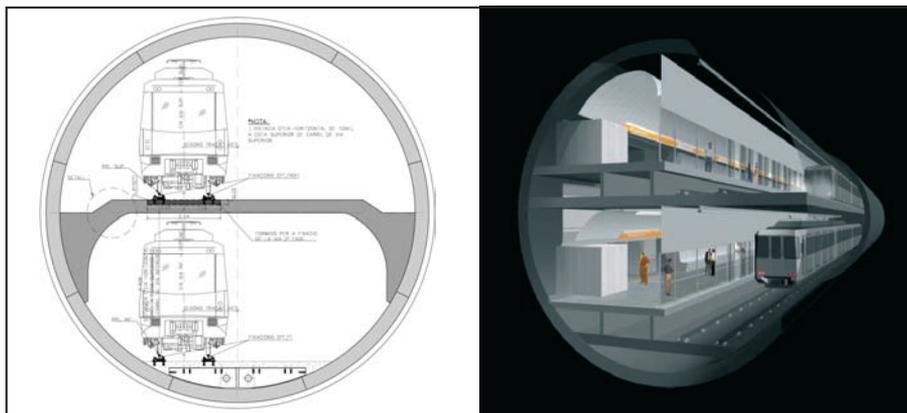


Fig 2 - Coupe du tunnel Ø_{ext} 12 m en section courante (à gauche) et en station (à droite).

avantages du point de vue fonctionnel, car il permet :

- de garer facilement des rames de réserve, d'où une grande flexibilité pour les distribuer tout au long de la ligne en fonction des besoins, grâce à des rampes de liaison (cf. fig. 3),
- de supprimer les niches latérales du fait du plus grand espace disponible,
- de faciliter l'inspection et la maintenance de la voie et des réseaux associés,
- de favoriser l'indépendance des deux voies en cas d'incendie,
- d'allonger les stations à volonté, pour un coût minime.

Par ailleurs, dans le secteur du delta du rio Llobregat, on a opté pour un tunnel monotube plus proche de la surface, avec deux voies sur le même niveau et des stations classiques entre parois moulées, dans le souci de protéger l'aquifère profond (cf. fig. 4).



Fig 3 - Vue de la voie inférieure avec débranchement d'une rampe de liaison avec le niveau supérieur

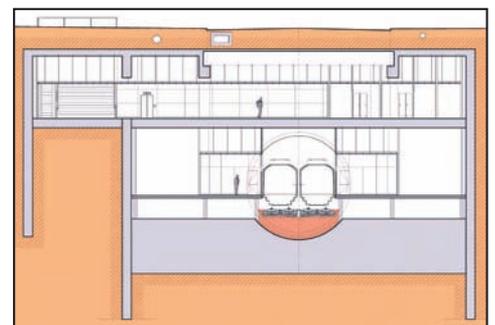


Fig 4 - Coupe d'une station réalisée à l'abri de parois moulées

Il est prévu d'utiliser au total 5 tunneliers à pression de terre ou convertibles. Enfin, un dernier tronçon est prévu en viaduc pour la traversée de la Zona Franca, ce qui est une nouveauté à Barcelone.

Autre changement fondamental apporté par la ligne 9 pour le transport public de masse : la **conduite automatique**, ainsi que la fermeture des quais par des portes synchronisées avec l'arrivée et le départ des rames ; l'installation de ce système d'exploitation automatique est confiée à la société SIEMENS-DIMETRONIC. Actuellement, un premier tronçon près de Santa Coloma de Gramenet est en cours d'essais, en vue de la mise en service d'un premier tronçon vers la fin 2009. Ultérieurement, d'autres tronçons seront mis en service les uns après les autres, jusqu'à achèvement de la ligne (cf. encadré).

2 - LE PROJET

Les projets de tunnels urbains à Barcelone, et en particulier celui de la ligne 9, doivent tenir compte d'un ensemble de contraintes, parmi lesquelles :

- La *population* que l'on désire desservir, donc les études de trafic potentiel réalisées au préalable ;
- Les *contraintes topographiques*, qui vont de l'environnement deltaïque des fleuves Besòs et Llobregat jusqu'à un contexte quasi-montagneux dans le centre et l'extrême Nord de l'agglomération ;
- Les *contraintes de tracé*, qui doivent intégrer la présence d'infrastructures existantes de toute nature : lignes de métro, voies ferrées, tunnels routiers, collecteurs d'assainissement, etc. ;
- Les *conditions géotechniques* imposées par un environnement géologique particulièrement complexe : sols meubles des deltas (sables et limons), roches fracturées et faillées (schistes), roches dures – ce qui a nécessité d'établir des coupes longitudinales et transversales, ainsi que des modèles de blocs et des interprétations en 3D [réf. 2]. Les méthodes recommandées dans l'Eurocode 7 ont été appliquées [réf. 3] ; ont été également réalisées des études probabilistes analogues à celles présentées par S. Boone [réf. 4]. Outre le calcul structurel du tunnel, il importe de vérifier par différentes méthodes la stabilité du front compte tenu des pressions de confinement utilisées (cf. recherches de N. Ruse, [réf. 5]) ;
- Les *autres sujétions liées au sous-sol*, telles que vieux puits, captages d'eaux

La ligne 9 en chiffres

Longueur. Total de la ligne 9 : 48 km dont :

- Tranchée couverte : 3 km
- Viaduc : 4,1 km
- Tunnel \varnothing_{ext} 9,40 m avec 2 voies à niveau : 13,6 km
- Tunnel \varnothing_{ext} 12 m à voies superposées : 26,9 km

Nombre de stations : 52, dont 20 en correspondance

Dates importantes

Lancement des travaux de génie civil : août 2002

Démarrage des 5 tunneliers : échelonné entre 2003 et 2009

Achèvement des travaux au tunnelier : juin 2011

Mises en service partielles :

- Can Zam – Can Peixauet : déc. 2009
- Gorg – Bon Pastor – Sagrera : juin 2010
- Aeroport – Prat – Zona Franca – Collblanc : déc. 2012

Ouverture de l'ensemble de la ligne 9 : juin 2014

Investissement total :

environ 6 500 M€ hors taxes, hors matériel roulant mais avec équipements ferroviaires

souterraines, refuges antiaériens de la Guerre Civile... En anticipant sur d'autres projets de l'aire métropolitaine de Barcelone et de Catalogne, on a également réalisé des inventaires spécifiques de phénomènes karstiques et d'habitat néolithique, inventaires qui seront également utilisés pour les études préalables de la future ligne 12 ;

• Les sujétions liées à la présence du *niveau phréatique* ou de flux d'eaux souterraines. A ce sujet, il convient de prêter la plus grande attention aux procédures de pompage, qui doivent faire partie intégrante de la méthode de construction ;

• Les *contraintes d'urbanisme*, dans les zones denses manquant de larges avenues, qui sont déterminantes pour l'implantation précise des stations, des accès, des puits de ventilation ou d'exhaure, des sorties de secours, etc. ;

• Les *contraintes fonctionnelles* propres à la conception d'une ligne à exploitation automatique mais toujours accessible et qui bénéficiera de la technologie la plus avancée.

Il va sans dire que les *contraintes de sécurité*, pendant les travaux comme pendant la construction, sont fondamentales et ce dès la phase de conception.

Enfin, les projets de construction de GISA intègrent des *Inspections techniques de bâtiments* (ITE), ainsi qu'un *Projet d'instrumentation de l'ouvrage* (ECIA), qui sert de base au Plan d'auscultation des travaux [réf. 6].

La prise en compte des diverses contraintes énumérées ci-dessus a conduit à

adopter une grande variété de **modes de construction** pour les différents tronçons de la ligne 9 (cf. fig. 5) :

- Tranchées couvertes entre parois, seulement exécutables dans les zones pourvues d'espaces libres et de larges avenues (sur 3 km) ;
- Tunnel peu profond \varnothing_{ext} 9,40 m, avec double voie sur le même niveau et stations entre parois moulées, solution adaptée au tronçon n° 1 (sur 13,6 km) (cf. fig. 4) ;
- Viaduc dans la zone industrielle du tronçon n° 2, au voisinage de la mer (sur 4,1 km) ;
- Tunnel profond \varnothing 12 m excavés pour les tronçons n° 2, 3 et 4, avec voies superposées et stations logées à l'intérieur même du tunnel (sur 26,9 km) ;
- Sur une courte longueur (0,4 km), tunnel excavé en méthode conventionnelle mais avec voies superposées.

C'est l'impossibilité de pouvoir exécuter des stations conventionnelles depuis la surface, et la grande difficulté de cavernes qu'il aurait fallu creuser dans des sols sous la nappe, qui a conduit à choisir sur la majorité du tracé le concept innovant du tunnel de grand diamètre exécuté au tunnelier. Sur la longueur du tunnel correspondant à celle de la station, on intègre donc dans le tunnel les deux quais et les divers services nécessaires aux stations. Les voies sont réparties sur deux niveaux séparés par une dalle intermédiaire de 40 cm d'épaisseur (cf. fig. 2) ; ce concept de voies superposées est analogue à celui qui a été adopté à la même époque pour l'autoroute A86 de



Fig 5 - Les divers modes de construction de la ligne 9

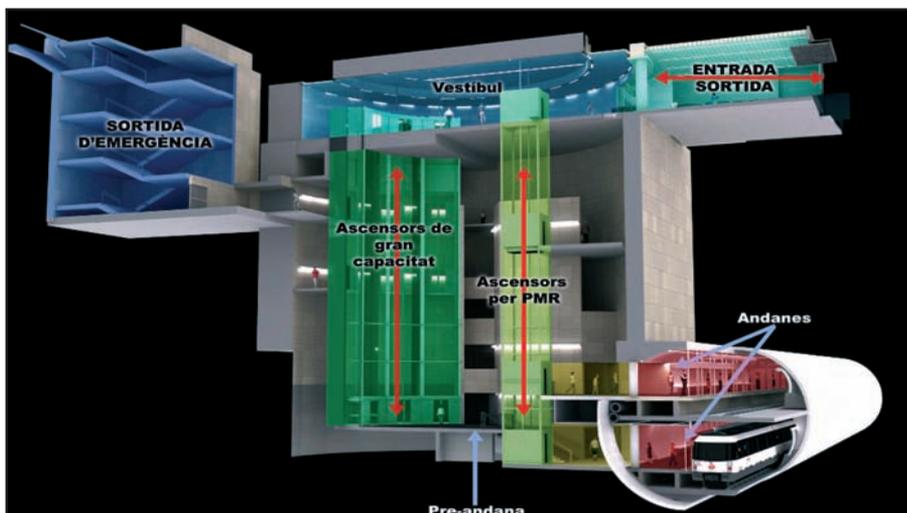


Fig 6 - Accès aux stations par puits de grand diamètre (andanes = quais)



Fig 7 - Puits d'accès creusé à l'abri d'une paroi moulée

contournement de Paris (projet SOCATOP), qui est limitée aux véhicules légers, ainsi que pour l'autoroute souterraine jumelée à un collecteur de crues à Kuala-Lumpur (projet SMART).

Le projet de ligne 9 a été divisé en 4 tronçons, présentés sous forme schématique sur la figure 5 en fonction de leur mode de réalisation. Les travaux font l'objet de 22 contrats principaux de génie civil et de 6 contrats pour les équipements. Sur les 52 stations, on compte 5 stations en viaduc, 17 entre parois moulées, et 30 à l'intérieur même du tunnel.

L'accès aux 30 stations de ce dernier type se fait par des **puits de grand diamètre** (26 à 32 m), dont la profondeur varie de 35 à 70 m (cf. fig. 6). Les puits profonds sont exécutés soit avec des bennes à deux godets, soit par des haveuses type Hydrofraise, en veillant particulièrement à l'exécution de joints entre panneaux (cf. fig. 7) ; en terrain rocheux, l'excavation des puits se fait parfois à l'explosif, avec soutènement en béton projeté, boulons et anneaux de béton armé. L'axe des puits est excentré par rapport au tunnel, l'implantation du puits pouvant varier depuis une position sécante (pour les stations situées dans des sols) à une position presque tangente (pour les stations situées dans des roches) (cf. fig. 8). Le plus souvent, le tunnelier traverse la base du puits **avant** qu'il ne soit vidé de ses matériaux, ce qui impose de démonter ensuite une partie des voussoirs.



Fig 8 - Intersection du tunnel avec un puits d'accès à une station

Naturellement, un bloc étanche doit être créé par injections au niveau de la jonction entre tunnel et puits.

3 - DONNÉES GÉOLOGIQUES ET GÉOTECHNIQUES

Sur la plus grande partie du tracé, la ligne 9 du métro de Barcelone passe sous des zones à forte densité avec des rues étroites. Le relief en surface est très variable selon les tronçons, depuis des zones collinaires à montagneuses dans le tronçon central et nord, jusqu'aux plaines deltaïques des rios Besòs et Llobregat. Les matériaux excavés varient également beaucoup, depuis des granites de grande dureté, des roches tendres du Miocène et du Pliocène, jusqu'à des sols sur-consolidés ou des sols mous du Quaternaire récent (cf. fig. 9). Le niveau phréatique est élevé, et toujours situé au-dessus de la clé du tunnel.

Dès les premières études réalisées par l'Autoritat del Transport Metropolità (ATM) et jusqu'à la réalisation des travaux, une grande masse de dossiers techniques a été compilée concernant les différentes campagnes de reconnaissance géotechnique, en particulier celles conduites par ATM et plusieurs campagnes réalisées durant le projet d'exécution. Après le début des travaux, on a réalisé localement des reconnaissances de détail, avec notamment des essais de pompage et l'exécution de puits et piézomètres qui ont apporté des informations complémentaires.

Pour la mise en place de l'auscultation, des sondages ont également été réalisés en vue d'y installer des extensomètres, inclinomètres, piézomètres et autres systèmes de mesure. En règle générale, les inclinomètres ont été implantés des deux côtés du tracé, jusqu'à une profondeur supérieure à celle du radier du tunnel ; à cette occasion, les sondages ont été carottés et

ont fait l'objet d'essais au laboratoire et in situ. Les forages piézométriques ont été également carottés afin de pouvoir positionner correctement la zone crépinée. Enfin, des forages destructifs ont été réalisés en compléments des investigations géophysiques destinées à détecter des fondations profondes.

Tous ces résultats ont été rassemblés dans des bases de données spécifiques facilitant leur consultation et leur analyse, en vue d'optimiser les méthodes de construction. Ceci a permis d'obtenir une vision tridimensionnelle du sous-sol, ce qui s'est révélé particulièrement utile dans les zones de contact entre couches et dans les zones faillées des massifs rocheux.

4 - CONTRATS DE MAÎTRISE D'ŒUVRE ET DE SUIVI DES TRAVAUX

En tant que maître d'ouvrage délégué pour le compte des autorités de Barcelone, GISA s'est assuré le concours des divers assistants techniques nécessaires au bon déroulement des travaux, en particulier :

- un Maître d'œuvre,
- un Responsable du suivi et du contrôle (LOP),
- un Coordinateur Santé-Sécurité,

avec pour chacun un contrat séparé. De plus, GISA a mis à la disposition du Maître d'œuvre d'autres contractants indépendants, comme le Contrôle de qualité, l'Auscultation topographique et géotechnique, ainsi que l'Inspection technique des bâtiments (ITE).

Pour les tronçons comportant des excavations sous bâti, on a rédigé des plans et protocoles de travail spécifiques, qui définissent les paramètres de contrôle et les actions à entreprendre en cas de dépassement des seuils.

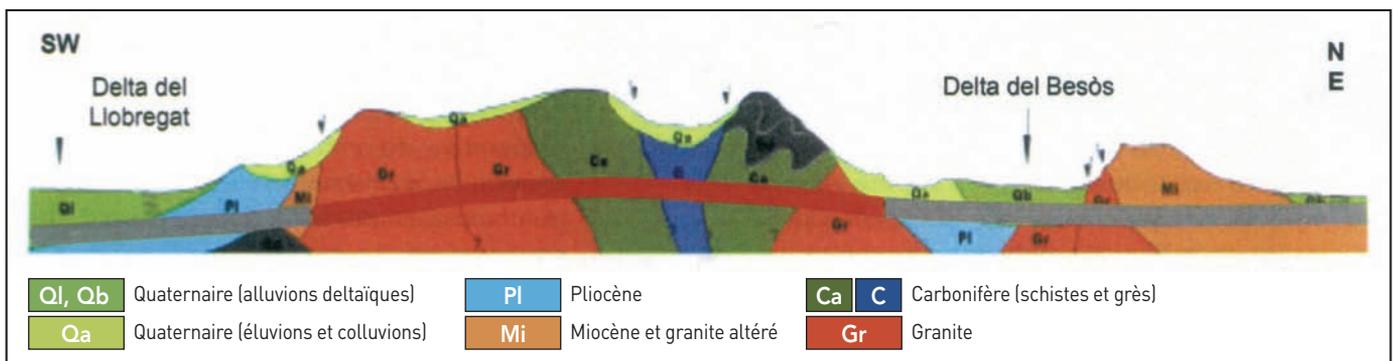


Fig 9 - Coupe géologique générale de la ligne 9 entre les vallées de Llobregat et du Besòs

Calcul et suivi des tassements

Pour le suivi direct des travaux, on dispose de systèmes informatiques de transmission des données en temps réel, auxquels ont accès le Maître d'œuvre, le Responsable du suivi et du contrôle, l'entreprise, l'Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), ainsi que GISA et tous ceux à qui elle y donne accès. Pour améliorer l'efficacité et l'analyse de l'auscultation des travaux en temps réel, GISA a créé une base de données avec son propre SIG (système d'information géographique). La connexion avec les systèmes informatiques des tunneliers donne une information directe sur les paramètres d'excavation ; l'utilisation de macros d'analyse permet de comparer des ensembles de valeurs et d'évaluer la qualité du travail des tunneliers [cf. La Fonta, réf. 17].

A l'initiative de GISA, on s'est efforcé d'améliorer ces systèmes informatiques ainsi que l'analyse des données disponibles. Pour cela, on a mis au point un système de fiches de constat et des formules d'évaluation de la qualité des travaux. Citons en particulier la formule d'évaluation de l'efficacité des injections de bourrage [réf. 7] ; cette formule permet de comparer la « perte de sol » ou la subsidence liée à la décompression du front, avec la perte de sol ou la subsidence finale une fois que le mortier d'injection a fait prise, soit :

$$\eta_R = 1 - \frac{V_{st} - V_{sc}}{V_c - V_t}$$

Dans la formule (1), le paramètre V_{st} représente le volume final (en m^3/m) de la cuvette de subsidence après stabilisation des tassements, tandis que V_{sc} représente le volume de subsidence lors du passage du front dans la section analysée. Le volume excavé V_c (toujours en m^3/m) est déduit du diamètre de la roue de coupe, tandis que le volume annulaire V_t correspond au diamètre extérieur des voussoirs.

En considérant une cuvette théorique en forme de courbe de Gauss inversée, il est possible de calculer le volume de subsidence V_s d'après le tassement dans l'axe du tunnel [réf. 8], soit :

$$V_s = \sqrt{2\pi} \cdot i \cdot s = \sqrt{2\pi} \cdot K \cdot h \cdot s = P \cdot s$$

où K est un coefficient dépendant du terrain, h est la hauteur de couverture dans l'axe du tunnel, et S le tassement dans l'axe. Compte tenu de la relation (2), on peut

déterminer l'efficacité η_R du remplissage de l'espace annulaire grâce à la formule (3), soit :

$$\eta_R = 1 - \frac{P(S_t - S_c)}{V_c - V_t}$$

où S_t est le tassement superficiel final dans l'axe après stabilisation, et S_c le tassement lors du passage du front.

Pour limiter au maximum les pertes de sol et les tassements qui en découlent, deux systèmes sont employés à la traversée des terrains meubles par les tunneliers à pression de terre (cf. fig. 10) :

- au front, injection rapide d'un coulis de bentonite en cas de perte de pression qu'il faut compenser au plus vite, notamment pendant la pose des voussoirs ou en cas d'arrêt intempestif ;
- autour de la jupe, injection systématique d'un volume contrôlé de mortier ou de coulis inerte pour compenser la conicité de la jupe et limiter la relaxation des terrains dans les sols peu cohérents, sans attendre l'injection du mortier de bourrage derrière les voussoirs.

GISA, en tant qu'entreprise publique de gestion des projets d'infrastructures décidés par la Généralité de Catalogne, a créé sa propre gamme d'outils qu'elle tient à la disposition de tous les intervenants dans le projet et les travaux. Ces outils consistent en une base de données géologiques et géotechniques, un système de contrôle des procédures des tunneliers, et un système avancé d'auscultation qui donne une vue d'ensemble de tous les paramètres.

5 - INSPECTION TECHNIQUE DES BÂTIMENTS

Pour tous les bâtiments situés dans la zone d'influence définie dans le projet, on réalise des Inspections techniques de bâtiments (« ITE »), travail qui est sous-traité à des bureaux ayant les compétences nécessaires en construction et pathologie des bâtiments.

Sont inspectées aussi bien les parties communes des immeubles que chaque unité de propriété individuelle, qu'il s'agisse de logements, de commerces, de bureaux, etc. Les procès-verbaux de ces inspections sont remis aux propriétaires des immeubles et sont également déposés chez un notaire.

En fonction des pathologies détectées, on réalise des études de vulnérabilité et de sensibilité ; le cas échéant, on refait des calculs de structures compte tenu de l'effet possible de l'exécution des ouvrages souterrains, ce qui permet de prendre des décisions adéquates lors des travaux.

6 - AUSCULTATION

Avant de commencer un ouvrage souterrain, le Maître d'œuvre prépare un Plan d'Auscultation, en se basant sur l'annexe Auscultation du projet et sur les documents de référence [cf. réf. 9 et 10]. Dans ce document, on définit principalement les critères de base pour le contrôle topographique et géotechnique des ouvrages. Selon la méthodologie définie pour les ouvrages souterrains gérés par GISA, un Plan d'auscultation doit comprendre les documents suivants :

- Doc. 0 : Registre des modifications, conformément à la norme ISO 9001 ;
- Doc. 1 : Système de transmission des messages d'alerte, et leur résolution ;
- Doc. 2 : Méthodologie d'installation, de lecture et de transmission des données, ainsi que de désinstallation des appareils ; notices et plans de mise en œuvre des instruments ;
- Doc. 3 : Notices techniques des dispositifs d'auscultation.

7 - INFORMATION DES HABITANTS

La réalisation de travaux en site urbain doit bien sûr prendre en considération les habitants qui doivent vivre avec les ouvrages et

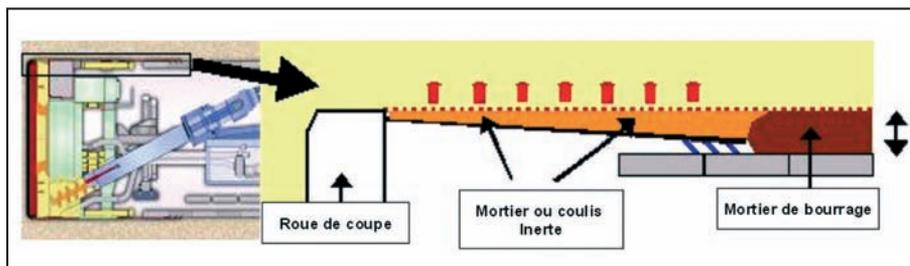


Fig 10 - Soutènement du terrain à l'extrados du tunnelier

les gênes qu'ils induisent (poussière, bruit, difficulté d'accès, etc.), et que l'on s'efforce de minimiser dans la mesure du possible. Pour pouvoir répondre aux questions et doléances éventuelles des habitants, GISA installe des Points d'information des citoyens (« PAC ») dans des lieux stratégiques des quartiers affectés par les travaux.

Ces PAC servent d'abord à organiser des réunions d'explication avec les associations de riverains pour présenter le projet, ses différentes phases, les déviations de voirie qu'il impose et autres sujétions. Mais dans les bureaux des PAC, les riverains ont aussi accès à la documentation du projet et à un interlocuteur de GISA ; celui-ci donne l'information demandée et recueille les observations ou doléances des riverains en vue d'y donner suite avec le Maître d'œuvre, ou le spécialiste qui a réalisé l'ITE en cas de dommages aux immeubles.

8 - LE TRONÇON CAM ZAM - RIO BESÒS

Le tronçon Cam Zam - Rio Besòs de la ligne 9, entièrement situé dans la commune de Santa Coloma de Gramenet, débute au niveau des ateliers de Cam Zam pour ce qui est de la marche du tunnelier. Il continue sous le faubourg de Singuerlin, où se trouve la station du même nom. Après être passé sous le vallon qui est aujourd'hui occupée par l'avenue Pallaresa et la tranchée couverte de l'autoroute urbaine B20, il se dirige vers la station Església, qui correspond à un point haut topographique. Le tracé aborde ensuite le faubourg de Fondo avec la Rambla de San Sebastian, où la ligne 9 passe sous la ligne 1 du métro. Les stations Santa Rosa et Can Peixauet desservent les quartiers du même nom. La fin de ce tronçon s'embranchement sur le tunnel Gorg-Sagrera, qui fait également partie de la ligne 9.

Le relief de ce secteur est de type collinaire à montagneux, avec des points hauts situés à Singuerlin et près de l'église principale de Santa Coloma. Les points bas de ce tronçon sont marqués par le parc de Can Zam dans la plaine du rio Besòs, le vallon de Riera de Can Zam, le faubourg de Fondo et la plaine de Besòs à la fin du tronçon.

A l'exception du parc de Can Zam et du tronçon final entre Can Peixauet et la jonction avec le tronçon Gorg-Sagrera, l'ensemble du secteur est entièrement urbanisé, avec une densité de population très élevée.

De plus, il faut souligner la présence de grandes infrastructures souterraines comme l'autoroute B20 (tranchée couverte), et la ligne 1 du métro avec sa station terminus de Fondo et son tiroir de manœuvre.

Les terrains rencontrés sur ce tronçon sont les suivants :

- formations quaternaires de la rivière Besòs et ruisselet,
- « sauló » (granite très altéré),
- granodiorites et « cornubianitas » (roches affectées par le métamorphisme de contact),
- conglomérats du Miocène,
- brèches de failles,
- dykes de porphyre.

L'excavation du tunnel utilise un tunnelier convertible Roches dures/Pression de terre, fabriqué par NFM-Wirth. La puissance installée est de 4,2 MW, pouvant fournir un couple de 29 MN.m à 3,7 tours/mn. Le revêtement comprend 7 voussoirs universels de 35 cm d'épaisseur plus une clé. La roue de coupe a un diamètre nominal de 11,95 m et avait au début un pourcentage d'ouverture de 22%. La roue de coupe utilisée sur ce tronçon possède deux configurations :

- pour l'excavation des roches en mode ouvert, la roue dispose sur sa face intérieure de godets qui remontent le matériau excavé et le déversent sur une bande transporteuse au centre du bouclier ;
- pour la conversion en mode pressurisé, on démonte ces godets, on rétracte la bande transporteuse et on referme son entrée ; ceci permet d'avancer la vis sans fin jusqu'à la base du bouclier pour extraire le matériau excavé.

La présence de roches métamorphiques fracturées (« cornubianitas »), combinée avec la taille et la proportion élevée des ouvertures de la roue, a favorisé la pénétration de gros blocs dans la chambre de coupe. La chute de ces blocs depuis le front a engendré divers problèmes, comme une usure accrue des molettes du fait des chocs contre un front hétérogène, des dégâts à l'intérieur de la chambre de coupe et des désordres au niveau de la bande transporteuse (notamment chutes de blocs de la bande vers le radier du tunnel). Ceci a conduit à réduire l'ouverture de la roue de coupe au moyen de barres soudées.

L'excavation dans les granodiorites a rencontré moins de problèmes. Dans les zones

peu fracturées, la pénétration était lente et par suite le rendement de la machine faible. Depuis les environs de la station Santa Rosa jusqu'à Can Peixauet, le profil se rapproche du contact entre le batholite granitique et les conglomérats du Miocène ; dans cette zone, la roche était plus écrasée que fracturée, si bien que cet affaiblissement du massif a permis d'attendre un avancement maximal de 22 anneaux/jour. Par ailleurs, la traversée de dykes successifs de porphyre dur mais fracturé et l'altération du massif à leur contact ont aussi entravé l'avancement.

La théorie de l'excavation en roches dures [réf. 11 et 12] explique que les molettes creusent des sillons concentriques sur le front et que les tractions induites par la pression des molettes détachent des écailles de roche entre sillons consécutifs. C'est bien ce qui c'est produit ici aussi en roche saine ; comme prévu, le marin se présente sous forme de « chips » aplatis et de granulométrie uniforme. Par contre, dans les roches très fracturées, la rupture ne se produit plus sous l'effet des tractions entre sillons, mais à cause de la décompression de la roche, qui provoque des chutes de blocs et augmente considérablement l'usure des outils.

L'exécution du tunnel de la ligne 9 dans les granites à intrusions de porphyre a rencontré une autre difficulté importante, à savoir la présence d'eaux thermales. Le complexe géologique traversé comprend un batholite de granodiorite traversé par des dykes de porphyre dans les zones de failles. Ces porphyres sont plus friables et plus fracturés que les granites. La décompression du massif rocheux à l'arrivée du tunnelier provoque une ouverture des fractures et fissures ; comme celles-ci ne sont pas planaires, elles se transforment en canalicules pour le passage de l'eau. L'équilibre des pressions hydrostatiques se trouve perturbé lors de l'entrée du tunnelier dans ces zones, avec apport d'eau depuis un niveau inférieur à l'excavation. Une fois les conditions hydrostatiques rétablies, l'arrivée d'eau thermique vers le tunnel s'arrête, si bien que l'effet thermique du phénomène n'est pratiquement pas ressenti à l'intérieur du tunnel.

L'excavation des puits circulaires des stations est réalisée entre parois moulées dans leur partie supérieure (sols et granite altéré), avec bétonnage d'un anneau intérieur. En profondeur, le creusement se fait à l'explosif, avec un anneau de béton armé.

9 - CONSIDÉRATIONS FINALES

Le projet et les travaux de la nouvelle ligne 9 du métro de Barcelone se basent sur des techniques classiques pour les ouvrages souterrains, mais aussi sur des méthodologies propres à GISA ; celles-ci incorporent le savoir de projeteurs, de maîtres d'œuvre, d'entrepreneurs, de spécialistes de l'auscultation, de l'inspection des bâtiments, etc. GISA veille à ce que soit mis en œuvre un processus d'amélioration continue, dans lequel prévalent le respect de la méthodologie, la rigueur, le contrôle, le développement et l'innovation. C'est dans cet esprit que GISA participe à des projets du 6^{ème} Programme-cadre de l'Union européenne, tels que TUNCONSTRUCT (Technology in Underground Construction) et S@NY (Sensors Anywhere).

La conception d'une grande partie de la ligne 9 avec des tunnels à deux niveaux est une innovation pour les systèmes de métro, qui répond à un ensemble de contraintes spécifiques comme la densité de population et la configuration urbanistique des quartiers traversés.

Nous considérons qu'une méthodologie rigoureuse et adaptée aux sujétions de chaque tronçon, ainsi que la rétro-analyse d'expériences antérieures, sont à la base d'une bonne exécution des ouvrages. Les paramètres d'avancement et les effets de l'excavation sur les avoisinants sont et doivent être ajustés en permanence en se basant sur l'analyse du terrain excavé, sur le contrôle des processus, et sur les résultats de l'auscultation comparés à ceux des modèles numériques.

La communication avec les riverains et les différentes entités et organismes par le biais de réunions d'information et de suivi, appuyées sur des Points d'information des citoyens (« PAC »), sont absolument indispensables pour atteindre les objectifs que nous nous sommes fixés. ●



► RÉFÉRENCES

- [1] Pla Director d'Infraestructures de Barcelona (PDI 2001-2010)
- [2] EXADACTYLOS, G. , STAVROPOULOU, M. – A specific upscaling theory of rock mass parameters exhibiting spatial variability ; analytical relations and computational scheme – Int. Journal of Rock Mech. & Mining Sciences, n° 45, 2008, pp. 1102-1125.
- [3] EUROCODIGO 7 : Proyecto Geotecnico (EN 1997).
- [4] BOONE, S. – Evaluating Risk of Construction-induced Building Damage for Large Underground Projects – Jorn. Tec. Movimientos de Edificios Inducidos por Excavaciones, Barcelona, 2008, pp. 95-122.
- [5] RRUSE, N. – Räumliche Betrachtungen der Standsicherheit der Ortsbrust beim Tunnelvortrieb – Doct. Thesis, Bericht n° 51, Abt. Ingenieurgeologie und Tunnelbau, Univ. Stuttgart, 2004.
- [6] GISA – Plec de prescripcions per a la redaccio d'estudis constructius d'instrumentacio i auscultacio en fase de projecte obra civil – ECIA PLP-38, 2006
- [7] SCHWARZ, H. – Línea 9 Metro Barcelona ; Excavacion con con Tuneladoras de Gran Diametro – Jorn. Tec. Singularidades Constructivas en los Tuneles de los Metros de Barcelona, Madrid y Sevilla. Barcelona, 2009
- [8] PECK, R.B. – Deep Excavations and Tunnelling in Soft Ground – Proc. 7th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engin., Mexico, 1969, vol. 1V, pp. 225-290.
- [9] DUNNICLIFF, J. – Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance – 1988.
- [10] SOTERAS, M., EMA, C., SCHWARZ, H. – Instrumentation y Auscultacion durante la Construcccion de Tuneles y Estaciones de la futura linea 9 del Metro de Barcelona – Ingeopress n° 143, nov. 2005.
- [11] RASTAMI, J., OZDEMIR, L. – A new Model for Performance Prediction of Hard Rock TBMs – Proc. RETC, 1993.
- [12] ITA Working Group n° 14 (Mechanised Tunnelling) – Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines.
- [13] DEULOFEU i PALOMAS, C. et al – La linea 9 del metro de Barcelona, eficaz interconexion – Cauce 2000, Revista de ingenieria civil, Madrid, 2007, n° 138, pp. 60-69.
- [14] DEULOFEU i PALOMAS, C. et al – El Tramo Can Zam - Besòs de la Línea 9 del Metro de Barcelona – Revista de Obras Públicas, ISSN: 0034-8619, abril 2009, n° 3498, pp. 33-42
- [15] DELLA VALLE, N. – The new line 9 of Barcelona metro – Tunnels & Ouv. souterrains, n° 172, juillet 2002, pp. 251-257.
- [16] BORRAS GABARRO, J. et al. – Line 9 of metro Barcelona : a new way for building metropolitan railways. Journées internat. AFTES de Toulouse, oct. 2002, pp. 243-345.
- [17] La FONTA, J.G., GASTINE, E. – Instrumentation automatique au cœur des projets européens (Eurostar, Barcelone, Bure) - Tunnels & Ouv. souterrains, n° 190, 2005, pp. 209-212.