

TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

TRAVAUX SOUTERRAINS. GRAND PARIS EXPRESS : PROLONGEMENT DE LA LIGNE 14 DU METRO PARISIEN / LA STATION PONT-CARDINET / MIEUX ANTICIPER LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX BRUIT ET VIBRATIONS EN PHASE CHANTIER. ROCADE A507 «L2 MARSEILLE» : TRANCHÉES COUVERTES SAINTE-MARTHE ET SAINT-JEROME. GRANDES CAVERNES SOUTERRAINES. EXPLOSIFS DANS TRAVAUX SOUTERRAINS URBAINS A MONACO. TRESORS DE NOS ARCHIVES : LE TUNNEL ROUTIER DE SAINT-CLOUD - 1958

N°921 JANVIER/FÉVRIER 2016



PROLONGEMENT
DE LA LIGNE 14 DU
MÉTRO PARISIEN
© SYSTRA





EXPERTS EN FONDATIONS SPÉCIALES



- SOUTÈNEMENT
- TIRANTS
- PIEUX
- MICROPIEUX
- INJECTIONS
- CONSOLIDATION
ET AMÉLIORATION DE SOLS

Fort des 4 entreprises de son pôle Fondations, le groupe Fayat dispose d'une gamme complète de solutions techniques pour tous les types de fondations et de travaux de consolidation des sols.

Les 4 sociétés Fayat Fondations apportent ainsi à leurs clients toute leur expertise en fondations spéciales et le savoir-faire de leurs équipes sur des chantiers d'envergure comme sur des travaux de proximité.



Directeur de la publication

Bruno Cavagné

Directeur délégué

Rédacteur en chef

Michel Morgenthaler

3, rue de Berri - 75008 Paris

Tél. +33 (0)1 44 13 31 03

morgenthalerm@fntp.fr

Comité de rédaction

Hélène Abel (Ingerop), David Berthier (Vinci Construction France), Sami Bounatirou (Bouygues TP), Jean-Bernard Datry (Setec), Philippe Gotteland (Fntp), Jean-Christophe Goux-Reverchon (Fntp), Laurent Guilbaud (Saipem), Ziad Hajar (Eiffage TP), Florent Imberty (Razel-Bec), Claude Le Quééré (Egis), Stéphane Monleau (Soletanche Bachy), Jacques Robert (Arcadis), Claude Servant (Eiffage TP), Philippe Vion (Systra), Michel Morgenthaler (Fntp)

Ont collaboré à ce numéro**Rédaction**

Monique Trancart, Marc Montagnon

Service Abonnement et Vente**Com et Com****Service Abonnement TRAVAUX**

Bât. Copemic - 20 av. Édouard Herriot

92350 Le Plessis-Robinson

Tél. +33 (0)1 40 94 22 22

Fax +33 (0)1 40 94 22 32

revue-travaux@cometcom.fr

France (9 numéros) : 190 € TTC

International (9 numéros) : 240 €

Enseignants (9 numéros) : 75 €

Étudiants (9 numéros) : 50 €

Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)

Multi-abonnement : prix dégressifs
(nous consulter)**Publicité****Rive Média**

2, rue du Roule - 75001 Paris

Tél. 01 42 21 88 02 - Fax 01 42 21 88 44

contact@rive-media.fr

www.rive-media.fr

Directeurs de clientèle

Bertrand Cosson - LD 01 42 21 89 04

b.cosson@rive-media.fr

Carine Reininger - LD 01 42 21 89 05

c.reininger@rive-media.fr

Site internet : www.revue-travaux.com**Édition déléguée****Com'1 évidence****Siège :**

101, avenue des Champs-Élysées

75008 PARIS

Tél. bureaux : +33 (0)2 32 32 03 52

revuetravaux@com1evidence.com

La revue Travaux s'attache, pour l'information de ses lecteurs, à permettre l'expression de toutes les opinions scientifiques et techniques. Mais les articles sont publiés sous la responsabilité de leurs auteurs. L'éditeur se réserve le droit de refuser toute insertion, jugée contraire aux intérêts de la publication.

Tous droits de reproduction, adaptation, totale ou partielle, France et étranger, sous quelque forme que ce soit, sont expressément réservés (copyright by Travaux). Ouvrage protégé ; photocopie interdite, même partielle (loi du 11 mars 1957), qui constituerait contrefaçon (code pénal, article 425).

Editions Science et Industrie SAS

9, rue de Berri - 75008 Paris

Commission paritaire n°0116 T 80259

ISSN 0041-1906

GRAND PARIS EXPRESS - LES PREMIERS TRAVAUX SONT ENGAGÉS



© DR

Le 13 novembre 2015 le Conseil de Surveillance de la Société du Grand Paris a approuvé à l'unanimité les dernières opérations d'investissement, concernant les lignes 17 Nord (Le Bourget - le Mesnil Amelot), 15 Est (St-Denis Pleyel - Rosny Bois Perrier - Champigny) et 18 (Orly - Versailles). Avec ces décisions le projet du Grand Paris Express est aujourd'hui lancé dans son intégralité.

Ce grand projet d'avenir pour les Franciliens se concrétise ainsi près de cent ans après la fermeture des rocadés ferroviaires de petite et de grande ceinture.

Cette étape importante franchie, la Société du Grand Paris ne relâche pas pour autant ses efforts : sur la ligne 15 sud, les déplacements de réseaux sont en cours et les premiers appels d'offres de génie civil sont lancés avec pour objectif une mise en service en 2022 ; les travaux vont être engagés sur le site de Fort d'Issy Vanves Clamart dès le deuxième trimestre 2016.

Les autres lignes vont suivre, d'abord la ligne 16 entre Noisy-Champ et Saint Denis Pleyel, puis le prolongement de la ligne 14 au sud, la ligne 15 à l'ouest, enfin les autres lignes approuvées le 13 novembre. Dans le même temps le prolongement de la ligne 14 au nord, sous pilotage de la RATP, est en cours pour une mise en service en 2019. Aussi, le savoir-faire des entreprises du BTP va être très largement mobilisé ces prochaines années.

La création de ce nouveau réseau fera appel à un panel de méthodes constructives assez étendu. Le parti pris technique d'employer un très grand nombre de tunneliers vise à garantir le respect des différents objectifs de mise en service. Ces machines éprouvées, qui se sont nettement perfectionnées ces dernières années, autorisent des cadences élevées et, lorsqu'elles sont à pression (de terre ou de boue), permettent de travailler sous nappe, en produisant des tassements très faibles en surface.

Lorsque les travaux seront lancés sur l'ensemble des lignes, au tournant de 2019-2020, c'est ainsi une vingtaine de tunneliers qui œuvreront simultanément.

Même si les caractéristiques et l'hétérogénéité des sous-sols franciliens sont bien connues des professionnels, la prudence reste la règle d'or. Toujours soucieuse des enjeux environnementaux, la SGP a mené un certain nombre d'études complémentaires de sorte à établir des états des lieux les plus exhaustifs possibles concernant le bâti en surface mais aussi en mettant en place une importante instrumentation pour ausculter, un an avant le début des travaux, le comportement des bâtis et terrains traversés (retrait-gonflement des sols argileux, dissolution du gypse...). La SGP a aussi choisi de faire appel à l'innovation : l'interférométrie radar - la télé-détection par satellite, habituellement utilisée en géophysique - nous sera également d'une aide précieuse.

Au total, la création du GPE générera 43 millions de tonnes (soit 20 millions de m³) de déblais, dont la moitié proviendra du creusement des tunnels. Plusieurs solutions sont à l'étude, comme l'utilisation de plateformes de transit. Sur ces sites, les déblais pourraient être caractérisés voire traités dans un objectif de valorisation et ce avec un haut niveau de traçabilité.

2016, c'est aussi le début d'importantes retombées en termes de création d'emplois dans le domaine des travaux publics. La SGP et les acteurs du BTP se sont organisés pour anticiper les questions de formation, d'emploi et en particulier en direction des jeunes d'Île-de-France. La région Île-de-France va ainsi sensiblement dépasser le niveau d'activité qu'elle a connu dans le domaine des travaux souterrains au début des années 90.

Un véritable challenge, que la Société du Grand Paris entend bien relever avec l'appui de l'ensemble de ses partenaires.

BERNARD CATHELAINMEMBRE DU DIRECTOIRE
SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

TRAVAUX SOUTERRAINS

STATION SAINTE-ANNE - METRO DE RENNES - © PHOTO THEQUE SOLDATA





04 ALBUM

08 ACTUALITÉ



16

ENTRETIEN AVEC MICHEL DEFFAYET
VIVRE MIEUX LA VILLE,
MIEUX FRANCHIR LES OBSTACLES

20 BESSAC :
UNE DOUBLE ACTIVITÉ 100% FRANÇAISE
EN TRAVAUX SOUTERRAINS



26

PROLONGEMENT DE LA LIGNE 14 DU MÉTRO PARISIEN
Point de départ des travaux du Grand Paris Express



32

SOUTÈNEMENT ET EXCAVATION DE LA STATION PONT-CARDINET
de la ligne 14 du métro parisien



44

ROCADE A507 « L2 MARSEILLE ».
Les tranchées couvertes de Sainte-Marthe et Saint-Jérôme



50

GRANDES CAVERNES SOUTERRAINES
Réflexions sur leur comportement et leur conception



64

UTILISATION DES EXPLOSIFS DANS LES TRAVAUX SOUTERRAINS URBAINS
Exemples à Monaco



70

CONSTRUCTION DU GRAND PARIS EXPRESS
Mieux anticiper les impacts environnementaux bruit et vibrations en phase chantier



75

TRÉSORS DE NOS ARCHIVES : LE TUNNEL ROUTIER DE SAINT-CLOUD SUR L'AUTOROUTE DE L'OUEST
Équipement - exploitation - entretien
Numéro 288 - 1958



Spie fondations

HS



SAINTE MARTHE ET SAINT JÉRÔME, PRIEZ POUR NOUS

SAINTE BARBE, patronne des mineurs, ne s'offusquera pas qu'on invoque ses saints collègues dont deux souterrains routiers de la rocade L2 au nord de Marseille portent le nom. Leur protection n'aura pas été inutile pour permettre à Bouygues TP, Dtp, Colas, Spie Fondations et les ingénieries du groupe Egis de réaliser avec succès, dans un contexte urbain très contraint, ces ouvrages en tranchée couverte. Le béton a coulé à flots : 27 500 m³ en pieux et parois moulées, 22 500 m³ en génie civil.
(voir article page 44).



© GIE L2



MONACO ÉLOGE DE LA MÉTHODE TRADITIONNELLE À L'EXPLOSIF

DANS le contexte monégasque où s'additionnent les contraintes exceptionnelles de la topographie, de la géologie, de l'urbanisation et du prix du foncier, la construction donne de plus en plus lieu à des prouesses. Eiffage Infrastructures réalise, dans le rocher, un tunnel courbe descendant et une caverne, sous maîtrise d'œuvre Tractebel - Coyne & Bellier et Arcadis respectivement. La technique traditionnelle à l'explosif s'impose. La prouesse est de la maîtriser parfaitement pour ne créer aucune nuisance. (voir article page 64).



TUNNEL DE LA LIGNE LYON-TURIN FIN DES RECONNAISSANCES ET AMORCE DU PROJET DÉFINITIF



Creusement par le haut de la chambre de montage du tunnelier à Saint-Martin-La-Porte.

Les travaux de reconnaissance des terrains traversés par le tunnel du Mont-Cenis sur la future ligne de chemin de fer Lyon-Turin arrivent à leur terme. Méthodes et procédés sont mis au point.

Sainte Barbe, patronne des travaux souterrains, trône à l'entrée du tunnel à Saint-Martin-La-Porte (Savoie) et veille sur le personnel qui travaille jour et nuit, 7 j/7, au creusement de la section transfrontalière de la liaison ferroviaire Lyon-Turin. Un compteur affiche quand même le nombre de personnes à l'intérieur grâce à une puce dans les casques, un dispositif qui les géolocalise. Les galeries sont jalonnées d'armoires de contrôle des gaz dans l'air ambiant et de chambres de survie.

Le tunnel s'inscrit sur la ligne qui mettra Lyon à 1h45 de Turin (Italie) au lieu de quatre, à une date indéterminée entre 2030 et 2050. Ce sera surtout une ligne de fret avec des camions sur wagons. Actuellement, les marchandises transitent à 85% par le tunnel routier de Fréjus et à 15%, par le tunnel ferroviaire du même nom qui date de 1871. Le nouveau tracé, à une quarantaine de kilomètres, est moins haut en altitude avec une pente praticable à 220 km/h. Des véhicules de 4,20 m de haut pourront y passer.

La section transfrontalière entre Saint-Jean-de-Maurienne (Savoie) et Susa (Piémont italien) mesure 65 km dont 57 en tunnel bitube. L'Union européenne apporte 40% des 8,6 milliards d'euros (2012) que coûte cette partie, la plus avancée de toute la ligne Lyon-Turin,

maillon du corridor méditerranéen entre Séville (Espagne) et Budapest (Hongrie). Le reste du projet, au montant inconnu et qui consiste en raccordements à cette section, est moins avancé.

Les premiers travaux de reconnaissance remontent à 2002 sous maîtrise d'ouvrage Lyon Turin Ferroviaire chargée des études d'avant-projet jusqu'en 2014. En février 2015, Tunnel Euralpin Lyon Turin, société franco-italienne (50/50), prend la relève pour la construction et la promotion des 65 km.

→ Terrain instable

Le côté français du futur "tunnel de base du Mont-Cenis" est creusé dans un terrain instable composé de schistes houillers, charbon, grès, argillites avec des eaux souterraines en quantité importante. Ces terres grises se rencontrent entre Saint-Martin-la-Porte et La Praz situé 9 km plus loin sur un autre versant du Massif d'Ambin, une des formations du Mont Cenis.

Entre 2002 et 2010, ont été creusées trois galeries d'accès au futur tracé, appelées descenderies, à Saint-Martin-La-Porte (2,4 km), La Praz (2,5 km) et Villarodin-Bourget/Modane (4 km, milieu du tracé).

C'est encore LTF qui a attribué en 2014 la fin des reconnaissances, la préparation du chantier et les premiers creusements définitifs au groupement mené par Spie

Batignolles TPCI, géré par Eiffage Génie civil, avec Sotrabas (filiale du mandataire) et les entreprises italiennes Cooperativa Muratori Cementisti Ravenna, Ghella et Cogeis. Maîtrise d'œuvre : Egis Tunnels et Alpina.

En 2015, 60 millions d'euros ont été engagés avec 350 personnes. Grâce à un marché à bons de commandes, les entreprises sont rémunérées au fur et à mesure de l'avancement du chantier. « *Tous les deux mois, les délais contractuels sont recalculés selon la géologie rencontrée,* » précise Florent Martin, directeur du projet chez Spie Batignolles. Ces travaux sont l'occasion de passer à une étape supérieure en technique. Après creusement, le schiste houiller converge et se recomprime. Cette particularité donne lieu à l'élaboration d'une méthode commune à toutes les entreprises.

Au fur et à mesure que les galeries sont creusées, les géologues poursuivent leur exploration du terrain. Ils effectuent des levés de front et la roche part en laboratoire.

→ Tunnelier acheminé démonté

La géologie est connue grâce à de précédents forages dirigés, au tunnel ferroviaire de Fréjus et aux données du BRGM⁽¹⁾ mais il reste à préciser les limites des couches, par exemple celle du calcaire voisin, plus stable.

Le marché de Spie Batignolles comprend l'aménagement d'une chambre de montage du tunnelier en pied de la descenderie de Saint-Martin-La-Porte. Celui-ci, livré monté par NFM en janvier, est démonté pour être acheminé par camion dans le tunnel. Il est remonté dans la chambre. Au pied de la descenderie de la Praz, est aménagée une seconde chambre, de démontage.

Sont creusés au tunnelier 9 km dans les schistes houillers sur le tracé du futur tunnel et à son diamètre. De plus, le sont en traditionnel (explosif) 1,4 km sur le tracé définitif et une nouvelle galerie de reconnaissance de 1,8 km.

→ Voussoirs fabriqués à proximité

Le tunnelier, de 130 m de long, est équipé d'une roue de plus de 11 m. Il a une poussée jusqu'à 18 570 tonnes à 525 bars afin de ne pas rester bloqué si la convergence est forte (impossible de le dépanner à plus de 500 m sous terre). Deux foreuses à sa tête détectent gaz et eau.

Le vide entre voussoirs en béton et tunnel est rempli par un coulis conçu spécialement et fabriqué sur place. Les voussoirs sont coulés dans une usine qui leur est dédiée, à proximité du chantier. ■

⁽¹⁾ Bureau de recherches géologiques et minières.

SECTION TRANSFRONTALIÈRE PRÊTE EN 2029

2002 : début des reconnaissances de terrain.

2015 : fin des reconnaissances et amorces du tunnel définitif.

2016-2018 : creusement de 9 km de galerie sur le futur tracé du tunnel.

2016-2017 : appels d'offres entrée côté Saint-Jean-de-Maurienne et puits à Modane.

2018-2019 : appels d'offres lots principaux des 2 tubes de 57 km.

2029 : ouverture de la section transfrontalière France-Italie (65 km).

COP21 : L'INDUSTRIE DE LA CONSTRUCTION S'EST FAIT ENTENDRE



Des ouvrages bien entretenus résistent mieux aux catastrophes climatiques. Ici, travaux sur un pont de l'A36.

Comment les travaux publics contribuent-ils à lutter contre le changement climatique ? Des réponses ont été apportées à la conférence sur le changement climatique organisée par la Fédération de l'industrie européenne de la construction (Fiec) et la Confédération internationale des associations de la construction, le 4 décembre à Paris. Environ 150 personnes ont participé à cette journée labellisée Cop21 (21^e conférence des Nations Unies sur les changements climatiques) et qui s'est tenue au siège de la Fédération nationale des travaux publics, membre comme la Fédération française du bâtiment de la Fiec.

« L'entretien des infrastructures est un élément-clé de la lutte contre le changement climatique, il ne faut pas le laisser tomber, » a souligné Sue Arundale, directrice des affaires techniques et environnementales de la Fiec. Les digues en mauvais état cèdent et faillent à leur rôle. Avec des routes et ponts non entretenus, les aléas climatiques - pluies diluviennes, inondations, grandes marées, etc. - se transforment en catastrophes.

Le secteur travaille déjà avec les collectivités locales pour anticiper les risques et proposer des solutions. « Nous avons bâti un mur sur pieux surmonté de béton pour former une digue solide entre une ville et la côte, » a cité en exemple le président de la Fiec, Johan Willemen. La question des financements est cruciale dans ce domaine. « Il faut trouver 500 millions d'euros pour créer un réservoir sur la Seine en amont de Paris, »

a précisé Jean-Louis Marchand, président de la commission économique et juridique de la Fiec. C'est aux collectivités locales que revient la prise en charge des effets du réchauffement de l'atmosphère.

→ Un manifeste et 10 propositions

Le secteur du bâtiment se débrouille mieux en matière de financement. En effet, les économies d'énergie générées par un bâti mieux isolé peuvent soutenir les projets de réhabilitation. Mais « nous concevons la rénovation au-delà du simple aspect énergétique, en y adjoignant l'élimination de matériaux dangereux, la mise en accessibilité, l'amélioration de la structure, parce que les occupants ne peuvent pas supporter qu'on intervienne deux fois chez eux, souligne Kjetil Tønning, président de la commission technique et environnementale. Par ailleurs, l'efficacité énergétique doit s'accompagner d'efficacité juridique et réglementaire, » notamment au niveau de l'Union européenne.

La Fiec qui représente 3 millions d'entreprises, a rédigé un manifeste en direction des décideurs politiques afin de réussir à lutter contre le réchauffement planétaire. Elle a également présenté dix propositions, principes pour aller dans la bonne direction. Parmi elles, citons le soutien à des plans d'adaptation au changement climatique dans les documents d'urbanisme avec une évaluation de la vulnérabilité d'un territoire.

L'innovation est appelée à la rescousse que ce soit à travers des contrats basés sur le résultat ou, par exemple, par le

développement du Bim (Bâtiment et informations modélisés).

→ Rendez-vous à la Cop22

Le financement figure en bonne place dans le manifeste et dans les propositions avec des idées telles que la contribution de l'utilisateur s'il y a des économies d'énergie, et dans un autre domaine, celle du pollueur.

La Fiec a décidé de renouveler cette manifestation à l'occasion de la Cop22 qui se tiendra du 7 au 18 novembre 2016 à Marrakech (Maroc).

En savoir plus sur www.fiec.eu. ■



Le 4 décembre, Soletanche Bachy a présenté le Biocalcis, moyen de renforcer localement une digue par injection d'une solution calcifiante associée à des bactéries et qui ne fait pas barrage à l'écoulement de l'eau. Ici, essai de biocalcification de sable pour un chantier (2013).

ÉNERGIE : LA PROGRAMMATION EN CONSULTATION

En novembre, la ministre de l'Écologie a mis en consultation un projet de programmation pluriannuelle de l'énergie, suite à la loi relative à la transition énergétique n°2015-992. Le texte prend en compte toutes les énergies.

Selon le Syndicat des énergies renouvelables, ce projet prévoit, d'ici à 2023, un triplement des puissances électriques existantes en solaire et éolien terrestre, un appel d'offres pour l'hydroélectricité, l'accroissement de 40% de la chaleur issue de la biomasse et 6 TWh de gaz produit par des sources renouvelables.

Le projet contient aussi des actions de maîtrise de la consommation d'énergie et aborde la sécurité d'approvisionnement.

ÉLECTRICITÉ : PLUS D'EFFACEMENT

Réseau de transport d'électricité (RTE) prépare fin 2015 un appel d'offres sur l'effacement de consommation électrique avec comme objectif un total de 2 000 MW sur les sites raccordés à plus de 36 kVA et de 300 MW pour ceux en dessous (résidentiels et professionnels), soit près d'un quart de plus qu'en 2015.

Le gouvernement souhaite accélérer la mise en place de ces dispositifs car ils évitent le recours à des productions émettrices de CO₂, au moment des plus forts appels de puissance, ils pallient l'intermittence des énergies renouvelables et peuvent abaisser les consommations. Sur ce dernier point, il prépare un cadre dérogatoire pour les effacements générateurs d'économies d'énergie.

ESPACES POUR ARRÊTS D'AUTOCAR

Des gares routières et des arrêts pour autocars vont être aménagés. Ces espaces sont indispensables pour accompagner le développement de ce mode de transport, conformément à la loi pour la croissance, l'activité et l'égalité des chances économiques⁽¹⁾. Paris accueille 200 départs par jour, Lyon et Bordeaux, plus de 40. En 2016, plus de cent lignes vont ouvrir, selon le ministère de l'Économie et le secrétariat d'État chargé des transports. Le gouvernement s'est engagé à prendre une ordonnance au 1^{er} trimestre afin de réformer le cadre qui leur est applicable.

Ces orientations visent à améliorer l'intermodalité des cars avec les transports urbains et les trains, et à coordonner la création des gares entre les opérateurs.

→ Des lignes de moins de 100 km

Les gestionnaires d'infrastructures comme la SNCF, Aéroports de Paris et l'Association des sociétés françaises d'autoroutes ont déjà identifié une vingtaine de gares pouvant héberger un arrêt de car, des aires d'autoroutes disponibles et la création de gares privées. Par ailleurs, une commission des sanctions a été créée par décret le 16 octobre au sein de l'Autorité de régulation des activités ferroviaires et routières, pour interdire ou limiter les nouvelles lignes de plus de 100 km qui « porteraient atteinte à l'équilibre économique » des lignes de train ou de bus existantes.

⁽¹⁾ Loi n°2015-990 du 6 août 2015.

LES TRAVAUX PUBLICS ONT BESOIN D'ACTIVITÉ À COURT TERME



© WILLIAMS DANIEL MÉDIATHÈQUE SNCF

Les travaux ferroviaires et sur les réseaux se portent mieux que ceux de génie civil et de terrassement.

En 2016, le chiffre d'affaires des travaux publics baissera de 3 % par rapport à 2015, selon la Fédération nationale des travaux publics (FNTP). Si le marché du privé sera légèrement positif à +1% et les commandes de l'État, stables, celles des grands opérateurs publics et privés vont céder le pas à -2%. La plus grosse chute viendra des collectivités territoriales avec -6,4 % prévus.

Ce recul pourrait détruire 7 000 emplois. Les entreprises qui avaient réussi à maintenir leurs effectifs jusqu'ici, n'y parviennent plus.

En 2015, 15 000 postes ont été supprimés, ce qui porte à 33 000 la perte d'emplois dans le secteur depuis 2008. En 2015, le chiffre d'affaires (CA) des TP a diminué de 8% après une année 2014 à -7%. En huit ans, la baisse du CA atteint 25%.

Dans ce sombre tableau, ce sont le génie civil et le terrassement qui souffrent le plus, selon Bruno Cavagné, président de la FNTP. Les travaux ferroviaires s'en tirent mieux et continueront de le faire en 2016-2017. Ceux des réseaux électriques et numériques tirent également leur épingle du jeu.

Comme les TP dépendent de la commande publique à 67% - avec en tête les communes et leurs communautés -, c'est là que le bât blesse.

Aux hésitations d'investir liées aux élections municipales, départementales et récemment régionales, s'ajoute l'amalgamement des dotations de l'État aux collectivités territoriales : près de 9 milliards d'euros en moins sur la période 2014-2016.

CHIFFRES TRAVAUX PUBLICS ET BÂTIMENT

	Travaux publics	Bâtiment
Chiffre d'affaires France	39,6 milliards d'euros	124 milliards d'euros
Chiffre d'affaires international	26,6 milliards d'euros	6,2 milliards
Nombre d'entreprises	7 600	382 000
Salariés permanents	251 000	1 090 000
Entreprises de plus de dix salariés	40%	5%
Clientèle publique*	70%	30%

(Source : FNTP, FFB 2014)
* Collectivités locales, État, grands opérateurs publics et privés.

Pour tenir le coup, les entreprises de TP ont besoin de chantiers rapidement. C'est pourquoi le plan de relance autoroutier a été bien accueilli même s'il a pris du retard. « Il va se faire avec l'ensemble des entreprises, » s'est réjoui Bruno Cavagné.

→ **Travaux de voirie finançables à 0%**
Autre point à effet rapide sur l'activité : l'inscription de la voirie dans les travaux finançables par des prêts à taux 0, à travers la mobilisation du fonds de compensation de la TVA⁽¹⁾. D'autres projets seront bénéfiques au secteur mais sur le plus long terme. Cela devrait être le cas du Canal Seine Nord Europe dont les financements européens sont acquis mais dont ceux des collectivités et de l'État tardent. « Le Grand Paris sera peut-être le chantier de la décennie, espère Bruno Cavagné, à condition que tous ceux qui sont dans sa gouvernance aillent dans le même sens. Il faut veiller à la participation des petites entreprises dans les appels d'offres, prévoir des lots à leur mesure. » Certains contrats de plan État-Régions

qui auraient dû démarrer en 2013 sont attendus pour 2016.

→ Grand carénage nucléaire pour quand ?

Il manque 600 millions d'euros à l'Agence française des investissements de transport de France (Afitf) pour financer les projets sélectionnés suite à la commission Mobilité 21. C'est pratiquement la somme à verser à Ecomouv pour l'abandon de l'écotaxe. Les financements des lignes à grande vitesse encore à construire sont en cours de discussion. Quant aux 55 milliards d'euros - au bas mot - dédiés à la réhabilitation de 60 centrales nucléaires baptisée grand carénage, le projet a pris du retard et ce seront des travaux très locaux.

La FNTP s'inquiète de la perte d'attraction de la France si ses infrastructures sont moins performantes, désaffection qui pourrait nuire à son économie. Le pays est descendu de la 4^e place en 2008-2009 à la 10^e en 2015-2016 en matière d'infrastructures. ■

⁽¹⁾ Cf. Travaux juin 2015, page 8.

LE TÉLÉPHÉRIQUE DE BREST EN TRAVAUX



© BOUYGUES-BMF

Le téléphérique est la solution la moins chère pour franchir la Penfeld, dans le quartier de Recouvrance.

Le téléphérique de Brest (Finistère) est entré dans la phase travaux. Sa mise en service est prévue au second semestre 2016. De 460 m de long, il franchit la Penfeld dans le quartier de Recouvrance. Le nouvel écoquartier des Capucins sera ainsi mieux desservi, le tramway ne passant qu'en bordure depuis 2012. Ces travaux s'inscrivent dans l'opération de renouvellement urbain de Recouvrance (financements spécifiques) et touche 2,56 millions d'euros du ministère de l'Écologie au titre d'un appel à projets transports urbains. Le téléphérique mettra trois minutes pour traverser, avec une fréquence toutes les cinq minutes et transportera 650 passagers/heure/sens. C'est la solution la moins chère à un peu plus de 19 millions d'euros HT (2015) y compris la phase

préparatoire. Une passerelle mobile aurait coûté plus de 20 millions (2014) et les ponts, entre 30 et 60 millions.

→ Au-dessus d'une base navale

Le tracé du téléphérique survole, outre la rivière, une base navale militaire, d'où un accord entre Brest métropole océane, maître d'ouvrage à travers la Semtram, et l'armée. Les câbles soutenus par un pylône de 80 m passent à 60 m de haut. Les travaux ont été confiés à un groupement mené par Bouygues TP RF avec BMF Remontées mécaniques France, Quille Construction, Halet Villette Architectes et les bureaux d'études Setec et DSCA.

Le téléphérique sera un maillon du réseau de transport en commun de Brest, et accessible aux vélos. ■

FACILITER L'IMPLANTATION DU TRANSPORT PAR CÂBLE

Une des ordonnances publiées par le gouvernement pour appliquer rapidement la loi de transition énergétique (août 2015) concerne les transports urbains par câble. Ce texte, paru en novembre, simplifie les procédures notamment d'urbanisme. Il instaure des servitudes d'utilité publique de libre survol, de passage et d'implantation des dispositifs associés. Le survol est le point qui achoppe dans les projets de téléphérique. Ainsi, selon la ministre de l'Écologie, les initiatives de Toulouse, Créteil (Val-de-Marne), d'Orléans et de Grenoble attendent-elles cette simplification pour se concrétiser.

MISE EN CONFORMITÉ DU TUNNEL DE PUYMORENS

Le tunnel du Puymorens, situé dans les Pyrénées entre l'Ariège et les Pyrénées-Orientales, a fait l'objet d'une mise en conformité. Bien que datant d'une vingtaine d'années, sa sécurité incendie n'était plus aux normes. L'ouvrage de près de 5 km est un raccourci en hiver quand le col de Puymorens à 1900 m d'altitude est sous la neige. Ventilation, désenfumage, abris, dispositifs d'alerte et de surveillance ont été repris et renforcés pour remplir les exigences de la réglementation⁽¹⁾.

Les parois des niches, des gaines, la dalle en béton entre la voie et la ventilation ainsi que tous les locaux abritant les réseaux dont l'alimentation électrique indispensable au fonctionnement de la sécurité, ont été protégés du feu - fumées, chaleur, stabilité des structures - en cas d'incendie. Des plaques Promat, résistantes à 1 300°C, ont été

posées partout où une isolation thermique de haut niveau était requise.

→ Maintenir 40°C

À base de silicate de calcium et employées dans des épaisseurs de 25 à 30 mm, elles peuvent maintenir la tem-

pérature ambiante à 40°C, et celle de contact, à 60°C. Ces plaques sont plus rapides à poser que la projection de béton, autre solution dans ce cas. ■

⁽¹⁾ Circulaires n°2000-63 et 2006-20.



© FRANÇOIS VIGOUROUX/FRES-SINET

Le tunnel de Puymorens dans les Pyrénées était en travaux depuis 2013.

ALLIANCE DANS L'ÉCLAIRAGE SOLAIRE

Ragni a pris une participation dans le capital de Novéa Énergies, spécialiste de l'éclairage public autonome grâce à une alimentation solaire et à une batterie de stockage, créée en 2007. Désormais, Novéa fait partie du groupe Ragni, fabricant de matériel d'éclairage public (mâts, luminaires, etc.). En plus de sa connaissance de l'électricité photovoltaïque, elle apporte son expertise technique en maîtrise de l'énergie, en électronique et en éclairage intelligent. Ragni a une longue expérience de l'éclairage public puisque l'entreprise a été créée en 1927. Le groupe a développé une large gamme de luminaires à leds.



© NOVÉA ENERGIES

Lampadaire alimenté par capteur solaire à Villevêque (Maine-et-Loire).

CONCESSION DE L'A355 OUEST

Le secrétaire d'État chargé des Transports devait finaliser début 2016 le contrat de concession de l'autoroute de contournement ouest de Strasbourg, l'A355, avec le groupement d'entreprises Arcos dont Vinci Concessions est le mandataire. Ce dernier a été retenu pour négociation après examen de quatre candidatures par les services d'Alain Vidalies.

PLATE-FORME DE DÉPOLLUTION

Extract Ecoterres peut valoriser jusqu'à 230 000 tonnes de déchets du BTP par an sur sa plate-forme de Bruyères-sur-Oise (Val-d'Oise) et montera à 300 000 tonnes en 2017. Ainsi, la filiale de Vinci Construction France se prépare-t-elle à accueillir les déblais des travaux du Grand Paris Express et notamment les terres excavées et boues de forage qui seraient polluées.

Le site de 3 hectares ouvert début 2015 à l'ouest de l'abbaye de Royaumont, dispose de quatre procédés de traitement : ressuyage dynamique, lavage physico-chimique, bio-rémédiation et tri mécanique par criblage. Il dépollue des sols contenant du mercure, des hydrocarbures, du cadmium, etc. Environ 80% des matériaux pourront être réutilisables.

Les terres arriveront par camion ou par barge sur l'Oise grâce à un quai de 200 m. Rappelons qu'une péniche à grand gabarit transporte l'équivalent de cent poids lourds.



© THIERRY DUVIVIER

Trois hectares pour traiter les terres excavées du Grand Paris.

L'ÉVOLUTION DE LA BIODIVERSITÉ EST SUIVIE DE PRÈS



© CD'HÉRAULT

L'arbre est un obstacle dont il faut parfois se protéger. Ici, glissière expérimentale à moindre empreinte sur l'environnement.

Les mesures en faveur de la biodiversité aux abords des infrastructures s'inscrivent sur le long terme comme le montrent les prix Infrastructures pour la mobilité, la biodiversité et le paysage (IMBP). Sept dossiers ont été distingués fin novembre par l'Institut des routes, des rues et des infrastructures pour la mobilité⁽¹⁾.

La concertation avec le public et les associations dure plus longtemps et inclut le chantier, par exemple lors du réaménagement de la place d'Austerlitz à Strasbourg - ancienne gare routière puis parking - aujourd'hui paysagère. Réflexion large également pour les 5 hectares proches du nouveau stade

Océan au Havre (Seine-Maritime) avec une gestion intégrée de l'eau.

Dans le Jura, le conseil départemental a conçu l'insertion dans le paysage du contournement de Lons-le-Saunier avec les associations naturalistes. Résultat : la route « *laisse penser aux usagers et riverains qu'elle a toujours été là,* » indique un communiqué. Les bassins de décantation en phase travaux sont transformés en mares. La biodiversité est maintenue et « *celle consécutive aux travaux sera développée* ».

Dans l'Ain, un passage à grande faune a été aménagé sur la quatre voies RD 884, une des routes où il y avait le plus de collisions avec les animaux. C'est une décision d'un groupe de travail avec les associations dans le cadre du contrat sur le corridor Mandement (Suisse)/Pays de Gex. Le département du Nord a, quant à lui, refait les analyses paysagères et les inventaires écologiques du contournement sud de Cambrai (13 km) quand il en a hérité de l'État. Après avoir recréé les corridors pour la faune et reconstitué la flore, il suit l'efficacité des travaux pendant cinq ans.

→ Logigramme de décision

Dans l'Hérault, les arbres au bord des routes, typiques du paysage, font l'objet d'une politique de tous les acteurs, à l'initiative du pôle des routes et transports du conseil départemental. Les alignements de platanes apportent ombre, protection au vent, meilleure lisibilité de la route en côte, en courbe ou par mauvais temps, et contribuent à l'assainissement de la chaussée, etc. Ils abritent

nombre d'oiseaux, de petits mammifères et d'insectes.

Toutefois, c'est un obstacle dangereux. Les services de terrain doivent obligatoirement utiliser un logigramme de décision incluant un diagnostic biodiversité et patrimonial (site, état de l'arbre) avant d'envisager éventuellement l'abattage. Sur certains tronçons, des glissières de sécurité s'intercalent entre la voie et l'alignement très proche. Le modèle, conçu avec Aximum, exige moins de poteaux et a un meilleur bilan énergétique et matière à la fabrication. Ces glissières, expérimentales, sont suivies avec le Cerema⁽²⁾.

→ Phares acoustiques

Enfin, Egis Environnement a reçu le prix "initiative astucieuse" pour ses phares acoustiques, dispositif de guidage des chauves-souris. Des sphères sur câbles, placées dans leur axe habituel de déplacement, amplifient les sons qu'elles émettent pour se diriger dans l'espace. Le dispositif a été utilisé pendant la phase travaux d'une tranchée couverte sur la déviation de Troissereux (Oise). Un déblai les empêchait de rejoindre leur zone de chasse.

L'efficacité des phares, conçu avec Jean-François Devret du groupement d'entreprises (Colas Nord Picardie), a été vérifiée grâce à une trajectographie en 3D et à une caméra infrarouge. ■

⁽¹⁾ L'Idrirm rassemble représentants de l'État, son réseau scientifique et technique, collectivités, services techniques, ingénierie et entreprises privées, associations et chercheurs.

⁽²⁾ Centre d'expertise pour les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement.



© EGIS ENVIRONNEMENT

Sphères amplifiant les sons que les chauves-souris émettent pour se guider dans l'espace, utilisées en phase chantier.

RENAISSANCE DES TABLIERS ORTHOTROPES



© PATRICK BOULEN/CCL LE HAVRE

Viaduc du grand canal (1994) au Havre repeint récemment.

Les ponts à tablier orthotrope connaissent un regain d'intérêt. Ainsi, le Conseil général des Ardennes avait-il choisi un ouvrage de ce type pour remplacer le vieux pont sur la Meuse à Saint-Nicolas-de-Revin avec un tablier courbe de 92 m de portée sans pile⁽¹⁾. La famille de ces ponts s'agrandit avec celui de la Citadelle à Strasbourg d'une portée de 163 m dont le chantier se termine en 2016. Sur ces ouvrages, le tablier est composé d'un plâlage en acier mince raidi par des augets longitudinaux, également en métal, un peu espacés et perpendiculaires aux poutres transversales. Grâce à la légèreté de l'acier - 150 kg/m² au lieu de 500 kg/m² (22 cm de béton) - la technique est utilisée pour des ponts mobiles et des grandes portées. Par exemple, le viaduc du Grand canal au Havre (1994, Seine-Maritime) qui vient d'être repeint, comporte une dalle orthotrope d'une portée de 360 m. À Brest (Finistère), les parties levantes du pont de Recouvrance refait en 2011 sont dotées d'un tablier orthotrope dont les augets abritent les rails du tramway.

→ **Épaisseur minimum du plâlage**
« Modéliser leur conception est simple, sauf exception comme celle du pont Raymond Barre à Lyon (256 m) à trois portées dont une de 151 m, » a précisé Daniel Bitar, chef de service études, adjoint au directeur des opérations du Centre technique industriel de la construction métallique (CTICM), à la journée sur les ponts métalliques et mixtes organisé par Construiracier⁽²⁾. Sur cet ouvrage,

les arcs inclinés sont alignés avec les alvéoles externes. Ces tabliers exigent des soudures de très bonne qualité entre les augets et le plâlage, et avec l'entretoise. Le rabouillage des augets doit être soigné. « Les problèmes peuvent aussi venir d'un plâlage trop mince - il faut une épaisseur de 14 mm minimum - et une distance trop importante entre augets, » a observé M. Bitar. La dalle orthotrope, relativement souple, est sensible à la fatigue. Des tabliers de ce type sont réhabilités, par exemple celui du pont d'Illzach (1970, Haut-Rhin) où est expérimenté un procédé conçu dans le cadre d'Orthoplus⁽³⁾. Ce projet de recherche 2007-2011 a évalué l'effet bénéfique d'un revêtement en béton fibré ultra-performant sur la résistance d'une dalle orthotrope en comparaison d'une

couche en bitume. Il propose des outils théoriques et méthodologiques de calcul de la durée de vie d'une telle dalle⁽⁴⁾.

→ **Réduire les contraintes sur les soudures**

À Illzach, du BFUP a été épandu sur le tablier de 110 m de portée et maintenu en place par de petits goujons verticaux, type Nelson. Il en ressort que ce revêtement contribue à diffuser la charge, d'où une réduction des contraintes sur les soudures dans le plâlage. L'ouvrage devrait ainsi se maintenir vingt ans de plus, selon le CTICM qui fait partie du comité de suivi (2011-2016), ce qui est conforme à la demande du maître d'ouvrage. Le CTICM a été bureau d'études d'exécution pour plusieurs ponts à tablier orthotrope. ■

(1) Cf. *Travaux* juin 2015 p. 48-55.

(2) Journée du 23 octobre à Montpellier sponsorisée par Arcelor Mittal et Dillinger.

(3) Projet financé par l'Agence nationale de la recherche avec le CNRS Rhône-Auvergne, l'Istitar, le Sctra relayé par Arcadis, l'ENTPE, Eiffage (Construction métallique et TP).

(4) Cf. *Travaux* décembre 2015, spécial BFUP, p. 91.



© DANIEL BITAR/CTICM

Fabrication du tablier orthotrope pour le pont de Recouvrance (Brest), réhabilité en 2011.



© DANIEL BITAR/CTICM

Vue de la dalle orthotrope du pont de la Citadelle qui franchit le bassin Vauban à Strasbourg, pendant le chantier (août 2015).

SIGNALER UN NID DE POULE PAR PORTABLE

En Midi-Pyrénées, chacun peut signaler le mauvais état d'une route, d'une piste cyclable, d'un trottoir, d'un réseau d'eau, d'électricité, etc. et le localiser, en utilisant Incity (incityapp.fr) sur son téléphone portable.

Ces informations sont transmises aux collectivités locales qui adhèrent à l'Observatoire régional de la qualité de service des infrastructures. L'Orquasi avait commandé une étude en ce sens aux étudiants de Sciences Pô Toulouse.

DÉVELOPPER LA PETITE HYDRO-ÉLECTRICITÉ

À l'heure où la ministre de l'Écologie lance un appel d'offres sur la petite hydro-électricité incluant la réhabilitation d'anciens moulins et d'ouvrages existants, Turbiwatt installe déjà des micro-centrales sur des basses chutes à partir de 1,20 m et 90 litres/sec, par exemple une écluse, un déversoir d'étang, etc.

La petite hydroélectricité est moins cher à installer que d'autres énergies renouvelables, selon la jeune entreprise :

« Une turbine de 36 kVA produira 300 000 kWh par an, soit l'équivalent de 3 000 m² de panneaux solaires photovoltaïques pour un investissement 20 fois plus faible hors génie civil. »



© TURBIWATT

Cette turbine fonctionne sur basse chute à faible débit.

MORTIER ANTI CORROSION

Le mortier Weber Rep est un mortier fibré de réparation structurale des bétons. Grâce à son pH de 13, il protège les armatures de la corrosion. Il évite d'avoir à épandre une couche primaire qui jouerait ce rôle. Il s'utilise en neuf ou en rénovation par couches de 2 à 50 mm.



Ce béton fibré protège les armatures métalliques.

GIRATOIRES EN BÉTON

Le guide sur les carrefours giratoires en béton aide à choisir la structure de chaussée la mieux adaptée et à adopter les bonnes règles de réalisation d'un giratoire où le béton remplace un matériau bitumineux.

Le document de 81 pages a été rédigé par le Syndicat professionnel des spécialistes de la chaussée en béton et des aménagements, et édité par l'Institut des routes, des rues et des infrastructures pour la mobilité.

Il aborde aussi bien la conception, le dimensionnement que le chantier, la réfection, l'entretien et le recyclage de ces giratoires. www.idrirm.com, rubrique publications.

TEXTES DE RÉFÉRENCE SUR L'ACIER AUTOPATINABLE



À Saumur (Maine-et-Loire), une passerelle et deux ponts sont en acier autopatinable. Ici, le plus récent, en chantier en 2014. À noter sa couleur orangée qui va virer au brun.

L'acier autopatinable revient en construction métallique. Après un pic dans les années 1980, il a fallu attendre les années 2000 pour qu'il soit réutilisé en passerelles et il l'est maintenant dans des ouvrages plus grands. Par exemple, le Conseil départemental du Maine-et-Loire a construit un pont avec ce matériau à Saumur en 2014 à proximité d'un ouvrage existant et d'une passerelle du même type datant de 1982.

Cet acier n'a pas besoin d'être peint. Sa surface évolue sur 1 mm, passe de la couleur orangée au brun noir. C'est sa composition chimique - ajout de cuivre et de chrome - qui le protège de la corrosion. « En ouvrage d'art, cet acier ne contient pas de phosphore », a précisé Jean-Michel Morel⁽¹⁾, responsable du pôle caractérisation physicochimique des matériaux à l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar).

Il a les mêmes caractéristiques que l'acier simple et il est désigné par la lettre W - Weathering steel - dans les textes européens. La norme EN 10025-5 est en cours de révision pour le prendre en compte.

→ Avantages et contraintes

Le manque de références normatives l'a écarté du projet de viaduc du Lez-Lironde sur le tracé du doublement de l'autoroute A9 au sud de Montpellier (Hérault). Cette lacune entraînait « un accompagnement du chantier par les services de l'État et la mise en place de contrôles spécifiques », a relaté Laurence Davaine,

ingénieur ouvrages d'art à Ingerop chargé de la conception⁽¹⁾. De plus, ASF (Autoroutes du Sud de la France) a craint que la liste des sidérurgistes capables de le fournir soit restreinte. » Abandon malgré un bilan économique neutre à la construction et positif à l'entretien. L'ouvrage n'aurait pas eu besoin d'être peint ni repeint. En revanche, l'acier autopatinable demandait quatre semaines de délai de livraison, coûtait 10 % de plus à l'achat (tôle et produit d'apport aux soudures). Par ailleurs, il est conseillé de protéger les culées des arrivées d'eau ou de sa stagnation. Les fissures de fatigue sont difficiles à détecter et les tags, à nettoyer.

L'absence de peinture est l'avantage numéro 1 de cet acier. Si le pont qui passe au-dessus de l'A86 à Rungis

(2013, Val-de-Maine) n'avait pas été en acier autopatinable, il aurait fallu prévoir une hauteur supplémentaire pour refaire la peinture avec un échafaudage, ce qui aurait rehaussé le pont et allongé le tracé du tramway qui l'emprunte.

→ Note d'information de 2015

Outre la norme en révision, les documents de référence sont retravaillés. La note d'information qui datait de 1982 (Sétra/LCPC) est ressortie en avril 2015. Elle a été remaniée par le Centre d'expertise pour les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement et l'Ifsttar. Jean-Michel Morel a recensé tous les ouvrages en acier autopatinable construits depuis 1968, soit une quarantaine, ce qui a inspiré des recommandations.

Parmi les changements apportés à la Note d'information ouvrages d'art 2015, citons la hauteur minimum du tirant d'air pour un ouvrage sur route en déblais, conseillée à une valeur entre 4,50 m à 7,50 m selon la taille de l'ouvrage au lieu de 7,50 m précédemment. Le tirant d'air sèche le milieu, ce qui protège l'acier de la corrosion due au brouillard salé (salage des chaussées). Au-dessus d'un cours d'eau, le texte recommande un tirant d'air de 2,5 m minimum. La note, qui ne concerne que les ponts et passerelles à poutres sous chaussée, est enrichie de deux chapitres sur l'inspection.

Note d'information sur :

http://www.infra-transport-materiaux.cerema.fr/IMG/pdf/NI_OA2_AAP.pdf. ■

⁽¹⁾ Le 23 octobre, lors de la journée Ponts métalliques et mixtes organisée par Construiracier.



4 600 tonnes d'acier Diweten 355 de Dillinger ont été utilisées sur le viaduc des Vaux (Canton de Vaud, Suisse) en épaisseur de 12 à 80 mm.

AGENDA

ÉVÉNEMENTS

• 17 ET 18 MARS

1^{res} journées nationales maçonnerie
Lieu : Marne-la-Vallée
<http://jnm2016.ifsttar.fr>

• 23 MARS

Géosynthétiques, protection contre l'érosion
Lieu : Marne-la-Vallée (Ifsttar)
www.cfg.asso.fr

• 6 ET 7 AVRIL

Bim World
Lieu : Grande arche, La Défense
www.bim-w.com

• 12 AU 14 AVRIL

Salon européen de l'éolien offshore
Lieu : Birmingham (Angleterre)
www.europeanoffshoreenergy-expo.com

• 8 AU 11 MAI

Durabilité des ponts et structures
Lieu : Guangzhou (Chine)
www.iabse.org

• 24 AU 26 MAI

21^e conférence internationale transports et pollution de l'air
Lieu : Lyon (ENS)
<http://tap2016.sciencesconf.org>

• 31 MAI AU 2 JUIN

Salon des maires
Lieu : Paris (Porte de Versailles)
www.salondesmaires.com

• 8 ET 9 JUIN

3^e rencontres nationales de l'urbanisme durable
Lieu : Paris
www.ademe.fr

NOMINATIONS

AÉROPORTS DE PARIS INGÉNIERIE : Le conseil d'administration d'ADPI a nommé Olivier Berger directeur général.

DÉLAIS DE PAIEMENT : Jeanne-Marie Prost est nommée présidente de l'Observatoire des délais de paiement après Jean-Hervé

Lorenzi, par arrêté du ministère de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique.

EIFFAGE : Benoît de Ruffray remplace Pierre Berger au poste de PDG du groupe Eiffage. Il était directeur général de Soletanche Freyssinet (Vinci).

SOLETANCHE FREYSSINET : Manuel Peltier a été nommé directeur général et Didier Verrouil directeur général adjoint.

ONEMA : Élisabeth Dupont-Kerlan est remplacée à la direction générale de l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques par Paul Michelet qui vient de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse.

PARIS SACLAY : Philippe Van de Maele est le nouveau PDG de l'établissement public (Essonne).

PRO BTP : depuis le 1^{er} janvier 2016, Hervé Naerhuysen est direc-

teur général du groupe de protection sociale. Il succède à Paul Grasset.

RATP : Nathalie Leboucher a été nommée directrice stratégie, innovation et développement.

SYNTEC : Luc Laurentin est le nouveau vice-président de la Fédération Syntec (entreprises de services de numérique).

URPG : Hubert Bolard est élu président de l'Union régionale des producteurs de granulats en Bourgogne/Franche-Comté à la suite de Laurent Delafond qui devient président de l'Union des industries des carrières et matériaux de construction pour la même région en remplacement de Denis Chevalier.

VINCI CONSTRUCTION FRANCE : Hugues Fourmentraux passe directeur général après avoir été directeur général adjoint.



terrasol

setec

Ingénieurs-Conseils en géotechnique

www.terrasol.com



INGÉNIERIE
LOGICIELS

» Conception, Maîtrise d'oeuvre, Expertise
Développement, Assistance technique, Formation «

Terrasol est un leader reconnu dans le domaine de l'ingénierie géotechnique, en France comme à l'étranger.

Parmi nos références récentes en France : Grand Paris Express, Métro de Rennes, Tunnel de la Borne Romaine, Ligne Nouvelle Provence Côte d'Azur, Ligne 14 Nord, Terminal méthanier de Dunkerque, Tour Trinity...

Et à l'étranger : Pont du Bouregreg, Centrales électriques de Plomin / Jijel / Biskra, EPR UK, 3^{ème} pont sur le Bosphore, Tunnel sous le port de Miami, Corniche de Brazzaville, Pont de Jacquévillie, Cap Lopez...



Paris
Tél : +33 (0)1 82 51 52 00
Fax : +33 (0)1 82 51 52 99
Email : info@terrasol.com

Lyon
Tél : +33 (0)4 27 85 49 35
Fax : +33 (0)4 27 85 49 36
Email : lyon@terrasol.com

Maroc
Tél : +212 (0)1 25 53 89
Fax : +212 (529) 03 64 00
Email : talmalki@terrasol.com

Tunisie
Tél : +216 71 23 63 14
Fax : +216 71 75 32 88
Email : info@terrasol.com.tn

VIVRE MIEUX LA VILLE MIEUX FRANCHIR LES OBSTACLES

DÉVELOPPER LES ESPACES EN SOUTERRAIN EST UN MOYEN PUISSANT POUR MAÎTRISER LA CROISSANCE URBAINE, MIEUX RÉPONDRE À LA DENSIFICATION DE LA VILLE ET REDÉPLOYER DES ESPACES EN SURFACE. C'EST AUSSI LA MANIÈRE LA PLUS EFFICACE POUR FAVORISER LES ÉCHANGES AU-DELÀ DES OBSTACLES GÉOGRAPHIQUES NATURELS. DE CE FAIT, LES TRAVAUX SOUTERRAINS CONNAÎTRONT, DANS LES ANNÉES À VENIR, UN DÉVELOPPEMENT IMPORTANT EN FRANCE ET DANS LE MONDE.

C'EST L'INFORMATION RÉCONFORTANTE POUR LES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS ET LES FABRICANTS DE TUNNELIERS QUI SE DÉGAGE DE CET ENTRETIEN AVEC MICHEL DEFFAYET, DIRECTEUR DU CETU.

PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



1 © MARC MONTAGNON

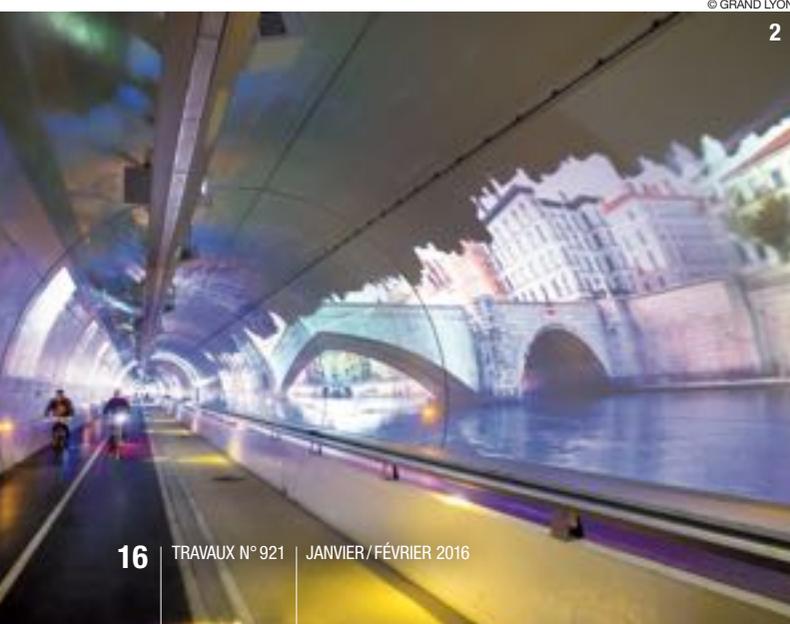
En quelques mots, en préambule, quelles sont les raisons de la création du CETU ?

Le CETU, service technique central du Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE), a été créé en décembre 1970 afin de doter le ministère d'une compétence particulière en matière de tunnels. Le CETU a accompagné la construction des tunnels routiers et autoroutiers depuis les années 70, ainsi que les premiers projets urbains réalisés au tunnelier, notamment la ligne D du métro de Lyon, qui a constitué, dans les années 80, une prouesse technique.

Il est également très orienté sur les questions d'équipements, d'exploitation et de sécurité, en particulier pour

les ouvrages routiers. En effet, si le nombre de tunnels routiers reste globalement modeste (près de 900 en France dont environ 200 de plus de 300 m), ils représentent des enjeux économiques et de sécurité très importants et font appel à des procédés techniques et des compétences tout à fait particuliers.

Dans le domaine des ouvrages ferroviaires et des métros, l'action du CETU se situe essentiellement au niveau du génie civil et de l'approche méthodologique des études, et plus récemment sur les problématiques liées à une meilleure prise en compte de la sécurité des tunnels ferroviaires et de transports guidés urbains, dès les phases de conception, mais aussi tout au long de la vie de ces ouvrages.



2 © GRAND LYON



3 © SOLDATA

Ses moyens et sa vocation ?

Il regroupe un peu plus de 80 personnes - ingénieurs et techniciens principalement - dont de nombreux spécialistes dans tous les aspects du génie civil ou des équipements de tunnels.

Son organisation est de type matriciel. L'essentiel du personnel technique est regroupé dans sept pôles thématiques. Chacun des pôles rassemble de cinq à douze personnes travaillant dans un même domaine, quelle que soit la nature de leur intervention : recherche, projets, expertises, rédaction de documents de doctrine ou de méthode, contrôles, inspections, exploitation de retours d'expérience, mesures, etc.

Le CETU est chargé de faire évoluer la connaissance et les outils au profit des maîtres d'ouvrages et exploitants, en premier lieu la DGITM⁽¹⁾ et les DIR⁽²⁾. Il a pour champ de compétence l'ensemble des techniques et méthodes relatives à la conception, la construction, l'entretien, l'exploitation et la sécurité des tunnels routiers. Il réalise des études et des recherches en relation avec de nombreux organismes français et étrangers.

Parmi les organismes partenaires, l'AFTES occupe une place privilégiée pour son rôle fédérateur de toute la profession, que ce soit dans la formation avec la création du mastère spécialisé, dans la construction du référentiel technique avec la publication régulière de recommandations qui sont internationalement reconnues, ou dans l'animation de nombreuses actions pour la promotion de l'espace souterrain.

Les interventions du CETU se font en majorité pour les tunnels du réseau routier national, mais aussi pour des

ouvrages gérés par des collectivités locales ou des maîtres d'ouvrage non routier (ferroviaire ou fluvial).

Comment la présence du CETU se caractérise-t-elle à l'international ?

Le CETU s'est impliqué dans plusieurs projets de recherche européens, notamment dans le domaine de la sécurité en exploitation et de la surveillance des ouvrages.

Les coopérations internationales sont également importantes et fructueuses. Le CETU a présidé pendant de nombreuses années le Comité Technique 3.3 de l'exploitation des tunnels routiers de l'association mondiale de la route (AIPCR), et va de nouveau l'assurer dans les années qui viennent.

1- Michel Deffayet, directeur du CETU.

2- Le tunnel « mode doux » de la Croix Rousse à Lyon.

3- SR 99 Alaskan Way : un tunnel de 17,80 m de large sur 2,7 km au cœur de Seattle.

4- Essais des équipements après rénovation dans le tunnel du Landy à Saint-Denis.

5- Rencontre de cavités pendant les travaux du tunnel de Violay sur l'autoroute A89.

Plusieurs experts du CETU animent par ailleurs ou participent aux six groupes de travail du Comité Technique 3.3. Le CETU est également impliqué dans les travaux de l'Association Internationale des Tunnels et de l'Espace Souterrain (AITES).

Il participe aux activités des comités COSUF de l'AITES (Comité on Operational Safety of Underground Facilities), comité qu'il a présidé jusqu'en mai 2013, et de l'ITACET (ITA Committee on Education and Training) en charge de l'organisation de formations et de la diffusion du savoir.

Comment se situe aujourd'hui l'actualité des travaux souterrains ?

En France mais aussi au niveau international, la demande est très forte en matière de travaux souterrains.

Ceci est sans doute lié au fait que l'on voit apparaître ou se développer de très grandes métropoles dans de nombreux pays, notamment dans ceux dont l'activité économique est en forte émergence.

Les questions de transport, de desserte des services, de fonctionnement général au quotidien de ces grandes métropoles posent des problèmes très importants et la dimension souterraine peut contribuer à les résoudre de façon satisfaisante.

On voit ainsi fleurir bon nombre de projets de métros ou d'extensions des réseaux existants, à commencer par Paris avec celui du Grand Paris Express mais il s'en prépare également dans de nombreuses agglomérations dans le monde. Cela pose des questions de compétences et d'expérience de ce type de travaux et la profession des souterrains est très mobilisée sur de nombreuses opérations.

Quelques exemples ?

Pour ne prendre que les métros, je peux faire ici référence à ceux de Ryad ou de Doha au Moyen Orient qui sont en pleins travaux, de Sao Polo au Brésil avec plusieurs lignes en réalisation et en projet, de Hanoi au Vietnam, les extensions à Bakou en Azerbaïdjan, de Lima au Pérou, du Caire et de Singapour dont il est prévu de porter le linéaire de 185 km en 2015 à 252 km en 2020. En Chine également le nombre de projets de tunnels en cours ou à venir est particulièrement impressionnant. Je vous cite volontairement des villes dispersées partout dans le monde car cela reflète bien la diversité et l'étendue des projets qui ont tous pour objectif de faire « vivre mieux » des villes saturées tant au niveau de la population que des transports ou des infrastructures. J'ajoute aussi que « l'épaisseur du souterrain » peut également constituer un espace disponible pour des projets allant bien au-delà des seuls tunnels de transport.

Parallèlement, et ceci concerne alors les domaines routier et ferroviaire, se profilent, ou sont même déjà en cours, des projets d'ouvrages de grande longueur de franchissements de points durs : une chaîne de montagne ou des verrous naturels que peuvent traverser des tunnels de plusieurs dizaines de kilomètres.

Aujourd'hui, alors que les plus grands ouvrages routiers en service en Europe ne dépassent pas une dizaine, voire une vingtaine de kilomètres pour certains tunnels de Norvège, les tunnels ferroviaires dépassent les 50 km comme le tunnel sous la Manche ou le tunnel du Gothard en Suisse et, dans un avenir relativement proche, le tunnel transfrontalier du Lyon-Turin entre la France et l'Italie. ▶

© CETU

4



© CETU

5





6

© PEUTZ FRANCE

Des raisons objectives peuvent-elles expliquer cette volonté de creuser de tels ouvrages ?

S'il y a des projets nettement plus longs, c'est d'abord parce que nos réseaux de transports se veulent toujours plus rapides et performants, donc directs et sans déclivités excessives ; mais c'est aussi parce que les techniques des tunneliers, les performances atteintes aujourd'hui, permettent désormais de réaliser des ouvrages très longs dans des délais raisonnables, c'est-à-dire ne dépassant pas généralement une dizaine d'années.

Dans le domaine routier, la longueur maximale des ouvrages dépasse rarement une vingtaine de kilomètres, et encore. Les grands tunnels autoroutiers transalpins, tels que le tunnel du Mont Blanc ou le tunnel du Fréjus se situent autour d'une quinzaine de kilomètres ; aller au-delà interpelle sur la capacité des conducteurs à supporter psychologiquement de telles longueurs : la limite de leur longueur est liée à l'homme, ce qui n'est évidemment pas le cas pour les tunnels ferroviaires.

La demande est donc double : dans l'amélioration des possibilités de se déplacer dans les grandes agglomérations, et dans l'efficacité des grands réseaux de transport. Comme, par

ailleurs, les techniques permettent de creuser plus vite, la conjonction de ces facteurs aboutit au fait que les travaux souterrains sont appelés à un développement important dans les années à venir.

La France est-elle également concernée par cette émergence de projets de très grande envergure ?

Si l'on se focalise sur la France, les projets sont effectivement nombreux pour les quinze années à venir. Avec Michel Pré, de SETEC TPI et président du comité technique de l'AFTES, nous avons fait, il y a peu, un intéressant exercice de recensement. Ainsi, au-delà du programme déjà fourni lié au Grand Paris Express, des projets sont bien avancés chez SNCF Réseau (ex RFF), à la RATP et au STIF. En considérant aussi les projets urbains hors Île de France, à Lyon et Nice notamment, nous avons évalué la longueur de lignes de métros ou tunnels de tramway à creuser d'ici 2025 à près de 200 km. Cela correspond à un rythme annuel de l'ordre de 30 à 35 km pour les années 2019 à 2021 alors que, dans le passé, on se situait plutôt autour de 5 à 10 km par an.

Ces projets vont mettre à contribution des tunneliers sur une très grande

partie des linéaires à creuser, ce qui pourrait se traduire par une vingtaine de machines tournant en parallèle, et donne une image de l'ampleur des travaux à réaliser, étant entendu que certains projets nécessitent bien sûr la mise en œuvre de plusieurs tunneliers simultanément.

Et le Lyon-Turin, dans cette perspective ?

Je viens d'évoquer les projets urbains, mais n'oublions pas les lignes ferroviaires ; et parmi elles, le projet voyageurs et fret du Lyon-Turin dont les travaux sont engagés.

Un tunnelier est en construction pour le creusement d'un premier tronçon de 10 km dans les mois qui viennent. Cette galerie au diamètre réel et à l'emplacement définitif aura également pour vocation de servir d'ouvrage de reconnaissance et de mise au point des techniques.

Côté SNCF Réseau, des projets de désengorgement sont prévus dans les agglomérations de Marseille et de Nice, première phase de la Ligne Nouvelle Provence - Côte d'Azur (LNPCA) avec un linéaire de bi-tubes à réaliser voisin de 10 km pour chacun des projets. Il en est de même pour le désengorgement du nœud ferroviaire lyonnais où des solutions souterraines de

longueur comparable sont à l'étude. Il ne faut pas oublier les galeries qui seront réalisées dans le cadre du projet Cigéo[®] piloté par l'Andra. La première tranche, dont la réalisation est prévue dans les 15 années à venir, comportera des travaux souterrains conséquents. Finalement, aux 200 km de travaux urbains que j'ai déjà évoqués, s'ajoutent ainsi une centaine de kilomètres d'autres projets, ce qui nous porte à un total de 300 km à réaliser d'ici 2025, soit un linéaire de 40 km par an pour certaines années dans la période 2020-2025.

On peut légitimement penser que des rééquilibrages, notamment financiers, feront que des échéances seront réajustées, mais il n'en demeure pas moins que l'activité « souterrains » sera soutenue dans les 15 années à venir. La profession en a conscience : les sociétés d'ingénierie qui sont concernées par ces projets souterrains sont déjà très actives. De leur côté, les entreprises savent que, potentiellement, elles feront face dans quelques années, à une activité soutenue dans ce domaine. Il leur tarde que cette période commence.

En France le marché des travaux souterrains est aujourd'hui relativement modeste mais laisse entrevoir de très belles perspectives.



© DR

7



© PAUL, VÉRONIQUE

8

Quelles sont les évolutions intervenues au niveau des tunneliers ?

Dans le monde, une très large proportion des tunnels est aujourd'hui réalisée avec des tunneliers car ces machines sont capables de faire face à une grande diversité de terrains, capables de supporter des pressions d'eau de plus en plus importantes, et de creuser des sections de très grands diamètres pouvant atteindre jusqu'à 16 ou 17 m. Mais l'escalade au diamètre n'est pas l'évolution la plus significative car la plupart des projets que je vous ai évoqués seront réalisés avec des diamètres plus réduits, de l'ordre de 11 à 12 m. Il est souvent plus intéressant de réaliser deux tubes d'un diamètre plus raisonnable qu'un tube unique de diamètre gigantesque qui pose ensuite des problèmes de division et d'utilisation des espaces, de conception des raccordements, ainsi que de sécurité. Sur un projet tel que le Lyon-Turin, par exemple, au-delà de la longueur exceptionnelle du tube principal, s'ajoute une multitude d'ouvrages secondaires ou de service de diamètres plus réduits. Les évolutions techniques des machines rendent possibles des projets qui, hier, n'étaient guère envisageables. Qu'il s'agisse de projets dans la nappe, à faible profondeur, ou dans des terrains difficiles, les nouveaux tunneliers permettent de réaliser des creusements dans des situations qui, autrefois, auraient été d'un coût et d'une difficulté technique réhabilitaires. La profession dispose désormais d'une offre de techniques qui permettent d'envisager des travaux dans des horizons géologiques autrefois difficilement accessibles. Il est possible de passer dans des terrains très contrastés qui vont de la roche très dure à des maté-

CIGÉO EN BREF

Cigéo est le projet français de centre de stockage profond de déchets radioactifs conçu pour stocker, dans des installations souterraines situées à environ 500 m de profondeur, les déchets hautement radioactifs et à durée de vie longue produits par l'ensemble des installations nucléaires actuelles jusqu'à leur démantèlement et par le traitement des combustibles usés utilisés dans les centrales nucléaires.

riaux alluvionnaires d'extrêmement pauvres caractéristiques mécaniques, avec des pressions d'eau variables, des zones hétérogènes, grâce à des tunneliers que l'on peut adapter aux caractéristiques des terrains rencontrés, voire à leur variation : les tunneliers sont devenus des machines évolutives. Alors que l'on considérait autrefois que la mise en œuvre d'un tunnelier n'était envisageable, économiquement, que pour une longueur de tunnel d'au moins 2 à 3 km, cette longueur se

trouve réduite à moins de 2 km, voire d'un kilomètre.

Une autre démarche a également modifié la donne : il est désormais envisagé couramment de prévoir la réutilisation d'une machine sur plusieurs chantiers différents moyennant certaines adaptations, notamment au niveau du diamètre de coupe, ce qui n'était pas le cas précédemment où les tunneliers étaient tous ou quasiment des prototypes conçus, construits et mis en œuvre pour un chantier déterminé. Cela reste la règle pour les très grands chantiers mais beaucoup moins pour les opérations de longueurs moyennes ou petites. On réfléchit aussi sur l'éventualité de travailler sur des diamètres qui soient plus standardisés, car cela faciliterait encore davantage les possibilités de réutilisation de machines.

Des évolutions sont-elles intervenues au niveau des outils ?

D'importants travaux ont été menés pour des outils plus performants sur la roue, pour améliorer l'efficacité d'abatage et réduire l'usure et par suite les travaux toujours délicats de remplacement des outils sous atmosphère hyperbare. Plusieurs programmes de recherche sont aussi en cours, comme le projet NeTTUN⁽⁴⁾ qui va d'ailleurs bien au-delà de ce seul objectif. Il s'agit

d'un projet européen de recherche et développement dont l'objectif est de trouver des pistes d'innovations en matière de construction, gestion et maintenance des tunnels.

D'autres actions sont-elles engagées, notamment en ce qui concerne l'évacuation des matériaux ?

L'évacuation des matériaux - et ce qu'on en fait - est un sujet qui prend de plus en plus d'ampleur parmi les préoccupations des acteurs des travaux souterrains, maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et entreprises, sans doute en raison de l'importance des volumes qui vont être excavés dans les années qui viennent. Que fait-on des milliers voire des millions de m³ sortis ? Comment les caractériser, comment les réutiliser le plus et le mieux possible ? Autant de questions indispensables pour résoudre au moins partiellement le problème de plus en plus aigu de la mise en dépôt. Il y a là un gros enjeu. La réglementation a évolué dans ce domaine et il est fort possible que des filières spécialisées se mettent en place en particulier à l'occasion de la réalisation du Grand Paris Express pour lequel l'évacuation des déblais dans des zones essentiellement urbaines nécessitera que des solutions compatibles avec les exigences en matière d'environnement soient trouvées. Sur ce sujet là aussi la profession est vigilante ; le groupe de travail 35 de l'AFTES va prochainement produire une recommandation complète qui fera le tour de la question. □

- 1- **DGITM** : Direction Générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer.
- 2- **DIR** : Directions Interdépartementales des Routes.
- 3- **Cigéo** : Centre industriel de stockage Géologique.
- 4- **NeTTUN** : New Technologies for Tunnelling and Underground Works.

6- Le système de sécurité intelligent dans le tunnel de la Croix Rousse à Lyon.

7- Le giratoire en souterrain « Canton » en direction de Cap d'Ail à Monaco.

8- Bouclier du tunnelier pour le creusement du Mont Sion sur l'autoroute A41.

9- Le tunnel sous le Vieux Port à Marseille.

10- Essai d'incendie dans le tunnel de Talant à Dijon.

© CETU

9



© CETU

10





1
© BESSAC

BESSAC

UNE DOUBLE ACTIVITÉ 100% FRANÇAISE EN TRAVAUX SOUTERRAINS

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

BESSAC EST LA SEULE ENTREPRISE FRANÇAISE DÉDIÉE À 100% AUX TRAVAUX SOUTERRAINS. ELLE EST AUSSI LA SEULE ENTREPRISE DE CONSTRUCTION DANS CE DOMAINE À AVOIR LA CAPACITÉ INDUSTRIELLE POUR LA FABRICATION DE TUNNELIERS. BESSAC A AUJOURD'HUI À SON ACTIF 300 KM DE TUNNELS RÉALISÉS EN 40 ANS, DEPUIS SA CRÉATION EN 1975. BERNARD THÉRON, PRÉSIDENT DE BESSAC DEPUIS 2008, RETRACE POUR TRAVAUX LES GRANDES ÉTAPES D'UNE AVENTURE QUI A PERMIS À CETTE PME TOULOUSAINNE DE S'IMPOSER DANS PLUS DE 20 PAYS DANS LE MONDE, EN PARTICULIER GRÂCE À SA DOUBLE SPÉCIFICITÉ DE FABRICANT INNOVANT ET D'ENTREPRISE PERFORMANTE.

C'est en 1975 que Michel Bessac, quittant l'entreprise familiale de travaux publics de Réalmont, dans le Tarn, crée sa propre société « Fonçages et Forages Bessac », spécialisée dans la réalisation de fonçages et forages horizontaux, des travaux réalisés avec, déjà, des matériels fabriqués dans l'atelier de l'entreprise. L'année suivante, conjuguant des capa-

cités d'inventeur à celles de mécanicien ingénieux, il propose une solution alternative au fonçage : la pose de voussoirs en fonte à l'avancement, sous la protection d'un bouclier hydraulique. Le premier tunnelier Bessac était né, préfigurant une exceptionnelle aventure qui perdure 40 ans plus tard : depuis 1976, Bessac a construit plus de 300 km de tunnels dans le monde

1 - Collecteur d'assainissement avec voussoirs en fonte à La Courneuve, en Seine - Saint-Denis.

dont plus de 140 km au cours des 10 dernières années.

L'innovation de 1976 permet à « Fonçages et Forages Bessac » de gagner un appel d'offres pour la construction d'un passage piétons sous les voies ferrées du Capitole à Toulouse, dont le creusement et la pose des voussoirs sont encore manuels. Ce qui n'empêche pas l'entreprise de réaliser pen-

dant cette période 7,5 km d'ouvrages souterrains sur près de 70 chantiers. Il s'agit essentiellement de traversées de voies ferrées, de routes, d'auto-routes et de canaux pour des gazoducs, des réseaux d'adduction d'eau et d'assainissement. Mais l'entreprise remporte également quelques marchés de collecteurs d'assainissement par fonçage sur de grands linéaires.

Dans les années 70-80, les besoins dans ce domaine sont importants en France et la construction d'ouvrages de ce type devient l'une des activités principales de l'entreprise.

Poursuivant ses recherches, Michel Bessac développe parallèlement une première machine d'abattage hydraulique, destinée à remplacer le creusement manuel.

Un prototype est installé dans une tête de forage pour la réalisation d'un collecteur à Pau. Après les mises au point nécessaires, cette machine appelée « taupe » est installée dans le bouclier qui a réalisé le passage pour piétons à Toulouse. On peut considérer qu'il s'agit du premier modèle de tunnelier mécanisé à attaque ponctuelle Bessac. Celui-ci sera utilisé pour le creusement de deux tunnels à Nanterre, en Île-de-France, en 1978 et 1979.

CREUSER SOUS LA NAPPE PHRÉATIQUE

« Après les deux chantiers de Nanterre, un succès commercial déterminant vient confirmer les atouts du tunnelier à attaque ponctuelle, précise Bernard Théron : la construction d'un collecteur d'assainissement de 3,50 m de diamètre à La Courneuve, en Seine-Saint-Denis. Cette première incursion en Île-de-France, avec un statut d'entreprise générale et non plus comme sous-traitant, sera une référence importante pour le développement de cette technique car c'est autour d'elle que

© BESSAC



2

BESSAC EN BREF

CHIFFRE D'AFFAIRES : 80 millions d'euros dont 70 % à l'international.

EFFECTIFS PERMANENTS : 200 personnes dont 50 à l'usine et 120 sur chantiers.

FILIALES : Bessac Andina (Colombie), Bessac Inc. (États-Unis), Bessac International (pour les interventions à l'étranger), Micromat (vente et location de matériel).

À ces filiales géographiques s'ajoutent des succursales créées ponctuellement, essentiellement pour des raisons administratives, au gré des chantiers (Algérie, Argentine, Hong Kong, Russie...).

PARC DE TUNNELIERS : 40 tunneliers et microtunneliers opérationnels, de 0,50 m à 6,50 m de diamètre.

2- Bernard Théron, président de Bessac.

3- Poste de pilotage d'un tunnelier à confinement par air comprimé.

4- À Bogota, en Colombie, sortie d'un tunnelier à pression de terre (EPB).

l'entreprise se développera dans les années qui suivront ».

Les premiers modèles de tunneliers Bessac ne permettaient pas le creusement sous la nappe phréatique. Il faut attendre 1985 pour qu'apparaisse le premier tunnelier à confinement par air comprimé qui permet le creusement sous l'eau d'un collecteur à Maisons-Alfort, dans le Val-de-Marne.

« La même année, indique Bernard Théron, le marché de la conduite for-

cée de Caudéran-Naujac, à Bordeaux, permet à l'entreprise de s'affirmer avec la double casquette d'entrepreneur et de constructeur de tunneliers.

Cet ouvrage de 2 km de longueur et de 4,50 m de diamètre, à creuser dans une géologie difficile, sous la nappe, représentait un véritable défi. Il permettra à Bessac de gagner ses lettres de noblesse dans le monde des travaux souterrains ».

À noter que ce tunnel sera le dernier réalisé en voussoirs en fonte : les voussoirs des ouvrages suivants seront en béton armé.

En 1983, l'entreprise quitte Réalmont et son célèbre marché à l'ancienne, au cœur de « l'autre » Sud-Ouest, pour installer son siège à Saint-Jory, près de Toulouse, dans une région dont l'activité économique, industrielle notamment, est en plein développement.

L'année suivante, Michel Bessac change la raison sociale de l'entreprise : « Fonçages et Forages Bessac » devient CSM Bessac (Creusement et Soutènement Mécanisé Bessac), appellation qu'elle gardera jusqu'en 2015, où elle vient de devenir « Bessac » tout court, nom générique sous lequel elle est universellement connue et qui a rapidement supplanté « CSM Bessac ».

PASSAGE DE TÉMOIN ACCOMPAGNÉ

« En 1990, intervient un événement qui contribuera de façon déterminante au développement de l'entreprise, poursuit Bernard Théron : afin d'assurer la pérennité de l'entreprise, Michel Bessac fait appel à un actionnaire extérieur - Solétanche - qui entre dans le capital d'abord à hauteur de 40 % puis plus tard de 80 % - avec l'engagement d'accompagner cette prise de participation jusqu'en 1996, année de son départ à la retraite, où Solétanche devient alors l'actionnaire unique⁽¹⁾ ». ▶



3



4



Poursuivant sa double activité d'entrepreneur et de constructeur, CSM Bessac participe à la montée en puissance du creusement au tunnelier, particulièrement dans les domaines de l'assainissement et des galeries techniques où la technique du tunnelier à confinement par air comprimé Bessac s'impose notamment grâce à ses capacités de creusement en milieu urbain. Quelques exemples mettent en évidence l'important développement qu'il connaît : 5 km de collecteurs dans le Val-de-Marne (VL6 Aval et Médian et Fresnes-L'Haj-les-Roses), 1,8 km de tunnel d'assainissement sous le centre de Toulouse, une galerie pour la CPCU⁽²⁾ sous le quai de la Rapée à Paris, un chantier particulièrement difficile sur lequel 50 tirants d'ancrage de paroi moulée seront découpés au front, à l'avancement du tunnelier...

OUVERTURE À L'INTERNATIONAL

« À partir de 1995, sous l'impulsion et avec l'appui de Solétanche, très implantée à l'export, indique Bernard Théron, CSM Bessac s'ouvre à l'international avec un premier chantier

important à Berlin, gagné en groupe-ment avec Solétanche. D'autres chantiers suivent en Espagne, en Suisse, au Pays de Galle. Puis, petit à petit, les distances d'intervention s'accroissent et l'entreprise remporte des marchés à Valparaiso, à Hong Kong, à Bogota... Cette démarche s'avérera décisive pour la croissance de l'entreprise à telle enseigne que nous intervenons aujourd'hui dans plus de 20 pays dans le monde ».

Entre 2000 et 2010, l'entreprise diversifie ses techniques de creusement en faisant appel à d'autres technologies, les tunneliers à attaque globale et les microtunneliers.

Un premier chantier de 10 km de collecteurs est réalisé avec deux tunneliers à pression de terre (EPB) à Bogota en 2000, suivi de deux autres chantiers de 10 km de tunnels pour le réseau d'assainissement de la capitale colombienne.

CSM Bessac construit son premier tunnelier EPB pour un collecteur de 4 m de diamètre pour le SIAAP, à Valenton. Ce tunnelier est réutilisé aussitôt pour un collecteur de 4,3 km à Alger.

5- Berlin :
premier chantier à l'export pour CSM Bessac.

6- À Alger, tunnelier EPB pour un collecteur de 4 m de diamètre.

7- Sortie du microtunnelier utilisé pour le chantier des émissaires de rejet en mer aux Sables d'Olonne.

L'entreprise réalise par ailleurs, son premier tunnel de métro, à Toulouse, en 2003, dans le cadre de la construction de la ligne B.

La diversification vers la technique du microtunnelier se concrétise par un chantier gagné en 2005 à Poitiers.

D'autres chantiers importants de micro-tunnelier sont obtenus : les émissaires de rejet en mer des Sables d'Olonne et de Rabat (Maroc), ou le collecteur de la Soie de 980 m de longueur, pour Lyon Métropole, un record.

Plus récemment, l'entreprise oriente son développement vers des diamètres plus importants, ce qui se concrétise avec sa participation sur plusieurs chantiers de métro : en France avec la ligne 14 de la RATP à Saint-Ouen et le tramway souterrain à Nice, à l'étranger avec la Thomson Line à Singapour. Sur le plan de l'activité industrielle, elle gagne un contrat de fabrication d'un tunnelier pour la construction d'une nouvelle ligne de métro à Minsk (Biélorussie).

Bernard Théron apporte des précisions à ce sujet : « Nous sommes rentrés de plain pied dans des diamètres qui nous permettent de couvrir désormais une gamme allant de 0,50 m pour les microtunneliers à plus de 8 m pour les tunnels. Nous avons également évolué en techniques de creusement. Du tunnelier à attaque ponctuelle sous air comprimé de l'origine de l'entreprise, nous sommes passés à tous types de tunneliers, à pression de terre et à pression de boue. »

« Nous avons une double casquette d'industriel et d'entreprise de construction. Cela correspondait à la tendance

générale des années 70 où l'intégration verticale était la règle. Bessac a conservé cette caractéristique qui lui assure un avantage concurrentiel sur les ouvrages de 2,20 m à 6,50 m de diamètre. Au-delà de 6,50 m, nous utilisons des tunneliers dont nous faisons l'acquisition à l'extérieur, car l'outil industriel de Saint-Jory ne dispose pas de la structure nécessaire pour construire des matériels d'un tel diamètre ».

« À côté de cela, il est évident que, face à la concurrence, pour nous démarquer, il est très intéressant de nous orienter vers des fabrications spéciales qui nous permettent de sortir des sentiers battus. Nous avons donc développé - et nous développons encore - des matériels inédits et très spécifiques comme le TDM⁽⁹⁾, une machine qui répondait à une spécificité d'un projet à Hong Kong, dans le cadre de la construction d'une nouvelle ligne de métro ».

« Cette machine a très bien fonctionné. Elle nous a permis de nous singulariser en apportant notamment une solution importante en termes de sécurité.



8
© BESSAC

8- Le tunnelier EPB pour le chantier de la nouvelle ligne du métro de Minsk.

9- Le TDM (Tunnel Dismantling Machine) mis en œuvre à Hong Kong, primé par l'ITA en 2013.

Nous avons traité ce chantier en tant qu'entreprise mais aussi en tant que concepteur et fabricant de matériel. Cette innovation a été reconnue au niveau national avec un prix de la FNTF mais aussi et surtout au niveau international en 2013 puisqu'elle a reçu le prix "Product or Equipment Innovation of the Year" décerné par l'ITA

(International Tunnelling Association) ». Rappelons à cette occasion que, précédemment, CSM Bessac avait reçu deux prix de l'innovation décernés par la FNTF pour le « Roll & Rock » en 2001 et la cureuse d'égout « Procope » en 2009.

DES CHOIX STRATÉGIQUES JUDICIEUX

À partir de 2010 et jusqu'à aujourd'hui, malgré une conjoncture défavorable pour le secteur de la construction, ces années se révèlent très dynamiques pour Bessac avec le gain de chantiers prestigieux comme la galerie hydraulique du terminal méthanier de Dunkerque pour EDF, d'une longueur de 5 km en diamètre 3 m.

« L'entreprise a fait mieux que résister dans cette période de crise, conclut Bernard Théron. Elle confirme que l'ensemble des choix stratégiques de la précédente décennie étaient les bons : l'export et la diversification technologique vers les tunneliers à attaque globale, vers la technique du microtunnelier et vers les tunnels de gros diamètre ».

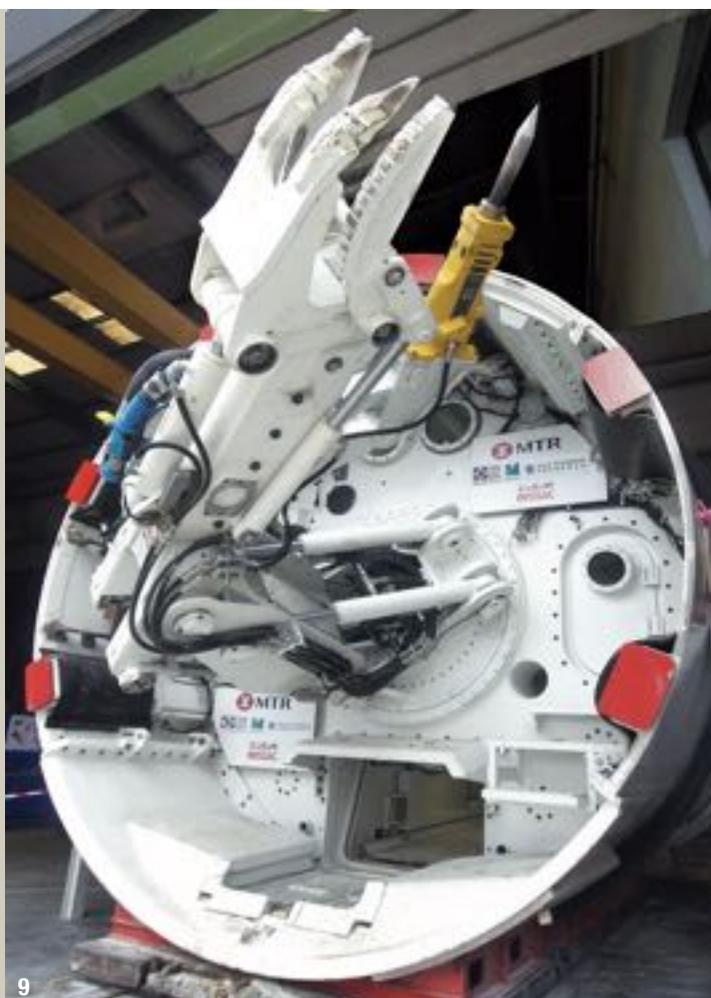
LE TDM : L'INNOVATION AU CŒUR DE LA SOCIÉTÉ

LE TDM (Tunnel Dismantling Machine), la machine à démonter les tunnels, qui a opéré pour la première fois sur une ligne de métro à Hong Kong, a vraiment fait carton plein lors de son lancement puisqu'elle a reçu 4 prix de l'innovation :

- Award « Product or Equipment Innovation of the Year » décerné à Londres le 26 novembre 2013 par l'ITA (International Tunnelling Association) ;
- Trophées des Travaux Publics 2013 (prix FNTF, catégorie Processus/ Matériels) ;
- Prix spécial « Maîtrise technique » reçu lors de la finale des Prix de l'Innovation Vinci 2013 ;
- Grand Prix Soletanche Bachy et Ménard reçu dans le cadre de la convention SoitTeam en octobre 2013, à Genève.

Cette machine fabriquée par CSM Bessac en coopération avec la joint-venture Dragage/Maeda/Bachy-Soletanche Group a été utilisée à Hong Kong dans le cadre de l'extension vers l'ouest de la ligne de métro « Island Line ». Outre la construction de 4 tunnels de 5,30 m de diamètre, le projet comprenait le démontage d'un tunnel d'arrière-gare sur lequel a été raccordé le nouveau tunnel construit par un tunnelier à pression de boue. Ce tunnel existant devait être purgé de ses voussoirs (en béton armé et en fonte) et rempli de béton maigre, sur une longueur d'environ 130 m. Cette opération complexe, au regard du contexte environnemental avec une forte densité de tours et de gratte-ciel au-dessus du tunnel, et surtout du contexte géologique - des alluvions sous une charge d'eau de près de 30 mètres - a été un succès total.

Avec le TDM, les différents jurys ont salué un engagement collectif pour concevoir, mettre au point et faire fonctionner une machine destinée à un usage unique et totalement atypique.



9

© BESSAC



10

© BESSAC

« L'objectif n'est pas la dispersion mais la sélection des projets. Nous sélectionnons les projets dès lors qu'ils intègrent, par leur complexité, les spécificités qui sont les nôtres et pour lesquels nous pouvons apporter, avec notre bureau d'études et notre usine, une réelle plus-value ».

Ceci s'est traduit, en 2015, par une forte croissance du chiffre d'affaires qui est passé de 40 M€ à 80 M€.

Depuis 20 ans, Bessac double son chiffre d'affaires tous les 5 ans et aujourd'hui, elle réalise plus de 70 % de son activité à l'export.

→ À Singapour, Bessac opère sur un lot de la ligne Thomson assurant la liaison avec Marina Bay, de 1,7 km de long en diamètre 5,80 m.

→ À Doha, au Qatar, dans le cadre du projet Idris, elle intervient sur deux lots de tunnels d'assainissement d'une longueur totale de 30 km, en diamètre 3 m et 4,50 m.

→ À Bruxelles, elle va démarrer un tunnel unitaire d'assainissement pluvial de 1,3 km en diamètre 4,60 m.

10- Trois des cinq tunnels d'interconnexion de 5,36 m de diamètre du Métro de Toulouse.

11- La cureuse d'égout Procope, primée en 2009.

12- Le marineur Roll & Rock, primé en 2001.

13- Tunnel TEO de 7,80 m de diamètre à Mexico.

De son côté, la filiale colombienne exerce son activité en permanence sur des chantiers locaux.

Par ailleurs, sur le plan de l'activité industrielle, Bessac vient de livrer un tunnelier EPB Ø 6,28 m à Minsk pour le creusement de la troisième ligne de métro de la capitale biélorusse.

EN FRANCE : DES ACTIVITÉS DIVERSIFIÉES

Bessac dispose depuis plusieurs années d'une agence en région pari-

À L'ÉTRANGER : DES CHANTIERS À CARACTÈRE INNOVANT

En 2015, ses chantiers internationaux présentant un caractère innovant particulier sont nombreux :

→ À Miami, aux États-Unis, un tunnelier mixte à pression de terre/pression de boue, creuse un collecteur d'assainissement reliant deux îles de 1,6 km de long en diamètre 2,50 m.

→ À San José, au Costa-Rica, le tunnelier à pression de terre « Guaria » creuse dans des roches volcaniques un tunnel d'assainissement de 1,8 km en diamètre 2,50 m.

→ À Antofagasta, au Chili, les micro-tunneliers « Joyce et Guiliانا » creusent par fonçage trois émissaires de rejet et de prise en mer pour une usine de dessalement (1,4 km en diamètre 2 m).

→ En Géorgie et en Azerbaïdjan, l'entreprise réalise au microtunnelier deux traversées de rivière de 1,6 km de long en diamètre 2 m.



11



12



13



© BESSAC

14

14- Tracé du tunnel destiné à relier deux îles à Miami.

15- Réalisation d'un collecteur d'amenée de 1,80 m de diamètre à Bezons, dans les Yvelines.

16- La filiale Bessac Andina, en Colombie, a été créée en 2009.



© BESSAC

15



16

sienne dont l'activité est soutenue avec, principalement, des chantiers de collecteurs d'assainissement mais aussi de métros.

Plusieurs chantiers significatifs viennent de s'achever ou sont en cours :

→ À Saint-Ouen, le lot n°2 de la ligne 14 de la RATP de 1,7 km en diamètre 7,75 m, entre la future station Clichy-Saint-Ouen et Saint-Denis.

→ À Paris, le tunnelier à pression d'air « Sophie » vient de creuser une galerie pour le chauffage urbain en diamètre 2,30 m, sous le boulevard périphérique.

→ À Antony, un chantier de micro-tunnel démarre, 1 km en diamètre 2 m pour la déviation de réseaux pour le tramway Antony-Clamart.

BESSAC : DATES-CLÉS

1975 Création de l'entreprise « Fonçages et Forages Bessac ».

1976 Fabrication du premier tunnelier.

1978 Fabrication du premier tunnelier mécanisé.

1980 Premier tunnelier de diamètre 3,80 m.

1983 « Fonçages et Forages Bessac » devient CSM Bessac (Creusement et Soutènement Mécanisé Bessac).

1986 Premier tunnelier de 5 m de diamètre à attaque ponctuelle et confinement à air comprimé.

1990 Entrée majoritaire de Solétanche dans le capital.

1995 Premier chantier à l'exportation à Berlin.

1996 Soletanche Bachy acquiert 100% du capital.

2007 Entrée dans le groupe Vinci.

2015 CSM Bessac devient Bessac.

→ À Nice, 3,2 km seront réalisés au tunnelier à pression de boue en diamètre 8,30 m pour la traversée en souterrain de la ville ancienne par la ligne de tramway.

→ À Montpellier, 2 microtunneliers sont en train de creuser un collecteur d'assainissement de 2,4 km en diamètre 1200.

→ À Montoir-de-Bretagne, le microtunnelier « Bertille » vient d'achever le creusement d'un collecteur d'assainissement de 160 m en diamètre 1200. □

1- Solétanche est devenue Soletanche Bachy en 1997, puis est entrée dans le groupe Vinci en 2007.

2- CPCU : Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain.

3- TDM : Tunnel Dismantling Machine.



1

© SYSTRA

LES PREMIERS TUNNELS AU TUNNELIER DU GRAND PARIS EXPRESS

AUTEURS : CLAUDE NGUIMBI, RESPONSABLE TRAVAUX, SYSTRA - PIERRE JULLIEN, DIRECTEUR TRAVAUX, SYSTRA, FABRICE SENEAL, DIRECTEUR TRAVAUX TUNNELS, EIFFAGE GC - GREGOIRE GERMAIN, DIRECTEUR TRAVAUX STATIONS, RAZEL-BEC

LE PROLONGEMENT DE LA LIGNE 14 DU MÉTRO PARISIEN CONSTITUE LE POINT DE DÉPART DES TRAVAUX DU GRAND PARIS EXPRESS. LES TRAVAUX DE GÉNIE CIVIL ONT DÉBUTÉ À L'ÉTÉ 2014 PAR LE LOT T01, POINT DE RACCORDEMENT AU TUNNEL EXISTANT DE LA LIGNE. LA FIN DE LA RÉALISATION DU RADIER DE LA STATION PONT-CARDINET, DANS LES DÉLAIS IMPARTIS, A PERMIS DE LANCER LE MONTAGE DU TUNNELIER MAGALY, DONT LA PHASE DE CREUSEMENT EST IMMINENTE.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET

La ligne 14 du métro parisien est une ligne de métro automatique sur pneu d'une longueur commerciale de 8,7 km avec 9 stations. La ligne a été mise en service en 1998 puis prolongée au nord jusqu'à la station Saint-Lazare en 2003 et au sud jusqu'à la station Olympiades en 2007. La vitesse com-

merciale moyenne est de 40 km/h pour un intervalle minimum entre trains de 95 s à l'heure de pointe, avec un trafic voyageur de près de 550 000 voyageurs par jour.

Le projet de prolongement jusqu'à la mairie de Saint-Ouen est la première étape du Grand Paris Express dont la ligne 14 constitue l'épine dorsale. Le principal objectif de cette extension

est de désaturer de 23% la ligne 13 (610 000 voyageurs/jour). Il est projeté de réaliser un tunnel d'environ 5,8 km avec 4 stations dont 2 en correspondances avec la ligne 13. Il est prévu que la ligne 14 soit exploitée à pleine capacité avec une vitesse maximale de 80 km/h et un intervalle entre trains réduit à 85 s, afin de répondre à la demande prévisionnelle attendue.

1- Le tunnelier Magaly.

1- The Magaly TBM.

PRÉSENTATION DU LOT T01

Le lot T01 concerne la réalisation des stations Pont-Cardinet⁽¹⁾ et Porte-de-Clichy⁽²⁾, et la réalisation d'un tunnel circulaire à 2 voies de 7,75 m de diamètre intérieur d'une longueur de 3,6 km, entre la rue de Londres (Paris VIII^e) et la rue Pierre-Dreyfus sur la commune de Clichy (92).

Il se décompose en 3 tronçons :

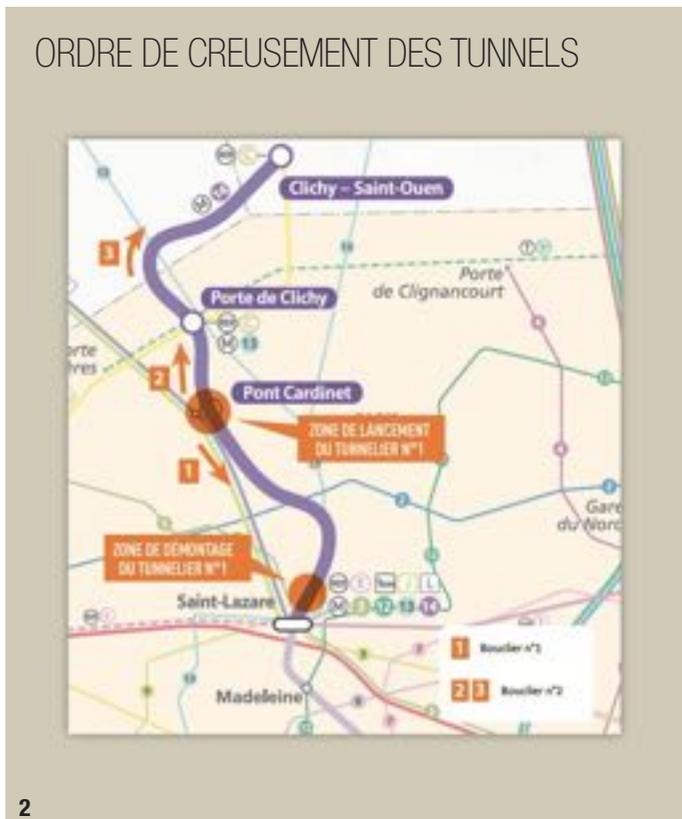
- Le premier tronçon se développe au sud de la station Pont-Cardinet, jusqu'à l'arrière gare de Saint-Lazare, sur une longueur de 1 590 m environ ;
- Le second tronçon relie les stations Pont-Cardinet et Porte-de-Clichy, sur une longueur de 560 m environ ;
- Le troisième tronçon s'étend entre les stations Porte-de-Clichy et Clichy-Saint-Ouen, sur une longueur de 1 430 m environ.

Le premier tir est réalisé en direction de la ligne existante pour réduire sensiblement le planning général. Cette configuration permet de poser la voie sur cette section, simultanément au creusement des autres tronçons. Ainsi le système de transport pourra être testé en anticipation (figure 2).

Les 3 sections de tunnel sont réalisées avec 2 boucliers de 8,92 m de diamètre fournis par Herrenknecht. Le premier bouclier (S940), avec ses remorques, est assemblé à la station Pont-Cardinet et il est démonté sur lui-même sous les bâtiments de la rue de Londres, puisqu'il n'a pas été possible de créer un puits de sortie dans le quartier de Saint-Lazare.

Le second bouclier (S941), avec la réutilisation des remorques, est assemblé également à la station Pont-Cardinet

ORDRE DE CREUSEMENT DES TUNNELS



2 © RATP

2- Ordre de creusement des tunnels.

3- Douille pour pré-trou.

4- Anneau universel.

2- Order of tunnel excavation.

3- Bushing for preliminary hole.

4- Universal ring.

pour creuser jusqu'à la station Clichy-Saint-Ouen.

L'objectif est d'avoir des cadences d'environ 300 m par mois, avec des anneaux universels de 7 voussoirs de 1,8 m (ou 1,5 m lorsque les rayons du tracé en plan sont inférieurs à 260 m). Les anneaux ont la spécificité d'être équipés de 2 lignes de 77 pré-trous

pour la mise en place des équipements futurs des tunnels (brevet RATP) (figures 3 et 4).

Les tunnels se situent dans un contexte urbain dense. Ainsi, 47 points singuliers ont été identifiés avec des passages à proximité d'ouvrage (lignes 2 et 13 du métro, lignes RER et Transilien, collecteurs, périphérique routier) et sous des bâtiments très sensibles (nombreux bâtiments de type haussmannien, établissement scolaire, lieux de culte). Chacun de ces points singuliers nécessite des interventions spécifiques réalisables au passage du tunnelier.

PRESTATIONS PRÉALABLES AU PASSAGE DU TUNNELIER

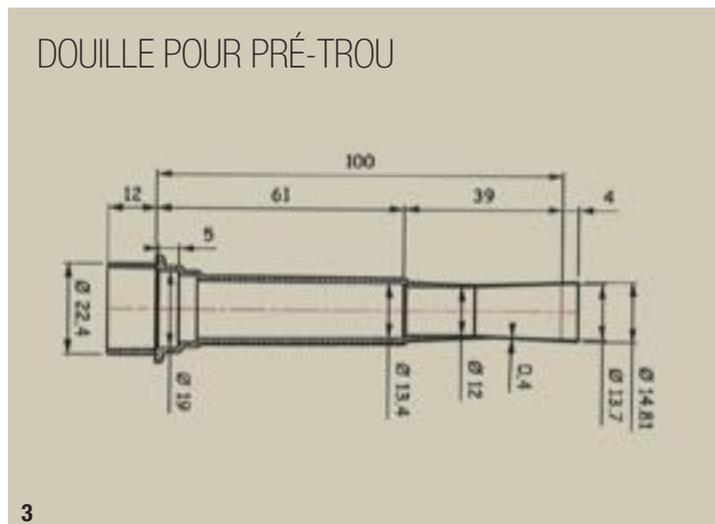
LES AUSCULTATIONS

Les bâtiments

L'auscultation topographique automatique des bâtiments, des ouvrages et des voiries situés dans la Zone d'Influence Géotechnique (ZIG) est indispensable pour s'assurer que les méthodes de creusement employées n'entraînent pas de désordres pour les constructions existantes.

Cette auscultation repose principalement sur un nivellement de haute précision réalisé avec des théodolites robotisés associés à des prismes-cibles. L'objectif est d'être à tout moment en mesure de déterminer les tassements absolus et les tassements différentiels avec la prise en compte automatique, et en temps réel, des compensations météorologiques et les réductions des erreurs angulaires.

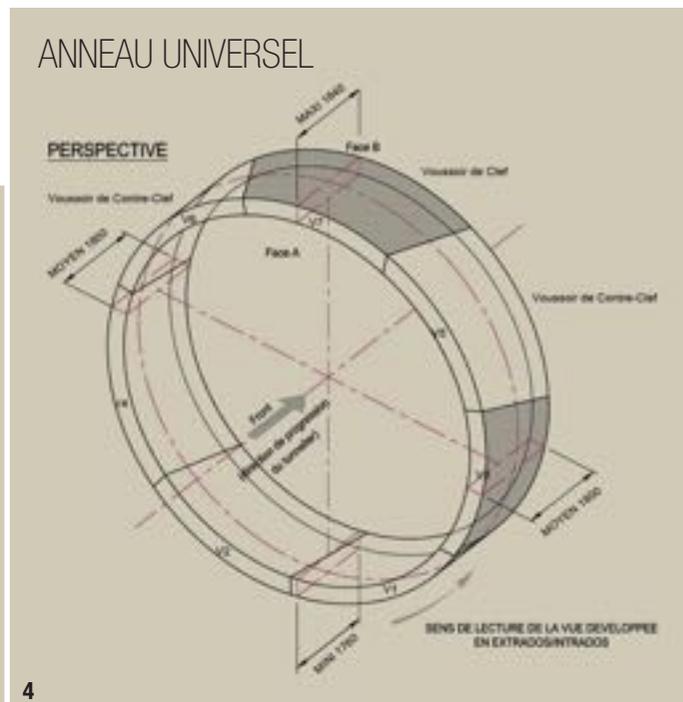
DOUILLE POUR PRÉ-TROU



3

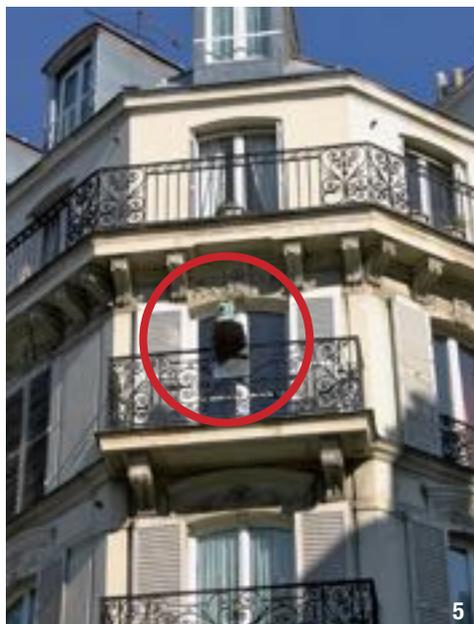
© ANIXTER

ANNEAU UNIVERSEL



4

© EIFFAGE TP / RAZEL-BEC



Ainsi, pour le passage du tunnelier sous les bâtiments « courants » de type haussmannien situés sur le premier tronçon, il a fallu installer 24 théodolites et plus de 650 prismes-cibles pour ausculter les 170 bâtiments. Tous ces bâtiments sont également équipés de fissuromètres de type G6 en fonction de leur état constaté lors des référés préventifs (figure 5).

Ce dispositif est complété pour les bâtiments classés « très sensibles » par une multitude de système de mesures : distancemètre, scanneur, inclinomètre, tiltmètre, électro-nivelle, fibre optique, géophone, etc.

Les ouvrages existants

Les ouvrages souterrains, et notamment les réseaux ferroviaires RATP et SNCF, ont nécessité la mise en place de dispositifs d'auscultation spécifiques afin de contrôler les déplacements des voies.

Ces dispositifs sont composés de prismes (visés à l'aide de théodolites) associés à des électro-nivelles et des tassomètres automatisés. L'objectif étant de contrôler les gauches, dévers et mise en pente des voies ferroviaires (figure 6).

Les sections de mesures des déformations

Pour vérifier les hypothèses d'estimation de perte de volume lors du creusement au tunnelier, mais aussi pour valider le comportement du modèle de calcul, des « sections de mesure des déformations » sont disposées perpendiculairement à l'axe du tunnel et équipées de moyens de mesure des mouvements des terrains en profondeur. Ces sections sont implantées à

proximité du lancement du tunnelier ou en des points spécifiques, en fonction du contexte urbain. Chaque section est composée d'inclinomètres et tassomètres dans des forages, de cibles en surface, de mesures de convergence en tunnel et d'instrumentation des anneaux.

Pour l'ensemble du lot T01, elles sont au nombre de 6. Les données collectées permettront d'affiner les paramètres de creusement du tunnelier après la reprise itérative des calculs de tassement (figure 7).

- 5- Théodolite automatisé.
- 6- Auscultation en tunnel.
- 7- Section de mesures des déformations.

- 5- Automated theodolite.
- 6- Monitoring in tunnel.
- 7- Strain measurement section.

LES TRAITEMENTS DE TERRAIN

Les bâtiments

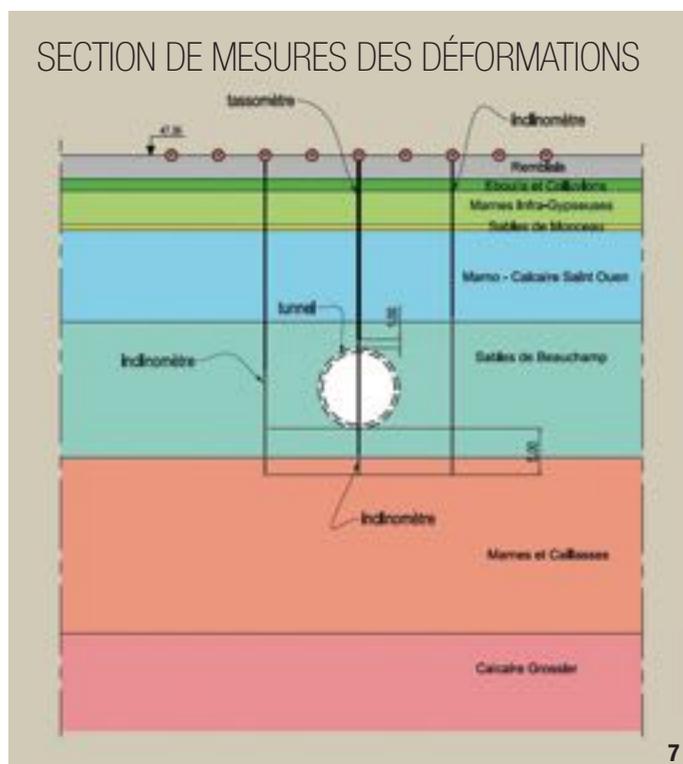
Plusieurs bâtiments classés dans les ouvrages sensibles nécessitent des traitements de terrain préalablement au passage du tunnelier.

Sous un bâtiment de type haussmannien, le tunnelier doit passer avec une couverture de moins d'un diamètre, dans une zone de calcaire de Saint-Ouen décomprimé. Plus d'une centaine de forages d'injection d'environ 12 m de longueur, avec des inclinaisons jusqu'à 50°, sont ainsi réalisés pour traiter la zone avec une foreuse hydraulique montée sur chenilles de type Camacchio MC 4D que le groupement d'entreprises a dû adapter aux contraintes de gabarit (figure 8).

Un second bâtiment situé à quelques mètres seulement de 3 ouvrages souterrains (ligne 13 du métro, collecteur de Clichy et RER C) est classé « très sensible » compte tenu de son exploitation (service d'assistance téléphonique 24 heures sur 24, 7 jours sur 7 ; avec les équipements électroniques et informatiques en sous-sol) et d'une façade constituée de verre agrafé. Ce bâtiment, fondé sur fondations profondes, comporte un pieu situé à environ 2 m de l'extrados du tunnel. Il est envisagé de reporter les efforts de pointe sous le tunnel avec du jet-grouting (figure 9).

Les ouvrages annexes

L'interface entre les futurs tunnels et 3 ouvrages annexes (accès pompier et ouvrages de ventilation) nécessite des traitements de terrain avant le passage du tunnelier afin de pouvoir réaliser les ouvertures de voussoirs en toute sécurité.



7

© EIFFAGE TP/RAZEL-BEC



© SYSTRA
8

Le premier ouvrage a la double fonction : accès pompier, ventilation.

Les traitements de terrain ont consisté à réaliser des colonnes sécantes de jet-grouting dans les sables de Beauchamp. Elles sont réalisées selon la méthode du double jet, avec une pression comprise entre 8 et 10 bars, avec les vitesses de remontée et de rotation constantes. L'objectif est de réaliser plus de 200 colonnes de 1,3 m de diamètre, 5 m de hauteur, à 34 m de profondeur. Chaque forage, y compris les tirs inclinés, est équipé d'un système Tigor complété de tiges amagnétiques d'un mètre, entraînant un surforage de 3,5 m.

Les forages sont exécutés avec un tricône de 130 mm de diamètre à l'aide d'une foreuse thermique Domine DCH114 sur chenilles. Le coulis de ciment est injecté avec une motopompe triplex à haute pression de type Techniwell TW600.

Le troisième ouvrage est réalisé en paroi moulée. Pour creuser la galerie d'une quarantaine de mètres dans des marnes et caillasses sujettes à la dissolution du gypse antéludien, des injections ont été réalisées. L'interface nécessite environ 1 200 m de forage pour injecter 1 750 m³ de coulis composé de bentonite et de ciment dosé à 350 kg/m³. Les injections sont réalisées à partir des tubes à manchettes avec des injecteurs espacés de 33 cm qui équipent les forages de 150 mm de diamètre.

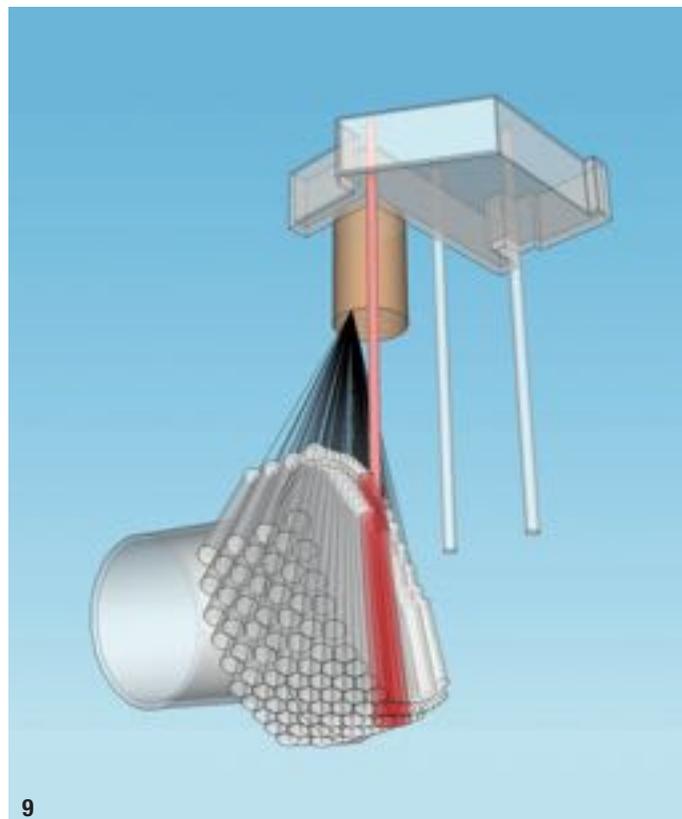
Le débit d'injection du coulis est compris entre 300 et 1 200 l/h avec des arrêts en volume à 260 litres et en pression à 10 bars.

8- Foreuse à gabarit réduit.
9- Traitement sous pieu.

8- Small-gauge driller.
9- Under-pile treatment.

L'arrivée en arrière gare de Saint-Lazare

Des traitements de terrain sont également nécessaires au niveau de l'arrière station de Saint-Lazare pour démonter la roue de coupe du tunnelier dans les marnes et caillasses. Cela nécessite de réaliser 200 forages sous sas (4 à 5 m sous nappe) représentant 1 400 m de forage (figure 10).



9
© SYSTRA

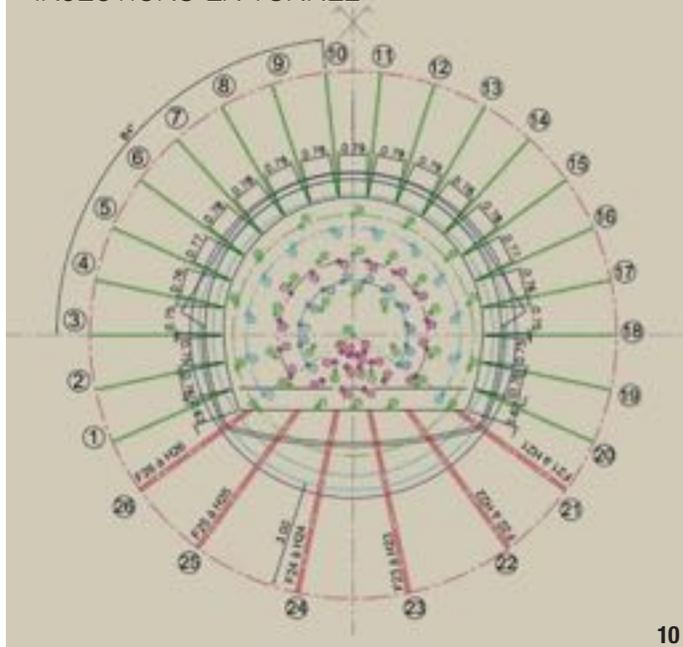
LES AUTRES POINTS SINGULIERS

Lors de la conception, les données concernant les existants sont d'origines multiples. Elles proviennent des demandes de renseignements (DR) faites auprès des concessionnaires, des achats de tréfonds et des contacts pris avec les exploitants usuels des souterrains parisiens (RATP, SNCF, Sapp et Sipa, Dirif, Eaux de Paris, etc.).

Malgré les nombreux échanges avec ces multiples entités, certaines informations peuvent passer à travers les mailles du filet. Cela a été le cas pour 2 ouvrages du tunnel entre les stations Saint-Lazare et Pont-Cardinet.

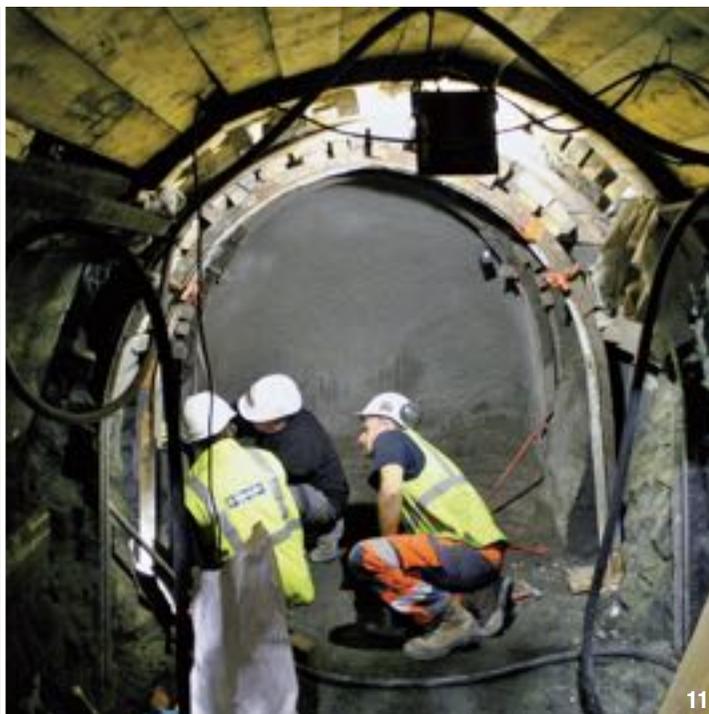
Le premier ouvrage est un abri anti-aérien de la seconde guerre mondiale, implanté sous le square des Batignolles. Il a été découvert pendant l'exécution, lors d'une simple visite de plan de prévention nécessaire à la réalisation des sections de mesures de déformations. Cet ouvrage étant peu profond, il n'a pas remis en cause le tracé du tunnel. Le second ouvrage est un puits (2,6 m de diamètre) et une galerie de reconnaissance remblayée pour un projet de collecteur d'assainissement des années 1980 se situant dans le tracé du tunnel. L'existence de cet ouvrage a été découverte en fin de conception lors des discussions pour les rejets des eaux d'exhaure du chantier. La déviation du tunnel nécessitant de modifier le dossier d'utilité publique (DUP), il a été choisi de recréer cette galerie pour enlever les cintres métalliques et le boisage que le tunnelier aurait des difficultés à franchir (figure 11).

INJECTIONS EN TUNNEL



10

© EIFFAGE TP / RAZEL-BEC



11

© SYSTRA

LES ENTRÉES/SORTIES DU TUNNELIER

L'expérience commune du prolongement de la ligne 12 du métro parisien a amené les intervenants à rechercher des solutions différentes et innovantes pour les dispositifs de lancement et d'arrivée du tunnelier dans les sables sous nappe.

Pour les réceptions de tunnelier, des bouchons de colonnes sécantes de jet grouting sont réalisés dans les sables de Beauchamp. Ils sont évidés en leurs centres pour faire des essais de pompage afin de contrôler l'étanchéité des massifs.

Pour les lancements de tunnelier, des faux tunnels métalliques sont mis en place. Cette solution innovante consiste à mettre en place une structure métallique composée de 5 anneaux de 6 voussoirs renforcés dans l'ouvrage de départ afin que le tunnelier puisse démarrer sous pression. Par sécurité,

le dispositif comprend également 2 rangées de colonnes de jet-grouting de 1,3 ou 1,5 m de diamètre pour obtenir un écran de terrain consolidé derrière la paroi moulée.

En parallèle du montage du bouclier, le faux tunnel (figure 12) a été assemblé en août 2015, suivant le phasage suivant :

- Montage à plat et en surface du premier anneau pour maîtriser les alignements ;
- Montage des 4x3 voussoirs inférieurs des 4 autres anneaux en fond de station, à l'aplomb de la trémie d'accès ;
- Mise en place du premier anneau, en fond de station, à l'aplomb de la trémie ;
- Mise en place de traverses ;
- Montage des 4x3 voussoirs supérieurs ;
- Ripage de l'ensemble, contre la paroi moulée ;

10- Injections en tunnel.

11- Démontage galerie de reconnaissance.

10- Grout injection in tunnel.

11- Reconnaissance gallery disassembly.

- Béton projeté entre paroi moulée et faux tunnel métallique.

LE TUNNELIER

La réception du montage à blanc du tunnelier a été réalisée dans l'usine de Herrenknecht à Schwanau (Allemagne) en février 2015. Puis le tunnelier a été démonté et conditionné pour le transport.

En juin 2015, les premiers éléments (jupe et roue de coupe) sont arrivés sur le chantier afin qu'ils puissent être soudés. Cela a nécessité 6 transports dont 4 convois exceptionnels de classe C3. Les 69 autres chargements, dont 8 convois exceptionnels de classe C3, nécessaires à l'amenée du bouclier et des remorques se sont étalés entre fin juillet et début septembre 2015. L'élément le plus imposant étant l'entraînement, d'un poids de 125 t.

Dès la fin de la réalisation du radier de la station Pont-Cardinet, l'assemblage du tunnelier en fond de station a commencé au moyen d'une grue de 700 t. Le bouclier a été monté durant le mois d'août, les remorques en septembre. Les 2 premiers mois sont consacrés à la réalisation des 100 premiers mètres de creusement. Cette période sert également à terminer l'assemblage et les réglages du tunnelier et de la chaîne de marinage, ainsi qu'à

LES OUVRAGES PRINCIPAUX DU LOT T01

STATION PONT-CARDINET :

Ouvrage souterrain réalisé entre parois moulées, de dimensions intérieures 120 m x 20,65 m et 25 m de profondeur.

STATION PORTE-DE-CLICHY :

Ouvrage souterrain réalisé entre parois moulées, de dimensions intérieures 120,50 m x 20,65 m et 26 m de profondeur.

TUNNEL :

3 tronçons réalisés en partant de la gare existante Haussmann-Saint-Lazare au tunnelier, de longueurs 1590 m + 560 m + 1430 m = 3580 m.

CARACTÉRISTIQUES DU TUNNELIER

TYPE DE TUNNELIER : Bouclier à pression de terre

PUISSANCE INSTALLÉE : Environ 4 900 kW (+ 400 kW optionnel)

LONGUEUR : Environ 98 m

MASSE DU TUNNELIER + TRAIN SUIVEUR : Environ 760 t + 516 t

VITESSE AVANCEMENT THÉORIQUE : 100 mm/min

RAYON DE COURBURE DE CORRECTION (MIN.) : 200 m

PRESSIION DE SERVICE : 5 bars



12

© SYSTRA

l'aménagement du fond de la station. En ce début d'année 2016, la cadence du tunnelier est de 45 anneaux par semaine en 15 postes (3 postes de 8 heures par jour - 5 jours sur 7).

CONCLUSION

Le prolongement de la ligne 14 constitue le point d'orgue du démarrage des travaux du Grand Paris. Les contraintes de conception, d'achat et de réalisation liées au planning très serré sont autant de défis que chacun des acteurs impliqués est amené à relever, les deux premiers ayant été surmontés avec succès.

Un autre défi est de creuser des tunnels dans un contexte urbain dense, en zone de dissolution du gypse anté-ludien, avec de très nombreux points singuliers.

Avant d'arriver à l'ultime étape qu'est la mise en service, le chemin sera

long. Il est donc primordial que tous les intervenants travaillent dans un esprit de partage, de consensus mais surtout de rigueur pour pouvoir pleinement satisfaire les attentes des voyageurs de la ligne 13, que le prolongement de la ligne 14 permettra assurément de désengorger. □

1- Ligne 14 - Fondations spéciales de la nouvelle station Pont-Cardinet. Revue *Travaux* n°916. F.Lamotte, P.Jullien.

2- Ligne 14 - Fondations spéciales de la nouvelle station Porte-de-Clichy. Revue *Travaux* n°916. P.Jullien, A.Martin, A.Davout, A.Rigazio et E.Mathieu.

12- Faux tunnel métallique.

12- Steel portal.

PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DE LA LIGNE 14

TYPE DE MÉTRO : Ligne automatique sur pneus

NOMBRE DE STATION : 9 stations

LONGUEUR COMMERCIALE DE LA LIGNE : 8,70 km

INTERVALLE MINIMUM : 85 secondes

VITESSE COMMERCIALE : 40 km/h

CAPACITÉ : 27 000 voyageurs par heure

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE CONJOINTE : Stif/RATP

CONDUITE D'OPÉRATION : RATP

MAÎTRISE D'ŒUVRE INFRASTRUCTURES : Systra

LOT T01 : Groupement Eiffage Génie Civil (mandataire) / Razel-Bec

TRAVAUX SPÉCIAUX : Eiffage Fondations / Sefi Intrafor

ABSTRACT

THE FIRST TUNNEL BORING WORK FOR THE 'GRAND PARIS EXPRESS'

CLAUDE NGUIMBI, SYSTRA - PIERRE JULLIEN, SYSTRA - FABRICE SENEAL, EIFFAGE GC - GRÉGOIRE GERMAIN, RAZEL-BEC

The extension of Paris metro line 14 was the starting point for work on the 'Grand Paris Express' project. Civil engineering work began in the summer of 2014 on work section T01, the point of connection to the existing tunnel on the line. After execution of the invert for Pont-Cardinet station was completed on schedule, assembly work started on the Magaly TBM, and the tunnel driving phase is imminent. Their shared experience on the extension work for line 12 led the contractors to look for different, innovative solutions for the TBM launching and arrival systems in the sands below the aquifer. For TBM launching, steel portals are put in place, an innovative solution which allows the TBM to start under pressure. □

LOS PRIMEROS TÚNELES CON TUNELADORA DEL GRAND PARIS EXPRESS

CLAUDE NGUIMBI, SYSTRA - PIERRE JULLIEN, SYSTRA - FABRICE SENEAL, EIFFAGE GC - GRÉGOIRE GERMAIN, RAZEL-BEC

La prolongación de la línea 14 del metro de París constituye el punto de partida de las obras del Grand Paris Express. Las obras de ingeniería civil comenzaron en verano de 2014 con el lote T01, punto de empalme con el túnel existente de la línea. Tras la finalización de la solera de la estación de Pont-Cardinet en los plazos previstos, ha iniciado el montaje de la tuneladora Magaly, que empezará a perforar de forma inminente. La experiencia común de la prolongación de la línea 12 ha impulsado a las partes intervinientes a buscar soluciones diferentes e innovadoras para los dispositivos de lanzamiento y llegada de la tuneladora en las arenas existentes bajo la capa freática. Se han instalado falsos túneles metálicos para los lanzamientos de la tuneladora, solución innovadora que permite a la tuneladora arrancar bajo presión. □



LIGNE 14 - SOUTÈNEMENT ET EXCAVATION DE LA STATION PONT-CARDINET ET RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR LES DÉFORMATIONS

AUTEURS : LAETTIA PAVEL, CHEF DE PROJET, ARCADIS - HERVÉ DESPRETS, DIRECTEUR TECHNIQUE, EIFFAGE GC - FRÉDÉRIC LAMOTTE, DIRECTEUR DE TRAVAUX, SEFI-INTRAFOR

LA STATION PONT-CARDINET EST LE PREMIER OUVRAGE DU PROLONGEMENT DE LA LIGNE 14. CET OUVRAGE EST LE Puits DE DÉPART DU TUNNELIER. IL A DONC CONSTITUÉ UN ENJEU IMPORTANT POUR LE GROUPEMENT EIFFAGE GC-RAZEL BEC QUI, DU FAIT DE SA POSITION EN SITE URBAIN DENSE ET DE SON CONTEXTE GÉOLOGIQUE SPÉCIFIQUE, A CHERCHÉ À OPTIMISER AU MIEUX SON DIMENSIONNEMENT TOUT EN VEILLANT AU RESPECT DES SEUILS ADMISSIBLES DE DÉFORMATION EN RECOURANT AUX TECHNIQUES DE RÉALISATION : PAROIS MOULÉES, INJECTIONS DE COMBLEMENT, JET GROUTING.

PRÉSENTATION DU PROJET

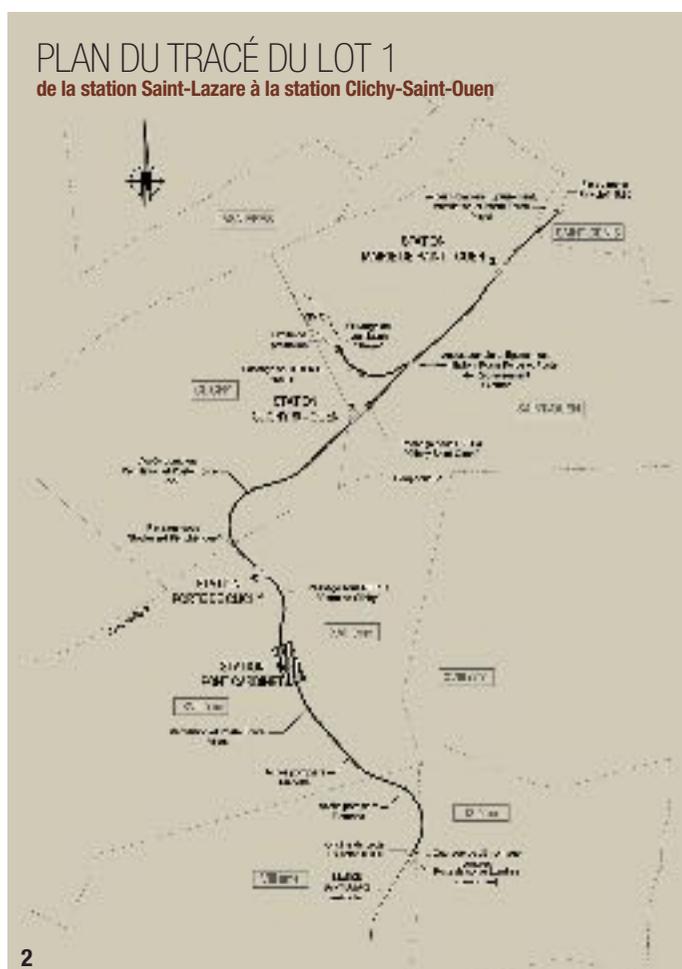
Le prolongement de la ligne 14 entre dans le cadre du projet de désaturation de la ligne 13, ligne particulièrement surchargée.

Le STIF et la RATP ont ainsi pour objectif de décharger la ligne 13 d'environ un quart de ses voyageurs et de mieux desservir la partie Nord de Paris et sa proche banlieue en vue du développement urbain de ce territoire.

1- Ateliers de forage de jet grouting sur Fillion et Boursault.

2- Plan du tracé du lot 1 de la station Saint-Lazare à la station Clichy-Saint-Ouen.

1- Jet grouting drilling equipment on Fillion and Boursault.
2- Plan view of the alignment of work section 1 from Saint-Lazare station to Clichy-Saint-Ouen station.



Le prolongement de la ligne 14, entre l'actuel terminus de Saint-Lazare et la station Mairie-de-Saint-Ouen, s'étend sur 5,8 km en souterrain sous les communes de Paris (8^e et 17^e arrondissements), Clichy-la-Garenne (Hauts-de-Seine), Saint-Ouen et Saint-Denis (Seine-Saint-Denis).

Ce tronçon de ligne comprend la construction de 4 stations : Pont-Cardinet, Porte-de-Clichy, Clichy-Saint-Ouen et Mairie-de-Saint-Ouen.

Le projet intègre des correspondances avec la ligne 13, le RER C, la ligne L du Transilien, le Tramway T3b, le réseau de bus, ainsi qu'un site de maintenance et de remisage pour les rames de métro.

Le lot 1 est le premier lot d'infrastructures du projet (figure 2). Il comprend :

- La section de tunnel à deux voies entre l'arrière gare existante de la station Saint-Lazare et la station Pont-Cardinet (Paris 8^e et 17^e) sur 1 592,4 m ;
- La station Pont-Cardinet implantée sous le parc Martin-Luther-King de la ZAC des Batignolles (Paris 17^e) et ses accès ;
- La section de tunnel à deux voies entre les stations Pont-Cardinet et Porte-de-Clichy (Paris 17^e) sur 564,2 m ;

PLAN DE SITUATION DE LA STATION PONT-CARDINET

- La station Porte-de-Clichy inscrite dans la boucle de retournement de la ligne 13 (Paris 17^e), ses accès et galeries de correspondance ;
- La section de tunnel à deux voies entre les stations Porte-de-Clichy et Clichy-Saint-Ouen (Commune de Clichy) sur 1 430,2 m ; cette dernière station est hors lot ;
- Les ouvertures du tunnel sur les accès pompiers et puits de ventilation (hors lot).

PRÉSENTATION DE LA STATION PONT-CARDINET

La future station a fait l'objet d'un premier article dans la revue *Travaux* en juillet/août 2015 (n°916) ; cet article était, pour l'essentiel, axé sur l'exécution des parois moulées de l'enceinte de la station. Cette station enterrée est implantée sous le parc Martin-Luther-King et permet une desserte des quartiers de Clichy-Batignolles et Saussure. Elle assure des correspondances en surface avec la ligne L du Transilien et le réseau de bus (figure 3).

Ses dimensions intérieures utiles sont de 120,50 m x 20,65 m et sa profondeur jusqu'au niveau des quais est d'environ 20 m. Son angle Sud-Est est situé à 2,50 m du nu de la rampe hélicoïdale d'accès au récent parking sou-

terrain (R-6) longeant la rue Cardinet. L'extrémité Sud de la station se trouve à proximité du Pavillon de l'Horloge. Cette station possède deux accès. L'accès principal contourne le Pavillon de l'Horloge et débouche sur la rue Cardinet. L'accès secondaire est prévu en extrémité Nord-Ouest de la station pour desservir le secteur Saussure. La conception architecturale de la station est quasiment symétrique sur ses

deux axes principaux et intègre un vide central sur 3 niveaux avec une mezzanine largement ouverte.

D'un point de vue structurel, la station intègre 5 niveaux de dalles : dalle de couverture, salle d'accueil R-1, mezzanine R-2, quais R-3, radier (figures 4 et 5).

Le projet prévoit la réalisation du tunnel du lot 1 à partir de cette station (double attaque) à l'aide de deux boucliers.

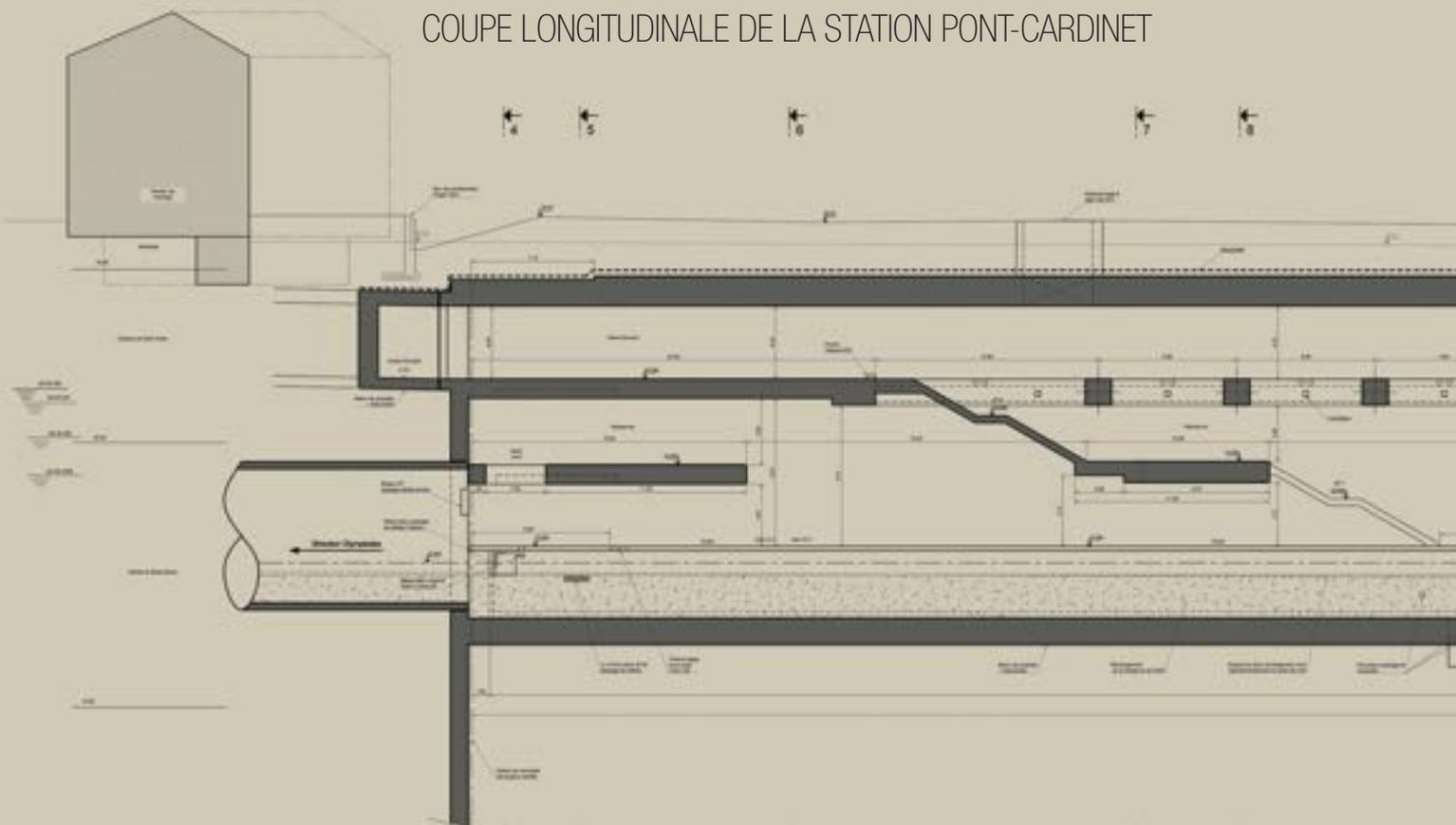


© SYSTRA

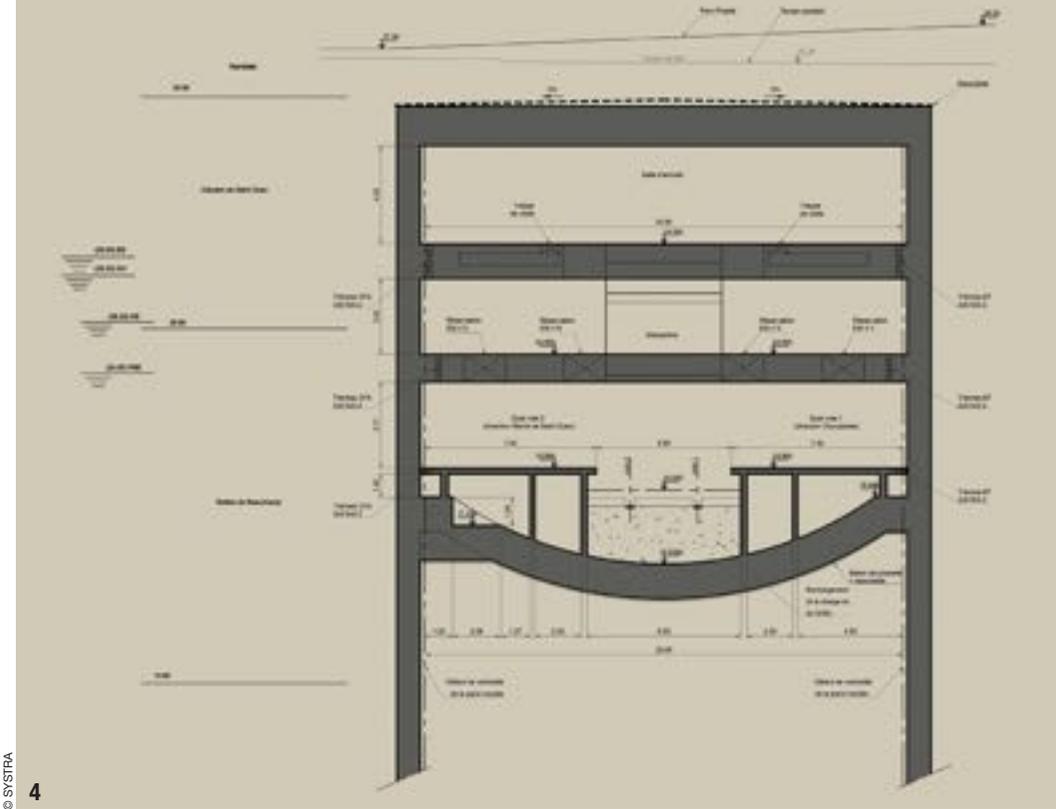
3- Plan de situation de la station Pont-Cardinet.

3- Location drawing of Pont-Cardinet station.

COUPE LONGITUDINALE DE LA STATION PONT-CARDINET



COUPE TRANSVERSALE DE LA STATION PONT-CARDINET



4- Coupe transversale de la station Pont-Cardinet.
5- Coupe longitudinale de la station Pont-Cardinet.

4- Cross section of Pont-Cardinet station.
5- Longitudinal section of Pont-Cardinet station.

Une première attaque se fait depuis le tympan Sud en direction de la station Olympiades avec un débouché au droit de l'arrière gare existante de la station Saint-Lazare. Le train suiveur est ensuite transféré et connecté au deuxième bouclier pour exécuter les second et troisième tronçons de tunnel, depuis le tympan Nord, jusqu'au débouché dans le tympan Sud de la station Clichy-Saint-Ouen.

PRINCIPES CONSTRUCTIFS ENVISAGÉS PAR LA MAÎTRISE D'ŒUVRE

La conception initialement envisagée par la maîtrise d'œuvre Systra prévoyait de réaliser le terrassement de la boîte à ciel ouvert à l'abri d'une enceinte en parois moulées (PM). Une paroi armée au coulis (PAC) venait recouper la station dans sa longueur, de manière à terrasser la partie Sud le plus rapidement

possible et permettre le montage et le démarrage du tunnelier en direction de Olympiades sans attendre le terrassement complet de la boîte (figures 6 et 7).

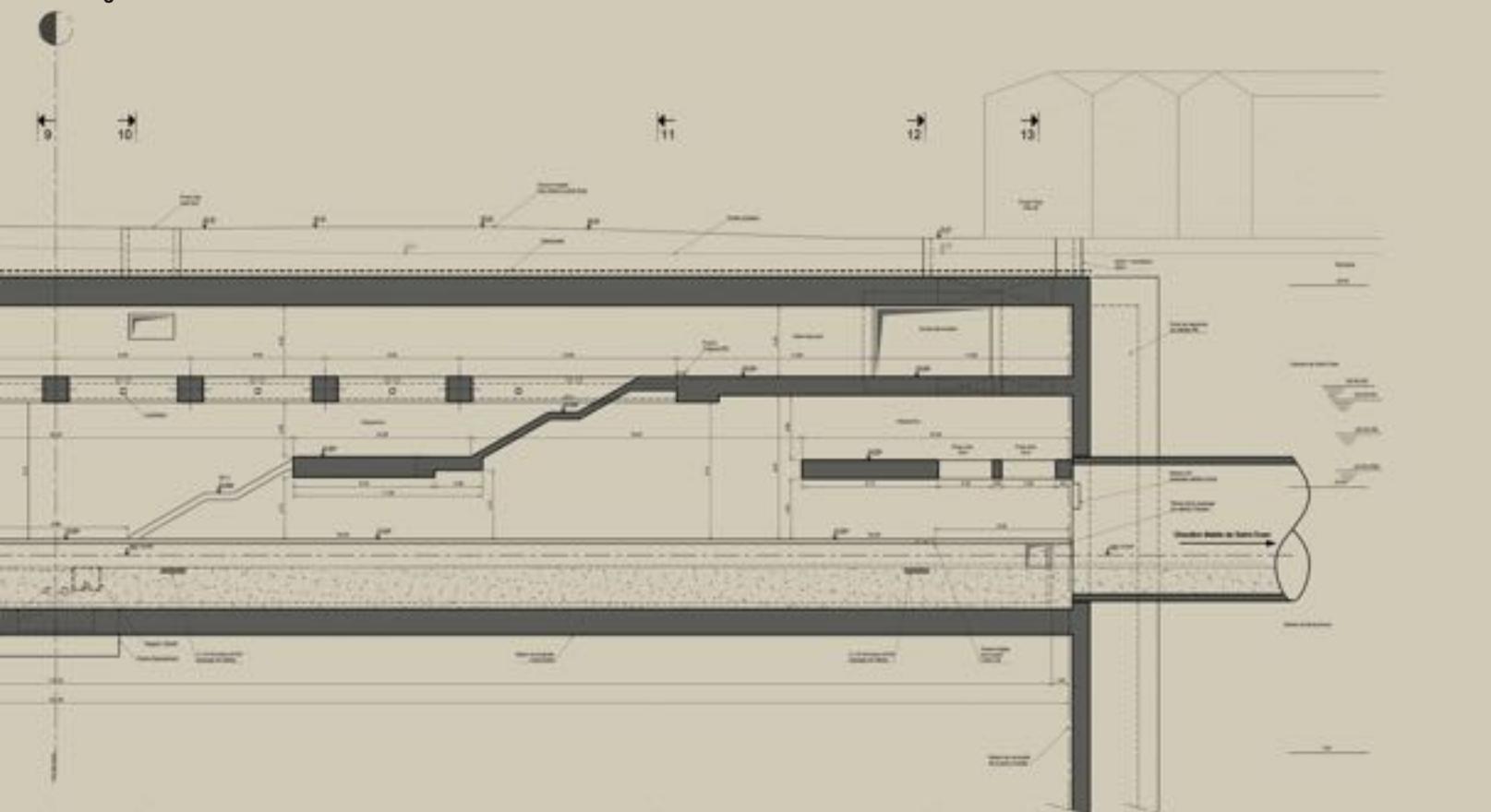
Phasage des travaux :

- Réalisation d'une campagne d'injections gravitaires de comblement des vides de dissolution de gypse décelés dans les Marnes et Caillasses ;

- Réalisation des PM et de la PAC ;
- Réalisation du bouchon injecté de la partie Sud puis de la partie Nord ;
- Terrassement de la partie Sud à ciel ouvert avec butonnage provisoire (3 niveaux de butons) ;
- Réalisation de la dalle de couverture Nord (hors trémie pour passage du tunnelier) ;
- Bétonnage du radier Sud ;

© SYSTRA

5



- Suppression du butonnage provisoire inférieur afin de libérer un gabarit suffisant pour le montage du tunnelier ;
- Montage du tunnelier et début du creusement en direction d'Olympiades (vers le sud) ;
- Terrassement en taube de la partie Nord avec butonnage provisoire (2 niveaux de butons) et démolition progressive de la PAC ;
- Bétonnage du radier Nord ;
- Suppression du butonnage provisoire gênant le ripage du tunnelier ;
- Débouché du tunnelier dans l'arrière gare de la station Saint-Lazare et transfert du back-up vers la station Pont-Cardinet ;
- Introduction au travers de la trémie ménagée dans la dalle de couverture de Pont-Cardinet, montage du tunnelier et creusement en direction Mairie-de-Saint-Ouen (vers le nord) après retournement des remorques ;
- Réalisation du génie civil de la partie Sud ;
- Démontage du tunnelier côté Nord après son débouché au tympan Sud de la station Clichy-Saint-Ouen ;
- Fin de réalisation du génie civil de la partie Nord.

6- Vue en plan des parois moulées et de la paroi armée au coulis (projet MOE).

7- Coupe longitudinale de la station Pont-Cardinet (projet MOE).

6- Plan view of the diaphragm walls and the grout reinforced wall (Project Manager plan).

7- Longitudinal section of Pont-Cardinet station (Project Manager plan).

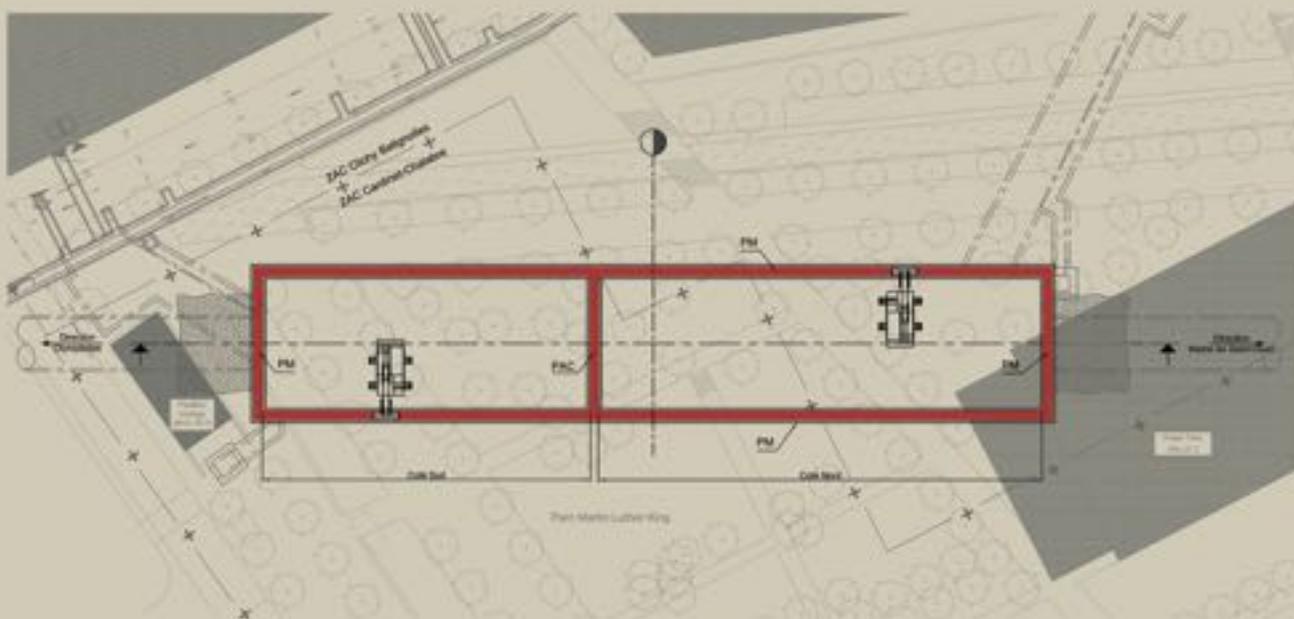
PROPOSITIONS D'OPTIMISATIONS DU GROUPEMENT D'ENTREPRISES

Lors de la phase de consultation des entreprises, le groupement Eiffage GC - Razel Bec a proposé une optimisation des structures butonnantes provisoires et définitives et la suppression de la PAC initialement envisagée par la maîtrise d'œuvre. La fiche des PM a aussi été réduite (base remontée de -5 à -3 m NGF).

Cela a conduit aux configurations suivantes :

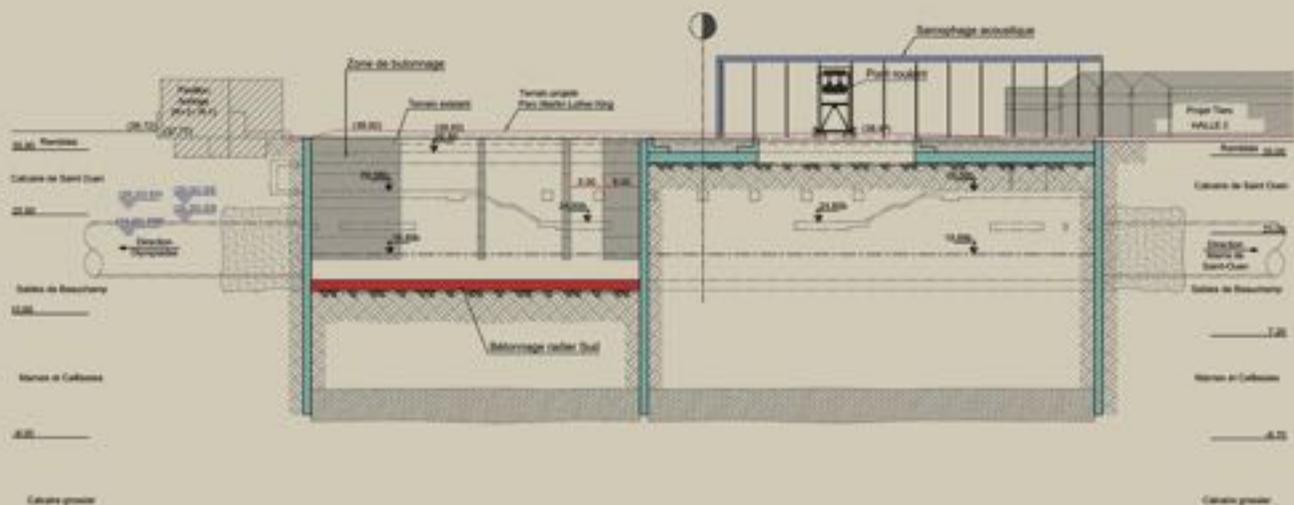
- Parties Sud et Nord : zones avec dalle de couverture réalisée en pre-

VUE EN PLAN DES PAROIS MOULÉES ET DE LA PAROI ARMÉE AU COULIS (PROJET MOE)



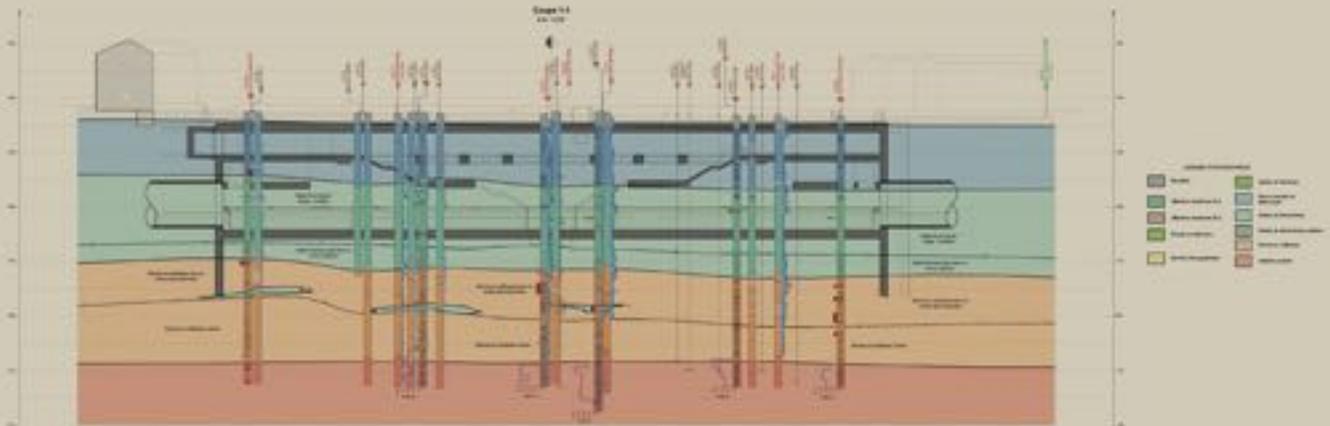
6 © SYSTRA

COUPE LONGITUDINALE DE LA STATION PONT-CARDINET (PROJET MOE)



7 © SYSTRA

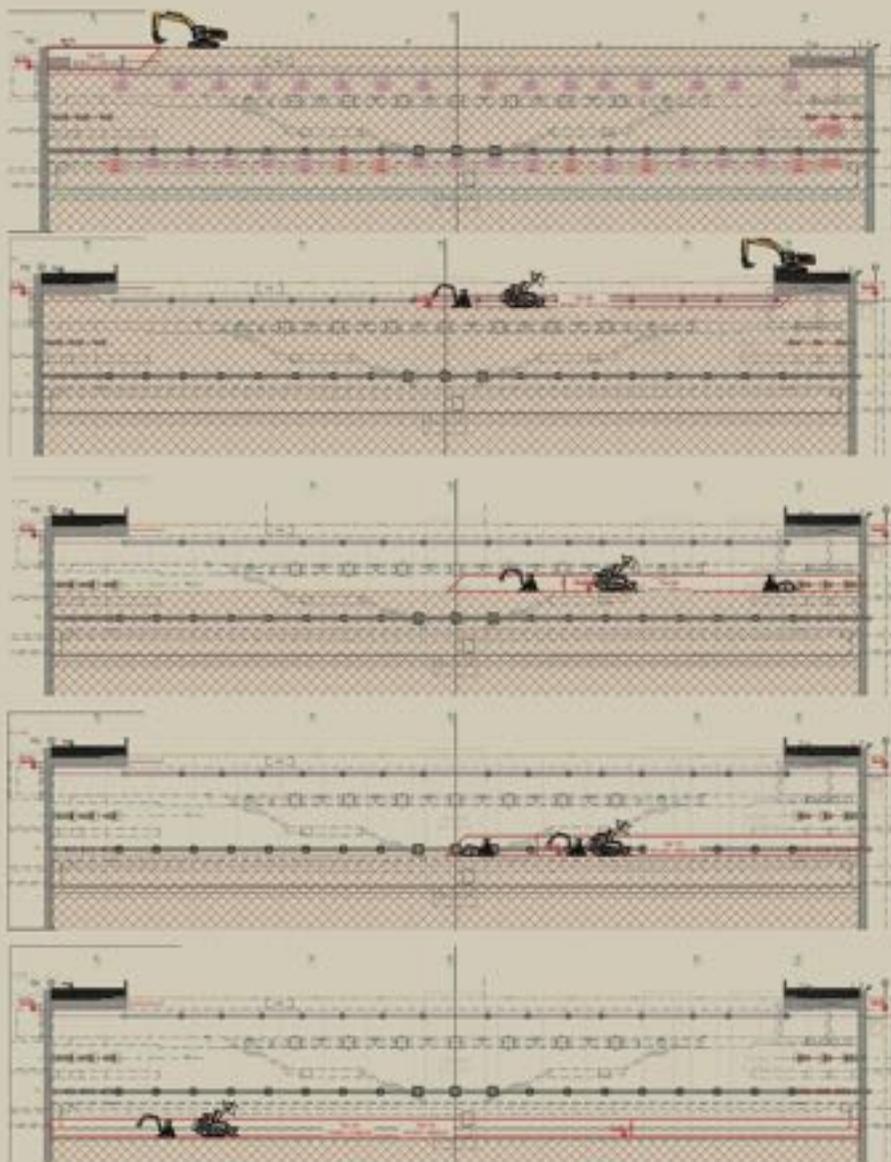
COUPE GÉOLOGIQUE DE LA STATION PONT-CARDINET



© SYSTRA

8

PRINCIPALES PHASES D'EXCAVATION



© EIFFAGE TP - RAZEL BEC

9

8- Coupe géologique de la station Pont-Cardinet.
9- Principales phases d'excavation.

8- Geological section of Pont-Cardinet station.
9- Main excavation phases.

- mier, avec terrassement en taupe et pose de 2 lits de butons provisoires aux niveaux +26,5 m NGF (\varnothing 610 mm, $e = 11,9$ à $15,9$ mm, espacement : 3,3 m) et +21,5 m NGF (\varnothing 610 mm, $e = 10,3$ à $14,3$ mm, espacement : 3,3 m) ;
- Partie centrale : zone avec dalle de couverture et dalles intermédiaires réalisées en remontant ; terrassement à ciel ouvert avec pose de 2 lits de butons provisoires aux niveaux +32,8 m NGF (\varnothing 720 mm, $e = 10$ mm, espacement : 5,3 m) et +21,5 m NGF (\varnothing 914 mm, $e = 15$ mm, espacement : 5,6 m)
- Lors de la préparation du chantier, le groupement Eiffage GC - Razel Bec a proposé de supprimer la PAC et de terrasser l'intégralité de la station en une seule phase. Cette solution n'impacte pas les délais globaux des travaux et présente les avantages suivants :
- Les cadences de terrassement sont augmentées grâce au doublement des points de chargement des déblais, répartis sur la longueur entière de la station ;
 - L'intégralité de la station est disponible pour le montage du tunnelier. ▷

PAROIS MOULÉES ET RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR LEURS DÉPLACEMENTS GÉOLOGIE RENCONTRÉE

La station Pont-Cardinet a fait l'objet de reconnaissances géotechniques détaillées lors des phases de conception. Des sondages complémentaires, réalisés à proximité de la station dans le cadre de projets tiers, ont également été pris en compte. Au total, 7 sondages carottés, 14 sondages pressio-

métriques et 4 sondages destructifs ont été réalisés dans cette zone du projet. Les terrains rencontrés sont :

- Des remblais ;
- Le Calcaire de Saint-Ouen : horizons plutôt marneux, avec des passages de marnes avec graviers calcaires. Des blocs calcaires sont rencontrés à la base de la formation ;
- Les Sables de Beauchamp : sables fins et limoneux avec des niveaux et blocs décimétriques de grès ;

- Les Marnes et Caillasses : alternance de niveaux marneux et de niveaux de blocs et de bancs calcaires ;
- Le Calcaire Grossier.

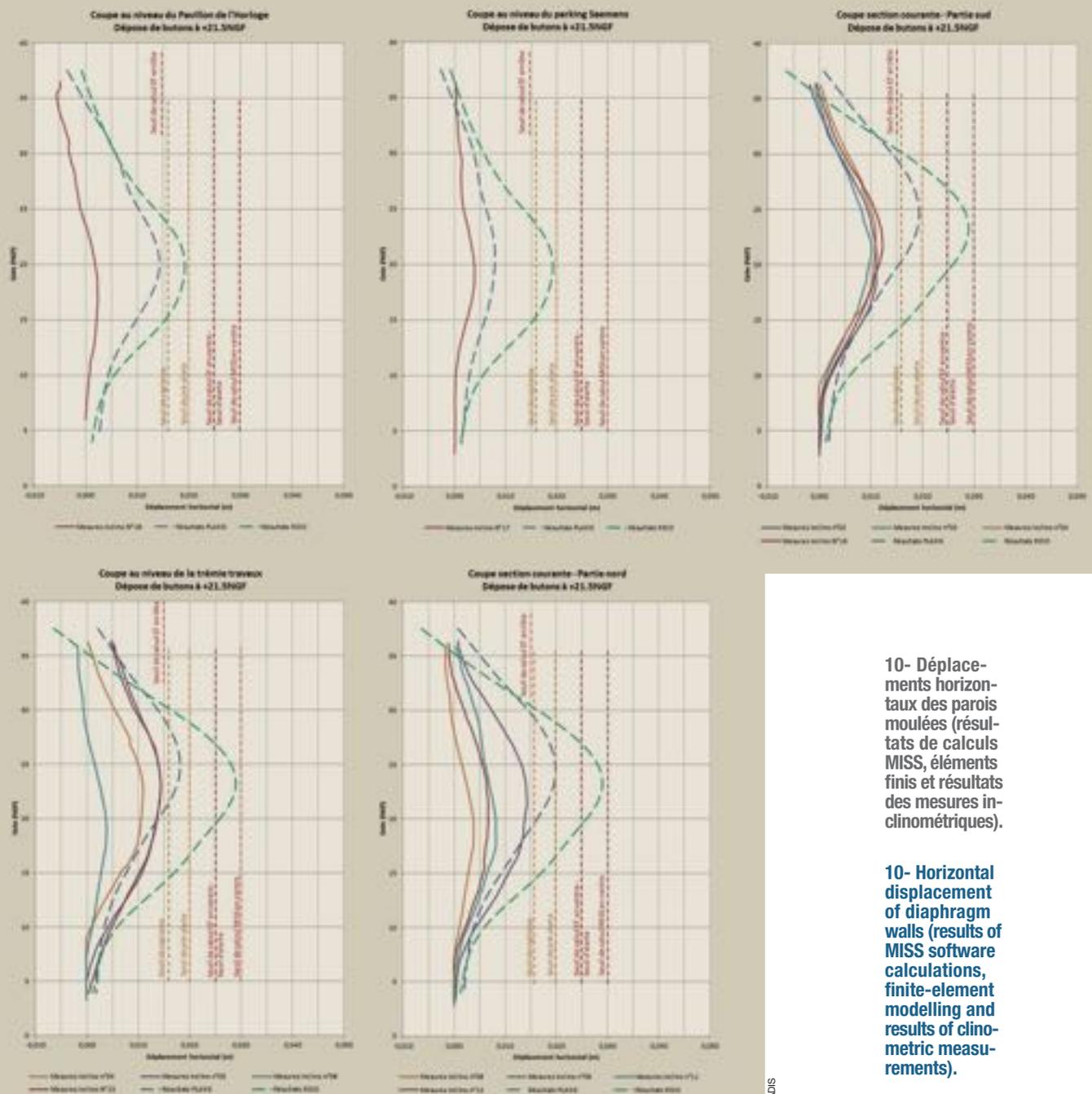
Des passages décomprimés et des lentilles sableuses de comblement ont été observés sur les 8 premiers mètres des Marnes et Caillasses, témoignant de passages de dissolution du gypse. Les valeurs de pression limite mesurées peuvent atteindre plus de 5 MPa dans ces formations (figure 8).

MÉTHODES ET MOYENS MIS EN ŒUVRE POUR LA RÉALISATION DES PANNEAUX DE PAROIS MOULÉES

Les injections de comblement

Du fait de la présence de ces passages décomprimés et de vides de dissolution du gypse, une campagne d'injections de comblement a été réalisée au droit des parois mouleées et sous le radier. Un maillage de 6 m x 2,8 m en quinconce a été mis en œuvre de part et

DÉPLACEMENTS HORIZONTAUX DES PAROIS MOULÉES (résultats de calculs MISS, éléments finis et résultats des mesures inclinométriques)



10- Déplacements horizontaux des parois mouleées (résultats de calculs MISS, éléments finis et résultats des mesures inclinométriques).

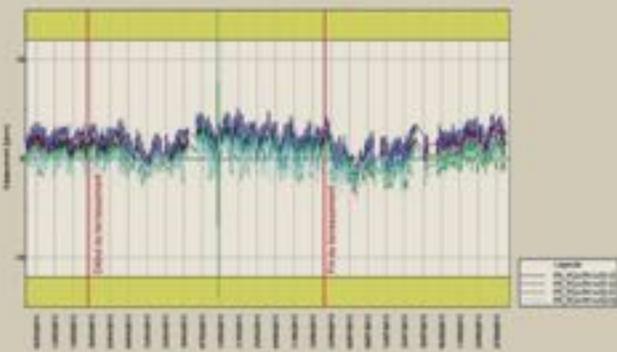
10- Horizontal displacement of diaphragm walls (results of MISS software calculations, finite-element modelling and results of clinometric measurements).



© ARCADIS

11

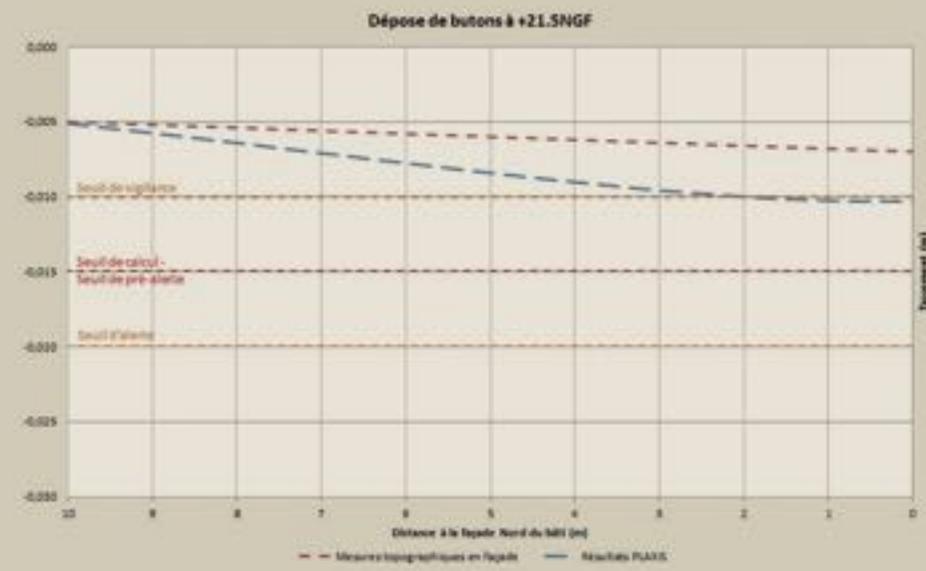
TASSEMENT DU PAVILLON DE L'HORLOGE (résultats des mesures topographiques)



© EIFFAGE TP

12

RÉSULTATS DE CALCULS OBTENUS POUR LES TASSEMENTS DU PAVILLON DE L'HORLOGE



© ARCADIS

13

11- Terrassement de la station et pose du 3^e lit de butons.

12- Tassement du Pavillon de l'Horloge (résultats des mesures topographiques).

13- Résultats de calculs obtenus pour les tassements du Pavillon de l'Horloge.

11- Station earthworks and placing the third layer of struts.

12- Subsidence of Pavillon de l'Horloge (topographic measurement results).

13- Calculation results obtained for subsidence of Pavillon de l'Horloge.

Bauer BC 40 monté sur un porteur Bauer BG 40). Le cutter a été équipé de tambours à terrain tendre à dents à faces parallèles, qui sont un bon compromis lorsque l'on se trouve dans une alternance de bancs rocheux ou gréseux et de terrains plus ou moins tendres.

La centrale de fabrication de boue bentonitique de type BE 550 installée sur le chantier a permis un stockage de 3 fois le volume du plus grand panneau (soit 900 m³). Pour pouvoir remonter les cuttings de forage de 40 m de profondeur jusqu'à la surface, le débit de circulation de boue a atteint en moyenne 250 m³/h.

Le ferrillage et le bétonnage

Les panneaux des parois ont pour dimensions 32,5 m de longueur et 6,54 m de largeur et comprennent deux cages d'armatures de 2,8 m à 3 m de largeur par panneau.

Le chantier a choisi un assemblage des cages sur le site pour avoir des cages de grande dimension qui ne sont pas acheminables par camion. Ce choix a également permis de gagner du temps sur leur mise en place dans l'excavation et d'avoir une meilleure garantie du bon positionnement des coupleurs.

Le béton des parois est constitué par un béton XA1 avec 385 kg de ciment/m³, une consistance de type S4 et une rhéologie de 5h correspondant à la durée de bétonnage. La fabrication du béton a été réalisée sur le site en raison de la surface disponible, des quantités importantes nécessaires pour la station, des contraintes de trafic et des cadences de livraison de béton importantes à respecter lors des bétonnages de panneaux de l'ordre de 60 à 70 m³/h.

Grâce à l'organisation mise en place et aux moyens humains et matériels, on a bétonné 4 panneaux de 270 m³/semaine conformément au planning prévisionnel.

PHASAGE DE TERRASSEMENT

Le terrassement de la fouille a été défini selon les niveaux de butonnage prévus. Les principales phases de terrassement sont :

- Terrassement jusqu'à +33,5 m NGF puis coulage de la dalle de couverture aux extrémités de la station ;
- Terrassement jusqu'à +31,8 m NGF puis pose du 1^{er} lit de butons à +32,8 m NGF en partie centrale ;
- Terrassement jusqu'à +25,5 NGF puis pose du 2^e lit de butons aux extrémités de la station à +26,5 m NGF ;



14

© SEFI-INTRAFOR

- Terrassement jusqu'à +20,5 m NGF puis pose du 3^e lit de butons à +21,5 m NGF ;
- Terrassement jusqu'au fond de fouille (+14,6 m NGF) en risberme ;
- Bétonnage du radier ;
- Dépose du 3^e lit de butons (+21,5 m NGF) après obtention d'une résistance suffisante du béton du radier (figure 9).

Le terrassement a été effectué à l'aide de 2 chargeuses Caterpillar 963/973, et le chargement des camions par 2 pelles Liebherr 954 remplacées ensuite par une pelle à câbles.

Un volume total de 56 000 m³ de terres a été excavé en 3 mois, avec une cadence de 2 000 m³/j au début des travaux (figure 11).

DIMENSIONNEMENT RÉALISÉ

Le dimensionnement des parois a fait l'objet de la démarche suivante conforme aux prescriptions du CCTP : un dimensionnement de la structure au moyen de calculs de type MISS (RIDO) réalisé par Sefi-intrafor et une estimation des déformations et déplacements au moyen de calculs aux éléments finis (Plaxis) réalisés par Arcadis.

Au vu de la structure de la station et du phasage des travaux, l'approche structurale a conduit à retenir 4 coupes de calcul et celle en déformation également 4 coupes.

14- Centrale et foreuse de jet grouting.

15- Assemblage du train de tige de jet double.

14- Jet grouting plant and driller.

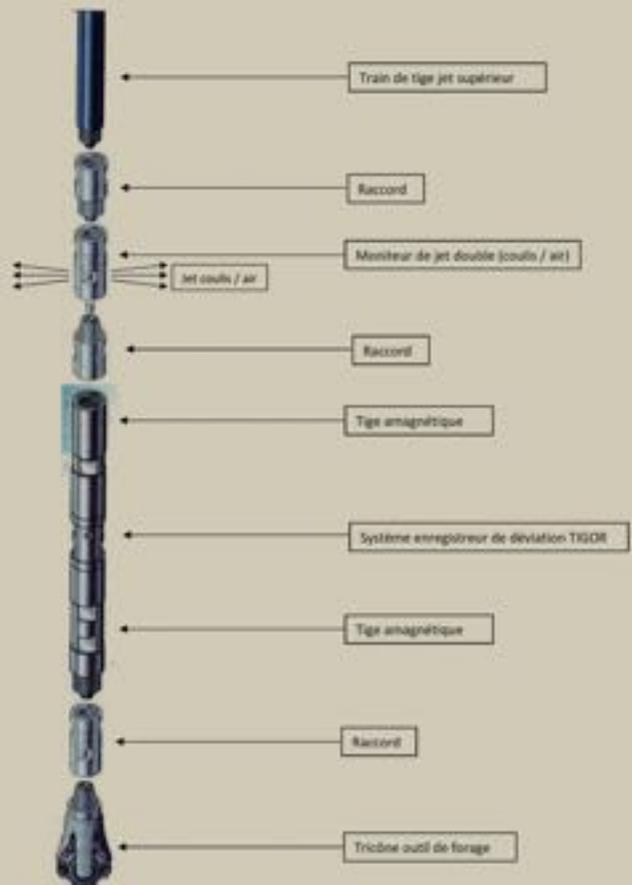
15- Double jet drill string assembly.

SEUILS DE DÉPLACEMENT ET AUSCULTATIONS

Les seuils de calcul et les seuils de pilotage pour les parois de soutènement et les ouvrages existants ont été définis par la maîtrise d'œuvre.

Les parois et les ouvrages avoisinants ont été instrumentés avec 18 inclinomètres dans les panneaux de paroi, 10 cibles de mesures topographiques au droit des panneaux, 4 cibles topographiques et 1 cible tiltmétrique par façade au droit du Pavillon de l'Horloge, 1 tiltmètre à l'intérieur du parking souterrain.

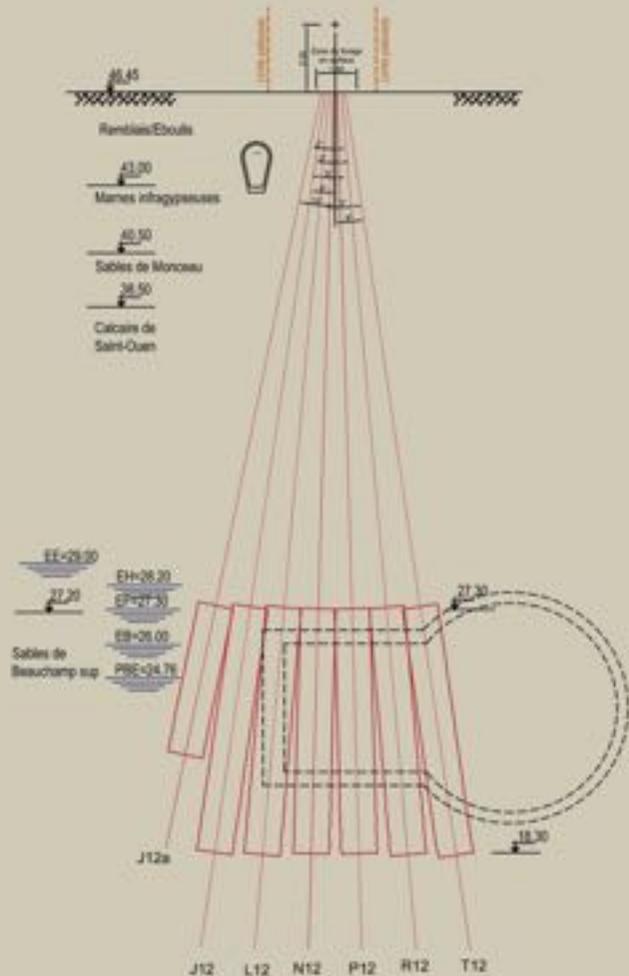
ASSEMBLAGE DU TRAIN DE TIGE DE JET DOUBLE



15

© SEFI-INTRAFOR

COUPE SUR AURÉOLE PAIRE / OUVRAGE BOURSALT



16

RÉSULTATS DES AUSCULTATIONS

Les résultats des inclinomètres montrent que les déplacements obtenus pour les parois sont généralement bien inférieurs à ceux estimés par le calcul. Des rétro-calculs ont été menés par Arcadis pour les calculs aux éléments finis avec prise en compte du butonnage mis en œuvre au niveau des panneaux équipés d'inclinomètres. Les résultats du dimensionnement selon la méthode MISS sont largement supérieurs aux résultats des auscultations. Ce point s'expliquerait d'une part par la méthode de calcul et d'autre part par l'approche orientée calcul de structure.

Les déplacements des parois obtenus par les calculs aux éléments finis sont plus proches des résultats inclinométriques. Les déplacements maximaux calculés restent supérieurs aux résultats des mesures. Un léger dépassement est observé dans la deuxième moitié inférieure de la fouille (figure 10).

16- Coupe sur auréole paire/ouvrage Boursault.

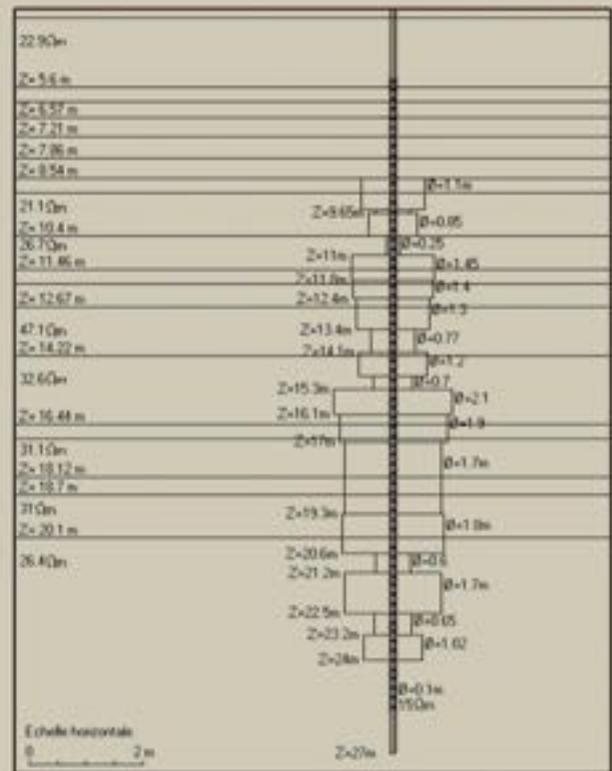
17- Diagramme de l'essai de jet grouting.

16- Cross section of grout hole fan pair on Boursault structure.

17- Jet grouting test logging.

Les mouvements naturels du Pavillon de l'Horloge et du parking souterrain ont été étudiés grâce à une marche à blanc minimale de 3 mois. Les mesures topographiques réalisées sur la façade du Pavillon de l'Horloge ne mettent pas en évidence de mouvement lors du terrassement, les mesures

DIAGRAMME DE L'ESSAI DE JET GROUTING



17

constatées restant dans l'enveloppe des mouvements naturels de la structure (figure 12).

Les résultats obtenus par les calculs aux éléments finis montrent des tassements plus importants, de l'ordre de 10 mm (figure 13).

DU JET GROUTING POUR CRÉER DES MASSIFS ÉTANCHES

LA MÉTHODE DU JET GROUTING

Le projet prévoit la réalisation de bouchons d'entrée ou de sortie de tunnel, de puits et galeries du poste électrique force et d'un puits de secours place Fillion sous le niveau de la nappe phréatique.

Ces ouvrages ne peuvent être réalisés qu'à l'intérieur d'un massif de terrain relativement étanche.

Pour créer un massif étanche dans les Calcaires de Saint-Ouen ou les Sables de Beauchamp, la technique du jet grouting à double jet a été retenue car l'injection n'aurait pas été suffisamment efficace dans ce type de terrain (figure 14).

Le jet grouting est un procédé de mise en œuvre à très haute pression

d'un coulis de ciment dans le terrain, visant à créer des colonnes de béton de sol. Il consiste à découper et déstructurer le terrain au moyen du jet de coulis à haute énergie cinétique, puis à mélanger le terrain en place avec le ciment issu du coulis injecté et enfin à expurger le surplus. Le jet de coulis est entouré d'un jet d'air sous pression qui augmente la pénétration du jet de coulis et crée un courant ascendant améliorant la remontée des spoils par l'espace annulaire (figure 15).

Chaque colonne est réalisée en 2 phases :

- Forage depuis la plate-forme jusqu'à la base de la colonne ;
- Remontée en rotation jusqu'à la tête de colonne, avec injection du ciment à haute pression.

CONCEPTION DES COLONNES ET DES PLANS DE TIR

Les colonnes de jet grouting doivent être sécantes pour assurer une étanchéité du massif. Le choix du diamètre de la colonne et de la distance entre les colonnes dépend de la tolérance de déviation du forage et de la profondeur des colonnes.

Ainsi, Sefi-Intrafor a opté pour des colonnes de 1,30 m de diamètre dans les Sables de Beauchamp, avec une maille entre colonnes de 1,04 m, de manière à assurer une continuité des colonnes à la base du massif à 28 m de profondeur avec 1% de déviation. Le plan de tirs de colonnes doit tenir compte de l'emprise dédiée à la foreuse et de la présence de réseaux à éviter. Ainsi, est-il fréquent que les tirs soient inclinés (figure 16).

MOYENS DE CONTRÔLE MIS EN ŒUVRE

Des moyens de contrôle sont mis en œuvre à toutes les étapes de réalisation des colonnes de jet grouting.

Le plot d'essai permet de déterminer l'énergie à mettre en œuvre pour obtenir le diamètre de colonne souhaité. Cette énergie de jet dépend de plusieurs paramètres (pression et débit du coulis, pression d'air, vitesse de remontée et de rotation de la buse de jet). Le diamètre de la colonne ainsi créée dans le sol est mesuré par un essai de cylindre électrique (figure 17).

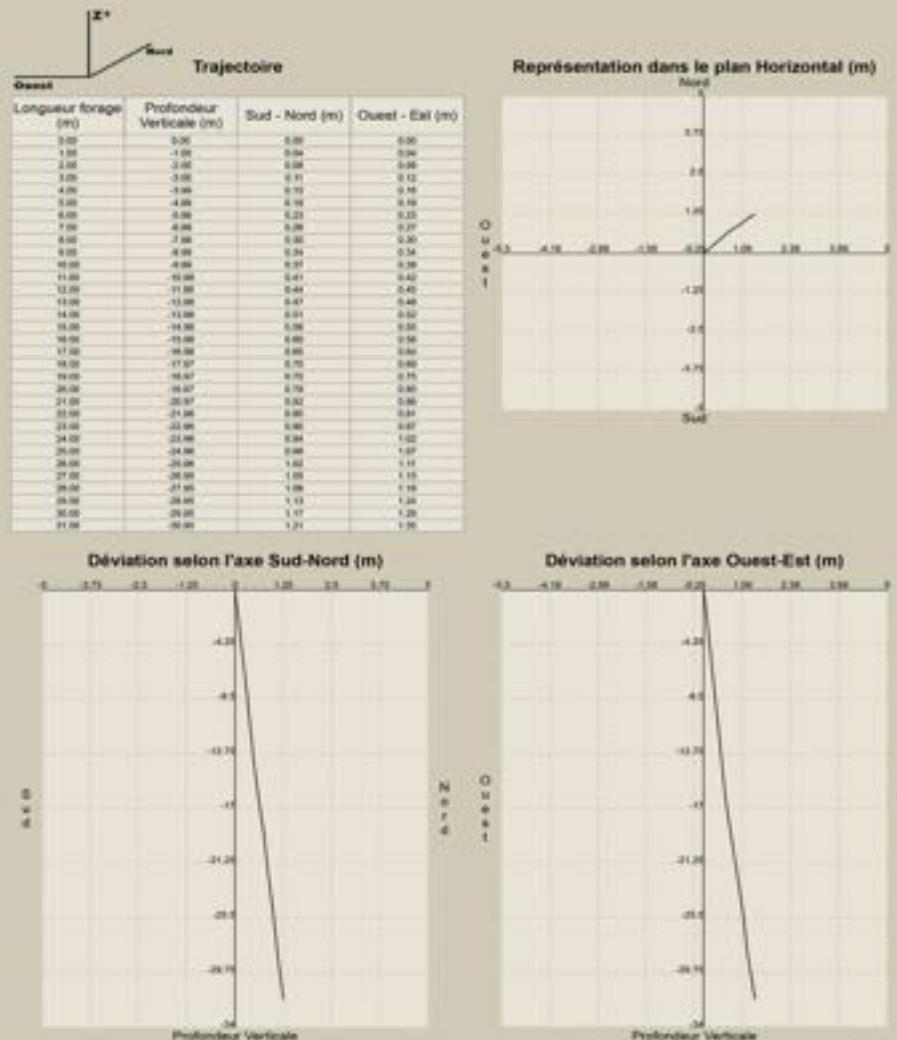
Les paramètres usuels sont contrôlés pendant le forage (vitesse d'avance, profondeur, pression et couple de rotation). Les paramètres de jet sont également contrôlés pendant la réalisation de la colonne (vitesse de remontée et de rotation du moniteur, pression et débit du coulis, pression d'air). La trajectoire du forage est contrôlée par l'outil Lutz Tigor qui mesure le champ électromagnétique à la base du train de tige. Des coupes horizontales produites à plusieurs niveaux permettent de vérifier la continuité du massif de colonnes (figures 18 et 19). Des essais de contrôle d'étanchéité sont réalisés à la fin des travaux pour vérifier l'étanchéité du massif de jet grouting. Il s'agit de réaliser deux carottages de colonnes, dans lesquels sont ensuite effectués des essais Lefranc pour mesurer une perméabilité du massif, mesurée entre 10^{-6} à 10^{-9} m/s, avec une moyenne proche de 10^{-7} m/s.

PRINCIPALES CONTRAINTES DU CHANTIER

La complexité de ce chantier de jet grouting résulte des trois contraintes suivantes :

- Ces colonnes sont considérées comme des colonnes de grande dimension qui nécessitent des moyens relativement importants ;
- Les délais octroyés pour leur réalisation sont très serrés pour respecter le planning global ;

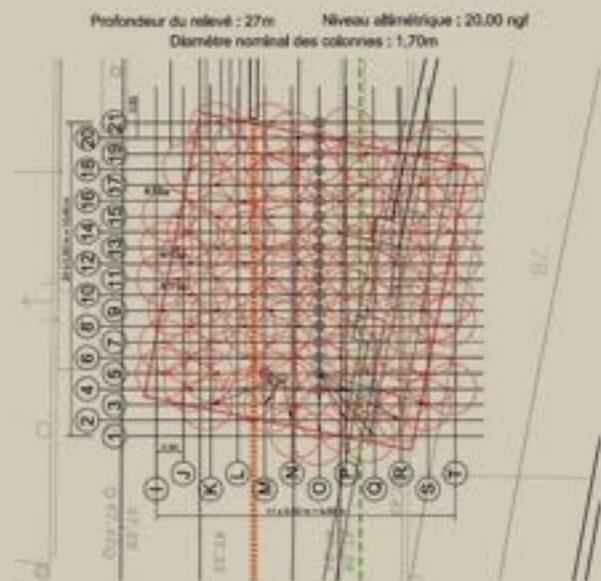
DIAGRAPHIE DES COLONNES DE JET GROUTING - POSTE FORCE FILLION



18

© SEFI-INTRAFOR

PLAN DE RÉCOLEMENT DES COLONNES DE JET GROUTING - POSTE FORCE FILLION



18- Diagraphie des colonnes de jet grouting - poste Force Fillion.

19- Plan de récolement des colonnes de jet grouting - poste Force Fillion.

18- Jet grouting column logging - Fillion power substation.

19- As-built drawing of jet grouting columns - Fillion power substation.

19

© SEFI-INTRAFOR

→ Les travaux en site urbain sont réalisés dans des emprises très réduites et doivent tenir compte de l'environnement (figure 1).

La principale difficulté a consisté à concilier la nécessité d'utiliser de gros moyens d'exécution avec une emprise réduite :

→ Phase d'études et de méthodes poussées pour définir des plans de tir optimisés ;

20- Centrale de fabrication de coulis compacte dernière génération.

20- Latest-generation compact grout mixing plant.

→ Utilisation d'une foreuse à cinématique auréolaire et barillet de tiges (Soilmec SM14) pour limiter les déplacements et faciliter les tirs inclinés ;

→ Utilisation d'une pompe à jet dernière génération (débit 425 l/min à 400 bars) ;

→ Utilisation d'une centrale de fabrication de coulis compacte dernière génération (capacité 30 m³/heure)

avec approvisionnement de 35 t de ciment par jour (figure 20) ;

→ Création d'une fosse à spoils de 150 m³ en aérien pour gérer le stockage et l'évacuation des spoils ;

→ Aménagement des horaires de travail de 7h à 20h pour profiter au maximum de la plage horaire disponible.

Ces moyens ont permis de maintenir une cadence de 15 à 20 colonnes par semaine en moyenne. □



© SEFI-INTRAFOR

20

CHIFFRES CLÉS DU CHANTIER

DIMENSIONS DE LA STATION PONT-CARDINET : 20,65 m x 120,5 m

HAUTEUR EXCAVÉE : 22,5 m

VOLUME DE TERRASSEMENT : 56 000 m³

LINÉAIRE DE FORAGES D'INJECTION DE COMblement : 6 400 m

HAUTEUR DES PANNEAUX DE PAROIS MOULÉES : 40 m dont 33 m pour fiche mécanique

VOLUME DE BÉTON DES PANNEAUX DE PAROIS MOULÉES : 12 000 m³

QUANTITÉ D'ARMATURES HAUTE ADHÉRENCE DES PAROIS MOULÉES : 1 020 t

PRINCIPALES CADENCES

BÉTONNAGES DE PANNEAUX DE PAROIS MOULÉES :

4 panneaux de 270 m³/semaine

TERRASSEMENTS : 2 000 m³/j dans les premières phases

JET GROUTING : 20 à 25 colonnes par semaine

(Ø 1,30 m, profondeur 28 m)

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : RATP - STIF

MAÎTRISE D'ŒUVRE : Systra

TITULAIRE DU LOT 1 : Groupement Eiffage GC (mandataire) - Razel Bec groupe Fayat

SOUS-TRAITANT FONDATIONS SPÉCIALES : Sefi - Intrafor

SOUS-TRAITANT INGÉNIEURIE GÉOTECHNIQUE : Arcadis

SOUS-TRAITANT TERRASSEMENT : Capocci

SOUS-TRAITANT AUSCULTATIONS DES AVOISINANTS :

Groupement Gexpertise 4D - Gdtest

ABSTRACT

LINE 14 - RETAINING STRUCTURE AND EXCAVATION OF PONT-CARDINET STATION AND FEEDBACK REGARDING DEFORMATION

L. PAVEL, ARCADIS - H. DESPRETS, EIFFAGE GC - F. LAMOTTE, SEFI-INTRAFOR

Pont-Cardinet station is the first structure for the Line 14 extension, being the starting shaft for the TBM. It was therefore a major challenge for the Eiffage GC / Razel Bec consortium, due to its location on a dense urban site in the 17th arrondissement of Paris and its specific geological context. The consortium endeavoured to optimise its design while ensuring compliance with acceptable deformation thresholds. Because of the significant urban constraints in this sector, the retaining structure was executed by the diaphragm wall technique, after grout injection to fill the gypsum's dissolution voids. Jet grouting was used to ensure sealing of the TBM entry and exit structures. □

LÍNEA 14 - ENTIBACIÓN Y EXCAVACIÓN DE LA ESTACIÓN PONT-CARDINET Y FEEDBACK SOBRE LAS DEFORMACIONES

L. PAVEL, ARCADIS - H. DESPRETS, EIFFAGE GC - F. LAMOTTE, SEFI-INTRAFOR

La estación Pont-Cardinet, el pozo de partida de la tuneladora, es la primera obra de la prolongación de la línea 14. Para el consorcio Eiffage GC - Razel Bec, ha supuesto un gran desafío debido a su ubicación en un entorno urbano denso, en el distrito 17 de París, y a su contexto geológico específico. El consorcio ha tratado de optimizar al máximo su dimensionamiento, respetando a la vez los umbrales de deformación admisibles. Debido a las fuertes restricciones urbanas de este sector, la entibación se ha realizado mediante pantallas continuas, previa inyección de relleno de los huecos de disolución de yeso. Se ha empleado el jet grouting para garantizar la estanqueidad de los macizos de entrada y salida de la tuneladora. □



ROCADE A507 « L2 MARSEILLE » LES TRANCHÉES COUVERTES DE SAINTE-MARTHE ET SAINT-JÉRÔME

AUTEURS : BENOÎT SAUNIER, RESPONSABLE DES ÉTUDES GC, BOUYGUES TP - ALI KOSSARI, RESPONSABLE DES ÉTUDES DE FONDATIONS, SPIE FONDATIONS

LES DEUX TRANCHÉES COUVERTES DITES « TC DE SAINTE-MARTHE » ET « TC DE SAINT-JÉRÔME » SONT RÉALISÉES DANS LE CADRE DES TRAVAUX ACTUELLEMENT EN COURS POUR LE COMPTE DU PROJET D'AUTOROUTE URBAINE « A507 » (DITE ROCADE L2) AYANT POUR OBJECTIF DE CRÉER UNE CONTINUITÉ DE PRÈS DE 11 KM ENTRE L'AUTOROUTE A7 AU NORD ET L'AUTOROUTE A50 AU SUD-EST DE MARSEILLE. LES DEUX OUVRAGES DOIVENT S'INSCRIRE DANS UN ENVIRONNEMENT URBAIN QUI INDUIT DE FORTES CONTRAINTES EN TERMES DE RÉALISATION.



→ Un enjeu de développement des modes de transports collectifs et des modes doux sur l'axe des voies délestées, voire de la L2 elle-même. La portion Est du projet est constituée de travaux démarrés dans les années 90, mais qui sont encore inachevés.

La portion Nord du projet, quant à elle, consiste en la réalisation de travaux neufs dans un corridor réservé à cet effet, dans un environnement urbain très dense.

La circulation dans ce corridor ne doit pas être interrompue. C'est dans cette portion Nord que sont situées les 2 tranchées couvertes de Sainte-Marthe et de Saint-Jérôme.

Les deux tranchées couvertes admettent les contraintes fonctionnelles suivantes :

- Pour chaque sens de circulation, il faut prévoir une BAU de 2,50 m de largeur, une chaussée de 9,75 m pouvant recevoir 3 voies de circulation (pour la TC de Sainte-Marthe) ou de 6,75 m pouvant recevoir 2 voies de circulation (pour la TC de Saint-Jérôme), et un trottoir côté voie rapide de largeur variable. La largeur totale est alors de 28 m pour la TC de Sainte-Marthe, et de 22 m pour la TC de Saint-Jérôme.
- La hauteur sous traverse doit dégager un gabarit minimal de 5,10 m (cette valeur comprend le gabarit véhicules de 4,50 m, les revanches de protection et de construction, ainsi que 45 cm supplémentaires pour la mise en place d'équipements).

- 1- TC de Saint-Jérôme - La rotoreuse Spié Fondations.
- 2- Tracé de la L2 et implantation des TC.

- 1- Saint-Jérôme cut-and-cover - The Spié Fondations Rotoreuse drill.
- 2- L2 route and location of cut-and-covers.

CONTEXTE DU PROJET ET CONTRAINTES FONCTIONNELLES

L'Autoroute A507 à Marseille, appelée Rocade L2, est un projet de type PPP qui a été attribué à un groupement d'entreprises constitué côté constructeur de Bouygues Travaux Publics, Dtp, Colas, Spié Batignolles et, côté ingénierie, des sociétés du groupe Egis et de nombreux bureaux d'études. Cette rocade est une infrastructure routière urbaine sans péage, s'étendant sur près de 11 km, qui reliera l'autoroute A7 au nord et l'autoroute A50 au sud-est (figure 2).

Le projet de la Rocade L2 de Marseille est réalisé avec les objectifs suivants :

- Un enjeu d'amélioration des déplacements urbains dans l'agglomération marseillaise en limitant la circulation automobile au centre-ville pour éviter son asphyxie.
- Un enjeu d'amélioration de la qualité de vie des habitants des quartiers concernés par le projet (réorganisation des quartiers Nord qui sont traversés, création d'espaces verts au-dessus de la future autoroute, etc.).

Sur la TC de Sainte-Marthe, des zones avec un gabarit vertical porté à 6,80 m sont à réaliser, afin de pouvoir mettre en place des équipements de ventilation (accélérateurs).

Les deux tranchées sont implantées dans la partie Nord du tracé de la Roclade L2 (figure 2).

CONTEXTE GÉOTECHNIQUE

Au droit du tracé de la L2 Nord, le sous-sol est constitué de terrains stampiens localement entaillés par des paléo-valons, plus ou moins profonds, principalement orientés nord-sud et comblés par des formations quaternaires (c'est ainsi que des talwegs se sont formés au droit de ce projet).

Les dépôts quaternaires sont constitués de matériaux limono-argileux à limono-sableux avec quelques passages graveleux ou sableux, le plus souvent vers la base au niveau du contact avec le Stampien.

Ces dépôts sont hétérogènes et présentent de forts contrastes de perméabilité entre les niveaux les plus fins et les moins conducteurs et les niveaux plus grossiers (sables, graviers).

La série stampienne regroupe un ensemble hétérogène de formations détritiques accumulées sur une très grande épaisseur. Les faciès rencontrés sont très variés (grès, sables marneux, marnes sableuses, poudingues, marnes, agiles). Ces formations sont assez peu perméables dans leur ensemble et sont le siège d'écoulements préférentiels selon une direction globalement nord-sud (le Stampien altéré est situé au-dessus du Stampien dit sain, il est plus perméable et peut être localement en continuité hydraulique avec la nappe quaternaire).

LA TRANCHÉE COUVERTE DE SAINTE-MARTHE

La TC de Sainte-Marthe a une longueur totale de près de 1100 m ; elle est orientée ouest-est. Le profil en long présente une pente de 5% dans la seconde moitié, côté Est.

On peut distinguer 2 zones distinctes :

→ Partie Ouest de la tranchée : cette zone est entièrement enterrée. Cette partie abrite une usine de ventilation, un bassin de récupération des eaux (implanté à l'extérieur de l'emprise de la tranchée) et une bretelle de sortie.

→ Partie Est de la tranchée : cette zone est successivement entièrement enterrée, partiellement enterrée et enfin totalement aérienne, par rapport au terrain naturel actuel.

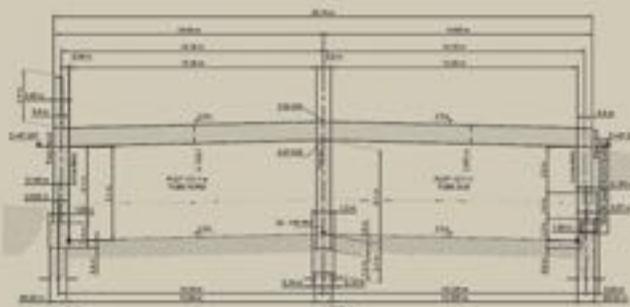
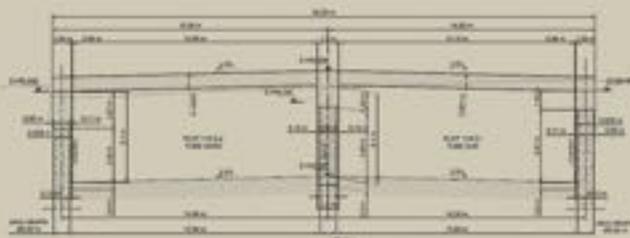
La coupe transversale (figure 3) de l'ouvrage est la suivante : il s'agit de réaliser un double portique de 2x15 m d'ouverture, avec les principes suivants :

→ Quand le double portique est entièrement ou partiellement enterré par rapport au terrain naturel actuel, les parois latérales et centrale sont réalisées en pieux sécants depuis le TN, faisant office de soutènement.

- 3- Coupes transversales types de la tranchée Sainte-Marthe.
- 4- Travaux de confortement du mur Raimu existant (octobre 2015).
- 5- Coupe transversale type de la tranchée Sainte-Marthe en zone ouverte.

- 3- Typical cross sections of the Sainte-Marthe cut-and-cover.
- 4- Consolidation works on the existing Raimu wall (October 2015).
- 5- Typical cross section of the Sainte-Marthe cut-and-cover in an open area.

COUPES TRANSVERSALES TYPE DE LA TRANCHÉE SAINTE-MARTHE



3

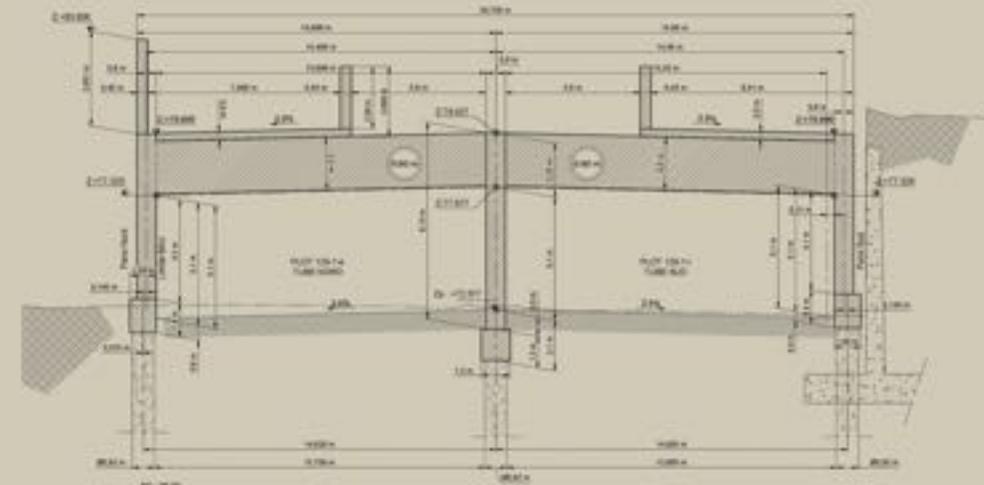
© SPIE FONDATIONS



4

© GIE L2

COUPE TRANSVERSALE TYPE DE LA TRANCHÉE SAINTE-MARTHE EN ZONE OUVERTE



5

© BYTP



© SPIE FONDATIONS

Des rehausses en béton armé sont réalisées en tête de ces parois quand l'ouvrage est partiellement enterré par rapport au terrain actuel.

- Quand le double portique est totalement aérien, on vient réaliser un double portique avec piédroits et traverse en béton armé ; les fondations sont alors constituées de pieux de diamètre 920 mm espacés tous les 2 m à 2,80 m selon les descentes de charges calculées.
- La traverse supporte une hauteur de remblai allant de 2 m à 4 m d'épaisseur ainsi qu'une surcharge routière de 2 t/m².
- Dans la zone où le double portique est aérien, celui-ci est calculé pour reprendre une poussée des terres symétrique ou dissymétrique, la dissymétrie pouvant atteindre près de 14 m de hauteur. Une partie de cette poussée dissymétrique sera reprise par des tirants passifs ancrés dans le piédroit Sud de la tranchée.

Les derniers 280 m de la tranchée, côté Est, constituent une zone particulière :

- Le corridor dans lequel la tranchée doit être réalisée empiète sur le soutènement d'une rampe qui longe le futur piédroit Sud de la tranchée. Pour réaliser les pieux

6- Tranchée Sainte-Marthe - forage au pied du mur existant.

7- Tranchée Sainte-Marthe - la foreuse Llamada P240TT en tarière creuse.

6- Sainte-Marthe cut-and-cover - drilling at the base of the existing wall.

7- Sainte-Marthe cut-and-cover - the Llamada P240TT continuous flight auger driller.

servant à fonder ce piédroit Sud, et pour mettre en place les différents réseaux, il faut détruire le patin avant d'un mur de soutènement existant ; le sciage de ce patin induit une concentration des contraintes au sol sous la semelle résiduelle du mur qui dépasse la résistance du sol de fondation. Un clouage du mur via des tirants passifs (longueur 20 m) a été mis en œuvre avant sciage du patin ; un talutage à

l'arrière du mur est également mis en œuvre. Ces deux dispositions permettent de limiter la contrainte au sol. Enfin, dans la zone où le mur est le plus haut, le sciage du patin initialement prévu a pu être finalement évité ; des carottages au droit des futurs pieux sont réalisés (figure 4).

- Les 80 derniers mètres de la couverture doivent être « ouverts » : la traverse doit être ouverte sur 6 m de part et d'autre du piédroit central. De plus, ces 80 derniers mètres seront construits par phases : réalisation du tube Sud en première phase, puis du tube Nord en seconde phase. Ces 2 contraintes ont conduit à concevoir une traverse composée de poutres portant sur les trois piédroits (largeur 1 m/hauteur 1,80 m) et d'un hourdis en béton armé d'épaisseur 30 cm portant entre deux poutres successives, le hourdis étant présent là où la couverture est prévue « fermée » (figure 5).

Les travaux de fondation effectués par Spie Fondations dans cette zone comprennent l'exécution des soutènements à l'aide des pieux de diamètres 880, 900 et 920 mm (selon la technique de forage) avec une longueur variable en

fonction du niveau du stampien sain (les pieux sont ancrés d'au moins 1 m dans cette couche).

En fonction de la présence d'eau dans les alluvions, de la hauteur de soutènement et de la descente de charge, les soutènements ont été réalisés selon deux types :

- Paroi en pieux sécants, avec des pieux qui sont espacés tous les 800 mm et qui sont armés 1/1 ou 1/2 (selon la sollicitation appliquée).
- Paroi lutétienne, avec un espacement qui varie entre 1,60 m et 2,80 m en fonction des sollicitations obtenues et des déplacements calculés.

Dans une paroi lutétienne, les éléments verticaux sont constitués par des pieux armés et le parement entre les pieux est fait en béton projeté lié aux pieux par des ancrages.

Le choix des outils de forage est dépendant du type de soutènement, de la géologie rencontrée, la présence des avoisinants (figure 6), et de la hauteur découverte des pieux. Ainsi les techniques de forage utilisées sont :

→ Pieux forés à sec :

Avec cette technique, les pieux seront forés à l'abri d'un tubage provisoire sur les premiers mètres (mis en place par rotation) et le forage à l'intérieur du tube se fait à l'aide d'outils tels que la tarière ou le bucket. Une fois que la base de forage est atteinte, la cage d'armatures est installée et le bétonnage peut commencer (bétonnage par une colonne de bétonnage, formée d'un tube plongeur et d'un entonnoir).

→ Pieux forés tubés (avec extraction du tube) :

Cette technique de forage est réalisée en deux phases. Dans la première phase, le forage est réalisé grâce au tube équipé d'une couronne munie de dents à son extrémité, et qui sera vidée à l'aide de l'outil de forage (tarière ou bucket). La longueur de tube dépend de la hauteur de terrassement et de la tolérance de verticalité fixée (le forage avec tubage permet d'obtenir une meilleure verticalité de pieux). Dans la deuxième phase, le forage continue sous le tubage (si la base du tube n'est pas la base finale de forage) pour atteindre la base de forage souhaitée. L'installation des cages et le bétonnage est identique à celle pour les pieux forés et le tube est extrait au fur et à mesure de la remontée du béton. ▷

→ **Pieux tarière creuse en utilisant le procédé Starforeuse® :**

Le forage est fait en utilisant une vis à âme creuse. Cette vis (tarière) est munie, à son extrémité basse, d'une soupape de bétonnage et à l'autre extrémité, d'un flexible relié à une pompe à béton (la hauteur du mât de la foreuse peut être supérieure à 40 m), (figure 7).

Une fois le forage terminé, le bétonnage commence en utilisant un tube de bétonnage télescopable à commande hydraulique installé dans l'âme de la vis (procédé Starforeuse®). Cette technique développée par Spie Fondations permet d'éviter le remaniement de la base du pieu dû au relèvement de la tarière avant de commencer le bétonnage. En fin de bétonnage, la cage d'armatures guidée par des écarteurs est descendue dans le béton frais du pieu par gravité.

LA TRANCHÉE COUVERTE DE SAINT-JÉRÔME

La TC de Saint-Jérôme a une longueur totale de près de 250 m ; elle est également orientée ouest-est. Le profil en long admet un point bas situé à 95 m mesurés depuis l'entrée Ouest (figure 10).

Seule la partie centrale de la TC est couverte, sur un linéaire de 67 m. De part et d'autre de cette zone couverte, la TC est ouverte ; des butons béton armé (poutres de dimensions 70 cm x 130 cm), de portée 22 m, sont prévus. Les butons positionnés à l'est de la zone couverte serviront à supporter une couverture acoustique, sur près de 63 m de long.

Enfin, à l'est de la zone couverte, un bassin de récupération des eaux pluviales sera réalisé 2 m sous le niveau de la chaussée. Ce bassin a les dimensions suivantes : longueur 80 m x largeur 22 m.

Les travaux de Spie Fondations dans cette zone consistent à réaliser les parois de soutènement verticales de la tranchée. Elles sont réalisées à l'aide de parois moulées d'épaisseur 84 cm et d'une longueur qui varie selon différentes zones (entre 10 m au droit de la paroi autostable et 18 m au droit du bassin de récupération des eaux pluviales).

Dans le but de délimiter la trace de la paroi moulée au sol et positionner le cadre de guidage des outils de forage, des murettes guides en béton armé sont réalisées en se basant sur l'implantation des axes de référence du



8
© SPIE FONDATIONS

projet tout en prenant en compte les tolérances d'exécution verticales et horizontales.

Le choix d'outil de forage des parois moulées a résulté d'une réflexion sur la géologie rencontrée (succession de remblais, alluvions, stampiens altérés et de stampiens compacts). L'alternance de terrains raides, militait pour l'emploi de la rotforeuse (figure 1) (outil de forage par mise en rotation des tambours équipés de dents en acier à pointe en carbure), alors que d'autres, limono-argileux à limono-sableux, semblaient constituer un obstacle à l'utilisation de la benne à câble.

8- TC de Saint-Jérôme - vue de la rotforeuse et de la benne à câble.

9- Talwegs Nord et Sud de la TC de Saint-Jérôme.

8- Saint-Jérôme cut-and-cover - view of the Roto-foreuse rotary drill and cable grab.

9- North and South thalwegs of the Saint-Jérôme cut-and-cover.

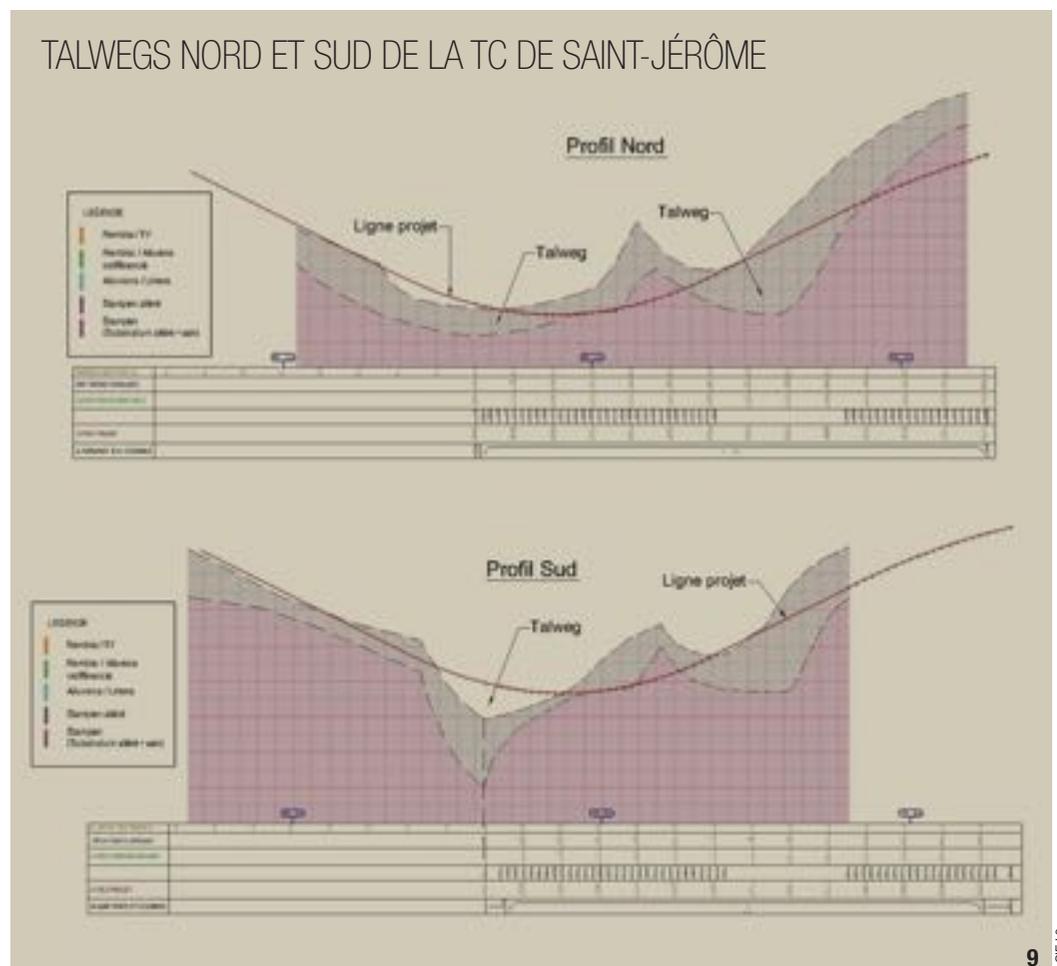
Le forage est réalisé en deux temps. Dans un premier temps, un pré-forage au moyen d'une benne à câble (figure 8) sur la hauteur des remblais/alluvions jusqu'au toit des stampiens et, dans un deuxième temps, le forage est poursuivi dans le stampien avec une rotforeuse.

Afin d'éviter un éventuel éboulement dans les panneaux forés, ces derniers sont stabilisés par un fluide de perforation constitué de boue bentonitique. La bentonite est un produit argileux naturel qui, mélangé à de l'eau, forme une boue aux qualités thixotropiques. Le niveau et la densité de la boue est surveillé.

Il doit rester dans la hauteur de la murette-guide.

Une fois que la base de forage est atteinte, les cages d'armatures sont mises en place dans les panneaux de paroi moulée.

Dans certains panneaux les cages sont équipées de tubes d'auscultation par transparence sonore (pour vérifier la qualité du béton), ou de tubes de réservation destinés à être équipé d'inclinomètres (pour le suivi des déplacements de la paroi).



9
© GIE L2

À la fin, le panneau est bétonné à l'aide d'au moins deux colonnes de bétonnage. Le béton, en remontant, chasse la boue vers le haut et celle-ci est acheminée jusqu'à la centrale de recyclage par l'intermédiaire d'une pompe de transfert.

Toutes précautions sont prises pour éviter le délavage ou la contamination du béton d'amorçage par le liquide de forage. Le bétonnage est arrêté lorsque le béton sain a atteint le niveau d'arase de recépage théorique.

Le secteur de Saint-Jérôme présente deux talwegs disposés en « Y », orientés du nord vers le sud, qui se rejoignent au sud du projet (figure 9).

Les talwegs sont perpendiculaires à la TC de Saint-Jérôme fondée sur parois moulées continues et bloque presque intégralement le flux d'eau des deux talwegs en Y.

Afin d'assurer la transparence hydraulique de part et d'autre du tracé de la L2 au droit des talwegs de Saint-Jérôme, un système de transit gravitaire a été créé. Ce système est constitué d'un réseau de 4 siphons implantés aux points bas des 2 talwegs (2 siphons seront implantés pour chaque talweg) par lesquels l'eau captée au nord de la tranchée transitera de manière gravitaire dans les panneaux drainants côté Sud. Les siphons nord sont constitués des puits circulaires et sont reliés aux panneaux drainants Sud par des collecteurs transversaux passant sous la voie L2 (le débit collecté par chaque talweg est estimé d'environ 10 m³/h).

L'aménagement futur prévu en surface implique la réalisation de rehausses en béton armé au droit des parois moulées de toute la zone non couverte. La hauteur de ces éléments peut atteindre les 6,40 m. Un remblai sera alors mis en œuvre à l'arrière de ces éléments.



10
© GIE L2

10- Vue générale des travaux de la TC Saint-Jérôme (octobre 2015).

10- General view of works on the Saint-Jérôme cut-and-cover (October 2015).

Les poutres-butons servant à la stabilité des parois moulées dans la partie non couverte de la tranchée viennent s'ancrer dans ces rehausses. Ces éléments sont coulés en place.

À chaque extrémité de la tranchée, en prolongement des parois moulées, des murs de soutènement dont la hauteur atteint les 7 m seront réalisés. Ces éléments sont également coulés en place. La dalle de couverture de la zone couverte est une dalle pleine coulée en place de 1 m d'épaisseur ; elle est dimensionnée pour supporter le poids de 3,70 m de remblais et l'action des surcharges routières. Ses extrémités sont ancrées dans les parois moulées via des aciers scellés ou manchonnés (aciers HA20 ou HA25).

Le piédroit central, uniquement réalisé au droit de la zone couverte, permet de réduire la portée de la dalle. Il est constitué d'un voile avec des ouvertures, fondé superficiellement et d'épaisseur 80 cm. Le ratio de ferrailage de la dalle est de

130 kg/m³, le ratio du piédroit central est de 80 kg/m³.

Le bassin de récupération des eaux pluviales est un bassin réalisé à l'abri des parois moulées de la tranchée. Il est situé 2 m sous le niveau de la future chaussée abritée par la tranchée. Un radier de 50 cm d'épaisseur, une dalle de couverture de même épaisseur ainsi que 2 voiles transversaux forment l'enveloppe extérieure du bassin.

Un tapis drainant de 50 cm d'épaisseur est mis en œuvre sous toute l'emprise du radier ; il est associé à des événements débouchant dans le bassin, afin de limiter la sous-pression sous le radier. Sans ce tapis drainant, il aurait fallu épaissir le radier ou prévoir des ancrages de type micropieux.

Une station de pompage permet le releve des eaux stockées dans le bassin ; cette station est située en dehors de l'emprise des parois moulées. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

SAINTE-MARTHE - QUANTITÉS DE PIEUX :

- 2 200 pieux de diamètre 880 à 920 mm
- 3 300 m de forage
- 21 000 m³ de béton

SAINTE-MARTHE ZONE EST - QUANTITÉS DE GÉNIE CIVIL :

- 2 200 t d'armatures
- 16 000 m³ de béton

SAINT-JÉRÔME - QUANTITÉS DE PAROIS MOULÉES :

- 7 400 m² de parois moulées de 0,84 m d'épaisseur
- 590 t d'armatures
- 6 500 m³ de béton
- 2 200 m de tubes soniques

SAINT-JÉRÔME - QUANTITÉS DE GÉNIE CIVIL :

- 830 t d'armatures
- 6 500 m³ de béton

ABSTRACT

"L2 MARSEILLE" A507 RING ROAD THE CUT-AND-COVER TUNNELS OF SAINTE-MARTHE AND SAINT-JÉRÔME

BENOÎT SAUNIER, BOUYGUES TP - ALI KOSSARI, SPIE FONDATIONS

The cut-and-covers of Sainte-Marthe and Saint-Jérôme are the two major engineering structures located in the northern part of the route of the future northern Marseille ring road. They form part of a dense urban environment entailing major constraints (utilities, work sequencing, limited available work area, existing engineering structures in the immediate vicinity). The foundation works involved the construction of retaining walls consisting of either diaphragm walls or secant piles, or Lutetian type retaining walls. The civil engineering work mainly involved the execution of a reinforced concrete cover slab of span 2x15 m. Related structures (ponds, ventilation plant, equipment rooms) are also being constructed. □

RONDA A507 «L2 MARSEILLE» LOS TRAMOS CUBIERTOS DE SAINTE-MARTHE Y SAINT-JÉRÔME

BENOÎT SAUNIER, BOUYGUES TP - ALI KOSSARI, SPIE FONDATIONS

Los tramos de Sainte-Marthe y Saint-Jérôme son las dos principales obras de la parte Norte del trazado de la futura vía de circunvalación Norte de Marsella. Se inscriben en un contexto urbano denso que induce fuertes restricciones (redes, realización por fases, superficies de obra limitadas, obras existentes en proximidad inmediata). Las obras de cimentación consisten en la realización de pantallas de contención, formadas ya sea de pantallas de hormigón, de pilotes secantes o de pantallas parisinas. Las obras de ingeniería civil consisten básicamente en la realización de una losa de cobertura de hormigón armado con una luz de 2x15 m. También se están llevando a cabo otras obras conexas (depósitos, central de ventilación, locales técnicos). □



1
© DR

GRANDES CAVERNES SOUTERRAINES RÉFLEXIONS SUR LEUR COMPORTEMENT ET LEUR CONCEPTION

AUTEUR : FRANÇOIS LAIGLE, EXPERT GÉOTECHNIQUE ET OUVRAGES SOUTERRAINS, CENTRE D'INGÉNIERIE HYDRAULIQUE, EDF

SOUVENT ASSOCIÉES À DES OUVRAGES HYDRO-ÉLECTRIQUES, MAIS SERVANT AUSSI À DES USAGES MILITAIRES, SCIENTIFIQUES OU DE STOCKAGE, LES GRANDES CAVERNES SE DISTINGUENT DES OUVRAGES SOUTERRAINS LINÉAIRES TELS QUE LES TUNNELS ET GALERIES, NON SEULEMENT PAR LA DIMENSION ET LA GÉOMÉTRIE, MAIS ENCORE PAR LEUR COMPORTEMENT ET PAR LEUR CONCEPTION. PARTANT D'UN INVENTAIRE MONDIAL DES OUVRAGES DE CE TYPE LES PLUS REPRÉSENTATIFS RÉALISÉS DANS LES 50 DERNIÈRES ANNÉES, L'EXPERT BROUSSE L'ÉTAT DE L'ART EN LA MATIÈRE ET PRÉSENTE LE PRODUIT DE SON EXPERTISE ET DE SES RÉFLEXIONS.

De grandes cavernes souterraines continuent à être creusées dans le monde dans des massifs rocheux et à des profondeurs atteignant souvent plusieurs centaines de mètres. Ces ouvrages sont souvent associés à des aménagements hydroélectriques, en particulier à des Stations

de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP), qui nécessitent d'installer, pour des fonctions de pompage, le matériel électromécanique en profondeur par rapport au niveau aval. Mais ces grandes cavernes profondes peuvent aussi avoir d'autres finalités, avec des fonctions de stockage et de protection

1- Photo du creusement de la voûte de la caverne de Tehri.

1- Excavation of the Tehri cavern roof - India.

militaires, ou encore pour abriter des expérimentations scientifiques comme dans le tunnel du Fréjus, Super-Kamiokande au Japon ^(Yamatomi 1999), avec une caverne de 40 m de portée à 1 000 m de profondeur, ou encore les cavernes du projet CERN-LHC au début des années 2000 ^[Laigle 2000 ; Laigle 2001].

Par rapport à des tunnels ou galeries, ouvrages linéaires présentant des sections transversales pouvant se rapprocher du cercle, forme optimale dans les ouvrages souterrains, les grandes cavernes ont en commun des caractéristiques bien spécifiques :

- Des géométries qui ne sont que très rarement circulaires et qui ne peuvent généralement pas être qualifiées d'optimales vis-à-vis des critères de stabilité en souterrain. Elles présentent souvent des parements plans sur de grandes hauteurs, avec, occasionnellement, des courbures très faibles.
- Des dimensions généralement décimétriques, que ce soit sur la portée de la voûte ou sur la hauteur de la cavité. Les portées peuvent varier entre une dizaine et une trentaine de mètres. Dans de rares exceptions, elles peuvent être beaucoup plus grandes, comme ce fut le cas de la caverne olympique de Gjovik en Norvège, avec une portée de 61 m.
- Elles sont souvent localisées à de fortes profondeurs, de quelques dizaines à quelques centaines de mètres, heureusement, dans leur grande majorité, dans des massifs rocheux de bonne qualité.
- Compte tenu de leur géométrie et de leurs dimensions, elles ne peuvent que très rarement être

soutenues par des structures de soutènement ou de revêtement rigides (cintres, revêtements en béton). Ceci impose souvent l'utilisation de soutènements légers, ce qui revient implicitement à compter sur le massif rocheux pour assurer sa propre stabilité.

- Il existe de nombreuses connections entre les cavernes et les galeries adjacentes d'accès, d'amenée, d'évacuation, générant de nombreuses intersections d'ouvrages de dimensions très différentes.
- Elles nécessitent des méthodes de creusement en section divisée, avec des phasages d'excavation souvent complexes, basés à la fois sur une recherche d'optimisation

des méthodes et cadences, mais aussi sur des considérations géotechniques relatives aux conditions de stabilité des ouvrages en phase provisoire.

- Ce sont des ouvrages qui ne sont généralement pas très longs (quelques centaines de mètres) et donc moins sujets à des variations et à des hétérogénéités de la géologie.

Ces quelques caractéristiques montrent que les grandes cavernes sont des ouvrages à part entière dans le monde des travaux souterrains et qu'elles doivent être conçues selon des critères spécifiques pouvant s'écarter de ceux retenus pour les ouvrages linéaires.

Cet article a pour vocation de présenter quelques réflexions sur la conception de ces cavernes, en particulier de rappeler quelques grands principes à intégrer dans le cadre des études de tels ouvrages, et de présenter les approches de dimensionnement les plus usuelles.

Ces propos seront illustrés par quelques études récentes menées par EDF dans le cadre du développement de nouveaux projets EDF, mais aussi dans le cadre de prestations d'assistance pour d'autres maîtres d'ouvrage à l'international, concernant des cavernes en cours de creusement ou en projet.

EXPÉRIENCE DES GRANDES CAVERNES HYDROÉLECTRIQUES À EDF

EDF exploite aujourd'hui environ 37 aménagements présentant des cavernes souterraines abritant des turbines ou turbines-pompes, sous des charges hydrauliques variant d'une cinquantaine de mètres à 1 200 m pour l'usine de la Bathie.

Ces ouvrages ont été creusés dans des faciès géologiques variés, depuis des milieux cristallins de type granites ou amphibolites, jusqu'à des configurations moins favorables comme des marnes ou des schistes houillers.

Ces cavernes ont des portées variant d'une dizaine de mètres jusqu'à 25 m, dans le cas de la caverne de Montzic, si on fait exception de l'usine du Sautet (figure 2) qui a une largeur de 36,5 m, mais une hauteur de seulement 25 m, ce qui lui confère une géométrie proche d'une station de métro. La plus vieille caverne est celle de Brommat I (figure 3), creusée en 1933 dans des granites, d'une largeur de plus de 21 m.

La plupart de ces cavernes, creusées dans des massifs de bonne qualité, a été réalisée avec des longpans faiblement soutenus mais elles présentent très souvent un revêtement en voûte en béton faiblement armé, conçu pour reprendre les charges verticales en les reportant vers les appuis de voûte. ▷

2- Coupe de la caverne du Sautet.

3- Coupe de la caverne de Brommat I.

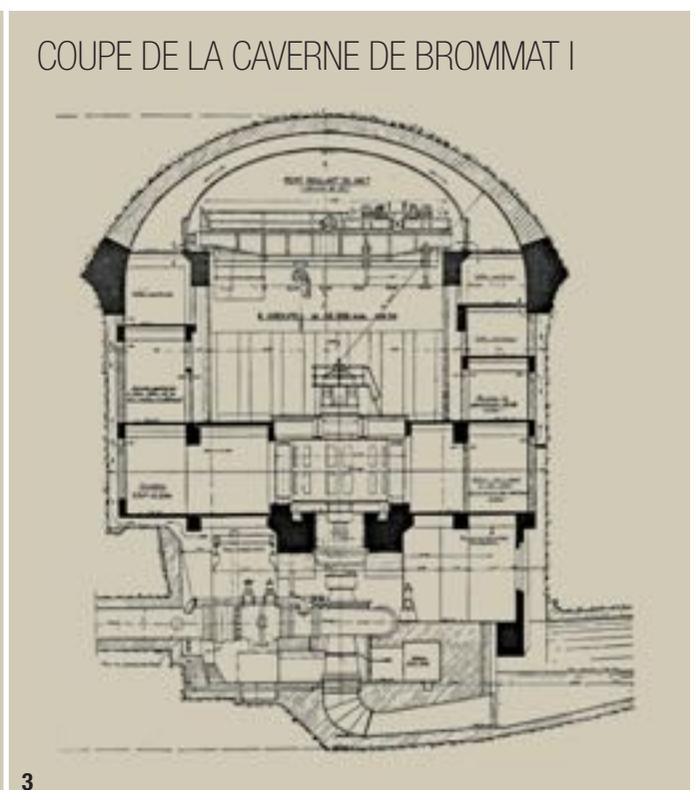
2- Sautet cavern (cross-section) - France.

3- Brommat I cavern (cross-section) - France.

COUPE DE LA CAVERNE DU SAUTET



COUPE DE LA CAVERNE DE BROMMAT I



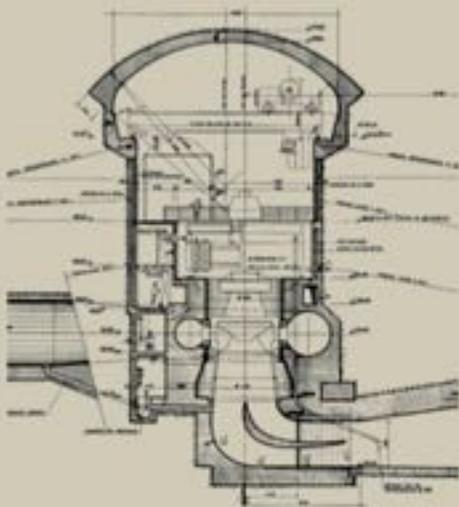


4



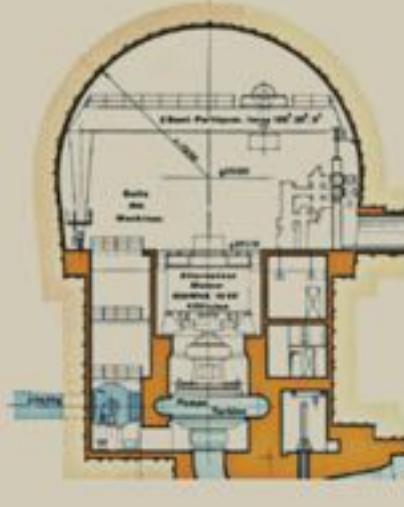
6

COUPE TYPE DE LA CAVERNE
USINE DE SISTERON



5

COUPE TYPE DE LA CAVERNE
DE MONTÉZIC



7

4- Photo du creusement de la caverne de Sisteron.

5- Coupe type de la caverne usine de Sisteron.

6- Vue de la caverne de Montézic.

7- Coupe type de la caverne de Montézic.

4- Photo taken during excavation of the Sisteron cavern - France.

5- Sisteron power plant cavern: typical cross-section - France.

6- View of the Montézic cavern - France.

7- Montézic cavern: typical cross-section - France.

Un exemple est la caverne de Sisteron (figures 4 et 5), creusée au milieu des années 70 dans un massif marneux, pour laquelle seul un soutènement par boulons, béton projeté et quelques tirants précontraints avait été installé en longpans.

Jusqu'à présent, seule la caverne de Montézic (figures 6 et 7), réalisée au début des années 80, ne présentait pas de revêtement en voûte et une recherche d'optimisation de la géométrie a été faite afin d'assurer sa stabilité définitive sur la base d'un système de boulonnage et de béton projeté.

Les cavernes actuellement en cours de réalisation dans le cadre d'un projet sous maîtrise d'ouvrage EDF sont celles de l'aménagement de Romanche-Gavet. Les excavations des 2 cavernes sont en cours de finalisation, avec une portée de 19 m pour la caverne abritant les turbines et de 15 m pour

celle abritant les transformateurs. Ces 2 ouvrages sont excavés dans un massif d'amphibolite présentant de bonnes caractéristiques mécaniques et la stabilité de l'ouvrage est assurée par un système de soutènement définitif composé de boulons et de béton projeté.

Cette expérience acquise est mise, ainsi qu'elle l'a toujours été, au service d'autres maîtres d'ouvrage à l'international pour le développement de nouvelles installations souterraines.

À la fin des années 90, EDF a été chargé, en partenariat avec le bureau britannique Knigh-Piesold, des études et de la maîtrise d'œuvre complète pour la réalisation des ouvrages du lot 1 du projet CERN-LHC. Il s'agissait de concevoir les structures souterraines des futures installations destinées à la détection du bozon de Higgs. Les excavations les plus grandes consistaient en 2 cavernes imbriquées, de portées res-

pectives 22 m et 34 m. Ces ouvrages étaient creusés dans la molasse du bassin genevois, à une centaine de mètres de profondeur, dans des terrains relativement hétérogènes, présentant des horizons argilo-marneux ayant de faibles caractéristiques mécaniques, sensibles aux phénomènes de comportement différé et de gonflement. Les grandes dimensions, la géométrie des ouvrages et leur proximité, le tout associé à un état des contraintes initiales défavorable, ont conduit à mettre en œuvre pour les soutènements une conception basée sur la Nouvelle Méthode Autrichienne (NATM) particulièrement bien adaptée dans ce contexte des grandes cavernes. Le soutènement, uniquement composé de l'association de 20 cm de béton projeté et d'un système de boulonnage passif à ancrage réparti, a donné entière satisfaction.

**DONNÉES STATISTIQUES
SUR LES CAVERNES
HYDROÉLECTRIQUES**

« *International Water Power & Dam Construction* » a présenté en 2009 une synthèse des cavernes souterraines existantes ou en construction, dans plus de 75 pays. Au total, 800 cavernes sont recensées. Une brève analyse de cette base de données montre que :

→ Indépendamment du type de machine installée, la portée des cavernes évolue avec la puissance unitaire, comme l'illustre la figure 11. Ainsi, pour des groupes de 100 à 200 MW, la largeur moyenne des cavernes est de 20 à 22 m.

8- Vue de la caverne principale de Gavet en cours de creusement.

9- Vue du creusement de la caverne USA15 du projet CERN-LHC.

10- Vue du creusement de la caverne UX15 du projet CERN-LHC.

8- View of the main Gavet cavern during excavation - France.

9- View of the excavation of CERN-LHC project cavern USA15 - Genève - Switzerland.

10- View of the excavation of CERN-LHC project cavern UX15 - Genève - Switzerland.



© DR 8

→ Sur 800 cavernes, seules 26, soit moins de 4 %, ont une portée supérieure ou égale à 30 m. Parmi ces ouvrages, il convient de citer la caverne des groupes du projet de Nant-de-Drance (figure 12), en Suisse, dont la construction s'est terminée récemment, et qui atteint

32 m de portée à son maximum, à plus de 600 m de profondeur [Balmer 2013].

→ La plus grande caverne hydroélectrique recensée a une portée de 35 m. Il s'agit de l'aménagement de Cirata, en Indonésie, construit en 1985. Cette caverne est réalisée dans des roches basaltiques, à une profondeur de l'ordre de 100 m.

→ La profondeur moyenne de ces cavernes sous le terrain naturel varie entre quelques dizaines de mètres et 700 m environ (figure 12). Il n'apparaît pas de tendance marquée entre la largeur des ouvrages et leur profondeur, car de nombreux

paramètres entrent en compte et, en particulier, le contexte géologique. Mais on constate que pour des profondeurs dépassant 500 m, les portées se limitent généralement à une vingtaine de mètres. Là aussi, le projet de Nant-de-Drance apparaît comme exceptionnel pour ces ouvrages souterrains, puisqu'il s'agit d'une des rares cavernes de plus de 30 m de portée localisée à une telle profondeur. La plus profonde, avec une dimension similaire, est celle de Kannagawa, au Japon, creusée dans des rhyolites, d'une portée de 33 m, située à une profondeur de 500 m. ▷



© DR 9



10

Deux cavernes n'apparaissant pas sur ce graphe, ont une profondeur de 1500 m et 1600 m. Il s'agit des cavernes de Tyn2 (Norvège) et d'Ar-dal (Suède), donc très probablement excavées dans des massifs rocheux de très bonne qualité. Ainsi, des cavernes hydroélectriques peuvent effectivement être réalisées à très forte profondeur, mais leur faisabilité dépend en premier lieu de la nature de la roche encaissante.

Les deux ouvrages cités précédemment sont creusés dans des roches compétentes. Est actuellement en cours d'excavation la caverne de Tehri, dans le nord de l'Inde, qui atteint 26 m de portée, sous 500 m de profondeur, dans un massif de phyllithes présentant des caractéristiques mécaniques fortement anisotropes.

Sur le plan géologique et géotechnique, la plupart de ces ouvrages sont excavés dans des massifs rocheux qualifiés de « moyens » à « bons », avec des indices Q-NGI variant en moyenne entre 0,7 et 5, et RMR de l'ordre de 40 à 60. De telles caractéristiques permettent généralement d'envisager des soutènements relativement souples, basés sur l'association d'un boulonnage et d'un béton projeté.

Seules quelques cavernes hydroélectriques ont été creusées dans des roches de très mauvaise qualité. Ce fut le cas pour EDF lors de la construction de l'aménagement de la Saussaz. Cet ouvrage fut excavé en 1973 dans un massif de schiste houiller du Briançonnais, avec une largeur de 17 m sous 200 m de couverture.

Cet ouvrage présenta rapidement, dès le début des excavations, des convergences importantes, nécessitant la mise en œuvre de revêtements en béton très épais, des butons entre parements et un phasage de creusement très lent et complexe.

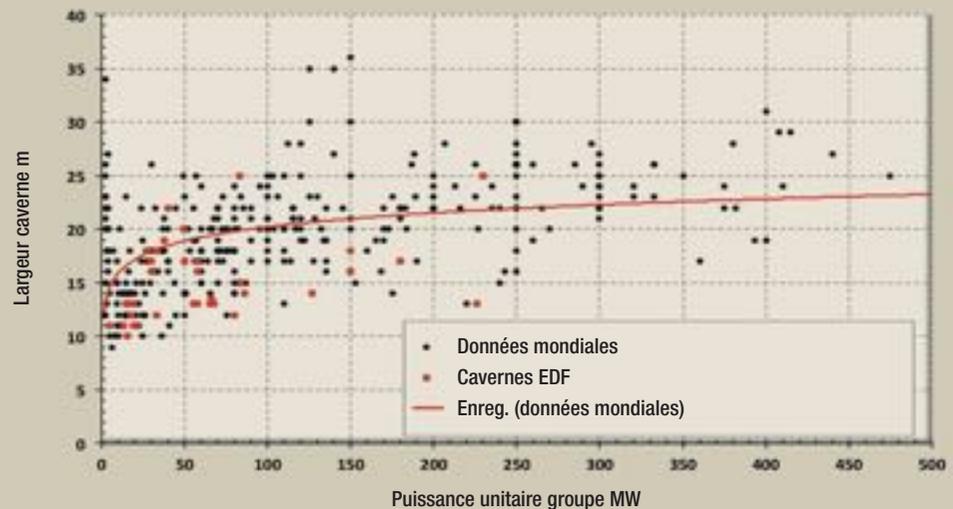
GÉOMÉTRIE DES CAVERNES HYDROÉLECTRIQUES

Sauf spécifications bien particulières liées à leur destination, les cavernes souterraines présentent généralement des géométries élancées, adaptées dans le cas des ouvrages hydroélectriques au matériel électromécanique installé.

Ceci leur confère souvent des géométries allongées dans la direction verticale, avec des longpans plans et de grande hauteur (plusieurs dizaines de mètres en phase d'excavation).

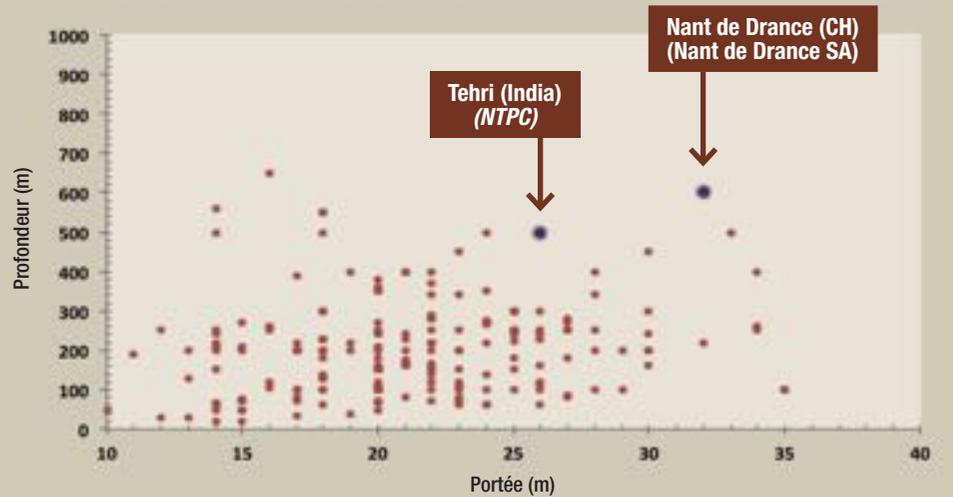
La géométrie et les dimensions de ces longpans sont défavorables vis-à-vis

ÉVOLUTION DE LA LARGEUR DE LA CAVERNE EN FONCTION DE LA PUISSANCE UNITAIRE



11

ÉVOLUTION DE LA LARGEUR DE LA CAVERNE EN FONCTION DE LA PROFondeUR



12

11- Évolution de la largeur de la caverne en fonction de la puissance unitaire.

12- Évolution de la largeur de la caverne en fonction de la profondeur.

13- Vue de la caverne de Nant-de-Drance en cours de creusement.

11- Cavern width vs. unit power.

12- Cavern width vs. depth.

13- View of the Nant-de-Drance cavern during excavation - Switzerland.



13

des conditions de stabilité de l'ouvrage. En zone décomprimée, ces grands piédroits sont exposés à un risque d'instabilité de dièdres potentiellement de grande taille.

Exposés au champ des contraintes horizontales, souvent plus élevées que les contraintes verticales, ces grands parements induisent des reports de charge en voûte et en radier. Si ces concentrations de contraintes peuvent parfois nécessiter un soutènement localisé du radier [Laigle 2001], il est souvent délicat de venir renforcer les soutènements de la voûte s'il s'avère que l'impact de ces contraintes dans le massif a été mal évalué. Ce sont enfin des zones où une « théorique » zone « plastifiée » s'étendra profondément dans le massif, étant associée à des convergences plus importantes qu'en voûte.

Considérer de telles géométries a essentiellement pour but une recherche de limitation des volumes d'excavation, mais ne correspond pas à une optimisation de la forme vis-à-vis de critères géomécaniques.

Relativement à ces considérations, il est alors préférable de chercher à arrondir la forme de la section transversale, en donnant une concavité aux

longpans, voire aux tympans. C'est ce qui a été réalisé pour la caverne principale de Nant-de-Drance, avec comme avantage de limiter la perturbation du champ des contraintes, de réduire les concentrations locales de ces dernières, et de limiter les volumes des dièdres potentiellement instables. Choisir une telle géométrie a bien entendu un impact sur les coûts, mais aussi sur la conception interne du génie civil et des équipements de l'ouvrage. Si cette évolution dans la forme transversale des cavernes améliore évi-

demment les conditions de stabilité des ouvrages, il faut aussi relativiser sa nécessité dans de très nombreuses configurations, pour lesquelles des longpans verticaux restent une solution acceptable, limitant les volumes d'excavation et nécessitant des soutènements similaires ou très légèrement majorés. Ces géométries sont à réserver à des ouvrages excavés dans des milieux présentant des faibles caractéristiques mécaniques, potentiellement convergents, ou alors exceptionnels relativement au critère "Profondeur-Résistance-Dimensions".

PATHOLOGIES ET MÉCANISMES D'EFFONDREMENT

Classiquement, comme tous les ouvrages souterrains creusés dans des massifs rocheux, les mécanismes de ruine potentiels, associés au comportement géomécanique du milieu, sont pilotés soit par la rhéologie du massif alors assimilé à un milieu continu (ou continu « équivalent »),

soit par la structuration du massif, en considérant alors le milieu comme discontinu et présentant un comportement discret.

Identifier quel est le mode prépondérant de comportement de l'ouvrage en phase d'excavation est une étape indispensable de l'analyse car cela conditionne, bien sûr, les méthodes de calcul, mais aussi et surtout le type de soutènement qui sera mis en œuvre, sa justification, les critères d'auscultation, les conditions et le passage d'excavation... donc finalement la conception générale de l'ouvrage en phase de construction.

Le Groupe de Travail GT30 de l'AFTES [AFTES 2011] a proposé un graphe synthétique permettant d'avoir une première estimation du mode probable de comportement, sur la base de 2 critères :

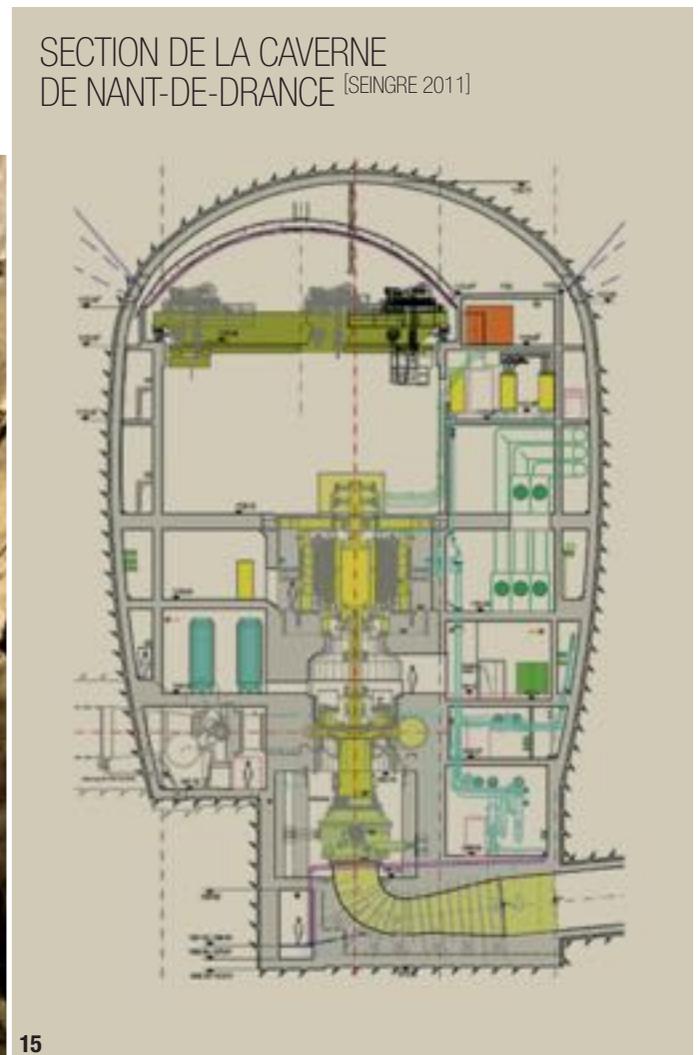
→ Un premier critère géométrique, correspondant au rapport D_b/D , entre la dimension moyenne des blocs composant la masse rocheuse D_b et la dimension principale de l'excavation D .

14- Section de la caverne de Kops II (<http://www.jaegerbau.com>).

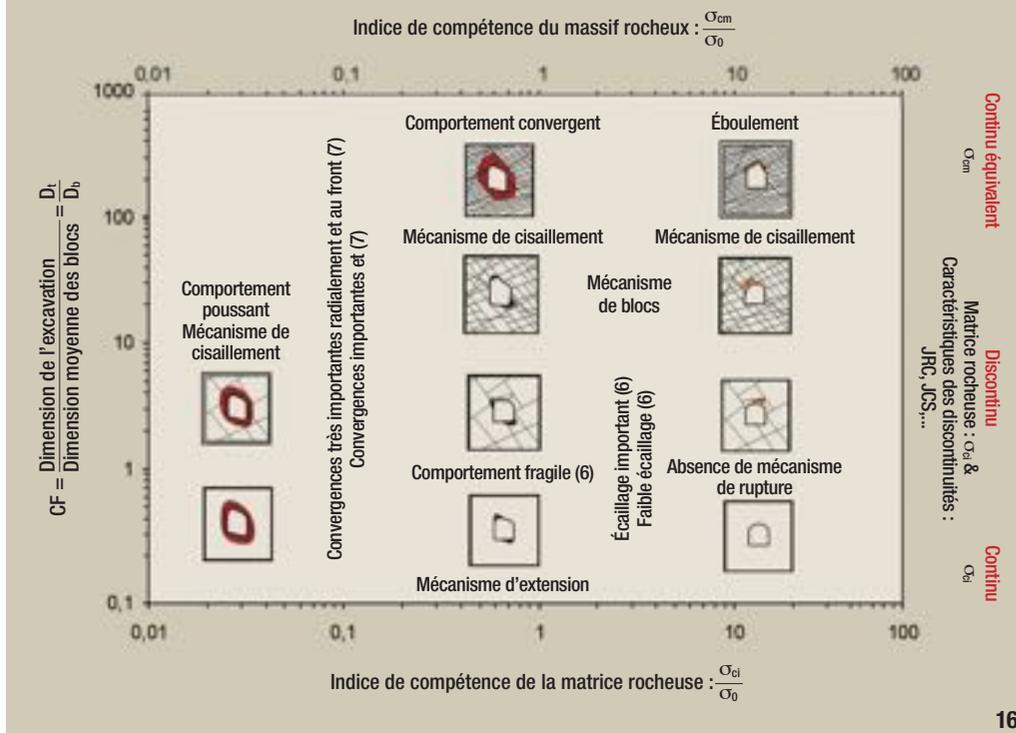
15- Section de la caverne de Nant-de-Drance [Seingre 2011].

14- Part of the Kops II cavern - Austria.

15- Cross-section of the Nant-de-Drance cavern - Switzerland.



GRAPHE PROVISOIRE ÉTABLI PAR LE GT30 DE L'AFTES POUR AIDER À L'IDENTIFICATION DES MÉCANISMES PROBABLES DE DÉGRADATION



16 © DR

16- Graphe provisoire établi par le GT30 de l'AFTES pour aider à l'identification des mécanismes probables de dégradation.

17- Graphe définissant le domaine de faisabilité d'une caverne en fonction de la profondeur et de l'indice Q-NGI.

16- Provisional chart drawn up by AFTES WG30 to help identify probable degradation mechanisms.

17- Chart defining the area of feasibility of a cavern based on depth and the NGI-Q index.

→ Un deuxième critère correspondant au rapport σ_c/σ_{max} , entre la résistance en compression simple caractéristique du massif (soit la résistance de la matrice rocheuse σ_{ci} , soit la résistance de la masse rocheuse σ_{cm}) et la contrainte initiale maximale en place σ_{max} .

Ainsi, en fonction de la configuration rencontrée, 3 mécanismes de dégradation peuvent, de façon relativement schématique, se développer, vis-à-vis desquels il faudra justifier le mode et le dimensionnement du soutènement :

→ **Un mécanisme discret d'instabilité des blocs**, piloté par la structuration du massif rocheux et les familles de discontinuités existantes, qui est celui généralement rencontré dans le cas des grandes cavernes souvent creusées dans des massifs de bonne qualité. Il faudra alors reconnaître les familles principales de discontinuités, et identifier les volumes potentiellement instables.

→ **Un mécanisme, souvent plutôt localisé, de rupture fragile par écaillage**, qui se développe dans des massifs peu fracturés, une matrice rocheuse rigide et résistante, et des contraintes relativement élevées. Ce mécanisme

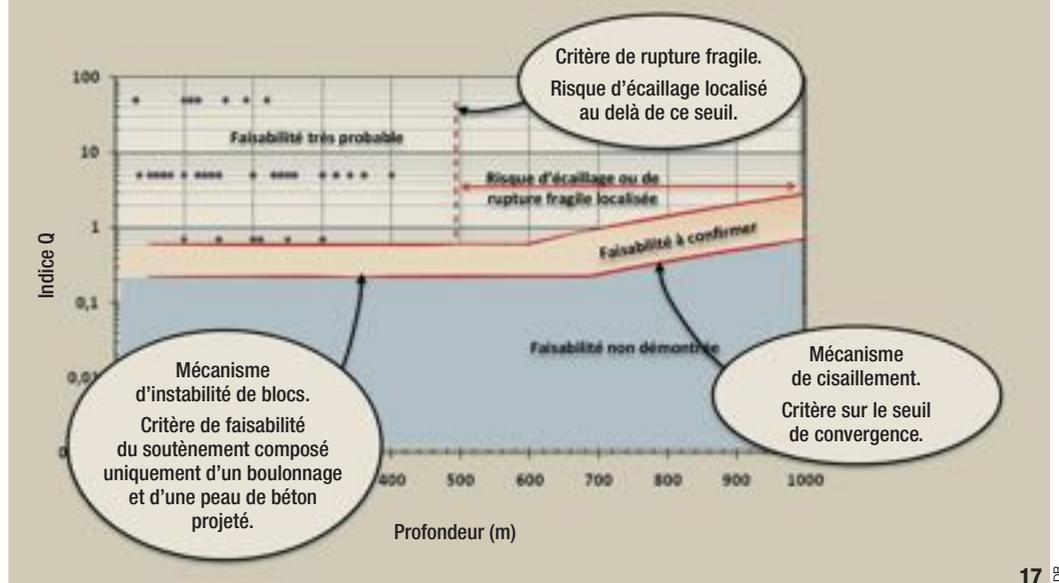
de dégradation est alors essentiellement régi par la rhéologie de la matrice rocheuse et l'état des contraintes régnant à proximité de l'ouvrage. Cette dégradation de surface va essentiellement se localiser au niveau des appuis de voûte ou en clé de voûte, zones de concen-

tration des contraintes orthoradiales. Ce type de mécanisme se développera généralement, d'après Diederich ^[Diederich 2010], pour des indices GSI supérieures à 65 environ, des indices de fragilité assimilables au paramètre m_i du critère de Hoek et Brown supérieurs à 20 et dès

que les contraintes de compression dépassent environ 40 % de la résistance en compression simple.

→ **Un mécanisme associé à une déformation généralisée** du massif, se traduisant par des convergences plus ou moins importantes. Contrairement au

GRAPHE DÉFINISSANT LE DOMAINE DE FAISABILITÉ D'UNE CAVERNE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR ET DE L'INDICE Q-NGI



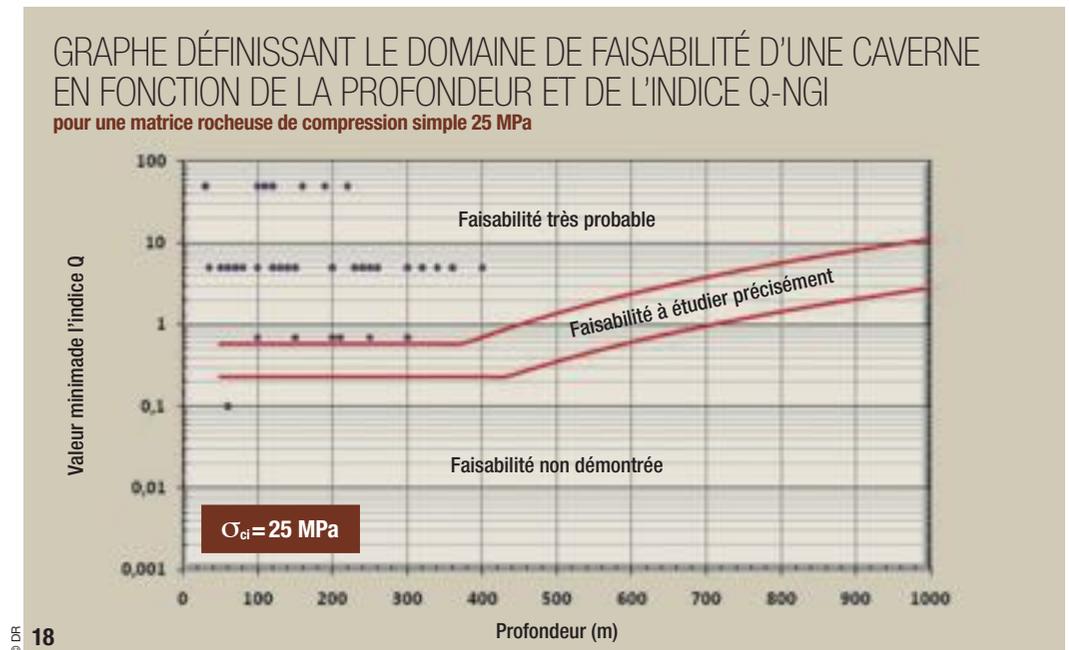
17 © DR

18- Graphe définissant le domaine de faisabilité d'une caverne en fonction de la profondeur et de l'indice Q-NGI, pour une matrice rocheuse de compression simple 25 MPa.

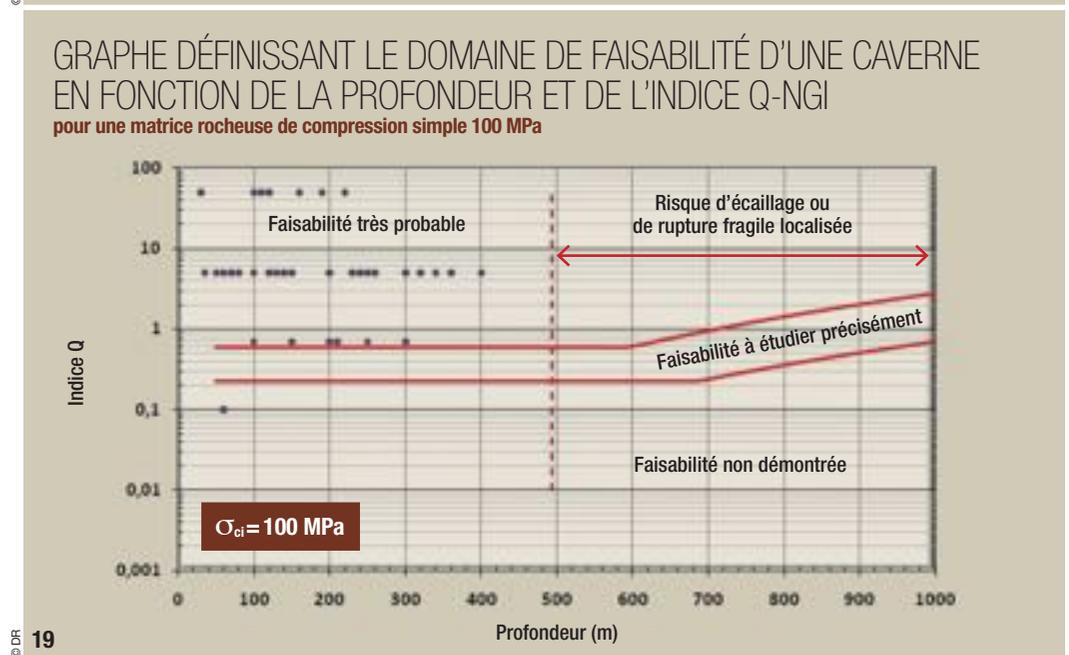
19- Graphe définissant le domaine de faisabilité d'une caverne en fonction de la profondeur et de l'indice Q-NGI, pour une matrice rocheuse de compression simple 100 MPa.

18- Chart defining the area of feasibility for a cavern on the basis of depth and the NGI-Q index, for a rock matrix with a standard compression strength of 25 MPa.

19- Chart defining the area of feasibility for a cavern on the basis of depth and the NGI-Q index, for a rock matrix with a standard compression strength of 100 MPa.



© DR 18



© DR 19

mécanisme précédent qui était initié et régi par le développement de fissures, ce comportement est associé à un comportement plastique et donc à des déformations de cisaillement. Ce comportement peut se retrouver dans des terrains présentant de faibles caractéristiques mécaniques, sous des contraintes relativement élevées, souvent dans des roches assez anisotropes. Si les convergences deviennent excessives, la faisabilité de la caverne est alors remise en question.

C'est donc en fonction du ou des mécanismes susceptibles d'être activés que la conception devra être menée, selon une méthodologie de calcul adéquate.

MÉTHODES DE CALCUL

De l'identification des mécanismes de ruine potentiels découle la démarche de conception et de dimensionnement du soutènement des cavernes. Il est bien évident que le choix des outils de calcul, de la méthodologie d'interprétation et des critères de conception, dépendra du type de phénomène vis-à-vis duquel le projeteur devra se protéger. Les outils de calcul peuvent être regroupés en 3 catégories rattachées à différents stades d'avancement du projet et/ou à la nature du comportement attendu. La démarche et les outils d'analyse décrits par la suite correspondent à la méthodologie utilisée par EDF/CIH dans les récentes études qui ont été menées sur des projets de cavernes.

APPROCHES PRÉLIMINAIRES

En premier lieu, et cela paraît aujourd'hui indispensable, il convient de mettre en œuvre des approches empiriques basées sur le retour d'expérience et largement partagées par la profession au niveau international. Il s'agit en particulier d'appliquer l'approche de Barton, en ayant estimé une plage probable de valeur de l'indice Q-NGI. Ces valeurs doivent être estimées à minima à partir des relevées de sondages, mais aussi recoupées avec toutes les informations disponibles issues d'autres méthodes d'investigations (mesures géophysiques, essais d'eau, etc.). À partir de cette approche, il est ainsi possible de fournir un avis sur la faisabilité de la caverne et sur la nature

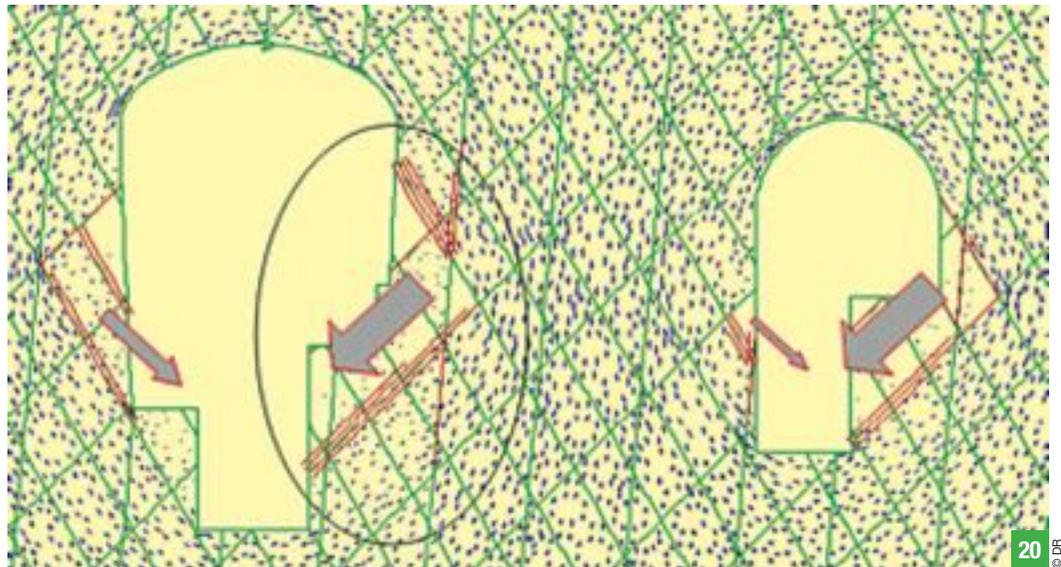
probable des structures de soutènement. Le retour d'expérience montre, en première approximation, que pour des valeurs de Q-NGI proches de 1, la faisabilité d'une caverne est envisageable sur la base d'un soutènement composé de boulons et de béton projeté. En deçà de cette valeur unitaire, d'autres approches calculatoires basées sur des modélisations numériques (modélisations numériques continues ou discontinues) doivent être envisagées pour justifier la conception envisagée. Pour illustrer ce retour d'expérience et dans le cadre d'analyses préliminaires, un graphe est proposé dans cet article permettant de donner un premier avis sur le mode de pathologie le plus probable et la faisabilité de la caverne, ▷

en fonction de sa profondeur et de l'indice probable de Barton. Un paramètre influant sur la position des seuils est la résistance en compression simple de la matrice rocheuse, à petite échelle. En fonction de cette valeur, 2 ou 3 des mécanismes identifiés précédemment seront susceptibles de s'initier.

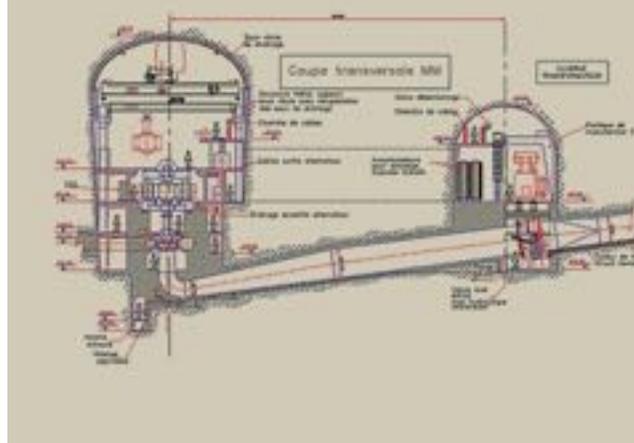
Le critère horizontal est essentiellement lié à la stabilité vis-à-vis d'un mécanisme piloté par la structuration et les discontinuités du massif. Pour le définir, il est implicitement admis que la faisabilité de la caverne est associée à une forte probabilité de pouvoir réaliser son excavation en n'ayant recours principalement qu'à un soutènement composé de boulons scellés et à une peau de béton projeté. À titre indicatif, les 2 seuils proposés correspondent à un boulonnage composé de boulons \varnothing 25 mm avec une maille de 1 m^2 (boulonnage mis en œuvre dans les cavernes du CERN LHC - Critère inférieur) et de \varnothing 32 mm avec une maille de $2,25 \text{ m}^2$ (boulonnage mis en œuvre dans la caverne de Tehri - critère supérieur). Il s'agit de densité importante de boulonnage au-delà de laquelle il ne convient pas d'aller.

Le critère courbe, sur la partie droite du graphe, est associé à un mécanisme de déformation plastique du massif. S'agissant d'un mode de comportement associé à des mouvements du terrain, ce seuil est calé relativement à des critères limites de convergence. Un critère de convergence de 1% est retenu pour la borne inférieure du seuil, alors qu'un critère de 0,4% est considéré pour caler la borne supérieure. Enfin, en fonction de la résistance en compression simple et de l'indice de Barton, un critère supplémentaire indique le risque d'apparition d'un mécanisme d'écaillage en paroi des ouvrages. Ce dernier seuil n'est pas considéré comme un critère de faisabilité car il n'est généralement pas rédhibitoire pour la réalisation de la caverne. Les figures 18 et 19 présentent respectivement ces abaques pour des résistances matricielles de 25 MPa et de 100 MPa.

Afin de justifier ces graphes, les cavernes hydroélectriques, pour lesquelles les données étaient disponibles dans la base fournie par le journal « *International Water Power & Dam Construction* », ont été reportées en considérant la borne inférieure de l'indice Q sur la plage considérée. On constate que pour ces 56 cas, 55 respectent les critères proposés. Le seul ouvrage situé en dessous



COUPE TYPE DES CAVERNES DE GAVET



20- Exemple de résultat d'un calcul discontinu (Logiciel UDEC-Itasca) pour le projet de Gavet.

21- Coupe type des cavernes de Gavet.

20- Example of the results of a discrete method (UDEC-Itasca software) for the Gavet project.

21- Gavet caverns: typical cross-section.

des seuils proposés correspond à la caverne de Darguinah, creusée en 1951 en Algérie, dans des schistes. Par ailleurs, ces résultats montrent que, pour des cavernes creusées dans des roches de qualité moyenne (Résistance en compression simple de l'ordre de 25-30 MPa), une attention particulière devra être portée lorsque l'ouvrage atteint des profondeurs de l'ordre de 400 à 500 m. A contrario, pour des excavations réalisées dans des massifs compétents, constitués d'une matrice présentant une résistance de 100 MPa ou plus, de grandes profondeurs peuvent être envisagées, mais le critère limitant est alors le risque d'apparition d'un écaillage en paroi.

Enfin, la faisabilité est clairement remise en question si l'indice de Barton devient inférieur à 0,2. En deçà, la conception de l'excavation doit être adaptée, en considérant des dimensions plus réduites, une géométrie optimisée et

peu élancée, un phasage d'excavation complexe, et probablement la mise en place de soutènements et de revêtements lourds et importants.

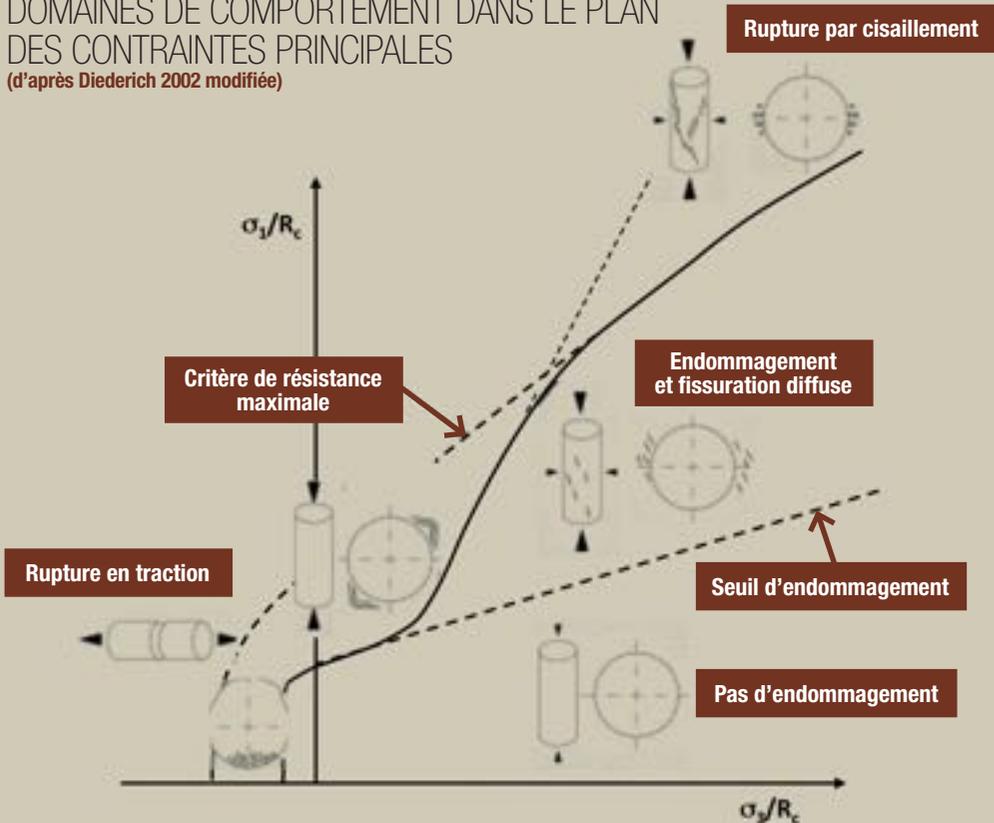
LES MODÉLISATIONS NUMÉRIQUES

Aujourd'hui, l'ingénieur dispose de codes de calcul accessibles, relativement performants en termes de potentialités de simulations (nombreuses lois de comportement, couplages hydro-mécaniques, éléments structuraux, facilités de discrétisation et de constitution du modèle géométrique, etc.). Ce développement de l'utilisation des outils de simulation est bénéfique et il serait dommage que la profession des travaux souterrains ne mette pas à profit ces méthodes de calculs, sous réserve de les utiliser et surtout de les interpréter de façon pertinente. Avant de démarrer la mise en œuvre d'une modélisation, il est indispensable de

définir les objectifs de ce calcul, puis le type de simulation le plus adapté (Discontinue ou continue ? Quelle loi de comportement ?) et enfin les critères d'interprétation des résultats de la modélisation. Ce point paraît fondamental car des modélisations numériques avancées sont couramment réalisées sans que la finalité et la méthodologie d'interprétation aient été clairement définies. Au même titre que les hypothèses de calcul, toute note d'analyse basée sur des simulations numériques devrait préciser les paramètres qui seront in-fine extraits, analysés, ainsi que les critères qui y sont associés. Derrière ces propos, il ne s'agit ni de critiquer la diffusion des outils de modélisation numérique qui sont utiles pour l'ingénieur dans la compréhension du comportement des ouvrages et à des fins de justification et d'optimisation, ni de critiquer l'intérêt et l'utilité des approches empiriques ou

DOMAINES DE COMPORTEMENT DANS LE PLAN DES CONTRAINTES PRINCIPALES

(d'après Diederich 2002 modifiée)



22- Domaines de comportement dans le plan des contraintes principales (d'après Diederich 2002 modifiée).

22- Areas of behaviour in the plane of principal stress (after Diederichs 2002, modified).

outils basés sur la notion d'équilibre limite, et qui analysent les conditions de stabilité de certains dièdres potentiellement instables compte tenu de leur géométrie.

C'est le cas par exemple du logiciel Unwedge, aujourd'hui couramment utilisé dans les études.

Une deuxième approche, illustrant l'apport des modélisations numériques à l'identification du risque de dégradation par écaillage, peut consister à exploiter des calculs purement élastiques et à analyser le champ des contraintes induit au voisinage des ouvrages en fin de creusement. Il est bien évident que, pour des ouvrages profonds creusés dans des massifs présentant potentiellement un comportement non-linéaire, réaliser une modélisation purement élastique conduit à des résultats peu représentatifs et donc à analyser avec circonspection.

Toutefois, à un stade préliminaire du projet, ou lors de la préparation d'un modèle de calcul plus complexe, il peut être intéressant de rapidement réaliser des modélisations 2D ou 3D, sans affiner la modélisation de la rhéologie du massif. L'exploitation de ces calculs doit alors se faire sur la base des états des contraintes et non relativement aux déformations ou déplacements qui sont, en l'occurrence, encore moins pertinents que les contraintes.

L'approche proposée s'inspire des travaux de Diederich ^[Diederich 2002], et consiste à séparer le plan des contraintes principales de compression majeure/mineure en 4 domaines décrits ci-dessous. Ce concept, sous une forme approchée, est intégré dans le modèle L&K développé par EDF/CIH ^[Laigle 2004, Kleine 2008] et il est illustré par la figure 22.

La description du comportement géomécanique associé à chaque domaine détaillée ci-dessous correspond aux concepts qui sont à la base du modèle L&K.

© DR 22

des méthodes de calculs analytiques qui, associées à l'expérience des concepteurs, sont à la base de la conception initiale des ouvrages. Il s'agit surtout de bien identifier les besoins de l'ingénieur de projet et de mettre au service de ces attentes les

outils pertinents et adaptés disponibles. Le tableau 1 liste quelques approches numériques utilisées et les principaux résultats à extraire et interpréter, en considérant les 3 mécanismes extrêmes identifiés précédemment. Un exemple d'application mettant

en œuvre une approche discontinue, ayant pour objectif de donner un avis sur la conception et le dimensionnement des soutènements, est le cas des études réalisées sur les cavernes du projet Romanche-Gavet. Il est par ailleurs courant d'utiliser des

TABEAU 1 :

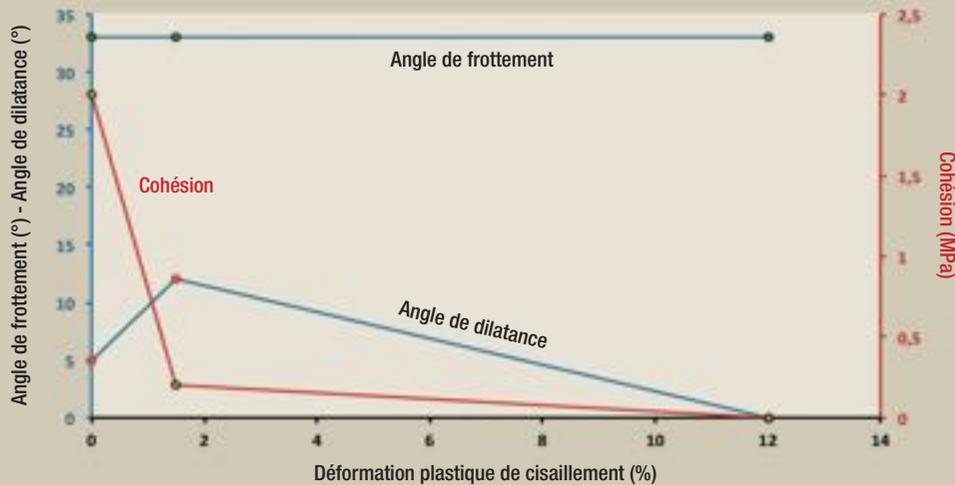
Mécanisme	Outils de calcul	Critères d'interprétation
	Approche discontinue	
Mécanisme discret d'instabilité des blocs.	<ul style="list-style-type: none"> • Modèles aux éléments discrets. • Approche d'équilibre limite. 	<ul style="list-style-type: none"> • Définition d'un coefficient de sécurité. • Contraintes et/ou déformations dans les boulons. • Contraintes dans les structures de soutènement/revêtement.
	Approche continue	
Mécanisme de rupture fragile par écaillage.	<ul style="list-style-type: none"> • Approche continue avec un comportement élastique linéaire. • Code aux éléments finis, différences finies, éléments frontières... 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse du champ des contraintes.
	Approche continue	
Mécanisme associé à une déformation généralisée en cisaillement du massif.	<ul style="list-style-type: none"> • Approche continue non-linéaire. • Modèle de comportement "pertinent" dans le domaine des moyennes et grandes "déformations" i.e au-delà du pic de résistance. • Code aux éléments finis ou différences finies. 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse du champ des déformations de cisaillement. • Analyse des déplacements. • Estimation des efforts et/ou déformations dans les boulons. • Estimation des contraintes dans les structures de revêtement et de soutènement.

En fonction de l'état des contraintes découlant d'un premier calcul élastique, relativement aux critères proposés ici, il est ainsi possible de donner un premier avis sur le risque de dégradation et d'instabilité localisée du massif. Ces domaines sont les suivants :

- Un domaine dans lequel la roche est élastique et non-endommagée (Domaine A figure 22). Si le champ des contraintes reste dans ce domaine, le comportement du massif est pérenne.
- Un domaine dans lequel la roche est endommagée (Domaine B figure 22), mais l'état de confinement est suffisant pour limiter la propagation de la micro-fissuration. La roche est susceptible, en fonction de la nature du matériau, de présenter un comportement différé, mais cette dégradation différée du massif se stabilisera.
- Un domaine dans lequel la roche est endommagée, mais sous un état de confinement insuffisamment élevé pour pouvoir annihiler le mécanisme de dégradation et fissuration (Domaine D figure 22). Si l'état des contraintes local se situe dans ce domaine, le matériau est susceptible, en fonction de ses caractéristiques géologiques et géotechniques, de développer un mécanisme d'écaillage à court ou long terme et surtout de présenter un comportement différé qui conduira à une rupture localisée de la matrice rocheuse. En d'autres termes, cette zone sera le siège, un jour ou l'autre, d'une fracturation de la roche ; fracturation qui se traduira en fonction de la nature du matériau et, en particulier, de sa résistance

ÉVOLUTION DES PARAMÈTRES DE PLASTICITÉ

en fonction de la déformation plastique de cisaillement, décrivant le comportement post-pic de la roche



23

- en compression simple, de sa densité de fracturation ou encore de son indice de fragilité, par un écaillage ou le développement de fractures sensiblement parallèles au parement.
 - Enfin, un domaine dans lequel la roche présente un état de contraintes situé au-delà du critère de rupture maximale (Domaine C, figure 22 - zone théoriquement inaccessible). Le volume de roche présentant un tel état des contraintes est donc susceptible d'entrer en rupture à très court terme, soit par écaillage, soit par cisaillement.
- Il est clair que cette démarche, qui consiste à fournir un modèle conceptuel relativement simple, pour interpréter des calculs d'ouvrages souterrains

creusés dans les roches, a pour finalité première d'aider l'ingénieur dans son analyse, en valorisant des modélisations relativement faciles à réaliser, pouvant être rapidement menées avec des logiciels comme Examine2D, par exemple.

L'utilisation de modélisations continues non-linéaires peut être illustrée par les calculs récemment menés dans le cadre des études de la caverne de Tehri, en Inde. Cette caverne, de 26 m de portée, est destinée à abriter 4 turbines pompes, dans le cadre d'un projet de suréquipement de l'aménagement de Tehri. Le maître d'ouvrage, THDC, a confié à un groupement composé du français Alstom et du constructeur de génie civil indien HCC, la construction de ce nouvel aménagement.

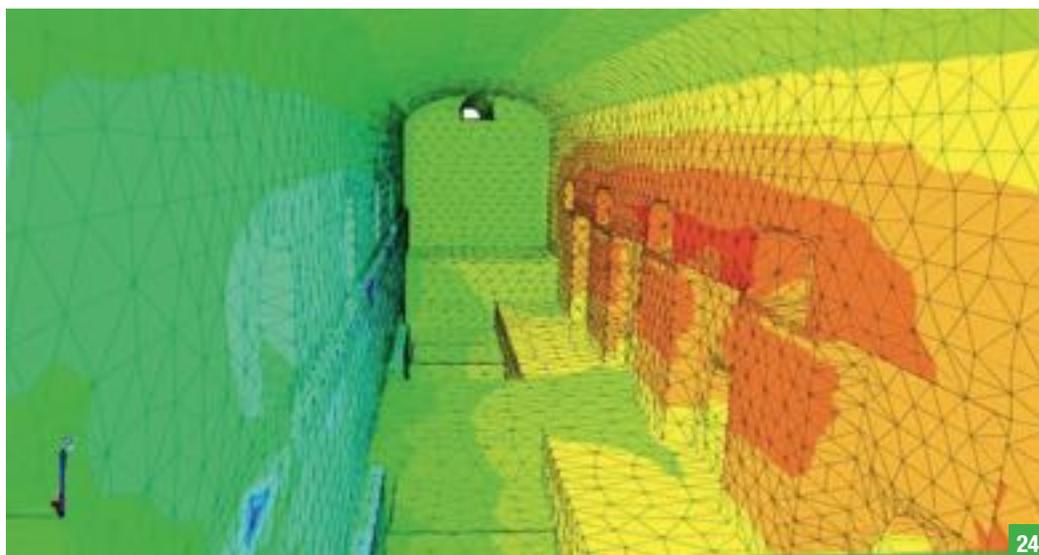
EDF intervient en sous-traitance de HCC pour les études de génie civil. Cette caverne est creusée dans un massif composé de phyllite, sous une couverture de l'ordre de 450 m. S'agissant d'un matériau anisotrope, sa résistance en compression simple sur échantillon varie entre 35 et 50 MPa,

23- Évolution des paramètres de plasticité en fonction de la déformation plastique de cisaillement, décrivant le comportement post-pic de la roche.

24- Vue 3D de l'intérieur de la caverne de Tehri et isovalues des déplacements horizontaux (Calculs Flac3D).

23- Changes in plasticity parameters vs. plastic shear deformation, describing post-peak behaviour of rock.

24- 3D view of the inside of Tehri cavern and horizontal displacement isovalues (Flac3D calculations) - India.



24

Portée (m)

25- Justification du soutènement par boulons pour assurer la stabilité de la caverne de Tehri, sur la base des modélisations.

26- Illustration de l'effet de la densité du boulonnage sur la prédiction du comportement de la caverne.

25- Design calculations for support using bolts to ensure stability of the Tehri cavern, on the basis of modelling.

26- Illustration of the effect of bolting density on predicted cavern behaviour.

en fonction de l'orientation de la sollicitation.

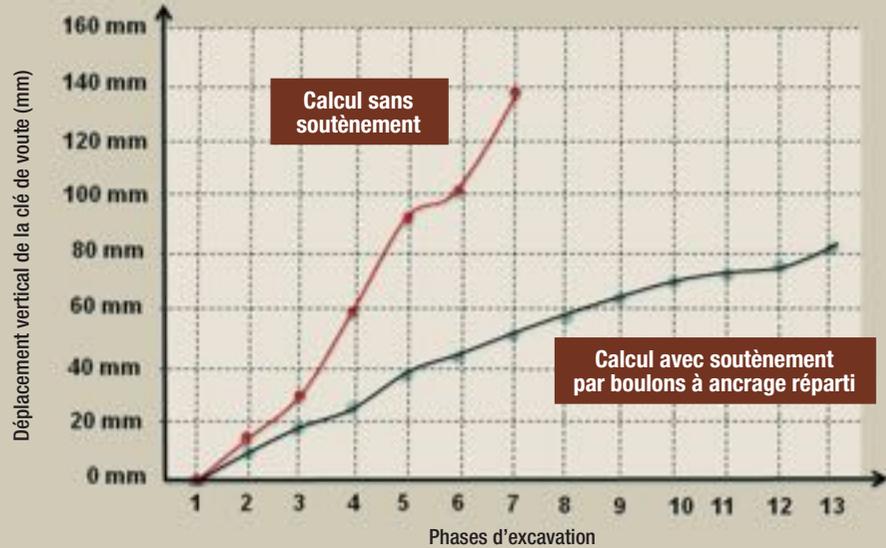
La conception de la caverne, orientée favorablement par rapport à la schistosité, prévoit la mise en place d'un soutènement souple, composé de béton projeté et de boulons. Avec de telles contraintes, le massif rocheux est susceptible de franchir son critère de résistance maximale et donc de travailler dans le domaine post-pic.

Des modélisations 2D et 3D ont été réalisées, en considérant un modèle de comportement à double mécanisme plastique de cisaillement ; un mécanisme isotrope associé à un mécanisme de plasticité orienté, traduisant l'effet de la schistosité (Modèle Ubiquitous-Joint proposé avec les logiciels Flac2D et Flac3D utilisés pour ces calculs). En plus de cette anisotropie, une attention est portée à la prise en compte du comportement post-pic, en faisant évoluer de manière simultanée l'angle de dilatance et la cohésion, afin de passer progressivement d'une résistance de pic à une résistance résiduelle respectant un critère purement frottant. Le respect de ces critères permet en particulier de mieux reproduire l'effet stabilisateur d'un soutènement par boulons scellés.

Le soutènement préconisé au stade des études pour la caverne principale correspondait à un système de boulonnage à ancrage réparti, de diamètre 32 mm

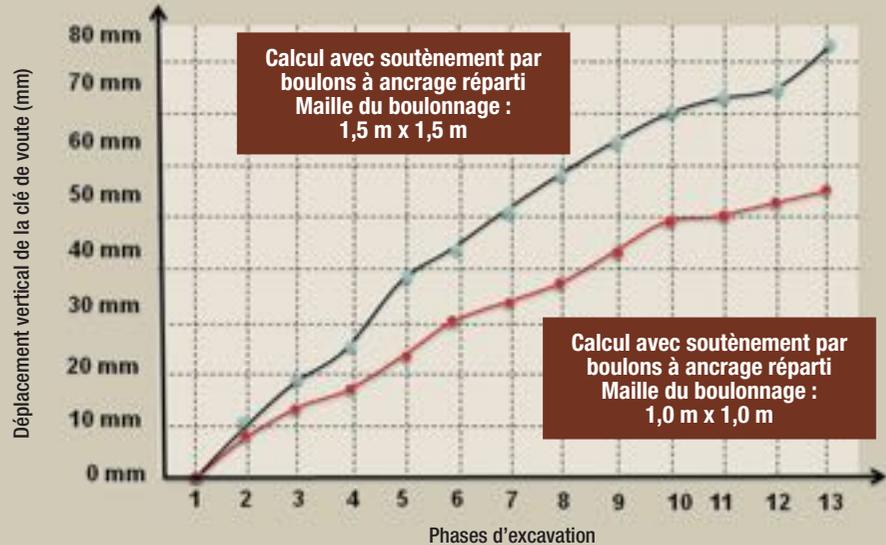
© DR 25

JUSTIFICATION DU SOUTÈNEMENT PAR BOULONS pour assurer la stabilité de la caverne de Tehri, sur la base des modélisations



© DR 26

ILLUSTRATION DE L'EFFET DE LA DENSITÉ DU BOULONNAGE sur la prédiction du comportement de la caverne



© DR

et d'espacement 1,5 m x 1,5 m, de longueur 8 m.

Ce soutènement a pu être justifié à partir des modélisations non-linéaires avec le modèle rhéologique brièvement décrit précédemment, comme l'illustrent les figures 25 et 26 présentant la prédiction des déplacements en clé de voûte, pour le cas avec et sans soutènement.

L'effet du boulonnage est clairement visible sur ce type de résultat, qui montre qu'en l'absence de soutènement la stabilité générale de la caverne ne peut être démontrée.

Une peau de béton projeté était associée, non prise en compte dans les

calculs compte tenu du risque de fissuration de celui-ci durant le creusement de la caverne.

Il est évident pour l'ingénieur que ce type d'ouvrage ne pouvait être creusé sans soutènement, mais la justification par un calcul numérique de l'apport du boulonnage passif n'est pas aisée et nécessite en particulier une modélisation rhéologique adaptée du massif rocheux, traduisant en particulier le comportement de ce dernier dans le domaine des moyennes et grandes déformations, donc dans le domaine post-pic. La modélisation joue alors pleinement son rôle d'outil d'aide à la conception.

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LA CONCEPTION DES SOUTÈNEMENTS

De par la géométrie et les dimensions de ces ouvrages, la conception des soutènements des grandes cavernes souterraines implique nécessairement de s'appuyer sur le concept de Nouvelle Méthode Autrichienne (NATM). Il est en effet indispensable de faire participer le massif à sa propre tenue, en permettant le transfert des contraintes induites par le creusement autour de l'ouvrage. Le soutènement ne peut alors se contenter de jouer un rôle de confinement, mais il doit aussi renforcer le massif rocheux. ▷

Dans ces conditions, le soutènement type et le mieux adapté correspond à un boulonnage à ancrage réparti associé à du béton projeté d'épaisseur relativement réduite au regard des dimensions des ouvrages.

De manière générale, la peau de béton projeté fibré ou renforcée peut avoir une épaisseur limitée en deçà d'une vingtaine de centimètres, car sa fonction est d'assurer un léger confinement entre les boulons. Outre cet effet local, ce béton projeté ne contribue à la stabilité générale de l'ouvrage qu'en limitant la désorganisation et les mouvements des blocs rocheux entre les boulons. La prise en compte de ce béton projeté de type 2 au sens de l'AFTES, dans la démarche de calcul, reste délicate, et dépend de la nature du terrain, du comportement de celui-ci et des mécanismes de ruine potentiels, et des conditions d'adhérence du béton projeté lui permettant de travailler de manière optimale en cisaillement direct [Barrett 1995].

Selon la configuration rencontrée, une réflexion doit être menée sur le rôle effectif du béton projeté, en gardant à l'esprit que celui-ci est susceptible de se fissurer localement durant le creusement de l'ouvrage, en particulier durant la descente du stross, et qu'une intervention de confortement peut s'avérer difficile si la hauteur sous la clé de voûte est devenue importante. La longueur des boulons n'est pas nécessairement grande relativement aux dimensions de la caverne. Leur détermination dépend, là encore, en premier lieu, du mode de comportement du massif (continu ou discontinu). Plus que la longueur, il paraît pertinent de jouer sur la densité du boulonnage, qui impacte directement le renforcement apparent du massif apporté par ce soutènement. Un allongement des boulons peut en particulier se justifier par l'existence éventuelle de dièdres rocheux de grandes dimensions en

longpan des ouvrages. Les longueurs généralement mises en œuvre peuvent varier de 5 m à 9 m, cohérentes en première approximation avec la relation $L(m) = 2 + 0,2 \times \text{Portée}(m)$.

De manière générale, ce qui doit caractériser ces soutènements est leur ductilité et déformabilité.

Ces ouvrages, de grandes dimensions, dont la stabilité générale ne peut être assurée que par une participation mécanique du massif, peuvent subir en phase de creusement des déformations significatives, nécessitant la mise en œuvre de soutènements souples.

Ainsi, la conception largement présente sur le parc des ouvrages EDF, qui consistait à mettre en place avant creusement du stross un revêtement en béton coffré en voûte de la caverne, ne paraît pas adaptée à des terrains potentiellement déformables. Cette structure rigide disposée en partie haute de la caverne est susceptible, lors du creusement du stross, de concentrer les contraintes, subissant des moments fléchissant éventuellement importants, et nécessitant donc un dimensionnement difficile.

Les graphes présentés figures 18 et 19 intègrent implicitement ces considérations générales, en supposant que seul un soutènement béton projeté+boulons est raisonnablement envisageable et, qu'en fonction de l'indice Q de Barton et de l'état des contraintes initiales, la convergence acceptable est limitée entre 0,4% et 1%.

CONCLUSION

Les grandes cavernes souterraines sont des ouvrages spécifiques, pour lesquels la justification de la stabilité à court et long terme nécessite une bonne compréhension du comportement du massif. En effet, de par leur forme et leurs dimensions, la stabilité générale ne peut être raisonnablement assurée que par une participation significative

du massif lors de la réorganisation des contraintes dans le terrain. Ces ouvrages ne peuvent donc être creusés dans des terrains de qualité médiocre, car les techniques de soutènement disponibles restent limitées et basées essentiellement sur la mise en œuvre de boulons et d'une peau de béton projeté. En se référant à l'indice Q de Barton comme caractérisation du massif, la faisabilité d'une caverne n'est démontrée que pour des valeurs supérieures à $Q = 0,8$ à 1 , en fonction bien entendu de la profondeur, donc de l'état des contraintes initiales.

Cet article traite de manière générale de la conception des grandes cavernes souterraines hydroélectriques telle qu'appréhendée à EDF, au travers des ouvrages réalisés au cours des cinquante dernières années, et des études plus récentes menées sur des projets réalisés ou en cours de réalisation. Un focus est mis sur l'importance des modélisations dans cette démarche de conception, soulevant en particulier l'importance de bien identifier les attendus des calculs, les critères d'interprétation, ou encore les modèles rhéologiques mis en œuvre. De l'exemple cité sur la caverne de Tehri, il ressort que le choix des modèles de comportement dans une modélisation numérique est fondamental pour pouvoir justifier la conception et le dimensionnement des soutènements par boulons et béton projeté. Plus que répondre à des questions, cet article montre que des réflexions doivent être poursuivies et partagées afin de mieux comprendre le comportement de ces grands ouvrages et les mécanismes mis en œuvre, de mieux calculer et modéliser ces structures et en particulier l'interaction entre le massif et les soutènements, de mieux préciser les critères d'interprétations et de conception, ou encore de mieux prendre en compte l'effet du boulonnage et du béton projeté. □

Références

- AFTES – GT30 (2011) - Conception et Justification du Boulonnage – Réflexions et avancées du groupe de travail n°30 de l'AFTES - Congrès International de l'AFTES – Espaces Souterrains de demain – Lyon 2011.
- O.Balmer (2013) - Nant de Drance – Pumped storage plant in the heart of the Alps - World Tunnel Congress 2013 Geneva. Underground-The way to the future. G. Anagnostou & H. Ehrbar (eds).
- S.V.L.Barrett & D.R. McCreath (1995) - Shotcrete Support Design in Blocky Ground: Towards a Deterministic Approach - Tunnelling and Underground Space Technology 10 - 1995 - pp 79-89.
- M.S. Diederichs (2002) - Keynote – Stress induced accumulation and implications for hard rock engineering - Hammah R. Bowden WF. Curran J. Telsnicki. M (eds). Proc. NARMS 2002. Toronto. University of Toronto Press - 2002 - pp. 3-14.
- M.S. Diederichs & C.D. Martin (2010) - Measurements of spalling parameters from laboratory testing - Rock mechanics in civil and environmental engineering, Zhao, Labiouse, Dudt and Mathier (eds). Taylor & Francis Group, London.
- A. Kleine (2008) - Modélisation numérique du comportement des ouvrages souterrains par une approche viscoplastique, thèse de doctorat. INPL Nancy.
- F. Laigle & B. Boymond (2001) - CERN-LHC Project – Design and excavation of Large-Span Caverns at Point 1 - ISRM Regional Symposium – Eurock 2001 – Espoo – Finland – 3-7/06/2001.
- F. Laigle, F. & B. Boymond & C. Guittin & F. Saive (2000) - CERN LHC1. Les études et débuts des excavations du lot 1 - *Tunnels et Ouvrages Souterrains*. N° 157. Janvier-Février 2000 - Conception des grandes cavernes souterraines. Apport des modélisations numériques pour le projet CERN-LHC1.
- F. Laigle (2001) - 1^{re} Conférence Internationale Albert Caquot - Octobre 2001 - Paris - Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
- F. Laigle (2004) - Modèle conceptuel pour le développement de lois de comportement adaptées à la conception des ouvrages souterrains. Thèse de doctorat, École Centrale de Lyon.
- G. Seingre & T. Ihly (2011) - Centrale de pompage-turbinage Nant de Drance. Un grand projet hydroélectrique souterrain dans les Alpes - Congrès International de l'AFTES – Espaces Souterrains de demain – Lyon 2011.
- J. Yamatomi et al. (1999) - The Super-KAMIOKANDE and subsurface space utilization at Kamioka mine - Proceedings of 9th International Congress on Rock Mechanics, Paris.

ABSTRACT

LARGE UNDERGROUND CAVERNS RESEARCH ON THEIR BEHAVIOUR AND DESIGN

FRANÇOIS LAIGLE, EDF

Large caverns are often involved in hydroelectric power projects, but are also used for military, scientific and storage applications. They differ from linear underground structures such as tunnels and galleries not only through their size and shape, but also through their behaviour and design. Based on a global inventory of the most representative structures of this type executed in the past 50 years, the expert outlines state-of-the-art practice in this area and presents the results of his expertise and research. □

GRANDES CAVERNAS SUBTERRÁNEAS REFLEXIONES SOBRE SU COMPORTAMIENTO Y SU DISEÑO

FRANÇOIS LAIGLE, EDF

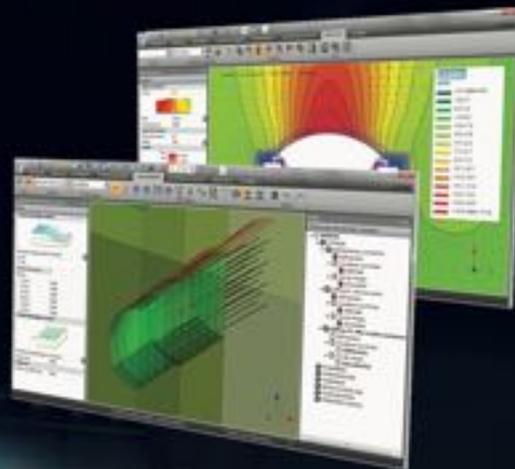
A menudo asociadas a las obras hidroeléctricas, aunque también utilizadas con fines militares, científicos o de almacenamiento, las grandes cavernas se distinguen de las obras subterráneas lineales, como los túneles y las galerías, no sólo por sus dimensiones y su geometría, sino también por su comportamiento y su diseño. Partiendo de un inventario mundial de las obras de este tipo más representativas realizadas en los últimos 50 años, el experto esboza el estado de la técnica en la materia y expone el resultado de su experiencia y sus reflexiones. □

CESAR

Code aux Éléments Finis
pour le Génie Civil

Nouvelle version 6

pour toutes vos analyses 2D
ou 3D de tunnels et ouvrages
souterrains...



Téléchargez une version d'évaluation
sur www.cesar-lcpc.com



Editeur de logiciels pour le Génie Civil

8 quai Bir-Hakeim 94410 Saint-Maurice
Tél.: +33 1 49 76 12 59

www.itech-soft.com contact@itech-soft.com



CAISSE NATIONALE DES ENTREPRENEURS DE TRAVAUX PUBLICS

Au service de la Profession des Travaux Publics

Nos missions :

assurer le service des congés payés auprès des salariés des Travaux Publics
procéder au remboursement des indemnités de chômage-intempéries versées par les employeurs de
la Profession.

La CNETP regroupe **7 400 entreprises** de Travaux Publics et assure le calcul et le versement de
prestations dues à près de **270 000 salariés**.

Nos coordonnées :

Par courrier :

31 rue le Peletier - 75453 PARIS CEDEX 09

Par Internet : www.cnetp.fr

Par mail : sur www.cnetp.fr, lien [nous contacter](#)

Par téléphone :

pour les entreprises : 01.70.38.07.70

pour les salariés : 01.70.38.07.77

Serveur vocal (24h/24) : 01.70.38.09.00





UTILISATION DES EXPLOSIFS DANS LES TRAVAUX SOUTERRAINS URBAINS. EXEMPLES À MONACO

AUTEUR : LOÏC THÉVENOT, DIRECTEUR DÉPARTEMENT TRAVAUX SOUTERRAINS, EIFFAGE INFRASTRUCTURES

DISPOSITIONS PRISES POUR RÉALISER DES OUVRAGES SOUTERRAINS À L'EXPLOSIF EN MILIEU URBAIN. EXEMPLES DU TUNNEL DESCENDANT OUEST ET DU TROISIÈME POSTE SOURCE DE LA PRINCIPAUTÉ DE MONACO.

DE L'UTILISATION DES EXPLOSIFS DANS LES TRAVAUX SOUTERRAINS URBAINS

LE CONTEXTE

La rareté du foncier en zone urbaine est de plus en plus exacerbée. Alors, quoi de plus naturel que de chercher de l'espace, ou plutôt du volume, sous la ville. Cette approche, autrefois réservée aux seules infrastructures de type métro ou parking souterrain, situées dans les centres villes d'importance, s'étend désormais aux zones péri-urbaines où la concentration de la population

entraîne de facto une valorisation du foncier. Les prochaines lignes de métro du Grand Paris seront souterraines bien que majoritairement situées en dehors de la capitale. Cependant, toutes les métropoles ne comptent pas un sous-sol propice à l'excavation avec des moyens mécaniques comme le tunnelier, qu'il soit à pression de terre, de boue ou de type roche dure.

L'utilisation du tunnelier apporte de nombreux avantages en termes de vitesse de creusement mais n'est pas toujours la plus appropriée. Compte tenu du coût d'un tunnelier, de son

délai de fabrication rarement inférieur à un an, des restrictions pesant sur le tracé (un tunnelier ne braque pas) et de l'adéquation nécessaire entre les conditions de sol rencontrées et les caractéristiques techniques de la machine, son utilisation est réservée aux seuls ouvrages linéaires d'importance qui permettent d'amortir la machine. L'importance des travaux préparatoires avant le creusement autorise la fabrication de la machine en temps masqué. C'est le cas des lignes de métro souterraines où les réalisations préalables des stations, notamment celles d'où

la machine démarre, dégagent une période suffisamment longue mise à profit pour la fabrication du tunnelier avec assez peu d'impact sur le planning global de l'opération.

Tous les ouvrages, même récents, ne sont cependant pas compatibles avec l'utilisation d'un tunnelier. Le concepteur se tourne alors vers des techniques dites conventionnelles faisant appel à des moyens mécanisés comme la machine à attaque ponctuelle ou encore le minage avec des explosifs. L'utilisation de l'explosif en zone urbanisée semble marquer le pas auprès des décideurs, en raison peut-être de sa méconnaissance, alors même qu'elle est une réponse technique mais également économique adaptée à de nombreux projets urbains. Lyon et la Principauté de Monaco sont deux exemples significatifs de sites où des ouvrages majeurs (tunnel en site propre de la Croix Rousse, tunnel descendant Ouest de Monaco) viennent récemment d'être réalisés à l'aide d'explosif avec succès.

LE TUNNEL DESCENDANT OUEST

Le tunnel descendant Ouest de Monaco est un tunnel routier long de 1 700 m. Il permet de relier directement l'entrée de la principauté (Beausoleil) en sortie de l'autoroute A8 au quartier de Fontvieille quelques 100 m plus bas, sans avoir à encombrer le centre-ville. Le tracé du tunnel opère ainsi une grande boucle dans le tréfonds français afin de respecter une pente maximale de 6% (figure 2). Sa section excavée est de 88 m² environ et le rayon de courbure minimal de 200 m.

Le profil en travers de l'ouvrage est composé d'une galerie latérale de 1,50 m, de 2 trottoirs, de 2 bandes dérasées de 2,10 et 0,75 m, et d'une voie de circulation de 3,25 m.

1- Vue de l'accès au chantier du troisième Poste Source.

2- Tracé du tunnel descendant (en rouge).

3- Vue de la tête amont du tunnel descendant Ouest de Monaco (photo prise au-dessus de l'entrée du tunnel).

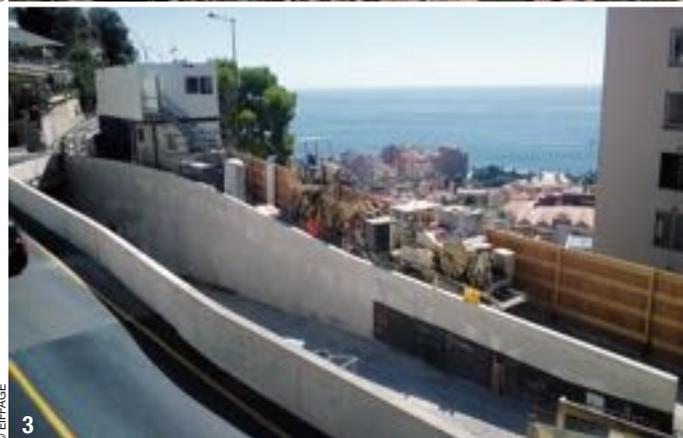


© DR
2

1- View of access to the third source substation project.

2- Layout of the descending tunnel (in red).

3- View of the front portal of the West Monaco descending tunnel (photo taken above the tunnel entrance).



© EIFFAGE
3

La majeure partie du projet présente un dévers de 2,5% (vers la gauche en regardant le sens de circulation - de l'amont vers l'aval).

Les terrains rencontrés sont à dominante marno-calcaire avec des résistances à la compression supérieures à 50 MPa.

La couverture maximale (hauteur de terrain séparant l'ouvrage de la surface) est de 360 m avec une valeur moyenne de 150 m.

Le tunnel a été majoritairement excavé à l'explosif (1 424 m sur 1 700 m).

Les travaux ont été réalisés depuis les têtes aval et amont de l'ouvrage, toutes deux situées à proximité immédiate d'immeubles d'habitation (figure 3). L'hôpital de la Princesse Grace domine la tête aval et le portail de la tête amont se situe juste sous les serres du jardin exotique de la Principauté.

Le creusement proprement dit du tunnel a commencé le 30 juillet 2013. Le premier tir de mine a eu lieu 8 mois plus tard après une première phase importante de consolidation par injection des amas de blocs rocheux rencontrés à la tête aval.

L'excavation s'est ensuite poursuivie avec beaucoup de précaution à l'abri de voûtes parapluies et avec le recours à du boulonnage de front sur les 120 premiers mètres. Pendant toute cette première période (d'août 2013 à mai 2014), le chantier a suivi le rythme diurne de la ville et de nombreux facteurs, pas de bruit en dehors des heures de bureau, limitations de circulation, activité ultra restreinte au mois d'août pendant la période touristique, ont réduit les efforts de productivité du chantier. Ce n'est qu'à partir du mois de mai 2014 que le chantier a pu prendre un rythme de production plus conforme aux ambitions légitimes de la direction de chantier. Le creusement s'est achevé le 4 août 2015. Le délai contractuel du marché imposait, pour être respecté, de travailler 24h sur 24 au moins cinq jours par semaine dès lors que les 120 premiers mètres de galerie étaient creusés.

LE TROISIÈME POSTE SOURCE

En raison de l'augmentation de la consommation d'électricité en Principauté de Monaco, le Gouvernement et la Société Monégasque de l'Électricité et du Gaz (SMEG) ont décidé de compléter leurs installations par la création d'un troisième Poste Source.

Compte-tenu de l'emprise nécessaire et de l'indisponibilité de terrains en surface, le Service des Travaux Publics



4
© EIFFAGE

de Monaco, Maître d'Ouvrage de l'opération, a décidé de construire ce poste intégralement en souterrain, à partir d'un ancien tunnel ferroviaire désaffecté entre la gare et le port.

Le Poste Source est constitué de 3 transformateurs logés dans des alvéoles ; ils permettent de distribuer l'électricité sous une tension de 20 kV dans les galeries techniques de la Principauté de Monaco à partir d'une alimentation sous une tension de 63 kV fournie par RTE.

La construction du poste se fait totalement en souterrain, dans le calcaire du jurassique, à une distance latérale de plus de 100 m de la falaise et à une

profondeur comprise entre 40 à 60 m (figure 1).

Les travaux de terrassement à réaliser en souterrain comprennent la création de trois alvéoles de longueur 17 m et d'environ 120 m² de section, d'une galerie d'accès de 112 m très élancée mesurant 12,50 m de hauteur pour 6,00 m de largeur, d'un quai de déchargement des équipements de longueur 55 m et de 140 m² de section, dans le prolongement de la galerie d'accès et perpendiculairement aux alvéoles, de deux petites galeries d'environ 7 m² ; la première, de longueur 32 m ayant une pente descendante de 34% permet le raccordement en amont du poste au réseau 63 kV et la seconde, de 100 m de longueur, permet le raccordement en aval aux galeries techniques préexistantes (figure 4).

Les travaux comprennent également l'approfondissement de 3 m du radier du tunnel ferroviaire désaffecté sur une longueur de 50 m.

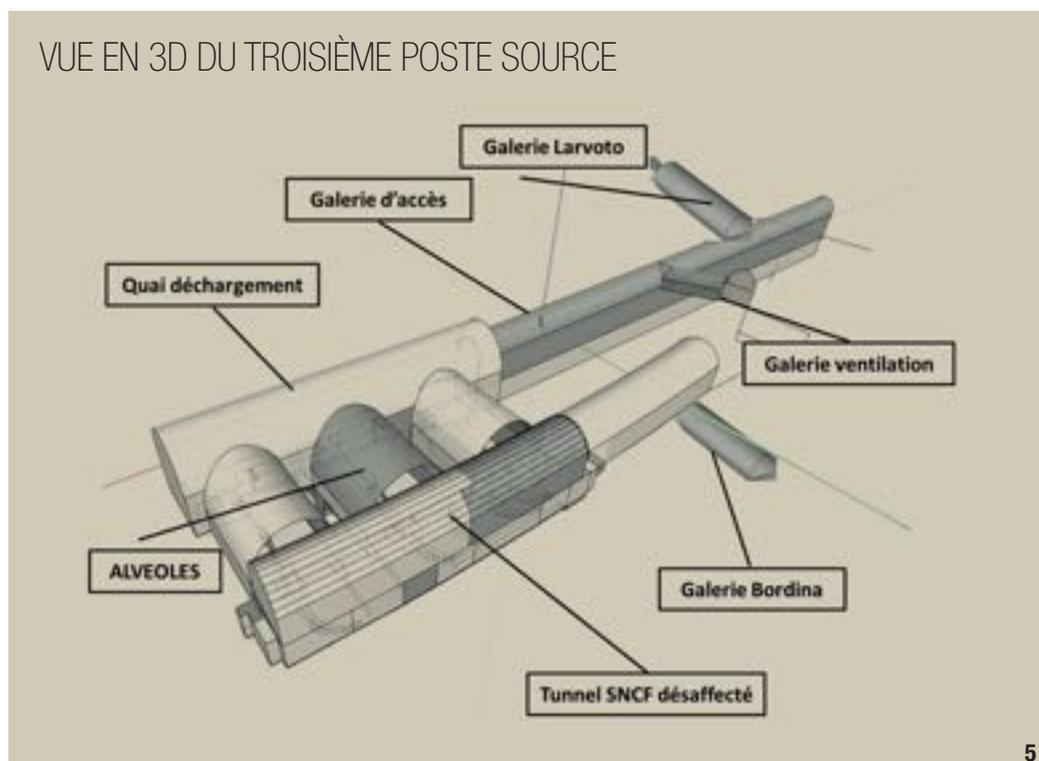
Seule une vue en 3D (figure 5) permet d'appréhender rapidement la complexité de ce labyrinthe souterrain de plus de 30 000 m³ coïncée entre la gare SNCF souterraine de Monaco l'église de la Sainte-Dévote et dominée à son sommet par certaines des villas les plus luxueuses de la Principauté. Des dispositions spécifiques ont ainsi dues être prises dans tous les domaines susceptibles d'interférer avec l'environnement du chantier (figure 6).

4- Vue de la zone dite du quai de déchargement, pendant l'excavation.

5- Vue en 3D du troisième poste source.

4- View of the so-called unloading quay area, during excavation.

5- 3D view of the third source substation.





6

© EIFFAGE

DISPOSITIONS PROPRES À CES OUVRAGES EXCAVÉS À L'EXPLOSIF, POUR ATTÉNUER LA GÊNE AUX RIVERAINS ET LES PERTURBATIONS SUR L'ENVIRONNEMENT

Nuisances sonores

Le bruit demeure une des contraintes principales de cette opération.

Les horaires de travail ont été adaptés lors du démarrage du creusement sur chacune des têtes du tunnel. Sur les 120 premiers mètres de tunnel le chantier ne travaillait que sur deux postes de 8 heures entre 6 heures et 22 heures. Au-delà de 120 m de galerie, les équipes ont pu tourner en trois postes 24/24 moyennant la mise en place :

→ D'une insonorisation du système de ventilation du tunnel situé sur la plateforme extérieure (ventilateur installé dans un container calfeutré). Les ventilateurs utilisés représentent une puissance installée de 150 kW et débitent 80 m³/s.

→ D'une insonorisation complète du tunnel afin de réduire le bruit à son minimum durant le poste de nuit (22h-6h), et permettant de confiner les engins à l'intérieur du tunnel (figure 7).

→ D'une adaptation des tirs de mine, autorisés seulement entre 8h et 20h30, avec un cycle d'avancement calé sur une durée de 12h pour le

6- Vue de l'environnement très dense du chantier (photo prise depuis le parvis de la gare SNCF).

6- View of the very dense site environment (photo taken from the railway station square).

tunnel et en fonction des créneaux de tir alloués par la SNCF sur le poste source.

→ Stockage temporaire en tunnel des déblais du tir du soir (laminage), l'évacuation nocturne étant rendue impossible.

Nuisances vibratoires

Les ouvrages existants (immeubles, maisons, murs de soutènements en pierre, etc.) situés à proximité du tracé ont fait l'objet, dans le marché, d'une classification de sensibilité aux vibrations. En tout, près de 50 ouvrages par chantier ont été recensés, classés de sensibles à très sensibles aux vibrations générées par les tirs de mine, mais aussi par le brise-roche hydraulique ou

encore les marteaux du robot de foration. Un dispositif enregistrant les vibrations a été systématiquement mis en œuvre sur les avoisinants. Le type de dispositif ainsi que son emplacement sur l'ouvrage sont définis en accord avec le maître d'œuvre et le bureau de contrôle. Des capteurs enregistrent les éventuelles vibrations et transmettent les résultats à une centrale d'acquisition, résultats transférés automatiquement à un téléphone portable via GSM ou directement par courriel.

Le dispositif d'auscultation est adapté quotidiennement en fonction de l'avancement du chantier.

La technique du tir séquentiel permet de limiter la charge instantanée d'explosif à quelques kilogrammes de façon à réduire la transmission des vibrations dans le sol. Le plan de tir conçu sur site était adapté en fonction des résultats obtenus quant aux vibrations.

Le bureau d'études Idtech, spécialisé dans les contrôles sismiques, procédait à l'analyse des enregistrements des vibrations au titre du contrôle externe du groupement.

Limites de déplacement des ouvrages

Avant le démarrage des travaux, l'ensemble des bâtis environnants a été équipé de cibles topographiques afin de détecter l'amorce de tous déplacements.

Il a été procédé, pendant toute la durée de l'excavation du tunnel, à des mesures systématiques portant sur le contrôle des tassements superficiels du sol en surface et sur les immeubles ainsi qu'à des relevés précis et détaillés au moyen de fissuromètres préalablement installés.

Ce dispositif de mesure pouvait être renforcé localement par l'installation d'inclinomètres et de tassomètres, comme cela a été le cas lors du passage du tunnel à proximité de l'immeuble des Caroubiers (immeuble de 12 étages).

Les seuils de mouvements enregistrés en surface n'ont pas dépassé les valeurs définies par le marché.

Sujétion particulières liées à la livraison et à l'utilisation des explosifs

L'exiguïté des emprises a conduit le chantier à faire le choix d'utiliser des explosifs encartouchés plutôt que des émulsions pompées à front.

Ces dernières, contrairement à l'utilisation des explosifs encartouchés, nécessitent l'implantation de hangars pour abriter les composants et les matériels nécessaires à la fabrication et au pompage des explosifs à front.

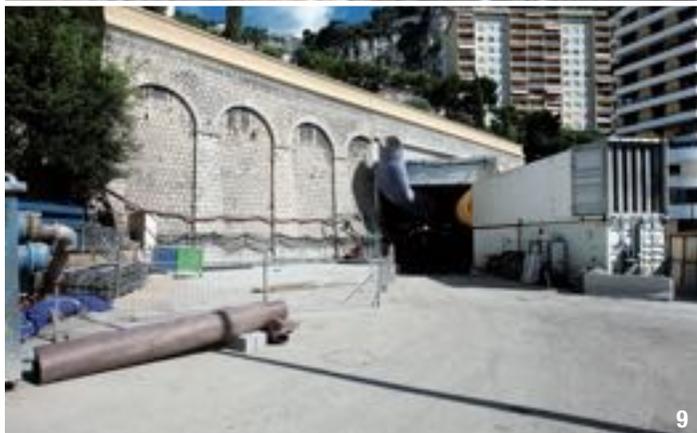
La consommation quotidienne moyenne d'explosif du chantier du tunnel avoisinait les 1300 kg d'explosif encartouché type Emulstar, livré par Epc France. ▷



7



8



9



10

© EIFPAGE

Le chantier, n'ayant pas de dépôt, consommait les explosifs livrés dans la journée, chaque tir consommant chacun de 300 kg à 350 kg d'explosif. Les explosifs étaient livrés par camion et entreposés directement dans un container dédié situé à l'intérieur de la galerie. Les cartons de 25 kg contenant les cartouches d'explosif étaient ensuite transférés dans un deuxième container au fur et à mesure des besoins pour préparer les précharges nécessaires au chargement du prochain tir (la volée). Les précharges réalisées étaient ensuite transportées directement au front de taille pour être introduite dans les mines (figure 8).

L'ensemble de ces opérations a donc été réalisé dans un périmètre à accès restreint sans interaction avec l'extérieur du tunnel.

Les personnels de l'entreprise chargés du minage sont tous habilités par l'entreprise. Les personnels responsables de la mise en œuvre des explosifs ont reçu une formation spécifique. Ils sont tous titulaires du certificat de déposé au tir avec options « travaux en souterrains » et « tir à amorçage électronique ». Les autres compagnons ont suivi une formation spécifique d'aide-boutefeu axée sur la manipulation des explosifs dans le strict respect des règles de sécurité.

En matière de sûreté, une demande est faite auprès de la préfecture du domicile de chaque mineur en vue de délivrer une habilitation préfectorale à l'utilisation des explosifs qui garantit la moralité du titulaire. Dans le cas, heureusement exceptionnel, de refus d'habiliter par le préfet, le personnel doit être écarté du chantier.

La gestion des imbrulés est un problème particulièrement sensible en milieu urbain car contrairement aux

chantiers situés dans des zones peu peuplées et non soumises à des horaires stricts de tir, les imbrulés ne peuvent être tirés indépendamment de la volée suivante. Ils doivent donc pouvoir être repris par le fournisseur qui les détruira dans ses installations appropriées. Une vigilance particulière doit être portée sur la présence d'imbrulés dans les déblais de telle sorte qu'ils ne puissent être mis en décharge. Le chantier avait positionné un observateur chargé de s'assurer qu'aucune cartouche imbrulée ne puisse être chargée par mégarde dans les camions de transport du déblais.

Ventilation et gaz de tir

L'utilisation des explosifs génère des gaz de tir en quantité importante, de l'ordre de 1 m³ par kilogramme d'ex-

plosif mis à feu. Ces gaz sont dilués après le tir dans l'air ambiant du tunnel puis évacués vers l'extérieur de la galerie grâce au système de ventilation (figure 9).

L'opération de ventilation dure environ trente minutes de telle sorte que l'air présent dans le tunnel puisse être intégralement renouvelé avant le retour des mineurs.

Une attention particulière doit être portée sur le positionnement de la conduite par laquelle les gaz s'échappent. Il faut que celle-ci soit orientée vers le haut ou dans une direction n'affectant pas les bâtiments avoisinants. Le chantier tient compte des vents dominants.

Traitement de l'eau

Le rejet des eaux de chantier en ville n'a pas été, sous l'angle environne-

7- Vue de la porte antibruit fermant le tunnel.

8- Vue du front de taille du tunnel pendant les opérations de chargement du tir.

9- La conduite bleue rejette les gaz viciés vers le haut. Isolation phonique du ventilateur dans le container blanc.

10- Vue de la mini station de traitement des eaux du tunnel descendant Ouest.

BONNES PRATIQUES

Il existe deux familles d'explosifs civils disponibles en France pour les chantiers de travaux publics : les dynamites et les émulsions à base de nitrate. Les dynamites sont conditionnées en cartouche, les émulsions peuvent être conditionnées sous forme de cartouche ou bien être fabriquées directement sur site avec une Unité Mobile de Fabrication d'Explosif (UMFE).

Les nitrates réagissent au contact du béton en produisant un dégagement caractéristique de gaz ammoniac. Le chantier devra donc porter un soin tout particulier lors de la mise en œuvre des émulsions pompées à front pour que le produit ne soit pas au contact du béton projeté sur le front de taille ou projeté contre les parements bétonnés du tunnel lors du tir sous peine d'incommoder les personnels présents dans le tunnel mais également, dans une moindre mesure, les nez sensibles des riverains du chantier.

Quand c'est possible, l'utilisation de la technique des émulsions pompées à front (système Morse développé par Epc) permet de résoudre le problème des imbrulés. Le produit se présentant sous forme d'émulsion, les charges situées dans les quelques mines qui n'auraient pas explosé sont pulvérisées dans les déblais rocheux après la fin du tir de la volée et le produit lui-même perd ses propriétés explosives après quelques jours. C'est une garantie en termes de sûreté et de sécurité.

7- View of the noise attenuation door closing the tunnel.

8- View of the tunnel working face during blast charging operations.

9- The blue pipe discharges waste gases through the top. Sound insulation of the fan in the white container.

10- View of the mini water treatment plant for the West descending tunnel.

11- Les bungalows du chantier sont recouverts d'une toile peinte en trompe l'œil laissant croire à la présence d'un élégant immeuble.

11- The site bungalows are covered with a canvas with trompe-l'œil painting suggesting the presence of an elegant building.



11 © EIFFAGE

mental, plus difficile à gérer qu'ailleurs. Seul le manque de place handicapait l'installation d'une station de traitement des eaux importante avec des bassins de décantation de grande dimension. Le chantier a dû s'équiper de stations de traitements et de filtres-presses compacts (figure 10).

En revanche les seuils de pollution (nitrate) des eaux sortant du chantier

sont souvent moins contraignants en ville car les eaux sont rejetées dans les égouts sans risques pour les nappes phréatiques et les cours d'eau. Il faut tout de même prendre garde aux taxes d'assainissements qui pourraient être appliquées par les concessionnaires des réseaux et ne pas rejeter de particules fines qui colmaterait inéluctablement ces derniers.

La communication et la gestion des riverains

Le pouvoir des riverains est considérable. Protégés par la loi et bien souvent entendus par les élus, les riverains mécontents peuvent ralentir la progression d'un chantier en exigeant des contraintes horaires supplémentaires, des restrictions d'accès au poids lourds, des horaires de livraison incompatibles

avec l'organisation des travaux, voire l'interdiction de certains types de techniques.

La direction du chantier avait choisi de communiquer sur le déroulement des travaux en organisant des réunions d'information avec les services du maître d'ouvrage, et, pour les quelques riverains les plus impactés par les travaux, en mettant en place une ligne téléphonique dédiée avec un interlocuteur issu des équipes du chantier, plus à même de maîtriser les heures précises des tirs et de donner les explications appropriées sur le déroulement des opérations (figure 11).

À la date de rédaction de cet article (début janvier 2016), le troisième Poste Source est en service et les travaux d'équipement du tunnel descendant Ouest sont en cours, l'ouvrage devant être mis en service le 1^{er} juillet 2016. La réussite de ces deux projets repose sur l'implication des équipes de maîtrise d'œuvre citées ci-dessous mais avant tout sur celle des services du maître d'ouvrage, les Travaux Publics de Monaco, qui ont accompagné ces deux projets. □

TUNNEL DESCENDANT OUEST

PRINCIPAUX INTERVENANTS :

MAÎTRE D'OUVRAGE : Travaux Publics de Monaco

MAÎTRE D'ŒUVRE : Tractebel - Coyne et Bellier

ENTREPRISE : Eiffage Infrastructures

DURÉE DES TRAVAUX : 52 mois

PRINCIPALES QUANTITÉS :

EXCAVATIONS : 155 000 m³ dans les marno-calcaires.

BÉTON PROJETÉ DE SOUTÈNEMENT : 12 000 m³

ANCRAGES & BOULONS : 90 700 m

BÉTON DE STRUCTURE : 36 800 m³

ACIER HA : 1 070 t

COFFRAGE VOÛTE : 33 200 m²

COFFRAGE GÉNIE CIVIL : 27 000 m²

TROISIÈME POSTE SOURCE

PRINCIPAUX INTERVENANTS :

MAÎTRE D'OUVRAGE : Travaux Publics de Monaco

MAÎTRE D'ŒUVRE : Arcadis

ENTREPRISE : Eiffage Infrastructures

DURÉE DES TRAVAUX : 29 mois

PRINCIPALES QUANTITÉS :

EXCAVATIONS : 34 000 m³ dans le calcaire dolomitique.

CINTRES MÉTALLIQUES : 27 t

BÉTON PROJETÉ DE SOUTÈNEMENT : 2 300 m³

ANCRAGES : 15 500 m

BÉTON DE STRUCTURE : 6 800 m³

ACIER HA : 583 t

COFFRAGE : 25 000 m²

ABSTRACT

USE OF EXPLOSIVES IN URBAN UNDERGROUND WORKS. EXAMPLES IN MONACO

LOÏC THÉVENOT, EIFFAGE

The use of explosive excavation techniques is often associated with quarrying and underground structures located in sparsely populated mountain areas. We discover, through two examples of recent projects carried out by Eiffage's specialist blasting teams in the Principality of Monaco, that the use of explosives is perfectly appropriate on ultra-urbanised sites, provided that a number of technical measures are taken to reduce the environmental impact of the works. □

UTILIZACIÓN DE EXPLOSIVOS EN LAS OBRAS SUBTERRÁNEAS URBANAS. EJEMPLOS EN MÓNACO

LOÏC THÉVENOT, EIFFAGE

El uso de técnicas de excavación con explosivos suele asociarse a la explotación de canteras y obras subterráneas situadas en zonas de montaña poco pobladas. Dos ejemplos de obras recientes realizadas en el Principado de Mónaco por los equipos de Eiffage, especializados en minería, revelan que el uso de explosivos es absolutamente pertinente en emplazamientos ultra urbanizados mediante la aplicación de varias disposiciones técnicas que permiten reducir el impacto de las obras en el entorno. □



1
© PHOTOTHÈQUE SOLDATA ACOUSTIC

CONSTRUCTION DU GRAND PARIS EXPRESS : MIEUX ANTICIPER LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX BRUIT ET VIBRATIONS EN PHASE CHANTIER

AUTEUR : FRÉDÉRIC DELAFOSSE, DIRECTEUR SOLDATA ACOUSTIC, SOCIÉTÉ DE CONSEIL EN ACOUSTIQUE ET VIBRATIONS

LA CONSTRUCTION EN MILIEU URBANISÉ DE NOUVELLES LIGNES DE MÉTRO ENGENDRE INÉVITABLEMENT, NOTAMMENT EN PHASE TRAVAUX, DES NUISANCES DE TYPE BRUIT ET VIBRATIONS. SOUVENT SUBIS, CES IMPACTS PEUVENT POURTANT ÊTRE MIEUX MAÎTRISÉS CAR DES SOLUTIONS EXISTENT. LES RESPONSABLES DU GRAND PARIS EXPRESS L'ONT BIEN COMPRIS ET ONT MÊME FAIT DE L'IMPACT DES CHANTIERS UN DES THÈMES MAJEURS POUR 2016. TOUR D'HORIZON DES BONNES PRATIQUES ET DES EXPÉRIENCES DE SOLDATA ACOUSTIC SUR DES PROJETS SIMILAIRES.

RAPPEL DES ENJEUX

Les problématiques bruit et vibrations en phase chantier sont de plus en plus considérées comme prioritaires en phase étude et il n'est plus possible aujourd'hui d'envisager de tels travaux sans une prise en compte réelle de ces impacts environnementaux. Le bruit gêne les populations, les vibrations dégradent les avoisinants et les politiques des maîtrises d'ouvrage intè-

grent donc des exigences de contrôle, mais aussi d'anticipation, voire même de réduction.

Les risques liés au bruit et aux vibrations peuvent être décomposés en différents types d'impact :

→ Impact sur les opérateurs intervenant à proximité des machines. Notion de pénibilité, d'exposition journalière et de risque santé, à cause du bruit et des vibrations.

1- Station Saint-Anne métro de Rennes.

1- Saint-Anne station, Rennes métro.

→ Impact sur les riverains à cause d'une augmentation des niveaux sonores et parfois vibratoires y compris dans les habitations. Notion de confort et de gêne.

→ Impact sur les avoisinants de type bâtiments sensibles et/ou équipements sensibles. Notion de risque structurel et risque sur le fonctionnement, à cause des vibrations.

Ces différents impacts ne sont évidemment pas traités avec le même niveau d'anticipation et de précision mais ils demandent tous à être pris en compte, au risque d'une non-acceptation du chantier, voire de dommages irréversibles. Le choix est fait d'illustrer par l'exemple ce qui a été réalisé, via différents retours d'expérience sur des missions prises en charge par Soldata Acoustic, sur les chantiers de métro de Londres, de Rennes (figure 1) et, bien sûr, de Paris.

LES IMPACTS SUR LES OPÉRATEURS

La réglementation européenne relative à l'exposition des travailleurs au bruit est claire et impose à tout employeur de prendre les mesures nécessaires pour protéger ses salariés : limitation du bruit

à la source, actions sur l'organisation des postes de travail et enfin port de protections auditives. Dans l'absolu, c'est bien sûr la limitation du bruit à la source (c'est à dire concevoir une machine moins bruyante) qui est à privilégier. Dans les faits, c'est dans 80% des cas le port de protections auditives qui est mis en place.

L'exemple du métro de Rennes est particulièrement intéressant puisque des mesures d'exposition au bruit des opérateurs intervenant sur le tunnelier Elaine (figure 2) viennent d'être réalisées. Une première à saluer sur ce type de chantier, avec bien évidemment un premier retour d'expérience unique. Les postes de travail sur le tunnelier (figure 3) sont confinés avec la quasi impossibilité de s'éloigner des différentes sources de bruit (convoyeur, ven-

tilateurs, moteurs, groupe hydraulique), à l'exception bien sûr de la cabine de contrôle qui, elle, est insonorisée. La durée d'exposition qui dépasse logiquement les 6 heures par jour contribue elle aussi à une dose de bruit qui justifie largement le port continu de protections auditives performantes. C'est, dans ce cas précis, la solution la plus adaptée, quand bien même il serait possible de réduire « à la source » les niveaux sonores, en travaillant par exemple en amont avec les concepteurs de tunnelier. Ce n'est cependant pas leur priorité car les sources de bruit et de vibrations générant les impacts les plus significatifs correspondent plutôt à la rotation de la tête de coupe, qui va créer des vibrations dans le sol, à l'origine des vibrations mesurables dans les avoisinants.

LES IMPACTS SUR LES RIVERAINS ET LES STRUCTURES

Ce sont incontestablement les impacts les mieux pris en compte en termes de bruit aérien (bruit transmis directement depuis les machines chez les riverains), de vibrations (dans les structures), mais aussi de bruit dit solidien (bruit rayonné par les bâtiments après une excitation vibratoire des fondations et/ou directement des structures).

LES DIFFÉRENTES APPROCHES RÉGLEMENTAIRES

Tout projet d'envergure nécessite une étude d'impact, assujettie ou non à une enquête publique, qui doit permettre, en phase projet (figure 4), d'identifier les impacts majeurs en phase d'exploitation mais aussi en phase travaux et de proposer des mesures visant à éviter, réduire ou compenser ces impacts. Cette démarche est systématique, obligatoire, et permet d'identifier en amont les risques encourus.

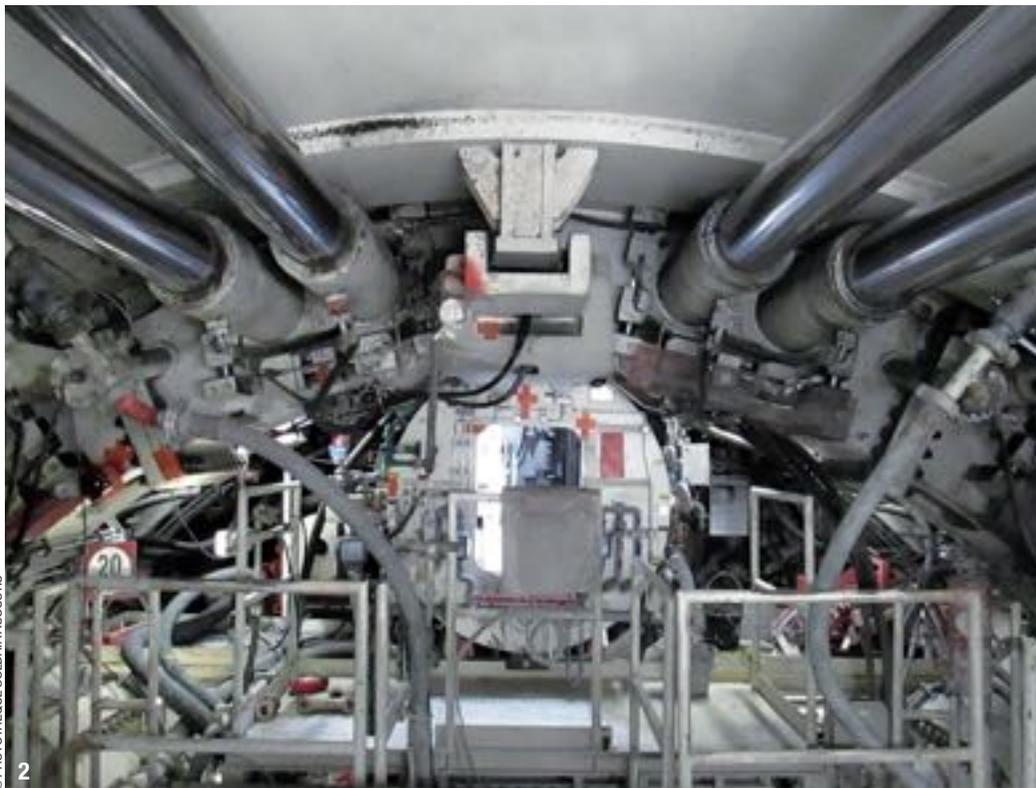
Les résultats de ces études environnementales menées par les maîtrises d'œuvre sont ensuite intégrés dans les cahiers des charges des entreprises, qui se doivent alors de respecter, pour ce qui est de la France, diverses préconisations de type « Chartes chantier vert » ou encore « Notices de Respect de l'Environnement ».

Ces préconisations ont largement évoluées ces dernières années avec, pour la première fois dans le cadre du Grand Paris, une vraie logique de management environnemental qui prend en compte l'ensemble des parties prenantes.

On peut lire dans les dernières NRE que le but est de préciser d'une part, les actions que doivent mener les entreprises pour respecter d'une manière générale les différentes contraintes d'environnement et d'autre part, les sites où ces mesures doivent s'appliquer et ce dans l'objectif d'obtenir un chantier respectueux de l'environnement. Il s'agit d'un document à valeur contractuelle qui impose à l'entreprise la responsabilité du chantier en matière environnementale. Le but est non seulement de protéger l'environnement, mais également la santé des opérateurs.

L'approche globale « Santé & Environnement » fait ainsi aujourd'hui clairement partie des objectifs affichés et c'est une vraie avancée.

Les projets de Crossrail répondent, quant à eux, à une logique un peu différente avec l'obligation pour les



© PHOTOTHÈQUE SOLDATA ACOUSTIC 2

2- Tunnelier Elaine métro de Rennes.
3- Dosimétrie bruit sur opérateur tunnelier.

2- Elaine TBM, Rennes metro.
3- Noise exposure measurement on TBM operator.



© PHOTOTHÈQUE SOLDATA ACOUSTIC 3

entreprises d'affiner les études pré-alables en prenant spécifiquement en compte leur propre matériel (figure 5), procédés ou encore choix constructifs. De nouveaux calculs prévisionnels sont obligatoirement réalisés via l'intervention d'acousticiens, nécessairement accrédités par Crossrail, suite à une vérification précise des compétences et à un entretien (obstacle non négligeable qu'a su franchir avec succès Soldata Acoustic dès 2011 via sa filiale implantée à Londres).

Ces doubles calculs (maîtrise d'ouvrage et entreprise) permettent de confronter les résultats et d'aboutir à un accord formel et négocié avec les autorités locales et les entreprises en charge des travaux.

Ce document, qui répond aux exigences de « Section 61 » du « Control of pollution act » est ensuite mis à jour régulièrement en fonction des différentes phases d'avancement du chantier : le démarrage d'un nouveau puits d'accès au tunnelier et c'est une nouvelle mise à jour des calculs d'impact bruit et vibrations, afin de s'assurer que les mesures compensatoires juste nécessaires et suffisantes seront bien mises en œuvre.

Dernière spécificité et pas des moindres sur Londres : les seuils retenus sont réellement issus d'une négociation et peuvent dans certains cas être adaptés au contexte spécifique du chantier et de son environnement. Sachant que 90 % des plaintes environnementales liées aux travaux de Crossrail concernent le bruit, une vraie prise en compte de la sensibilité du voisinage est donc nécessaire pour permettre le bon déroulement des chantiers (figure 6).



© PHOTOTHÈQUE SOLDATA ACOUSTIC

LES DIFFÉRENTES MÉTHODES PRÉDICTIVES

Les calculs prévisionnels de propagation du bruit aérien sont aujourd'hui bien maîtrisés, malgré la forte variabilité temporelle et spatiale des sources en présence et la variabilité du bruit préexistant. Ces paramètres vont fortement influencer sur la perception que l'on va avoir du bruit « rajouté » par le chantier et donc sur son acceptabilité. L'estimation des niveaux vibratoires est par contre bien plus complexe et nécessite :

→ La connaissance de la source et de ses caractéristiques vibratoires. Un tunnelier est le plus souvent unique et il sera donc nécessaire, si l'on veut connaître avec plus de précision le niveau de risque vibratoire, de procéder, une fois le tun-

nelier en place, à des campagnes de mesures de décroissance qui permettront de mieux connaître la source.

- La connaissance du sol et de ses anomalies. L'identification préalable des zones a priori sensibles est indispensable afin d'optimiser les méthodes de caractérisation des sols et utiliser les meilleurs techniques disponibles. Soldata Acoustic s'appuie dans ce cas sur les compétences de sa société sœur Soldata Geophysics, spécialisée en géophysique appliquée.
- La maîtrise des calculs de propagation d'ondes. Grâce à la connaissance de la source, du sol, et du type de fondations, il est alors possible de réaliser un calcul de propagation depuis le tunnelier jusqu'à l'intérieur des habitations sensibles. L'objectif est d'évaluer le risque de dépassement des seuils vibratoires (intégrité des bâtiments et/ou fonctionnement d'équipements sensibles) et acoustiques (bruit solarien rayonné). Méthodes analytiques, méthodes par éléments finis et/ou éléments de frontières... les outils à la disposition de l'expert sont nombreux mais leur utilisation reste complexe, et nécessite à la fois des compétences en calculs numériques, acoustique et vibrations, voire géotechnique, géophysique et structures.
- La définition et la mise en place d'un système dit de monitoring. Ce dernier volet, spécialité de Soldata, vient en complément des méthodes prédictives. Le design du système de monitoring doit répondre aux

4- Évaluation du risque en amont, bâtiment sensible.

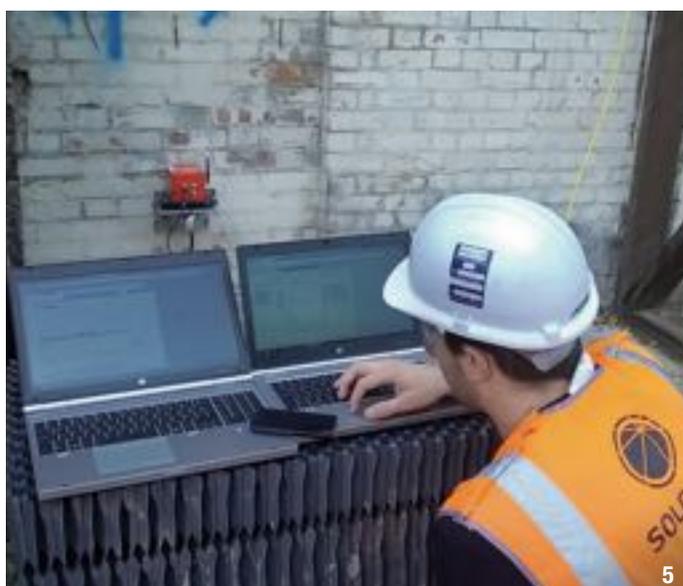
5- Recalage calculs mesures, métro de Londres.

6- Surveillance bruit/vibrations/poussières, métro de Londres.

4- Preliminary risk assessment, sensitive building.

5- Measurement calculation updating, London underground.

6- Noise/vibration/dust monitoring, London underground.

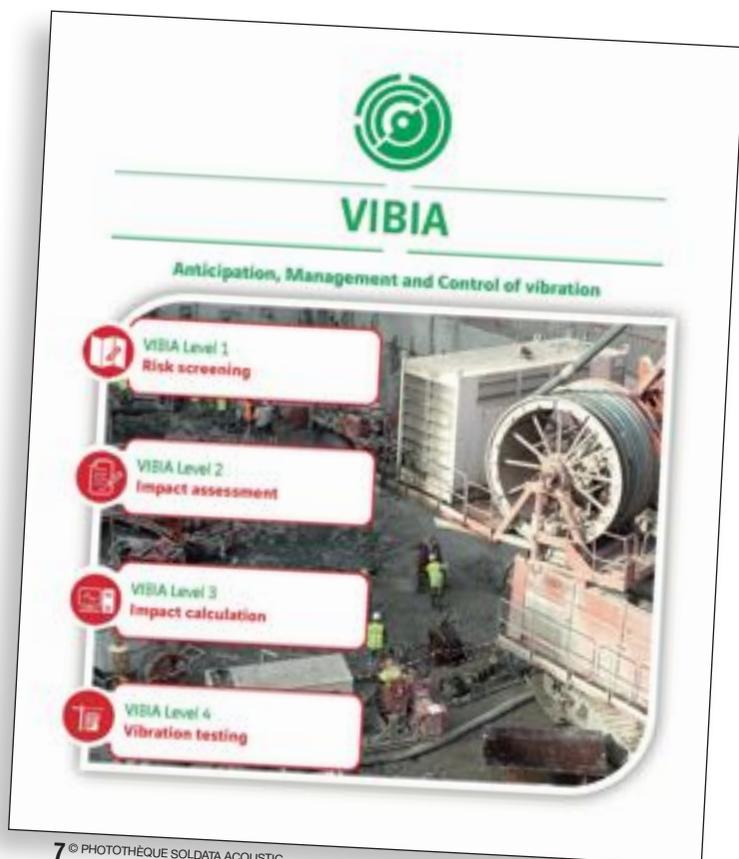


5



6

© PHOTOTHÈQUE SOLDATA ACOUSTIC



7 © PHOTOTHÈQUE SOLDATA ACOUSTIC

véritables enjeux et être défini en concertation avec les différentes parties prenantes : quels seuils, comment, à quelle fréquence, pour communiquer quoi et à qui ? Autant de question qui méritent d'être posées le plus en amont possible pour éviter les mauvaises surprises et garantir un dimensionnement optimisé.

LA MÉTHODE VIBIA APPLIQUÉE AU MÉTRO DE RENNES

Afin d'appréhender efficacement ces différents problématiques vibratoires, Soldata Acoustic a développé

7- Approche Vibia.

8- Surveillance équipements sensibles.

9- Travaux de BRH, Crossrail.

7- Vibia approach.

8- Sensitive equipment monitoring.

9- Hydraulic rock breaker work, Crossrail.



8 © PHOTOTHÈQUE SOLDATA ACOUSTIC

une approche globale qui permet, en fonction de la qualité des données d'entrée, du résultat attendu et des moyens mis à disposition, d'ajuster le contenu des méthodes prévisionnelles. Cette méthode Vibia (figure 7) a ainsi déjà été appliquée à de nombreux projets :

- Études d'impact vibratoire sur les lignes 14-15-16-17-18 du Grand Paris avec la réalisation de modélisation par éléments finis.
- Calculs prévisionnels bruit et vibrations sur les projets C315 et C340 de Crossrail.
- Approche mixte calcul/mesures pour anticiper les vibrations sur le métro de Rennes.

Dans ce dernier exemple, grâce à la volonté partagée de l'ensemble des acteurs, une approche innovante a été mise en place avant le lancement du tunnelier :

→ En phase de préparation des travaux, une étude préalable est réalisée sur la base d'une hypothèse concernant la force vibratoire du tunnelier. L'estimation de la propagation dans le sol est réalisée grâce à des simulations numériques basées sur des spectres d'émission vibratoire typiques du tunnelier qui dépendent du sol, de la vitesse de rotation et de la force de poussée.

→ Au démarrage des travaux de creusement du tunnel, des essais vibratoires sont réalisés sur un terrain propice (ex : terrain dégagé avant que le tunnelier n'arrive dans les zones d'habitation dense), afin de mesurer la vitesse vibratoire au niveau de la surface du sol lorsque le tunnelier passe dans le sous-sol. Le site d'essai doit ensuite être modélisé afin d'évaluer la mobilité de transfert et ainsi de caractériser indirectement l'émission vibratoire. La mobilité de transfert peut également être évaluée à l'aide de mesures.

La force du tunnelier ainsi obtenue permet d'améliorer la précision de l'étude vibratoire préalable.

Cette force est en théorie indépendante de la structure géologique du sol d'essai et est ensuite utilisée pour réaliser une étude prévisionnelle détaillée sur l'ensemble des bâtiments sensibles situés le long du tracé.

Cette étude détaillée peut également nécessiter de mesurer les fonctions de transfert des bâtiments étudiés.

L'avantage de l'approche Vibia, basée ici sur un mixte mesures/calculs, est de pouvoir affiner la précision des résultats au fur et à mesure de l'avancement du projet, à l'aide d'essais vibratoires. ▷



9 © PHOTOTHÈQUE SOLDATA ACOUSTIC

LES IMPACTS SUR LES ÉQUIPEMENTS SENSIBLES

Ce dernier impact est plus complexe à appréhender en phase amont car il est difficile d'identifier les équipements critiques existants : bâtiments privés, essais sensibles, caractère confidentiel. Dans la plupart des cas, la solution retenue consiste en la mise en place de systèmes de surveillance en continu pendant le chantier. Le dimensionnement de ces systèmes nécessite toutefois une étude prévisionnelle, ne serait-ce que pour la définition des seuils, des zones sensibles et des grandeurs à mesurer.

Un exemple significatif correspond au chantier de création d'une jonction tunnel entre la nouvelle station Crossrail et la station Bond Street de London Underground. L'objectif était de s'assurer de la non-perturbation, par les activités du tunnelier et de démolitions adjacentes, du fonctionnement d'équipements sensibles (radio, gestions des équipements de signalisation, signaux de sécurité...) internes à la station.

Une première évaluation du risque a été réalisée en amont à l'aide de la méthode Vibia et a montré une forte possibilité de dépassement du critère retenu de 5 m/s². Les équipements sensibles ont donc été instrumentés via la pose d'accéléromètres reliés à un analyseur temps réel multi-voies. Les données ont ensuite été traitées par FFT afin de comparer les valeurs mesurées aux seuils exprimés en mm/s² (figure 8).

L'information fournie via Gesocope (logiciel de supervision de Soldata, intégrant la gestion d'alarmes temps réel et l'accès aux données enregistrées) a ensuite permis d'identifier et de comparer les moments de fortes activités vibratoires avec les phases de

démolitions, dans l'objectif d'éviter tout dommage sur les équipements.

Les travaux sont à ce jour terminés et tous les équipements fonctionnent.

PERSPECTIVES

Les problématiques bruit et vibrations (figure 9) causées par des travaux souterrains de type métro font aujourd'hui systématiquement l'objet d'études et d'analyse en amont, afin d'anticiper au mieux ces impacts. L'objectif est de préserver la santé des opérateurs, la tranquillité des riverains, l'intégrité des bâtiments et le bon fonctionnement des équipements sensibles... tout en permettant aux chantiers d'avancer ! Les obligations en termes de résultats et de moyens imposées par les donneurs d'ordre aux entreprises ont tendance à s'uniformiser, mais, dans la pratique, les dispositions réellement mises en place diffèrent.

La politique de Crossrail et des autorités locales sur le métro de Londres a placé la barre très haut, avec des bonnes pratiques en termes d'études prévisionnelles devenues aujourd'hui un réflexe, voire même un standard européen. Cela ne garantit pas pour autant l'absence de plainte mais cela a permis à l'ensemble des parties prenantes de progresser dans le domaine environnemental et, par voie de conséquence, dans celui de la santé et aussi de la sécurité (figure 10).

Le métro de Rennes, certes plus modeste en termes de longueur de voie, joue clairement la carte de l'agilité en adaptant les moyens aux enjeux. Un système de monitoring environnemental conséquent couplé à des investigations ponctuelles par calcul et mesures pour mieux comprendre et anticiper les impacts bruit et vibrations des travaux à venir, y compris sur le volet santé.



10

© PHOTO THÉÂTRE SOLDATA ACOUSTIC

10- L'acousticien dans son environnement de travail.

10- The acoustic engineer in his work environment.

Le projet du Grand Paris Express a, quant à lui, posé les bases d'un plan de management ambitieux relatif au bruit et aux vibrations, plan dont les différentes étapes se succèdent depuis déjà quelques années sans que l'on puisse encore en mesurer toute l'efficacité puisque les travaux principaux ne sont pas engagés.

La meilleure des solutions se situe très probablement entre ces 3 approches et le Grand Paris Express a sûrement compris qu'il devait tirer profit des expériences de ses voisins pour faire avancer un de ses thèmes prioritaires sur 2016, à savoir l'impact de ses chantiers. □

PRINCIPAUX INTERVENANTS SUR LES DIFFÉRENTS CONTRATS

MAÎTRES D'OUVRAGE :

- Londres : Crossrail
- Rennes : Semtcar
- Paris : Société du Grand Paris

MAÎTRES D'ŒUVRE :

- Londres : Crossrail
- Rennes : Egis

ENTREPRISES GÉNÉRALES :

- Londres : Vinci Construction UK
- Rennes : Dodin Campenon-Bernard Spie Batignolles

ABSTRACT

CONSTRUCTION OF THE 'GRAND PARIS EXPRESS': IMPROVED FORWARD PLANNING FOR ENVIRONMENTAL IMPACTS OF NOISE AND VIBRATION IN THE SITE WORKS PHASE

FRÉDÉRIC DELAFOSSE, SOLDATA ACOUSTIC

The noise and vibration issues caused by underground works on underground rail systems, for example, are now recognised and are the subject of preparatory studies and analysis. The assignments performed by Soldata Acoustic on projects in London, Rennes and Paris in the past five years have enabled the company to draw up an inventory of good practices to protect workers, limit nuisances for nearby residents and protect the structures, while allowing work to move forward on site. Between the exemplary nature of Crossrail and the agility of Rennes, Société du Grand Paris has already launched its own ambitious noise and vibration management plan. It assigns great importance to protection of the environment on its construction sites. □

CONSTRUCCIÓN DEL GRAND PARIS EXPRESS: PREVER MEJOR LOS IMPACTOS DEL RUIDO Y LAS VIBRACIONES EN EL ENTORNO DURANTE LA FASE DE OBRAS

FRÉDÉRIC DELAFOSSE, SOLDATA ACOUSTIC

Actualmente se reconocen los problemas de ruido y vibraciones generados por las obras subterráneas de tipo metro, y están siendo objeto de estudios y análisis previos. Las misiones que la sociedad Soldata Acoustic lleva a cabo en las obras de Londres, Rennes y París desde hace 5 años permiten elaborar un inventario de buenas prácticas para proteger a los empleados, limitar las molestias a los vecinos y preservar las estructuras, permitiendo a la vez el avance de las obras. Entre la ejemplaridad de Crossrail y la agilidad de Rennes, la empresa Société du Grand Paris ya ha presentado su ambicioso plan de gestión del ruido y las vibraciones, que sitúa la protección del entorno de sus obras en el eje de sus preocupaciones. □

TRÉSORS DE NOS ARCHIVES : LE TUNNEL ROUTIER DE SAINT-CLOUD SUR L'AUTOROUTE DE L'OUEST ÉQUIPEMENT - EXPLOITATION - ENTRETIEN

PAR MICHEL DE BUFFÉVENT

TRAVAUX N°288 - OCTOBRE 1958

RECHERCHE D'ARCHIVES PAR PAUL-HENRI GUILLOT, DOCUMENTALISTE-ARCHIVISTE, FNTP



Comme déjà signalé dans un article du même auteur paru en 1950 intitulé « Achèvement de l'autoroute de l'Ouest » reproduit dans la rubrique « trésors de nos archives » du n° 901 de *Travaux*, les études du tunnel de Saint-Cloud on commencé en 1929. Il a été déclaré d'utilité publique en 1935. Les travaux auraient été achevés en 1940 s'ils n'avaient été interrompus par la guerre. Dès 1939 le gros œuvre était terminé et la Kriegsmarine y entreposa des torpilles. Le tunnel fut inauguré en 1951. C'était un tunnel monotube à double sens, solution jugée rationnelle à l'époque, compte tenu d'une estimation établie en 1936

d'un trafic prévisionnel de 5 000 véhicule/heure en pointe et de la dissymétrie des trafics de pointe. L'article de 1958, reproduit ici, traite essentiellement de l'éclairage et de la ventilation. Les spécialistes sauront pointer les progrès technologiques accomplis depuis mais ils pourront noter le grand sérieux des études réalisées et des solutions mises en œuvre à l'époque, notamment en matière de pollution de l'air (le mot « pollution » n'apparaît pas une seule fois). Une station fixe installée sur l'unité de ventilation et des appareils de détection mobiles pour analyser les variations à l'intérieur de l'ouvrage permettaient de mesurer les émissions d'oxyde de carbone.

Il est intéressant de relever au passage les consommations conventionnelles pour 100 km retenues : 4 litres pour < 4 CV, 10 litres pour 5 à 11 CV, 20 litres pour > 11 CV, 40 litres pour les utilitaires. La progression du trafic sera fulgurante : 17 335 véhicules/jour en 1951, 34 715 en 1957, conduisant à la réalisation du deuxième tube dans les années 1970. Pour les puristes et les épistémologistes, noter une regrettable coquille dans l'article : « Piteau » alors qu'il fallait écrire « Pitot » (l'inventeur du fameux tube), qui a échappé au rédacteur en chef de l'époque qui n'était pas un spécialiste de la mécanique des fluides.

ABSTRACT

TREASURES FROM OUR ARCHIVES: THE SAINT-CLOUD ROAD TUNNEL ON THE WESTERN MOTORWAY EQUIPMENT, OPERATION AND MAINTENANCE

TRAVAUX N°288 - OCTOBER 1958

MICHEL DE BUFFÉVENT

Comme déjà signalé dans un article du même auteur paru en 1950 *As already mentioned in an article by the same author published in 1950, entitled "Completion of the Western motorway", reproduced in the "Treasures from our archives" section of the issue 901 of "Travaux", the Saint-Cloud Tunnel was already on the drawing board in 1929. It was approved as being of public interest in 1935. The works would have been completed in 1940 if they had not been disrupted by the war. As of 1939, the structural work was completed, and the Kriegsmarine stored torpedoes there. The tunnel was inaugurated in 1951. It was a two-way single-tube tunnel, a solution considered rational at that time, based on a 1936 estimate of forecast peak traffic of 5,000 vehicles/hour, and the asymmetry of peak traffic. The 1958 article, reproduced here, mostly discusses the lighting and ventilation. Specialists will point to the technological progress accomplished since then, but they may note the very credible studies performed and solutions implemented at that time, notably with regard to air pollution (the word "pollution" does not appear once). A fixed station installed on the ventilation unit and mobile detection devices to analyse variations within the structure made it possible to measure carbon monoxide emissions. It is interesting to note in passing the standard fuel consumption levels adopted per 100 km: 4 litres for < 4 hp, 10 litres for 5 to 11 hp, 20 litres for > 11 hp, and 40 litres for utility vehicles. Traffic growth was astounding: 17,335 vehicles/day in 1951, 34,715 in 1957, leading to the construction of the second tube in the 1970s. For purists and epistemologists, note a regrettable misprint in the article: "Piteau" instead of "Pitot" (the inventor of the famous Pitot tube), which escaped the Chief Editor at the time, who was not a fluid mechanics specialist. □*

TESOROS DE NUESTROS ARCHIVOS: EL TÚNEL VIAL DE SAINT-CLOUD EN LA AUTOPISTA DEL OESTE EQUIPAMIENTO - EXPLOTACIÓN - MANTENIMIENTO

TRAVAUX N°288 - OCTUBRE DE 1958

MICHEL DE BUFFÉVENT

Como ya se señaló en un artículo del mismo autor publicado en 1950 *y titulado «Finalización de la autopista del Oeste», que aparece en la sección «Tesoros de nuestros archivos» del n° 901 de Travaux, los estudios del túnel de Saint-Cloud comenzaron en 1929. Fue declarado de utilidad pública en 1935. Las obras habrían finalizado en 1940 si no hubiesen sido interrumpidas por la guerra. Desde de 1939, la obra gruesa estaba acabada y la Kriegsmarine la utilizó para almacenar torpedos. El túnel fue inaugurado en 1951. Era un túnel monotubo de doble sentido, solución considerada racional en aquella época sobre la base de un estudio que en 1936 preveía un tráfico de 5.000 vehículos/hora en horario punta y de la disimetría de los tráficos en hora punta. El artículo de 1958 aquí reproducido trata principalmente del alumbrado y la ventilación. Los especialistas podrán observar los avances tecnológicos logrados desde entonces, al tiempo que advertirán el enorme rigor de los estudios realizados y de las soluciones aplicadas en aquel momento, en especial en materia de contaminación del aire (la palabra «contaminación» sólo aparece una vez). Una estación fija instalada en la central de ventilación y equipos de detección móviles para analizar las variaciones en el interior de la obra permitían medir las emisiones de óxido de carbono. Asimismo, resulta interesante observar los consumos convencionales establecidos para 100 km: 4 litros para < 4 CV, 10 litros de 5 a 11 CV, 20 litros para > 11 CV, 40 litros para los utilitarios. La progresión del tráfico sería fulgurante: 17.335 vehículos/día en 1951, 34.715 en 1957, lo cual obligó a realizar un segundo tubo en los años 1970. Para los puristas y los epistemólogos, el artículo original en francés contiene una lamentable errata: «Piteau» en lugar de «Pitot» (el inventor del famoso tubo), en la que no recabó el redactor jefe en aquella época, que no era un especialista en mecánica de fluidos. □*

ORGANE OFFICIEL TECHNIQUE
DE LA FÉDÉRATION NATIONALE
DES TRAVAUX PUBLICS ET DE
SES SYNDICATS AFFILIÉS

TRAVAUX

REVUE MENSUELLE
ÉDITIONS « SCIENCE ET INDUSTRIE »

CH. J. HEUDELLOT ◉ ✱
Président, Directeur général
P. LE PRINCE ✱
Directeur, Rédacteur en chef

ORGANE OFFICIEL TECHNIQUE
DE LA CHAMBRE SYNDICALE
DES CONSTRUCTEURS EN
CIMENT ARMÉ DE FRANCE

OCTOBRE 1958

N° 288

6, AVENUE PIERRE-I^{er}-DE-SERBIE — PARIS (16^e) — TÉLÉPHONE : KLÉBER 47-71 (3 LIGNES)

Le tunnel routier de Saint-Cloud sur l'autoroute de l'Ouest

Équipement — Exploitation — Entretien

Par M. de BUFFÉVENT

Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées.

Fig. 1. — Vue aérienne du départ de l'autoroute de l'Ouest à Saint-Cloud. En haut à gauche : l'entrée du tunnel.

(Photo Baranger.)



THE SAINT-CLOUD ROAD TUNNEL ON THE WEST MOTORWAY

The 17 m wide Saint-Cloud tunnel on the arterial motorway leading from Paris — the so-called West Motorway — provides a route through the hills of Saint-Cloud, traversing the park of the same name, 832 m in length, with a curve near one of the portals and a difference in level of 22 m between the two ends, it provides an access way to the west.

The tunnel was constructed partly during 1936-1939 and was subsequently completed after 1945. It goes through ground which presented difficulties on account of its lack of stability and the fact that it had in places previously been excavated. In the present article a complete description of this tunnel is given for the first time.

The electric power requirement for lighting, signs and traffic signals, offices, etc. is 350 kW and is obtained from three separate external sources for reasons of safety. The lighting, which can be regulated according to the prevailing lighting conditions outside the tunnel, has been of the fluorescent type since 1952. The lighted traffic signals comprise three-coloured lights and disappearing contact studs.

The maximum flow of traffic, which estimated at 5 000 vehicles/hour and which has not greatly exceeded 6 000, necessitates the use of artificial ventilation. Normal ventilation is effected by means of an air intake shaft situated midway along the tunnel and provided with a propeller fan which runs for fifteen hours a day on the average. An auxiliary installation, which has proved to be necessary, draws in the air by means of two sets of four centrifugal fans installed in two chambers situated close to the main structure and connected laterally to the ventilation opening, which in that case is isolated from the external air. A permanent check on the carbon monoxide content of the air in the tunnel is maintained by an apparatus which operates by selective absorption of light in the infra-red range. This apparatus, which was supplied by O.N.E.R.A., is installed at the exhaust air outlet. The article shows the agreement that exists between the measured degree of air pollution and the results obtained from a theoretical calculation based on the volume of traffic through the tunnel and the fuel consumption of the vehicles.

The operation of the tunnel for the maximum traffic flow of 6 058 vehicles/hour and 78 055 vehicles/day calls for close and stringent control, which is effected both by automatic counts and by appropriate signals, besides lighting and ventilation, which have already been referred to.

The Authorities themselves remove any vehicles that have a breakdown or mishap in the tunnel and maintain stationary and mobile watching posts to guard against the risk of fire.

The roof and sides of the tunnel have a surface area of 22 000 m² of glazed stoneware. The side walls are cleaned every week, the cleaning being done by hand in the daytime by a gang of men working on the footpaths. The roof is cleaned with steam and a detergent once a year, mechanised methods being employed. The average inclusive cost of keeping the tunnel clean was, in 1955, 35 francs per cleansing.

The annual cost of maintenance is about 12 million francs, not including wages and plant depreciation.

D'un développement total de 31 km en chiffres ronds, avec un tronçon commun et deux branches aboutissant respectivement sur les grandes routes de Normandie, de Bretagne, et du Sud-Ouest, au-delà de Versailles et de Saint-Germain, l'autoroute de l'Ouest a essentiellement pour objet de permettre à la circulation sortant de Paris vers l'Ouest de traverser commodément la zone encombrée de la proche banlieue.

Dans cette direction, une fois dépassés les coteaux de Saint-Cloud, une succession presque ininterrompue de terrains domaniaux, de forêts et d'espaces libres, se prêtait particuliè-

(1) Bien que d'une réalisation technique plus difficile, la solution d'un tunnel unique de grandes dimensions a été finalement préférée, et avec raison croyons-nous, à celle de deux tunnels de section moindre affectés chacun à un sens de circulation.

En dehors de l'économie de premier établissement qui en résultait, un tel choix était justifié en particulier par le caractère très dissymétrique de la circulation de pointe, qui aurait conduit à concevoir et à équiper chaque tunnel séparé pour des trafics à peine inférieurs à celui susceptible d'emprunter un tunnel unique.

En raison de la situation de l'ouvrage à l'origine même de l'Autoroute, l'utilisation d'une chaussée unique de 15 m de largeur, faisant suite à celle de même dimension de l'avenue du Palais, n'entraînait en soi aucune discontinuité fâcheuse, compte tenu notamment du dispositif de signalisation lumineuse décrit ci-après (page 927). En cas de panne ou d'incendie à l'intérieur de l'ouvrage, elle offre par contre l'avantage de dégagements beaucoup plus faciles.

EL TUNEL VIAL DE SAINT-CLOUD EN LA AUTOPISTA DEL OESTE

El túnel de Saint-Cloud, de 17 m de anchura, que se encuentra en la autopista de salida de París por la parte Oeste, permite franquear las colinas de Saint-Cloud, atravesando el parque del mismo nombre. Su longitud se eleva a 832 m, con una curva ligera en las inmediaciones de una de sus extremidades y su desnivelación alcanza 22 m entre ambas bocas, con un anchurón de acceso en su extremidad oeste.

Este túnel fué ejecutado en parte desde 1936 hasta 1939, y acabado después en 1945 y atraviesa terrenos difíciles debido a su falta de estabilidad y asimismo, debido a que en ciertos puntos se han procedido a excavaciones anteriores. Este artículo es el primero en que se trata de dicha obra, ya que hasta ahora no se ha dado ninguna descripción completa del túnel de Saint-Cloud.

La alimentación de energía eléctrica para alumbrado, señalización, control, oficinas, etc. requiere una potencia de 350 kW, con tres alimentaciones exteriores distintas por motivos de seguridad. El alumbrado graduable en relación con la luz exterior es del tipo fluorescente desde 1952. La señalización luminosa está compuesta por señales de tres colores y guardacontones retráctiles.

El tráfico máximo, estimado en 5.000 vehículos por hora, y que apenas ha sobrepasado de 6.000 requiere una ventilación artificial. La ventilación normal tiene lugar por medio de un pozo aspirante situado en la mitad del túnel y provisto de un ventilador de hélice que funciona 15 horas diarias, por término medio. Una instalación de socorro, que ya ha dado pruebas de su necesidad, aspira por medio de dos grupos de 4 ventiladores centrifugos, en dos cámaras situadas cerca del edificio principal y unidas lateralmente a la zona de aireación que entonces queda aislada de la atmósfera exterior. Un control permanente del porcentaje de óxido de carbono de la atmósfera del túnel tiene lugar por un aparato de absorción selectiva en el infrarrojo, construido por la O.N.E.R.A. y montado en la salida del aire evacuado. El artículo demuestra la concordancia existente entre los porcentajes de contaminación medidos y aquellos que se derivan de un cálculo teórico fundado en los consumos de carburante y el número de vehículos que atraviesan el túnel.

La explotación del túnel, para cantidades máximas de 6.058 vehículos por hora y 78.055 vehículos diarios, requiere una vigilancia atenta y rigurosa, la cual tiene lugar simultáneamente por medio de contadores automáticos y una señalización adecuada, aparte del alumbrado y la ventilación ya mencionados.

La Administración tiene a su cargo el remolque o transporte de los vehículos averiados o accidentados, así como la lucha contra incendios por puestos fijos o móviles.

La bóveda y los costeros representan una superficie de 22.000 m² de revestimiento cerámico. Los costeros son limpiados semanalmente, a mano, por un equipo que circular por las aceras del túnel. La bóveda se limpia por medio de vapor, una vez al año, con adición de lejía, mecánicamente. La limpieza costaba en media, en 1955, un total de 35 francos por metro cuadrado cada vez.

Los gastos anuales de conservación alcanzan 12 millones aproximadamente, no incluyéndose en esta cifra los sueldos del personal y la amortización del material.

rement bien à l'établissement d'une route nouvelle dont le caractère utilitaire pouvait, au surplus, s'accompagner des agréments d'une magnifique promenade.

Il en allait de même du côté de Paris, où, par le bois de Boulogne et les grandes artères déjà établies, la circulation converge facilement vers le pont de Saint-Cloud.

La liaison des deux itinéraires soulevait par contre le maximum de difficultés. L'obligation impérieuse de respecter le parc historique de Saint-Cloud, réserve de verdure et de calme aux portes de la capitale, excluait toute idée d'y tracer une voie à grand trafic. Il ne pouvait davantage être question de passer de plain-pied à travers l'agglomération urbaine quasi-continue, accrochée au coteau, en bordure de Seine, alors qu'au surplus la dénivellation à racher, près de 60 m, eût entraîné des pentes excessives ou d'énormes terrassements. Finalement, une seule solution s'offrait aux Ingénieurs : la construction d'un tunnel routier (fig. 1).

CARACTERISTIQUES DU TUNNEL DE SAINT-CLOUD

D'une longueur totale de 832 m, le tunnel de Saint-Cloud présente aux naissances une largeur de 17 m (1).

La voûte en forme d'anse de panier à trois centres, extra-dossée en arc de cercle, est prolongée par deux piédroits légèrement incurvés, réunis eux-mêmes par un radier en voûte renversée (fig. 2).

Du point bas du radier au sommet de l'intrados, la hauteur totale atteint 8 m et la hauteur libre au-dessus de la chaussée dans l'axe de l'ouvrage 6,40 m. Tous les parements vus sont revêtus en carreaux de grès émaillé.

La chaussée, de 15 m de largeur en pavage mosaïque jointoyé au ciment, est encadrée par deux trottoirs de 1 m chacun, en bordure desquels sont aménagées, dans l'épaisseur des piédroits, des niches de sécurité espacées de 25 m et disposées en quinconce. Dans l'axe de l'ouvrage est installée une galerie visitable donnant passage aux

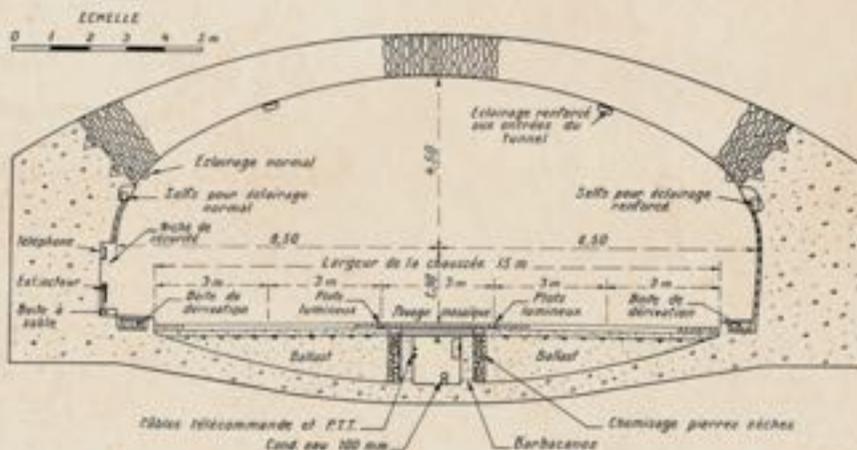


Fig. 2. — Souterrain de Saint-Cloud. Aménagement intérieur, coupe type.



(Photo Viguier.)

Fig. 3. — Tunnel de Saint-Cloud. Vue de la tête Est.

Fig. 4. — Vue aérienne de la sortie ouest du tunnel de Saint-Cloud.

(Photo Baranger.)



canalisations électriques, aux câbles de commande et de signalisation, conduites de lavage et d'incendie, etc.

En plan, le tracé comporte deux éléments droits de 654,70 m et 58,83 m de longueur, séparés par une courbe de 1 000 m de rayon et de 118,48 m de développement. La tête Est débouche sur l'avenue du Palais par un vaste terre-plein bien dégagé (fig. 3). A l'extrémité Ouest, au contraire, le souterrain se prolonge par une trémie de 200 m de longueur, encadrée par deux grands murs de soutènement distants de 21 m (fig. 4).

Le profil en long, qui s'élève sans interruption, comporte 3 rampes de 5 p. 100, 3 p. 100 et 1,85 p. 100, raccordées entre elles par des éléments de parabole, la différence de niveau entre les deux extrémités étant de près de 22 m.

Encore qu'il soit établi, sur la plus grande partie de son parcours, dans les différents étages du calcaire grossier, la construction du tunnel de Saint-Cloud ne fut pas sans rencontrer, tout au moins à ses deux extrémités, de sérieuses difficultés. Sur les 150 premiers mètres à partir de la tête Est, la présence, à la base, d'un très mauvais sol : fausses glaises et sables bouillants reposant sur l'argile plastique du Sparnassien et, en même temps, au sommet, d'anciennes carrières en partie remblayées ou effondrées, entraîna de difficiles et coûteux travaux de fondation et de consolidation. D'autre part, sur les 150 derniers mètres, l'ouvrage dont le niveau était imposé par la nécessité de réserver le passage des égouts collecteurs de Saint-Cloud, se glissait à faible profondeur sous les voies ferrées de deux lignes de banlieue à fort trafic, ce qui obligea à la construction préalable d'ouvrages sous-voies particulièrement délicats (2).

Commencés dans le courant de l'année 1936 (3), les travaux, sans la guerre, auraient dû normalement se terminer en 1940. En septembre 1939, le gros œuvre était en effet pratiquement achevé, lorsque les événements obligèrent à en ralentir, puis à en suspendre la finition. Ils ne furent repris qu'en 1945 après récupération de l'ouvrage qui, entre temps, réquisitionné par la marine de guerre allemande, avait été transformé en dépôt de torpilles sous-marines.

A cette époque, l'autoroute elle-même, limitée il est vrai au tronc commun, dont une des chaussées manquait encore entre Vaucresson et Rocquencourt, et à la branche Nord, était déjà ouverte à la circulation. Bien que, du fait des restrictions de carburant et de pneumatiques, cette dernière y fût encore très réduite, elle ne pouvait s'accommoder bien longtemps d'une entrée de fortune débouchant provisoirement sur la R. N. 185. Aussi le tunnel fut-il mis en service dès le mois de juin 1946 dans l'état où il se trouvait alors, et sans que soit terminé son équipement.

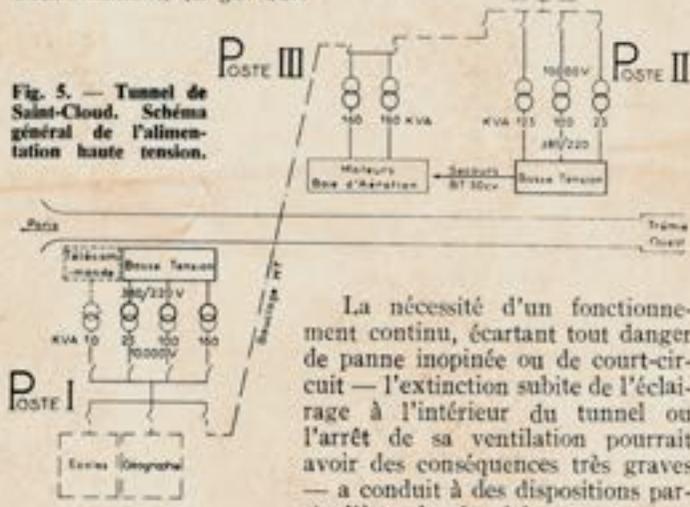
Ce dernier fut poursuivi, compte tenu des possibilités budgétaires, au cours des années suivantes, au fur et à mesure que la circulation croissante en faisait apparaître la nécessité. C'est ainsi que furent successivement mis au point et réalisés, en tenant compte des données précieuses d'une expérience de plus en plus poussée, la ventilation, l'éclairage lumineux, la signalisation lumineuse, en même temps qu'étaient terminés et aménagés les bâtiments d'exploitation (3 bis). Il est d'ailleurs dans la nature des choses qu'une œuvre de ce

genre, qui, par certains côtés, s'apparentait à la réalisation d'un prototype, ne soit jamais complètement terminée, et qu'on y trouve toujours quelque complément utile à y apporter, en suivant au plus près les besoins qui naissent de l'exploitation elle-même.

Cela explique que les travaux de parachèvement se soient étalés sur une dizaine d'années et que de ce fait aucune description complète de l'équipement du tunnel de Saint-Cloud n'ait encore été publiée. C'est cette lacune que nous voudrions combler par cet article, en nous excusant par avance de certaines redites, rendues obligatoires par les nécessités de la présentation.

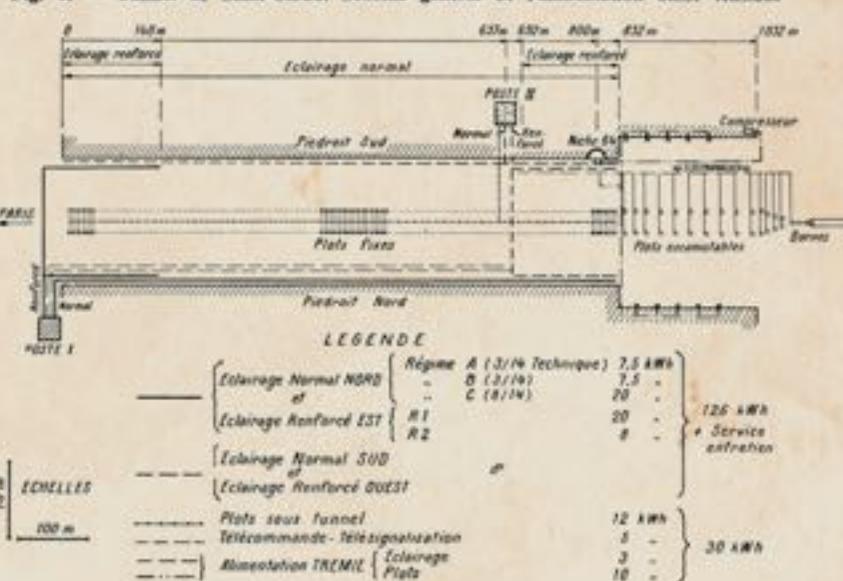
I. Equipement électrique général.

Les besoins d'énergie, au tunnel de Saint-Cloud, pour l'éclairage, la ventilation, la signalisation lumineuse, la télécommande et le contrôle des appareils, les services d'entretien, les bâtiments des bureaux et du personnel représentent, en tout, à plein régime, 350 kW environ. Ils sont assurés par une alimentation en haute tension triphasée 10 000 V utilisée, après transformation en 380-220.



C'est ainsi qu'on a été amené à réaliser 3 alimentations extérieures distinctes, aboutissant au tunnel de Saint-Cloud en partant de 3 sous-stations électriques différentes de la région

Fig. 6. Tunnel de Saint-Cloud. Schéma général de l'alimentation basse tension.



(2) Sur la construction du tunnel de Saint-Cloud, on pourra se reporter à notre étude : « L'Autoroute de l'Ouest, nouvelle sortie de Paris », publiée dans les Annales des Ponts et Chaussées, juillet-août 1941.

(3) Ils avaient été adjugés, le 29 mai 1936, aux Etablissements Billard qui les ont menés à bien, ainsi que tous les aménagements compris entre la place Clemenceau et la tête Est.

(3 bis) Nous nous devons de souligner la part prise, tant à la mise au point des projets qu'à la direction des travaux, par MM. Vieillard, Legrand, Faisandier, successivement Ingénieurs d'Arrondissement; Métenier et Leviennois, Ingénieurs subdivisionnaires.

parisienne, sur lesquelles, par le moyen d'un bouclage intérieur, peuvent être indifféremment branchés les différents postes de transformation (fig. 5).

Ces derniers, au nombre de trois, ont chacun une zone d'action propre, mais peuvent, le cas échéant, se relayer l'un l'autre. Equipé chacun de plusieurs transformateurs de puissance échelonnée, ils peuvent ainsi faire face, avec le maximum de sécurité et le rendement optimum, aux différents régimes de fonctionnement et satisfaire, dans de bonnes conditions, toutes les demandes.

Le poste I est installé dans les bâtiments d'exploitation de la tête Est, où aboutissent les feeders venant des sous-stations « Ecoles » et « Géographie » ; il est équipé de 4 transformateurs de puissances respectives 160-100-25 et 10 kVA.

Les transformateurs de 160 et 100 kVA, qui peuvent éventuellement être mis en parallèle, débitent dans le circuit basse tension qui alimente normalement une partie des installations d'éclairage (piédroit Nord et tête Est — éclairage des abords et de l'avenue du Palais), ainsi que les bâtiments des services et d'exploitation (fig. 6).

Il en est de même du transformateur de 25 kVA destiné à fonctionner en cas de service réduit, notamment la nuit et aux heures creuses. Le transformateur de 10 kVA assure, par un circuit spécial, l'alimentation des organes de commande du tableau général.

Le poste II est installé dans une chambre souterraine accolée au piédroit Sud du tunnel, au droit du P. K. 0,637, et qui a utilisé une galerie auxiliaire aménagée pendant la construction de l'ouvrage, pour l'évacuation rapide des débris de la partie centrale. Il comprend 3 transformateurs de 125-100 et 25 kVA, et alimente normalement le reste des installations d'éclairage du tunnel (piédroit Sud et tête Ouest), celles de la trémie Ouest et les circuits de signalisation : plots fixes et bornes escamotables.

Le poste III est installé dans le bâtiment de la baie d'aération au-dessus du tunnel. Equipé de 2 transformateurs de 160 kVA chacun, il assure essentiellement le service de la ventilation. En cas de panne, un circuit de secours en basse tension, partant du poste II, permet de disposer encore d'une puissance de 50 ch et d'assurer une marche réduite, mais suffisante, des moteurs.

Un souci d'homogénéité a guidé le choix des types de transformateurs qui sont tous de même fabrication et susceptibles, au moins pour ceux dont les puissances sont de même ordre, d'être mis en parallèle et de débiter ensemble dans le même circuit basse tension.

La nécessité d'un accès facile et n'engageant pas la circu-

lation de l'autoroute, de toutes les installations, n'a pas non plus été perdue de vue. Les circuits de basse tension sont placés sous trottoir, dans des caniveaux spéciaux. D'autre part, on a réuni, dans la galerie visitable établie dans l'axe de la chaussée (voir fig. 2, page 906) — et qui est reliée elle-même avec le poste de ventilation — les câbles d'alimentation des plots lumineux, les câbles pilotes pour la télécommande de l'éclairage et de la ventilation, et le circuit de secours de cette dernière. La possibilité d'un bouclage ultérieur des circuits de basse tension y a été également réservée, cette sécurité nouvelle venant alors s'ajouter à celle que donne déjà le bouclage en haute tension.

Toutes les combinaisons sont reproduites sur le tableau de contrôle du poste central d'où peuvent se faire les commandes à distance.

II. Eclairage.

La longueur du souterrain de Saint-Cloud rend obligatoire un éclairage artificiel de jour, dont la difficulté essentielle réside, comme on le sait, dans la nécessité d'assurer au voisinage des têtes un éclairage décroissant régulièrement vers la partie centrale, pour atténuer sinon éviter, dans toute la mesure du possible, l'effet de contraste produit par le passage de la lumière solaire à la lumière artificielle. Cette difficulté est d'autant plus grande que la disposition des lieux se prêtait mal à l'aménagement d'une zone d'ombre extérieure, au moins pour la tête Est qui est entièrement dégagée.

L'importance de l'éclairage de transition doit d'ailleurs varier à tous moments, suivant les heures de la journée et les conditions météorologiques, de manière à tenir compte des variations importantes et continues de l'éclairage extérieur (fig. 7).

Installation primitive.

Dans l'installation primitive conçue en 1938, à une époque où l'éclairage luminescent, encore à ses débuts, n'offrait pas toutes les possibilités actuelles, les foyers lumineux étaient constitués, pour le circuit permanent, par des lampes à incandescence de 150 W installées dans des niches espacées de 6,25 m et aménagées dans les piédroits de l'ouvrage à 3,15 m au-dessus des trottoirs. Ils étaient alimentés par des branchements sous tubes, partant de boîtes de dérivation établies sur les câbles de distribution placés sous trottoirs, dans des caniveaux spécialement aménagés.

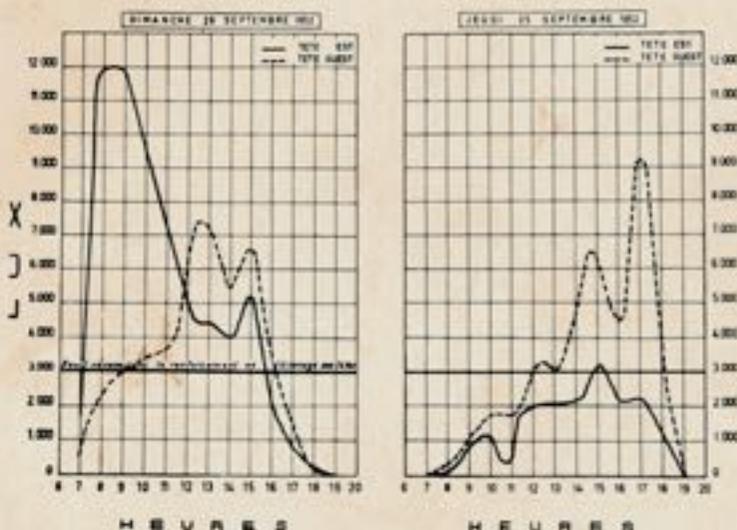
Au voisinage des têtes, sur des longueurs respectives de 150 m à 200 m, 2 circuits de renforcement, dont les foyers se rapprochaient jusqu'à 2,80 m, étaient équipés de lampes allant de 500 à 1 000 W et assuraient un éclairage supplémentaire de transition.

La puissance totale utilisée était de 80 kW pour l'éclairage central et 110 kW pour l'éclairage renforcé, elle donnait en principe un éclairement au sol variant de 10 lux dans la partie centrale à 300 lux au voisinage des extrémités.

Mais l'installation eut à pâtir de l'occupation du tunnel, de 1941 à 1944. L'effet désastreux de l'humidité ternit notamment les réflecteurs et les aménagements apportés par les occupants à la câblerie générale en modifièrent complètement l'économie. A la Libération, l'éclairement au sol était tombé de ce fait à 3 ou 4 lux dans la partie centrale sur la chaussée, 12 lux sur les trottoirs, 60 lux seulement à 20 m de l'entrée.

Malgré des améliorations intéressantes, obtenues en changeant les optiques réfléchissantes, placées derrière les lampes, les verres de fermeture des niches, en portant la puissance des foyers du circuit permanent à 300 W (1 lampe de 200 et 1 lampe de 100 dans la même niche) et celle des circuits de renforcement à 1 500 W, l'installation était devenue tout à fait insuffisante. Elle a été entièrement reprise en 1952 en réutilisant d'ailleurs au maximum tout ce qui pouvait être conservé.

Fig. 7. — Variations diurnes de l'éclairage extérieur aux têtes du tunnel de Saint-Cloud : deux jours voisins de 1952.





(Photo Viguiet.)

Fig. 8. — Vue intérieure du tunnel au voisinage de la tête Est, montrant les différents circuits d'éclairage normal et renforcé.
On remarquera les hublots de l'ancien éclairage incandescent qui abritent maintenant les appareils d'alimentation des tubes. On peut apercevoir sur la chaussée, au premier plan, une pédale détectrice de l'installation de comptage du trafic et parallèlement à l'axe de l'ouvrage les lignes de plots lumineux servant au balisage de la circulation.

Installation nouvelle.

Le nouvel éclairage mis en service le 15 décembre 1952 utilise des tubes fluorescents (fig. 8).

Il comprend :

- un éclairage normal régnant sur la longueur totale de l'ouvrage dit « circuit permanent », composé d'une rampe monotube, courant d'un bout à l'autre de chaque piédroit et fractionnée en 3 régimes d'exploitation ;

- un éclairage renforcé aux têtes, fractionné en 2 régimes d'exploitation comportant des rampes à nombre variable de tubes, fixées au ciel de la voûte et courant sur 140 m de longueur à partir de chaque entrée du tunnel.

Les tubes fluorescents utilisés sont tous à allumage instantané sans starter ; ils sont équipés par duos. Ceux de l'éclairage normal sont du type basse tension de 1,20 m de longueur ; ceux de l'éclairage renforcé du type moyenne tension de 2,40 m de longueur. La couleur de la lumière produite est le « Blanc Jour », se rapprochant de la lumière extérieure.

Après un certain nombre d'essais accompagnés de mesures d'éclairage (4), l'emplacement choisi pour la rampe d'éclairage normal est à 3,80 m au-dessus du trottoir et celui de l'éclairage renforcé à 5,50 m de hauteur, sur la voûte même.

La première position crée un bon éclairage latéral qui constitue le meilleur balisage et rend plus faciles les interventions d'entretien. La seconde position donne un ciel clair aux entrées de l'ouvrage avec un éclairage plus uniforme de la chaussée.

(4) En dehors de la valeur de l'éclairage proprement dit, d'autres considérations avaient également à entrer en ligne de compte dans le choix de l'emplacement : gabarit des véhicules à respecter, possibilités d'atteindre commodément les tubes pour l'entretien, etc. La solution retenue est finalement un compromis entre plusieurs desiderata qui s'opposent partiellement.

(5) Des mesures effectuées ont montré qu'au bout de quinze jours les poussières accumulées sur les paralumes et les tubes peuvent faire baisser l'éclairage de 15 à 20 p. 100.

Eclairage normal.

Les tubes constituant la rampe de l'éclairage normal sont alignés suivant une parallèle au profil en long du tunnel. La longueur de piédroit affectée à chaque tube, soit 1,34 m, a été déterminée, compte tenu de l'encombrement des douilles étanches, de manière à permettre l'installation des appareils d'alimentation dans les hublots existants dont l'espacement était par conséquent imposé.

Comme nous l'avons indiqué ci-dessus, l'installation comporte trois régimes d'utilisation pouvant fonctionner séparément ou simultanément. Le module de base étant constitué par une suite de 14 duos, 3 duos sont rattachés au régime A, 3 autres au régime B, et les 8 derniers au régime C. La répartition des duos constituant les régimes A et B est inversée d'un piédroit à l'autre afin de réaliser un dispositif en quinconce des tubes en service quand ils fonctionnent seuls (fig. 9 à 12).

La puissance électrique totale par piédroit est de 35 kW. L'éclairage maximum produit lors du fonctionnement simultané des régimes A + B + C varie de 15 lux au centre de la chaussée, à 50 lux sur le trottoir.

Les tubes fluorescents sont fixés sur des supports tubulaires dans lesquels passent les fils d'alimentation. Ils sont protégés par des écrans de défilement ou paralumes, en tôle galvanisée à chaud et peints au four, répartis transversalement à raison de 6 sur chaque longueur de tube. Outre leur effet protecteur contre les chocs et contre les courants d'air qui, en les refroidissant, diminuent le rendement des tubes, ces écrans permettent également d'éliminer tous effets de brillance des sources et créent un heureux effet de volume lumineux, tout en améliorant l'éclairage au moins sur le trottoir. Ils présentent par contre le gros inconvénient de s'encrasser très vite sous l'effet des fumées et des poussières et exigent, pour garder leur efficacité, de très fréquents nettoyages (5) qui constituent une sujétion onéreuse.

Eclairage renforcé.

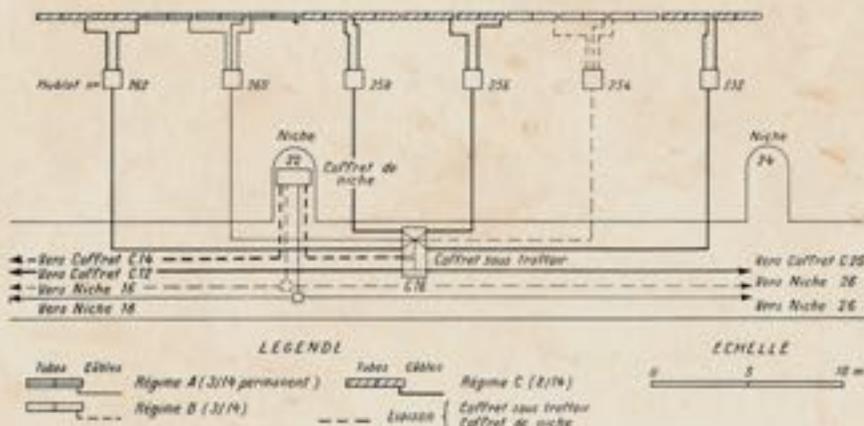
Les tubes fluorescents utilisés pour l'équipement des rampes d'éclairage renforcé fonctionnent sous 450 V avec allumage par surtension de 750 V. Ils sont alimentés par des transformateurs spéciaux logés dans les hublots de l'ancien éclairage incandescent.

Les tubes sont assemblés sur des plateaux métalliques suspendus à 30 cm environ de la voûte, ce qui facilite les raccordements de la câblerie (fig. 13).

Les tubes sont répartis en deux séries, comportant chacune un nombre de rampes variable suivant la distance à l'entrée du tunnel :

De 0 m à 20 m	3 rampes.
De 20 m à 45 m	4 rampes.
De 45 m à 80 m	3 rampes.
De 80 m à 120 m	2 rampes.
De 120 m à 140 m	1 rampe.

Fig. 9. — Tunnel de Saint-Cloud. Eclairage normal. Répartition des régimes.





↑
Fig. 10. — Eclairage réduit utilisant le régime A.

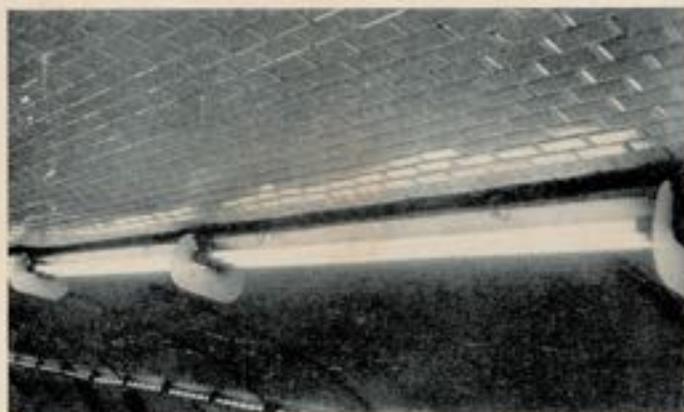
→
Fig. 11. — Eclairage réduit utilisant les régimes A et B.

Fig. 12. — Eclairage normal utilisant l'ensemble des circuits A, B et C. Les paralumes ont été déposés pour nettoyage.



(Photos Jacob.)





(Photo Jacob.)

Fig. 13. — Circuit de renforcement suspendu à la voûte.

Les tubes fluorescents munis de douilles étanches sont enfilés dans des enveloppes en pyrex qui les protègent contre les chocs et les refroidissements extérieurs. Un écran en plexiglas par duo, soit tous les 5 m, atténue l'effet de brillance.

La puissance électrique installée, à chaque tête du tunnel, pour le circuit de renforcement est de 28 kW répartie en deux régimes de 8 et 20 kW. L'éclairage supplémentaire obtenu, mesuré de nuit avec des tubes usagés, est de l'ordre de 200 lux à 20 m de l'entrée.

A chacune des têtes est disposée, au-dessus du tunnel, une cellule photo-électrique qui réduit en courant les variations de la luminosité du ciel. Ces renseignements, renvoyés sur le tableau de commande du poste central, permettent de déterminer, chaque jour, l'heure à laquelle l'éclairage renforcé doit être mis en service et de choisir le régime de ce dernier (6).



Finalement la substitution de l'éclairage fluorescent à l'éclairage incandescent a permis d'obtenir, avec une puissance installée inférieure d'un tiers, un éclairage 3 à 4 fois plus fort et avec une meilleure répartition. Ce résultat est dû, non seulement au rendement plus élevé des lampes, mais encore à l'utilisation qui est faite dans la nouvelle installation du pouvoir réfléchissant de la voûte du tunnel. Encore

(6) Nous avons renoncé à la commande automatique, à la suite d'un certain nombre de difficultés rencontrées. Aussi bien cette dernière est-elle de peu d'intérêt, la permanence qui doit être assurée de toute façon, de 7 h du matin à 9 h du soir, au poste du tunnel, rendant possible la commande à main sans frais supplémentaires.

(7) Des mesures faites à l'occasion du remplacement, par des tubes neufs, de tubes ayant déjà 12 000 h de fonctionnement, ont fait apparaître, pour ces derniers, une diminution de rendement allant de 40 à 50 p. 100. En fait, et bien que la durée réelle des lampes soit bien supérieure, il ne semble pas intéressant d'aller au-delà d'une utilisation de 4 000 h, qui correspond déjà à une diminution assez sensible.

(8) Une sortie de secours aménagée avant la trémie ouest, permet dans ce cas de détourner par l'allée de la Lanterne et la R. N. 185 la circulation venant de l'Autoroute, en court-circuitant le tunnel. Le vaste dégagement de la tête Est ne pose pas de problème pour la circulation venant de Paris qui peut d'ailleurs être déviée par la R. N. 307 à la sortie du pont de Saint-Cloud.

(9) Contrairement à ce qu'on aurait pu attendre, compte tenu du développement énorme pris par la circulation au cours des dernières années, cette prévision, qui avait pu paraître, il est vrai, très large à l'époque, ne s'est pas trouvée trop sensiblement dépassée par la réalité.

Le trafic horaire de 5 000 véhicules n'a, en effet, été atteint pour la première fois que le 28 mars 1954, et celui de 5 500 véh. que le 13 mai 1956. Ce dernier a été dépassé seulement 7 fois au cours des deux années 1956 et 1957. Le niveau de 6 000 véh/h n'a été lui-même atteint encore qu'une seule fois, le 13 avril 1958, avec 6 058 véh.

(10) Voir plus loin, pages 922 et 923. La capacité intérieure du tunnel étant de 77 000 m³ en chiffres ronds, le seuil de 4/10 000 serait atteint, dans les hypothèses faites, au bout de 9 mn. pour une circulation de voitures de tourisme atteignant 5 000 véh/h.

convient-il que cette dernière soit maintenue en constant état de propreté par des nettoyages fréquents, l'encrassement produit au bout de quelques semaines seulement par les gaz d'échappement des véhicules pouvant à lui seul diminuer la qualité de l'éclairage de 20 à 25 p. 100.

Il convient également de procéder périodiquement au renouvellement des tubes sans attendre leur mise hors d'usage, qui est toujours précédée d'une forte diminution de rendement (7).

III. Signalisation lumineuse.

Aux installations d'éclairage, il convient de rattacher celles concernant la signalisation lumineuse, qui comporte — outre une signalisation classique par feux tricolores commandés à distance, utilisée en cas de pannes ou d'accidents graves pour interdire l'accès du tunnel et éviter des stationnements dangereux à l'intérieur (8) — un dispositif de plots lumineux permettant de partager au mieux la chaussée unique de 15 m de largeur entre les deux sens de circulation. A cet effet, quatre lignes de plots délimitent cinq voies de 3 m de largeur chacune (voir fig. 2, 6 et 8 ci-dessus). Les deux lignes centrales sont équipées avec des plots lumineux pouvant être éclairés à volonté en lumière blanche ou rouge. On peut ainsi, en déplaçant à la demande la bande rouge séparant les deux courants de circulation, affecter toujours trois voies sur cinq au trafic le plus important, dont la direction varie suivant les heures de la journée.

Le dispositif est complété, à la sortie du souterrain, par une double ligne de plots lumineux escamotables permettant de raccorder l'extrémité de la ligne de plots lumineux fixes en service, à l'origine du terre-plein central séparant les deux chaussées de l'autoroute.

IV. Ventilation.

Nécessité d'une ventilation artificielle.

Les prévisions de circulation faites lors de la mise au point du projet de l'autoroute de l'Ouest, en partant des indications données à l'époque par des comptages effectués sur les différentes sorties Ouest de Paris, avaient conduit à évaluer, en 1936, avec toutes les réserves d'usage, à quelque 5 000 véh/h (9), la circulation de pointe susceptible d'emprunter, dans l'avenir, le tunnel de Saint-Cloud.

Si l'on admet, en première approximation, qu'un litre d'essence brûlé dans un moteur d'automobile produit, en moyenne, 500 l d'oxyde de carbone, si l'on fait d'autre part quelques hypothèses simples sur la composition du trafic et la consommation moyenne pour chaque catégorie de véhicules, il était facile de se rendre compte qu'en l'absence de toute ventilation naturelle ou artificielle la teneur en oxyde de carbone était susceptible d'atteindre, au bout de 5 à 10 mn, aux heures de charge, le seuil de 4/10 000 considéré comme un maximum à ne pas dépasser (10).

Dès l'achèvement du gros œuvre, une série de mesures ont été faites en vraie grandeur à l'intérieur du souterrain, pour reconnaître les conditions d'une ventilation naturelle.

Dans une section droite choisie dans la partie centrale, les vitesses du courant d'air étaient mesurées plusieurs fois par jour en sections horizontales et verticales. On notait en même temps les conditions météorologiques extérieures.

Ces essais, qui ont duré plusieurs mois, ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

1° Les périodes pendant lesquelles la vitesse du courant d'air est inférieure à 0,25 m/s et, par conséquent, la ventilation naturelle pratiquement inexistante, sont fréquentes ;

2° L'existence d'un courant d'air à l'intérieur de l'ouvrage est liée directement aux vents extérieurs. Dans la période chaude où les vents d'Ouest dominent, le tirage sera plus souvent Ouest-Est ; dans la période froide où les vents du secteur Est sont les plus fréquents, le tirage sera le plus souvent Est-Ouest. Les inversions constatées dans l'écoulement coïncident avec le changement de direction du vent extérieur ;

3° La vitesse moyenne à partir de laquelle la ventilation artificielle deviendrait inutile n'est atteinte que très exceptionnellement. Il arrive fréquemment par contre, soit en l'absence de vent au niveau du sol, soit dans le cas d'un vent orienté dans une direction normale à l'axe de l'ouvrage, de ne constater aucun déplacement d'air à l'intérieur du souterrain.

Dans ces conditions, il apparaissait indispensable de prévoir une installation de ventilation artificielle.

Choix du système de ventilation.

3 types de ventilation pouvaient être envisagés :

— le système transversal, adopté notamment pour les grands tunnels sous-fluviaux américains et dans lequel l'air frais est distribué uniformément le long de l'ouvrage, l'air vicié étant également aspiré sur toute la longueur ;

— le système semi-transversal qui est notamment celui du tunnel routier de Liverpool, où l'air frais, comme dans le système précédent, est distribué sur toute la longueur au moyen d'un carneau inférieur placé sous la chaussée alors que l'aspiration de l'air vicié se fait directement dans l'ouvrage lui-même, en des points judicieusement choisis ;

— le système longitudinal qui consiste essentiellement, en provoquant une dépression à l'intérieur de l'ouvrage, à créer les conditions d'un balayage longitudinal par un courant d'air frais rentrant aux extrémités.

C'est ce dernier système, le plus économique et que rendaient possible les conditions propres au tunnel de Saint-Cloud, qui fut finalement adopté, après une série d'essais sur modèle réduit (11).

Description de l'installation de ventilation normale.

L'installation comporte essentiellement un puits d'aération unique situé exactement au centre de l'ouvrage, équipé d'un ventilateur à hélice et fonctionnant à l'aspiration (fig. 14).

Elle comprend en particulier :

— 1 divergent de 14°5 d'angle au sommet, 6,70 m de diamètre inférieur et 10,18 m de diamètre supérieur, au niveau du plan de rotation de l'hélice ;

— 1 hélice métallique à 10 pales de 10,15 m de diamètre ;

— 1 diffuseur de sortie d'air de forme circulaire, avec une hauteur libre sous champignon de 4,10 m ;

— 2 bâtiments annexes servant, l'un de salle des machines (poste de transformation, moteurs électriques, etc.), l'autre de salle de montage du ventilateur.

Le puits d'aération est raccordé avec l'intrados de la voûte par un convergent de 9 m de diamètre à la base, équipé d'une grille d'entrée, assurant un certain guidage des filets d'air. Les dimensions principales : angle au sommet du divergent, diamètre du ventilateur et hauteur libre sous le champignon du diffuseur de sortie, ont été fixées après essais sur modèle

(11) Ces essais ont été décrits dans notre étude « L'Autoroute de l'Ouest, nouvelle sortie de Paris », publiée dans le numéro juillet-août de 1941 des Annales des Ponts et Chaussées. Nous nous devons de signaler la part qu'y a prise, ainsi qu'à la mise au point du projet de ventilation normale, M. Spinetta, alors Ingénieur des T. P. E. à la Subdivision de construction du tunnel de Saint-Cloud.

(12) Voir Annales des Ponts et Chaussées, juillet-août 1941.

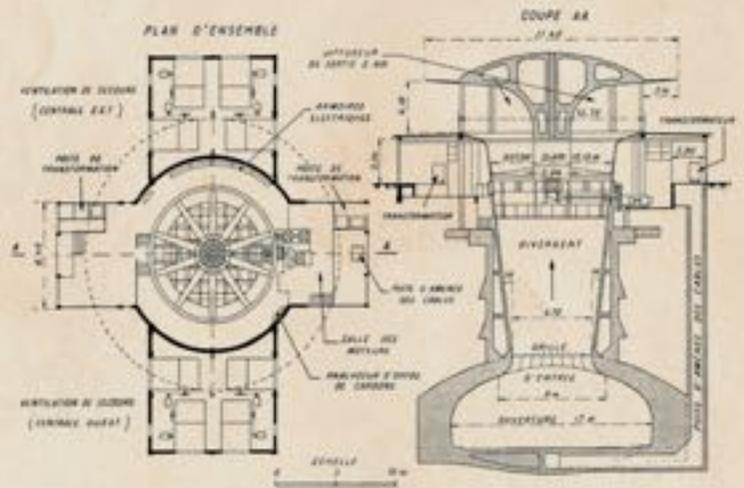


Fig. 14. — Installation de ventilation. Plan d'ensemble. Coupe AA'.

réduit au 1/25, qui ont permis de déterminer les valeurs donnant le meilleur coefficient d'utilisation (12).

La commande du ventilateur est assurée en marche normale, par un groupe de deux moteurs du type asynchrone, à deux puissances chacun, montés sur le même axe horizontal, la transmission s'effectuant par l'intermédiaire d'un renvoi d'angle avec poulies à gorge et courroies de section trapézoïdale (fig. 15).

Les puissances mises en jeu peuvent être ainsi, suivant les besoins, de 12, 20, 30 ou 125 ch. Par mesure de sécurité, le groupe moteur a été doublé après coup par un moteur de secours indépendant de 145 ch installé en 1952 et dont la puissance supérieure permet en outre une ventilation plus poussée pendant les grosses pointes horaires.

Un dispositif d'embrayage-débrayage, intéressant à la fois la poulie commandée à partir de l'arbre moteur du premier groupe et un réducteur à engrenages lié au moteur de secours, permet le changement de service en quelques minutes.

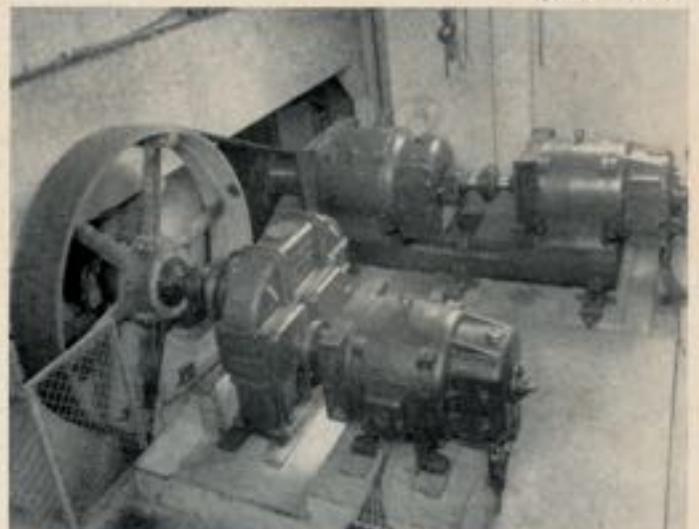
Des mesures faites lors de la mise en service de l'installation initiale au mois de mai 1940 avaient donné, pour les

Fig. 15. — Groupes moteurs de la ventilation normale.

A l'arrière-plan, le groupe 4 puissances avec le système d'entraînement du ventilateur par courroie et poulie, et, sur le devant, le moteur de 145 ch associé au réducteur à engrenage par l'intermédiaire d'un manchon élastique.

Le dispositif d'embrayage-débrayage de ce groupe est situé entre le réducteur et la poulie. Le dispositif d'embrayage-débrayage de la poulie est placé derrière cette dernière.

(Photo Jacob.)



différents régimes de ventilation, les résultats suivants (tableau I) :

TABLEAU I

Puissance du moteur (ch)	Tr/mn		Débit d'air aspiré en m ³
	Moteur	Hélice	
12	350	31,6	200
20	480	42	250
50	725	63,4	420
125	980	85,6	590

La vitesse d'aspiration verticale correspondante calculée au col du divergent variait de 6 à 17 m/s.

Les débits d'air étaient calculés en mesurant, au moyen d'un tube de Pitot, la dépression provoquée par l'appel d'air au niveau du divergent. Les indications données par une prise statique placée contre la paroi latérale étaient affectées d'un coefficient moyen de réduction pour tenir compte de la répartition variable des vitesses aux différents points de la section intéressée.

Cette méthode de mesure, il convient de le souligner, comportait une large marge d'incertitude, en ce qui concerne notamment l'évaluation du coefficient de réduction susvisé et il est vraisemblable que les chiffres donnés ci-dessus pour les débits d'air doivent être considérés comme trop forts.

C'est en tout cas ce qui paraît ressortir de mesures beaucoup plus précises effectuées en 1957 pour les 3 régimes de ventilation supérieurs, et dont les résultats sont consignés ci-après (tableau II) :

TABLEAU II

Puissance du moteur (ch)	Tr/mn			Débit en m ³ /s
	Moteur	Arbre horizontal	Hélice	
50	732	123	63,5	280 à 300
125	1 000	168	86,5	400 à 450
145	990	180	93	460 à 500

L'évaluation des débits était faite en partant de la mesure directe, au moyen d'un anémomètre « Richard » placé successivement au droit de chacune des cases de la grille de base du divergent, des vitesses réelles d'écoulement de l'air pour un régime permanent donné (13).

Installation de secours.

Telle qu'elle a été réalisée, l'installation mécanique décrite ci-dessus et que nous appellerons « ventilation normale », s'est révélée robuste et simple. Cependant, si les dispositions prises

(13) Pour le moteur 50 ch, le plus usuel, ces vitesses variaient de 4 m/s au centre, à 8 m/s à la périphérie, avec une répartition superficielle fort irrégulière (fig. 16).

Une constatation analogue se dégageait de la mesure de la perte de charge à 1 m au-dessus de la grille, qui passait de 14 mm d'eau sur les parois à 5 mm seulement au centre.

(14) Il y avait sept ans que l'installation fonctionnait sans défaillance, à l'exception d'une réparation portant sur les roulements situés entre les moteurs et l'hélice, qui avait pu être effectuée, en novembre 1953, tout en maintenant une ventilation suffisante aux heures de pointe.

permettent de pallier, par le jeu des rechanges, une défaillance inopinée d'un groupe moteur ou de la transmission correspondante, il n'en est pas de même en ce qui concerne le dispositif d'entraînement de l'hélice situé à l'intérieur de la baie d'aération proprement dite, et l'hélice elle-même, dont l'entretien et la réparation ne peuvent se faire qu'en dehors des temps de marche, c'est-à-dire d'une façon discontinue, pendant les heures creuses de nuit.

L'importance toujours croissante du trafic empruntant le tunnel de Saint-Cloud conduit en effet à faire fonctionner la ventilation artificielle en moyenne une quinzaine d'heures par jour, et cela pendant 365 jours par an. Cette seule indication montre combien est dur le service demandé aux pièces mécaniques en mouvement, et l'on s'explique que, dans ces conditions, il est apparu nécessaire de doubler l'installation normale par une installation de secours indépendante, capable de la suppléer pendant les périodes d'arrêt, pour entretien et réparation, qu'on peut d'ailleurs chercher à faire coïncider avec des périodes de moindre circulation routière.

Alors que cette installation de secours était déjà décidée et étudiée, mais non encore réalisée, un incident d'exploitation s'est chargé d'ailleurs d'en souligner l'impérieuse nécessité.

Le 12 août 1956, un accident mécanique bénin, le dévissage d'un écrou maintenant en place la roue dentée à engrenage conique qui entraîne l'arbre vertical de l'hélice, provoqua une avarie grave des organes mécaniques, dont la réparation, y compris le temps nécessaire pour le montage et le démontage de la plate-forme de travail et des échafaudages annexes, entraîna un arrêt complet de la ventilation jusqu'au 10 septembre, soit pendant près d'un mois (14).

Bien que coïncidant, par chance, avec la période de moindre circulation du mois d'août et du début de septembre, cette interruption ne fut pas sans entraîner de sérieuses difficultés dans l'exploitation du tunnel.



Pour répondre à ce qu'on attendait d'elle, l'installation de secours devait satisfaire, dans sa conception, à un certain nombre de conditions :

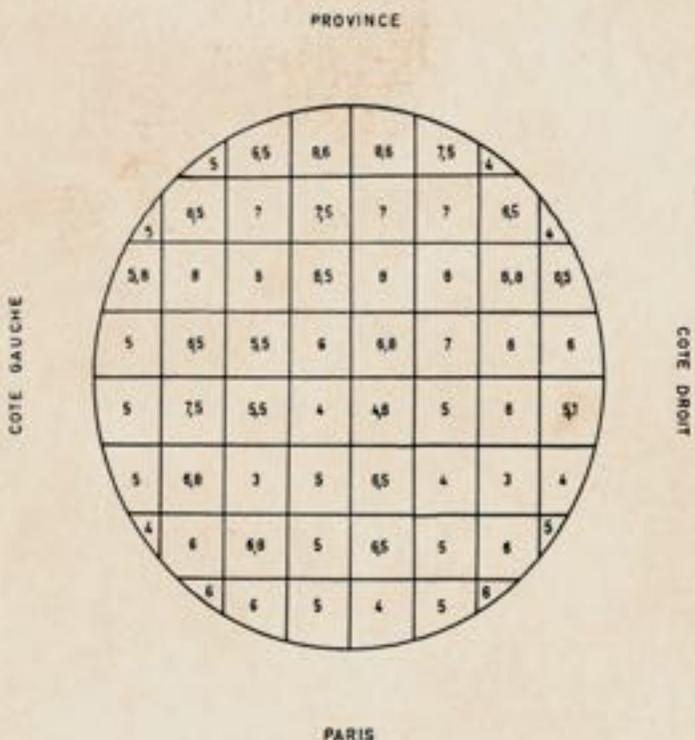


Fig. 16. — Essai de débit du moteur 50 ch (6/8/56). Répartition des vitesses verticales en m/s au niveau de la grille de base.

— pouvoir suppléer avec un temps mort aussi réduit que possible à une défaillance inopinée de la ventilation normale ;

— être entièrement indépendante de celle-ci, tant en ce qui concerne sa mise en place et son entretien ultérieur, qu'au point de vue des possibilités d'accès et d'entretien de l'installation de ventilation normale pendant la marche de la ventilation de secours ;

— enfin, tout en utilisant le même puits d'aération, l'installation nouvelle ne devait pas réduire sensiblement le débit et le rendement de l'installation normale.

Ces diverses conditions ont conduit notamment à écarter la solution d'un simple doublement du ventilateur par l'installation d'une deuxième hélice, placée à poste fixe au-dessous de la première et qui aurait pu être mise en marche de façon indépendante, et à adopter finalement une formule entièrement différente, basée sur l'emploi de ventilateurs centrifuges groupés par 4 dans 2 chambres disposées de part et d'autre du bâtiment principal et aspirant latéralement dans la baie d'aération préalablement isolée de l'atmosphère extérieure (fig. 17, 18 et 18 bis).

Le plafond des chambres des ventilateurs est situé au niveau inférieur des ouvertures d'évacuation des gaz de la ventilation normale et comporte une ouverture horizontale de 22 m² de surface destinée à l'appel d'air dans le tunnel. L'air vicié est rejeté à l'extérieur par chacun des ventilateurs, à travers une courte gaine de refoulement terminée par des volets fixes inclinés à 45° vers le haut.

L'obturation des baies de refoulement de l'installation normale est réalisée par des volets métalliques disposés sur la couronne extérieure du diffuseur. En régime normal, ces volets sont placés parallèlement aux filets d'air et, compte tenu de la vitesse faible de ces derniers, n'entraînent aucune perte de charge appréciable. Les refoulements mêmes des ventilateurs sont munis de volets mobiles s'ouvrant automatiquement dès la mise en route de la ventilation, et se refermant avec l'arrêt des moteurs, isolant ainsi les turbines au repos.

Chaque ventilateur est équipé d'un moteur électrique à 2 vitesses permettant son utilisation en 2 points de sa caractéristique :

- à bas régime (210 tr/mn — débit : 35 m³/s) ;
- à grand régime (310 tr/mn — débit : 60 m³/s).

Dans le premier cas, la puissance mise en jeu est de 14 ch ; elle est de 40 ch dans le second. Pour l'utilisation simultanée des 8 moteurs à grand régime, il est donc nécessaire de disposer de 300 kVA environ, ce qui a conduit à doubler le poste de transformation de la ventilation normale.

Ce doublement apporte d'ailleurs une sécurité supplémentaire pour le fonctionnement de cette dernière. Pour l'utilisation de la ventilation de secours, chaque poste de transformation est affecté à l'une des centrales, chaque centrale pouvant fonctionner seule et chacun des moteurs pouvant tourner individuellement à bas régime ou à grand régime, ce qui donne une grande souplesse à l'installation.

Toutes les sécurités dans les commandes électriques ont été prises, de manière à éviter le moindre incident et à écarter tout danger pour le personnel d'exploitation : klaxons de mise en route, coupures sur les postes, enclenchement des moteurs un par un, suivant un dispositif de commande en cascade à retardement par relais chronométriques, renseignements donnés par voyants rouges et verts, etc. Deux nouvelles armoires électriques ont été placées au bout des armoires relatives à l'installation normale, l'une pour le choix et le contrôle de l'alimentation générale, l'autre pour la commande et le contrôle des moteurs.

Du point de vue des débits d'air aspiré et des puissances mises en jeu, les essais effectués pour la réception de l'installation ont donné les résultats suivants (tableau III) :

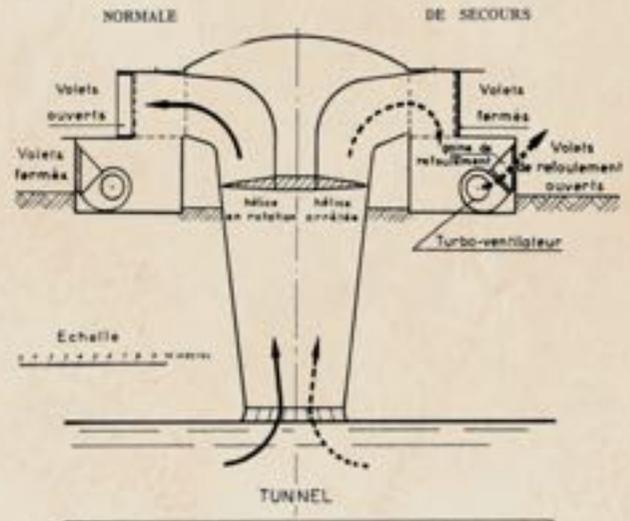


Fig. 17. — Schéma des deux systèmes de ventilation normale et de secours.



(Photo Jacob.)

Fig. 18. — Maquette de la station de ventilation.

A droite et à gauche, les chambres des ventilateurs de la ventilation de secours ;
Sur le devant, la chambre des moteurs de la ventilation normale. Les volets d'obturation des baies de refoulement sont dans la position de fonctionnement de la ventilation normale. Sur le champignon du déflecteur, l'antenne de T.S.F. assurant les liaisons radio de la police de l'autoroute.

Fig. 18 bis. — Vue de la station de ventilation dans le parc de Saint-Cloud.

(Photo Jacob.)



TABLEAU III

Ventilateur N°	Vitesse moyenne en m/s		Débit en m ³ /s		Puissance moyenne en kW	
	Centrale		Centrale		Centrale	
	Est	Ouest	Est	Ouest	Est	Ouest
1° Fonctionnement des 8 ventilateurs à petite vitesse.						
1	5,65	5,36	32,82	31,14	9,7	9,7
2	5,0	5,50	29,05	31,95	—	—
3	5,16	5,23	29,98	30,50	—	—
4	5,08	5,63	29,51	33,0	—	—
Totaux partiels.			121,36	126,59	33,8	38,8
Totaux généraux			247,95		77,6 environ 90 kVA	
2° Fonctionnement des 8 ventilateurs à grande vitesse.						
1	9,05	8,38	52,58	48,69	28,5	29,5
2	8,75	8,17	50,90	47,46	—	—
3	9,22	8,07	53,57	46,89	—	—
4	8,96	8,48	52,05	49,27	—	—
Totaux partiels.			209,10	192,31	114,0	118,0
Totaux généraux			401,41		232,0 (environ 280 kVA)	

Ces résultats, mesurés au refoulement des ventilateurs, ont été sensiblement confirmés par des mesures de vitesse faites à la grille d'entrée du divergent, et l'on peut admettre que le débit correspondant aux 8 ventilateurs marchant en grande vitesse est de l'ordre de 400 m³/s. Dans ces conditions, la ventilation de secours marchant à petite vitesse correspond sensiblement au moteur de 50 ch de la ventilation normale et, à grande vitesse, au moteur de 125 ch. Il y a lieu de remarquer cependant que les puissances demandées par la ventilation de secours sont environ le double de celles dont se contente, à débit égal, la ventilation normale, ce qui est sans inconvénient majeur, étant donné son utilisation relativement limitée.

Contrôle de l'efficacité de la ventilation.

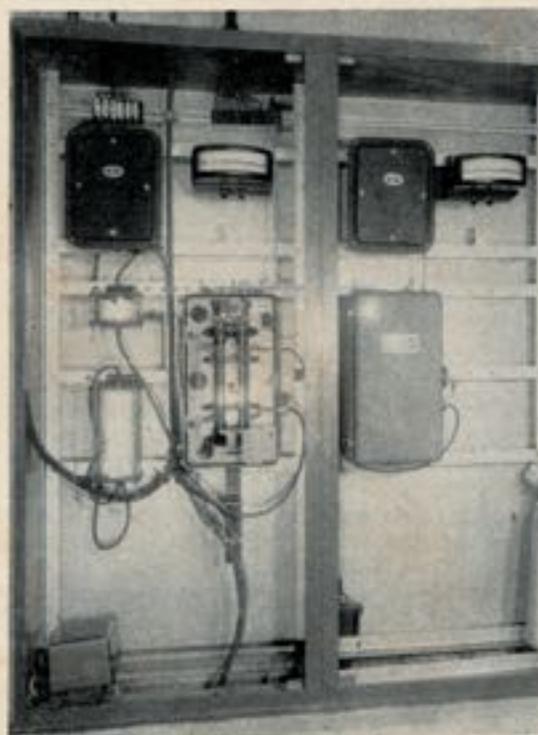
Il est essentiel de pouvoir se rendre compte, à tout moment, de la teneur en oxyde de carbone et en gaz carbonique de l'atmosphère du tunnel pour pouvoir régler la ventilation en conséquence, et prendre toutes mesures utiles, dans le cas où, accidentellement, le pourcentage admissible se trouverait dépassé.

Dispositif permanent de contrôle.

Aussi, un dispositif permanent de contrôle a-t-il été installé à la station de ventilation, avec répétition au tableau de commande du poste central de l'autoroute. Il permet une analyse continue de l'air évacué, qu'on peut considérer comme représentant l'atmosphère moyenne du tunnel.

Les prélèvements sont faits, d'une façon permanente, dans la baie d'aération, à 2 m environ au-dessus de la grille

du divergent. L'air aspiré par une petite pompe, en quatre points situés aux quatre extrémités de deux diamètres rectangulaires, est brassé dans une bêche de mélange puis traverse un filtre à poussière et un dessiccateur avant de passer dans l'analyseur (fig. 19).



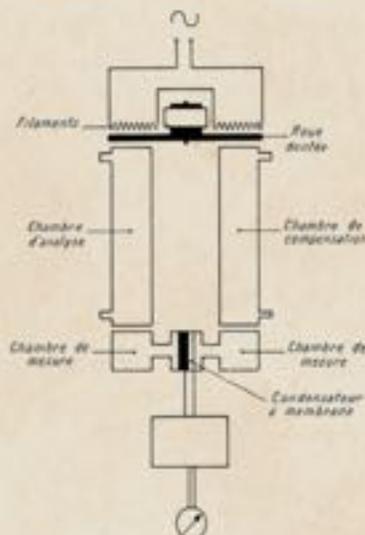
(Photo Jacob.)

Fig. 19. — Vue intérieure de l'armoire d'analyse des gaz à la station de ventilation.

Dans le compartiment de gauche, l'analyseur d'oxyde de carbone dont le couvercle a été enlevé. A sa gauche, le dessiccateur chimique surmonté du filtre principal. Au-dessus de ce dernier, le stabilisateur de tension. En haut, à droite, le cadran donnant le pourcentage d'oxyde de carbone et dont les indications sont répétées sur le tableau du poste central de commande du tunnel. En bas, à gauche, la pompe à valve, aspirant l'air dans la baie d'aération et le refoulant dans le circuit des analyseurs. Dans le compartiment de droite, l'analyseur de gaz carbonique. Dans le coin droit, la bouteille d'oxyde de carbone taré pour l'étalonnage de l'analyseur.

Ce dernier est du type à absorption sélective dans l'infrarouge, construit par l'O. N. E. R. A. (fig. 20).

Fig. 20. — Schéma de l'appareil analyseur d'oxyde de carbone.



Schématiquement, l'appareil comporte une source de chaleur constituée par deux filaments montés en série et portés au rouge par un courant électrique. Le premier envoie son rayonnement dans une chambre d'analyse, où passe l'air à contrôler ; l'autre, le sien dans une chambre de compensation, exactement semblable et contenant de l'air ordinaire. Les deux rayonnements sont simultanément interrompus à intervalles réguliers, par une roue dentée de forme convenable.

A la partie inférieure de l'appareil se trouve placée une chambre de

mesure divisée elle-même, par un condensateur à membrane, en deux compartiments situés respectivement sous la chambre d'analyse et sous la chambre de compensation.

Le rayonnement qui traverse la chambre d'analyse est absorbé plus ou moins, suivant la quantité plus ou moins grande d'oxyde de carbone contenue dans l'air traversé. Le réchauffement périodique du gaz contenu dans le premier compartiment de la chambre de mesure et l'élévation périodique de pression qui en résultent sont, de ce fait, plus faibles que l'échauffement et l'élévation de pression du même gaz, contenu dans le deuxième compartiment. Le condensateur à membrane se déforme donc sous l'influence des différences de pression et sa capacité varie périodiquement. On fait correspondre à ces variations de capacité des variations de tension que l'on amplifie, détecte et mesure.

L'appareil effectue ainsi, avec une précision de l'ordre de 1 p. 100, des mesures instantanées automatiques et continues, ce qui permet la lecture directe à tout moment et l'enregistrement sur bande mobile. Les indications sont répétées sur le tableau de commande du poste central de l'autoroute.

L'analyse de la teneur en gaz carbonique est faite dans des conditions analogues par un deuxième appareil basé sur le même principe.

D'une façon générale et depuis la mise en service de l'installation, les données fournies par les analyseurs n'ont fait apparaître que des teneurs en oxyde de carbone inférieures à 1/10 000 et, en tout cas, toujours très inférieures au maximum de 4/10 000 (15) considéré comme le seuil à ne pas dépasser. Les résultats sont aussi nets en ce qui concerne le gaz carbonique, d'ailleurs beaucoup moins dangereux en raison de sa densité, et qu'on n'a jamais trouvé en quantité gênante ni dans le tunnel ni dans le divergent.

Variation moyenne de la teneur en oxyde de carbone à la baie d'aération.

Encore que de telles vérifications soient fort difficiles, et qu'il ne puisse s'agir que de résultats qualitatifs et non quantitatifs, nous avons cherché à mettre en évidence la teneur en

oxyde de carbone dans l'atmosphère du tunnel en fonction du régime de ventilation utilisé et du niveau de la circulation.

On trouvera ci-dessous (fig. 21), reportées sur un même graphique et pour la période allant du 12 août 1954, à 16 h, au 13 août 1954, 0 h du matin, à la fois les variations du trafic données par les compteurs enregistreurs et celles de la teneur en oxyde de carbone fournies par les analyseurs. En regard, on a indiqué les régimes de ventilation utilisés, caractérisés par la puissance du moteur mis en marche.

On remarquera notamment la faible teneur en oxyde de carbone malgré l'arrêt de la ventilation, aux heures creuses de nuit, où la circulation est réduite à très peu de chose, et la nette remontée, à partir de 6 h du matin quand le trafic reprend. On remarquera également l'effet immédiat produit par la remise en route de la ventilation, avec le moteur de 50 ch.

Des constatations du même ordre peuvent être faites sur le deuxième graphique qui donne les mêmes éléments pour la journée du 17 août 1954. On peut y voir, notamment, les résultats obtenus par la substitution pendant 40 mn, au voisinage de 18 h, du régime de ventilation poussé avec moteur de 125 ch, au régime de ventilation réduite utilisant le moteur de 12 ch.

Appareils mobiles de contrôle.

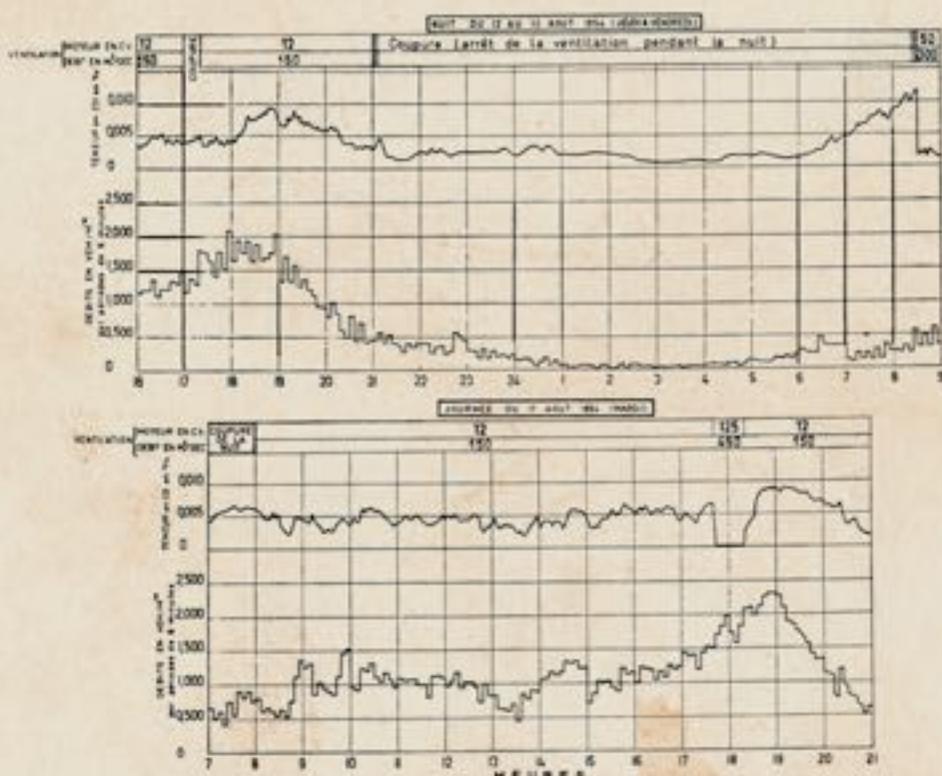
Les données fournies par les appareils de contrôle, installés à la baie d'aération et qui analysent l'air aspiré dans le tunnel avant son rejet dans l'atmosphère, doivent être considérées comme des indications moyennes (16).

Mais il est bien évident que les différentes sections du souterrain peuvent ne pas être ventilées d'une façon équivalente et que, la teneur moyenne restant acceptable, des accumulations locales inadmissibles pourraient se produire en certains points particuliers.

Il était donc intéressant de compléter les renseignements généraux recueillis par l'installation de contrôle de la baie d'aération, par des vérifications directes, effectuées dans le tunnel lui-même.

A cet effet, des appareils de détection du type décrit ci-dessus ont été montés sur des châssis mobiles, de manière à pouvoir être mis en station en différents points (fig. 22). Deux prises d'air, l'une à 1 m au-dessus de la chaussée, l'autre à 3 m, amènent l'air vicié dans une boîte-tampon (17) d'une quarantaine de litres environ d'où une pompe l'envoie vers les filtres et l'analyseur. A la partie supérieure du châssis sont fixés les appareils analyseurs et enregistreurs alimentés électriquement par un ensemble transformateur-redresseur qui est branché sur l'une des prises de courant installées dans les niches du tunnel.

Fig. 21.



(15) Pendant une période de quatre années consécutives, la teneur maxima relevée n'a pas une seule fois dépassé 1,5/10 000.

(16) En dehors de l'indication générale donnée sur la qualité moyenne de l'atmosphère à l'intérieur de l'ouvrage, elles mettent également en évidence le caractère non nocif de l'air refoulé à l'extérieur où il se trouve d'ailleurs immédiatement dilué. Ce refoulement est effectué, au surplus, en lisière du parc de Saint-Cloud dans une partie relativement isolée, à plus de 50 m des habitations les plus proches.

(17) Le rôle de la boîte-tampon, qui peut d'ailleurs être court-circuitée, est d'absorber les impulsions dues au passage des véhicules. Le temps de réponse de l'appareil se trouve alors majoré d'une demi-heure environ.

L'utilisation de ces appareils mobiles a permis de constater, comme on pouvait s'y attendre, que la répartition de l'oxyde de carbone dans l'air du tunnel n'est pas homogène et qu'elle est, en général, plus forte à une tête qu'à l'autre, en fonction notamment du sens de la circulation prépondérante.

Il était intéressant, dans ces conditions, de procéder à des mesures simultanées, en différents points de l'ouvrage, et de rapporter les résultats obtenus aux conditions concomitantes de la circulation.

Au préalable, nous avons cherché à nous rendre compte de la manière dont se propageait à l'intérieur du tunnel le courant d'air longitudinal provoqué par l'aspiration de la baie centrale.



(Photo Jacob.)

Fig. 22. — Chariot équipé pour la détection de l'oxyde de carbone à l'intérieur du tunnel.

Circulation de l'air dans le tunnel en fonction de la ventilation.

Des mesures de la vitesse longitudinale du courant d'air de ventilation ont été faites dans la nuit du 20 au 21 novembre 1954, à une heure où la circulation était pratiquement nulle, et pour les deux régimes de ventilation correspondant respectivement aux moteurs de 50 et 145 ch. La température était de +3,5 et le vent extérieur de 4 m/s, orienté au Sud-Sud-Est.

Les mesures étaient faites dans des profils en travers espacés de 50 m, au droit des trottoirs et dans l'axe de l'ouvrage, à 1,80 m au-dessus de la chaussée. Elles sont traduites par les graphiques ci-après (fig. 23).

On ne sera pas sans remarquer l'inégale répartition de la vitesse de l'air, entre les deux trottoirs nord et sud, répartition qui s'inverse d'ailleurs en passant d'un côté à l'autre de la

(18) Nous avions cru pouvoir rapporter cette dissymétrie à l'effet de rotation dû à l'hélice du ventilateur. Mais elle s'est retrouvée lorsque fonctionnait seule la ventilation de secours qui n'introduit aucun effet de ce genre.

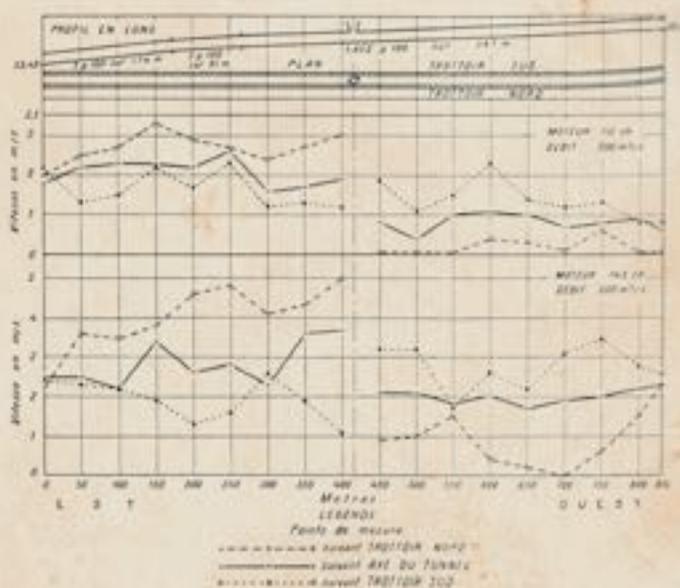


Fig. 23. — Courant d'air de ventilation à l'intérieur du tunnel.

baie d'aération (18). A noter que le passage d'une voiture suffisait à inverser le courant d'air pendant quelques minutes dans les parties les moins ventilées, qui sont aussi celles où le courant d'air artificiel est contrarié par le courant de circulation des véhicules.

On remarquera également que la moitié Est du tunnel était mieux ventilée que la moitié Ouest, ce qui peut être attribué à la composante du vent parallèlement à l'ouvrage.

Répartition de la teneur en oxyde de carbone à l'intérieur de l'ouvrage.

Des mesures directes ont été effectuées les dimanches 30 septembre et 7 octobre 1956, ainsi que le mercredi 20 août 1956. Elles utilisaient 4 appareils détecteurs placés par paire, un sur chaque trottoir, dans le tunnel même, à 60 m des entrées. A ces appareils mobiles s'ajoutait l'appareil de détection permanente de la baie d'aération. Les prises d'air, dans le tunnel, étaient faites pour chaque appareil, simultanément à 1 m et 3 m du sol. Les enregistrements des 4 appareils du tunnel et de l'appareil de la baie d'aération étaient simultanés. Les résultats sont donnés dans les graphiques ci-contre. Nous y ajouterons les commentaires suivants :

Graphique du 30 septembre 1956 (fig. 24). On observe deux maxima de la teneur en oxyde de carbone que nous exprimerons dans tout ce qui suit, en 1/10 000 :

- à la tête Est, vers 10 h, 2,4 sur le trottoir Nord et 3 sur le trottoir Sud, soit 2,7 en moyenne ;
- à la tête Ouest, vers 15 h 30, 1,8 sur le trottoir Nord, et 2 sur le trottoir Sud, soit 1,9 en moyenne.

Ces maxima correspondent aux maxima de la circulation dans l'un et l'autre sens.

A la baie centrale d'aspiration, la teneur en oxyde de carbone est restée inférieure ou égale à 1. Aux heures des maxima indiqués ci-dessus, elle était de 0,6.

Graphique du 7 octobre 1956 (fig. 24 bis). Les résultats correspondant aux maxima de la circulation sont du même ordre que les précédents :

- à la tête Est, vers 10 h, 1,8 sur le trottoir Nord, 1,2 sur le trottoir Sud, soit 1,5 en moyenne ;
- à la tête Ouest, vers 15 h, 1,2 sur le trottoir Nord, 1 sur le trottoir Sud, soit 1,1 en moyenne.

A la baie centrale, la teneur en oxyde de carbone est restée de l'ordre de 0,6.

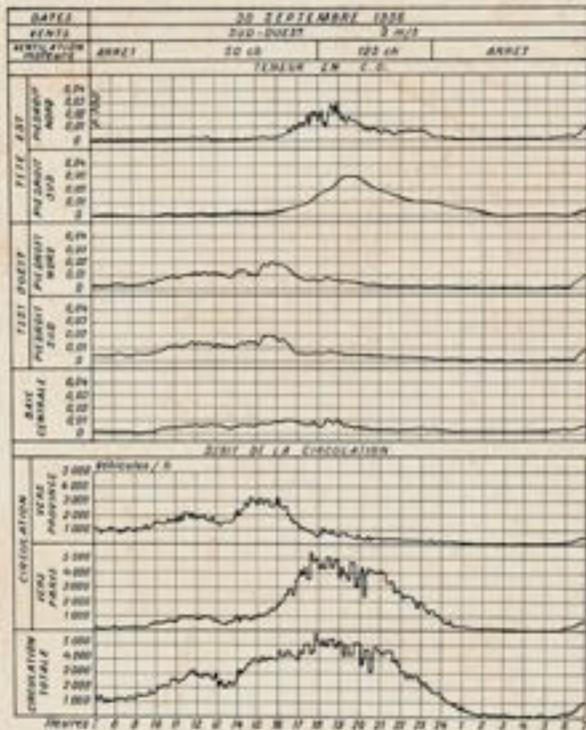


Fig. 24. — Variations de la teneur en oxyde de carbone à l'intérieur du tunnel, en fonction de l'intensité de la circulation et du régime de ventilation (30 septembre 1956).

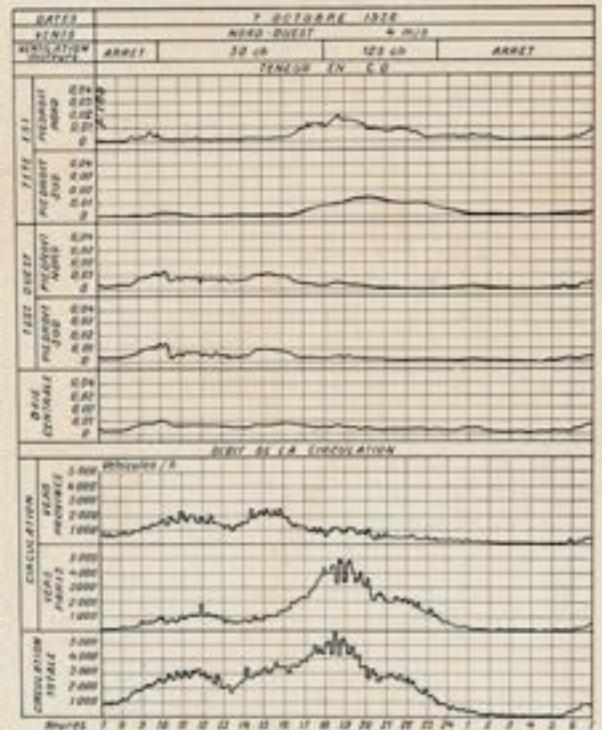


Fig. 24 bis. — Variations de la teneur en oxyde de carbone à l'intérieur du tunnel, en fonction de l'intensité de la circulation et du régime de ventilation (7 octobre 1956).

Fig. 24 ter. — Variations de la teneur en oxyde de carbone à l'intérieur du tunnel, en fonction de l'intensité de la circulation, ventilation arrêtée (29 août 1956).

Graphique du 29 août 1956 (fig. 24 ter). L'enregistrement a été fait pendant une période d'arrêt accidentel de la ventilation :

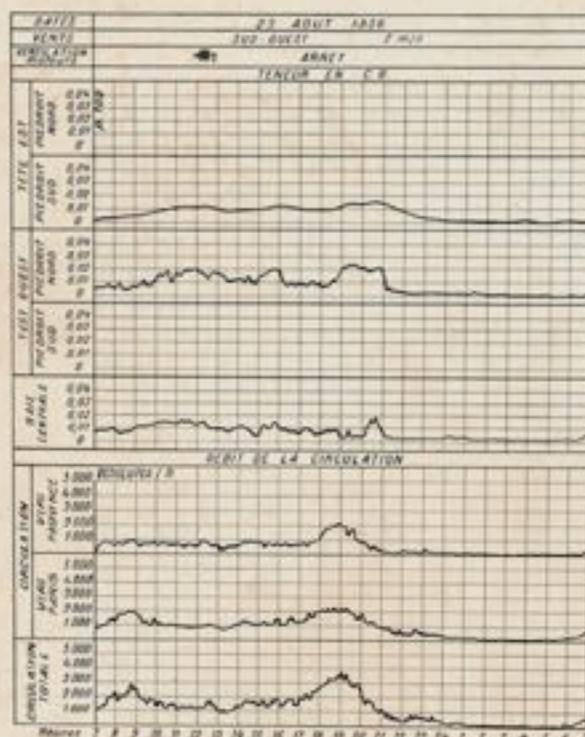
La circulation de pointe, vers 19 h, était d'environ 2 000 véh/h dans chaque sens.

A ce moment, la teneur en oxyde de carbone a atteint en moyenne 1,5 à la tête Est, 2,4 à la tête Ouest et 2 à la baie centrale.

La concentration en oxyde de carbone était restée à peu près constante de 0 h à 18 h, alors que le débit de la circulation variait lui-même dans une faible proportion. La pointe de circulation de 19 h a produit une augmentation appréciable de la concentration aux têtes, mais une diminution notable au milieu du tunnel. On peut penser que le mouvement des véhicules avait créé un appel d'air par la baie centrale. Ce phénomène paraît confirmé par le fait que la plus forte concentration en oxyde de carbone sous la baie centrale se produit après 20 h, quand le débit de la circulation a commencé à décroître.

Enfin, on note une teneur en oxyde de carbone plus forte à la tête Ouest qu'à la tête Est, ce qui est probablement dû à la différence d'altitude des deux têtes (10)

(10) L'un des graphiques d'enregistrement (tête Est, piédroit Sud) se présente sous la forme d'une ligne à peu près continue, alors que les autres sont en dents de scie. Ce fait provient de l'interposition entre la prise d'air et l'appareil analyseur de la boîte tampon (voir nota 17, page 919) qui absorbe les impulsions dues au passage des véhicules.



Effet de piston dû au courant de circulation prépondérante.

Le tableau IV rassemble un certain nombre de résultats correspondant à 4 séries d'enregistrements effectuées en septembre et octobre 1956, en même temps qu'il indique les conditions de circulation et de ventilation correspondantes.

Y figurent pour un jour et une heure déterminés :

- la teneur maxima en oxyde de carbone C_m relevée au voisinage de la tête la moins bien ventilée : tête Ouest (O) ou tête Est (E) ;
- la teneur minima en oxyde de carbone C_n relevée au voisinage de la tête la mieux ventilée ;
- la teneur en oxyde de carbone C_s relevée à la baie centrale ;
- le nombre de véh/h V_m dans le sens le plus circulé ;
- le nombre de véh/h V_n dans le sens le moins circulé,

ainsi que le sens de la circulation prépondérante (vers l'Ouest ou vers l'Est) ;

— le régime de ventilation utilisé : moteur de 50 ch ou de 125 ch.

Son examen met en évidence l'effet de piston résultant de la dissymétrie des courants de circulation et qui provoque une certaine accumulation de gaz au voisinage de la tête de sortie, dans le sens du courant de circulation prépondérante. Il arrive d'ailleurs que ce phénomène se concrétise par l'apparition d'un léger nuage de fumée ou de poussière, flottant sur une

TABLEAU IV

Jours et heures	Tête la mieux ventilée	Teneur en oxyde de carbone en 1/10 000			V _n	V _a	Régime de ventilation	Circulation prépondérante
		C _n	C _a	C _m				
<i>Dimanche 16-9-56</i>								
11 h 30	O	1,3	0,6	0,3	2 800	700	50 ch	Vers l'Ouest
16 h	O	1,4	0,7	0,3	2 900	1 000	50 ch	—
19 h	E	1,8	0,6	0,4	4 800	800	125 ch	— l'Est
<i>Samedi 29-9-56</i>								
15 h 30	O	1,4	0,7	0,4	2 600	1 500	50 ch	Vers l'Ouest
20 h	E	1,45	0,8	0,4	2 800	1 500	50 ch	— l'Est
<i>Dimanche 30-9-56</i>								
15 h 30	O	1,9	0,9	0,2	3 000	1 200	50 ch	Vers l'Ouest
19 h	E	2,7	0,9	0,5	4 800	800	125 ch	— l'Est
<i>Dimanche 7-10-56</i>								
15 h	O	1,1	0,6	0,15	2 300	1 000	50 ch	Vers l'Ouest
19 h	E	1,5	0,5	0,2	4 500	1 100	125 ch	— l'Est

TABLEAU V

Données thermiques et hygrométriques.

	Température	Humidité relative
Air extérieur	11°7	58 p. 100
Dans le souterrain :		
1/4 côté Paris	12°5	44 p. 100
Baie d'aération	13°6	41 p. 100
3/4 côté Province	12°5	44 p. 100

TABLEAU VI

Résultats analytiques.

Points de prélèvements	Teneur en oxyde de carbone	Teneur en gaz carbonique
	en $\frac{1}{10\ 000}$	en $\frac{1}{10\ 000}$
Prélèvement en marche	0,104	3,5
Trottoir Nord à 140 m de l'entrée Est	0,208	3,5
Trottoir Nord à 280 m de l'entrée Est	0,600	3,1
Trottoir Nord sous la baie d'aération	0,434	3,5
Trottoir Nord à 550 m de l'entrée Est	Traces	4
Trottoir Nord à 650 m de l'entrée Est	Néant	3,1
Trottoir Sud à 140 m de l'entrée Est	0,117	3,1
Trottoir Sud sous la baie d'aération	Néant	4
Trottoir Sud à 625 m de l'entrée Est	0,2	4
Prélèvement au-dessus de la baie d'aération	Traces	3,1

centaine de mètres au voisinage de cette tête, on par une zone de moins bonne visibilité.



Enfin, pour être complet, nous donnerons les résultats d'analyses d'air effectuées en laboratoire, sur des échantillons prélevés le 27 mars 1953, entre 15 h 30 et 17 h 30, dans le tunnel de Saint-Cloud.

La circulation était, en chiffres ronds, de 780 véh/h en direction de l'Ouest, et de 700 véh/h en direction de l'Est. La vitesse du vent était de 6 m/s en direction Nord-Nord-Est.

Les conditions thermiques et hygrométriques et les résultats d'analyses sont donnés par les tableaux V et VI.

On remarquera que les résultats ainsi obtenus confirment les ordres de grandeur donnés par les appareils enregistreurs.

Confrontation du calcul et de l'expérience.

Comme nous l'avons déjà indiqué, on peut, à partir d'hypothèses simples touchant la composition du trafic, la consommation moyenne de carburant par catégorie de véhicules et le volume moyen d'oxyde de carbone produit par la combustion d'un litre de carburant, calculer a priori la teneur moyenne de ce gaz dans l'atmosphère du tunnel, pour un niveau de circulation et un régime de ventilation donnés.

On peut être tenté alors de rapprocher les taux ainsi calculés de ceux mesurés expérimentalement dans les mêmes conditions de circulation et de ventilation. C'est ce que nous nous proposons de faire ci-après, à titre simplement indicatif, bien entendu, et sans nous dissimuler ce qu'un propos de ce genre a de téméraire.

Les données de base du calcul sont les suivantes :

Composition du trafic.

Elle a été déduite de comptages de contrôle effectués en novembre et décembre 1954, qui ont porté sur près de 50 000 passages au tunnel de Saint-Cloud, et qui ont permis de déterminer, avec une exactitude suffisante, les pourcentages dans lesquels interviennent, dans la circulation de l'autoroute, les véhicules de différentes puissances.

Consommation moyenne de carburant.

Les pourcentages de véhicules par catégories, ainsi que les consommations moyennes de carburant admises pour chacune de celles-ci, sont donnés dans le tableau VII :

TABLEAU VII

Puissance en ch	Consommation moyenne aux 100 km en palier	Importance relative dans la circulation totale	Consommation relative correspondante
<i>Véhicules légers :</i>			
Jusqu'à 4 ch	4	0,23	0,92
De 5 à 11 ch	10	0,53	5,30
Au-delà de 11 ch.	20	0,16	3,20
<i>Véhicules lourds :</i>			
Véhicules utilitaires	40	0,08	3,2
<i>Circulation totale..</i>		1,00	12,62

Pour tenir compte de la déclivité moyenne de l'ouvrage, voisine de 3 p. 100, nous admettons, d'autre part, une majoration de consommation de 20 p. 100 pour les véhicules montants supposés, par mesure de simplification, en nombre égal aux véhicules descendants, ce qui conduit finalement au chiffre moyen de 13,9 l aux 100 km.

Ce chiffre se rapporte à la circulation de semaine. Il doit être corrigé en ce qui concerne la circulation du week-end du samedi midi au lundi midi — pendant lequel l'autoroute est interdite aux véhicules utilitaires lourds. Avec les mêmes hypothèses on arrive, dans ce cas, au chiffre de 11,2 l.

Production d'oxyde de carbone.

Nous avons supposé que 1 l d'essence brûlé dans un moteur d'automobile, dans des conditions normales, produit en moyenne 500 l d'oxyde de carbone. Ce chiffre, qui est très généralement admis, résulte d'expériences faites avant la guerre, par M. Kohn Abrest pour la Ville de Paris, et se trouve recoupé de façon satisfaisante par différentes constatations faites depuis.

Proportion d'oxyde de carbone dans l'atmosphère du tunnel.

En régime permanent, la proportion moyenne d'oxyde de carbone, dans l'atmosphère du tunnel, est en principe égale au quotient du volume de gaz formé, par seconde, par le volume d'air frais apporté, pendant le même temps, par la ventilation et que nous avons pris égal à 300 m³ pour le régime du moteur de 50 ch et 450 m³ pour celui du moteur de 125 ch (20).

Dans ces conditions, pour une circulation de semaine de 1 000 véh/h, on arrive à une teneur en oxyde de carbone, exprimée en 1/10 000, de 0,533 avec la ventilation à 50 ch et de 0,357 pour la ventilation à 125 ch. Pour la circulation de week-end, ces mêmes chiffres sont respectivement de 0,431 et 0,288.

Le tableau VIII permet la comparaison des pourcentages ainsi calculés, avec les pourcentages maxima mesurés dans le souterrain, à différentes heures, pendant un samedi et trois dimanches de septembre et octobre 1956.

D'une façon générale et à une exception près, les chiffres calculés sont supérieurs aux chiffres réels qui sont déjà eux-mêmes des chiffres maxima et non moyens. Mais les ordres de grandeur sont respectés et la concordance est très satisfaisante. Il convient d'ailleurs de ne pas perdre de vue que le calcul simplifié fait ci-dessus n'a pu tenir compte de l'influence des agents extérieurs : mouvement des véhicules et composante du vent, notamment, qui peuvent activer la ventilation artificielle.

(20) Voir page 916.

TABLEAU VIII

Jours et heures	Densité de la circulation en véh/h	Régime de ventilation	Teneur en oxyde de carbone en 1/10 000	
			C ₂ maximum mesuré	C calculé
<i>Dimanche 16 septembre 1956 :</i>				
11 h 30	3 500	50 ch	1,3	1,5
16 h	3 000	50 ch	1,1	1,7
19 h	5 600	125 ch	1,5	1,6
<i>Samedi 23 septembre 1956 :</i>				
15 h 30	4 100	50 ch	1,4	1,8
20 h	4 300	50 ch	1,5	1,9
<i>Dimanche 30 septembre 1956 :</i>				
15 h 30	4 200	50 ch	1,9	1,8
19 h	5 600	125 ch	2,7	1,6
<i>Dimanche 7 octobre 1956 :</i>				
15 h	3 300	50 ch	1,1	1,4
19 h	5 600	125 ch	1,5	1,6

Conclusion.

De tout ce qui précède et d'une expérience de près de huit années, il semble qu'on puisse dégager quelques conclusions pratiques, qui, bien entendu, sont fonction des caractéristiques propres au tunnel de Saint-Cloud : longueur, section, tracé en plan et en profil, et ne sauraient être transposées à d'autres ouvrages sans les correctifs nécessaires.

La première de ces conclusions est que, compte tenu de l'importance de la circulation, il n'était pas possible de se passer d'une ventilation artificielle.

On peut chercher d'ailleurs à se rendre compte du niveau de circulation à partir duquel une telle ventilation devient indispensable, et nous disposons, pour le faire, de trois séries de recouvrements intéressants :

a) Avant la mise en service de l'installation de ventilation normale (mai 1940), la circulation n'ayant jamais dépassé 15 000 véh/j, on a écoulé des trafics horaires qui ont pu atteindre 1 200 à 1 600 véh, sans qu'il en résulte d'inconvénients notables ;

b) Au contraire, pendant l'arrêt forcé d'un mois (août-septembre 1956) de l'installation de ventilation, provoqué par un accident mécanique, des trafics horaires de pointe, allant de 2 600 à 4 800 véh en chiffres ronds, ont dû emprunter le tunnel de Saint-Cloud non ventilé et il en est résulté de graves inconvénients.

Le vendredi 31 août 1956, avec un trafic horaire de pointe de 4 518 véh entre 18 h et 19 h, des incidents sérieux dus notamment à l'accumulation de fumées et de la mauvaise visibilité se sont produits au point que la circulation a dû être coupée et détournée à 4 reprises.

Le 1^{er} septembre 1956, à 15 heures, avec un trafic de 2 600 véh/h, principalement en direction de l'ouest, la teneur en oxyde de carbone mesurée à la baie d'aération a atteint le taux de 3/10 000 déclenchant le dispositif d'alerte. Il en a été de même le 3 septembre, à 18 h 50, avec une circulation de 2 700 véh/h.

c) en marche normale, les consignes actuelles d'exploitation prévoient l'arrêt de la ventilation le dimanche soir, quand le trafic tombe au-dessous de 800 véh par demi-heure.

En semaine, la ventilation arrêtée en général vers 21 h 30 — le trafic est alors voisin de 800 à 1 000 véh — est remise en marche, le matin, suivant les saisons, entre 6 h et 7 h 30. Le trafic peut atteindre alors 1 500 véh/h. Mais la ventilation est souvent nécessaire avant que ce chiffre soit atteint, du fait de la proportion importante des camions Diesel qui produisent des fumées.

On peut déduire de ces indications que des trafics de semaine de 1 000 véh comportant une certaine proportion de poids lourds, et des trafics de dimanche de 1 500 véh comportant uniquement des véhicules de tourisme, peuvent se passer de ventilation. Par contre, dès que le trafic dépasse 2 000 ou 2 500 véh, cette dernière devient indispensable. Il convient d'ailleurs de souligner que la mise en service de la ventilation artificielle est souvent rendue nécessaire, plus pour l'évacuation des fumées et des poussières qui diminuent la visibilité et engendrent de mauvaises odeurs, qu'en raison d'un pourcentage trop élevé d'oxyde de carbone (21).

(21) Ceci nous a conduit à installer un dispositif permettant de mesurer l'opacité de l'atmosphère à l'intérieur du tunnel. Un projecteur fixé sur un piédroit envoie un faisceau de lumière monochromatique verte, d'intensité constante, sur un récepteur situé à une certaine distance sur le piédroit opposé et constitué par un système optique concentrant la lumière reçue sur une cellule photo-électrique, dont on reçoit le courant sur des micro-ampèremètres placés sur le tableau de commande du poste central de l'Autoroute. Plus l'opacité est importante, plus l'indication est faible. Au-dessous d'un certain minimum, il est nécessaire de pousser la ventilation même si la teneur en oxyde de carbone reste très faible.

(22) Sur le trafic de l'Autoroute de l'Ouest au tunnel de Saint-Cloud, on pourra se reporter à nos études annuelles publiées par la Revue Générale des Routes (n° 240, janvier 1952 ; 266 et 267, mars et avril 1954 ; 278, mars 1955 ; 290, mars 1956 ; 302, mars 1957 ; 315, avril 1958).

Une autre conclusion est que le système de ventilation adopté, qui a l'avantage de la simplicité et de l'économie, s'est révélé efficace et, sans être bien entendu parfait, apparaît comme très suffisant. Plus encore que toutes les mesures et vérifications dont nous avons fait état ci-dessus, une simple constatation suffirait à établir son efficacité du point de vue de la dilution et de l'évacuation des gaz nocifs : pendant les trois mois qu'ont duré les travaux de modernisation de l'éclairage, des équipes d'ouvriers ont travaillé chaque jour pendant huit heures à l'intérieur du tunnel, dans les conditions de ventilation habituelles, sans qu'aucun incident ait jamais été signalé.

V. Exploitation et entretien.

Depuis sa mise en service, le 9 juin 1946, jusqu'à ce jour, la circulation empruntant le tunnel de Saint-Cloud n'a cessé de croître dans des proportions impressionnantes, comme le montrent avec suffisamment d'éloquence les quelques chiffres ci-après (22).

	1948	1951	1954	1957
Trafic journalier maximum de l'année	12 849	41 980	60 486	74 226
Trafic journalier moyen de l'année	4 054	17 335	28 242	34 715
Trafic journalier minimum de l'année	645	8 192	10 489	16 755
Trafic horaire maximum ...	1 600	4 404	5 173	5 583
Circulation totale de l'année arrondie en milliers de véhicules	1 480	6 340	10 325	12 683

Au cours des six premiers mois de 1958, les records de circulation journalière et horaire se sont trouvés d'ailleurs encore une fois dépassés avec 78 055 véh par 24 h le 16 juin 1958, et 6 058 véh/h le 13 avril 1958.

Les grosses circulations horaires, qui correspondent généralement au retour massif sur Paris des beaux dimanches de printemps ou d'automne, sont d'ailleurs caractérisées par une dissymétrie marquée des deux courants de circulation, avec jusqu'à 7 ou 8 fois plus de passages dans un sens que dans l'autre.

L'emprunt du souterrain de Saint-Cloud par un pareil flot de véhicules n'est pas sans poser d'importants problèmes d'exploitation et a nécessité la mise en place d'une organisation adéquate dont nous allons souligner certains aspects.

Bâtiments d'exploitation et poste central de commande.

On trouvera, ci-contre (fig. 25), le plan des bâtiments d'exploitation qui ont été groupés à la tête Est du tunnel et qui comportent, outre les logements du personnel habitant sur place par nécessité de service : un Ingénieur des T.P.E., Chef de Subdivision ; un Conducteur de chantiers, Chef d'Exploitation ; et un Monteur électricien — le poste central de commande et de permanence, la salle des transformateurs, les locaux du Service des Ponts et Chaussées et de la Police, les magasins et installations diverses, dont certaines concernent également l'exploitation de l'autoroute elle-même.

Au poste central de commande est installé le tableau général (fig. 26) où sont rassemblés, sur 8 panneaux différents, tous les appareils de mesure et de contrôle nécessaires au bon fonctionnement des installations électriques, d'éclairage, de ventilation et de signalisation, savoir :

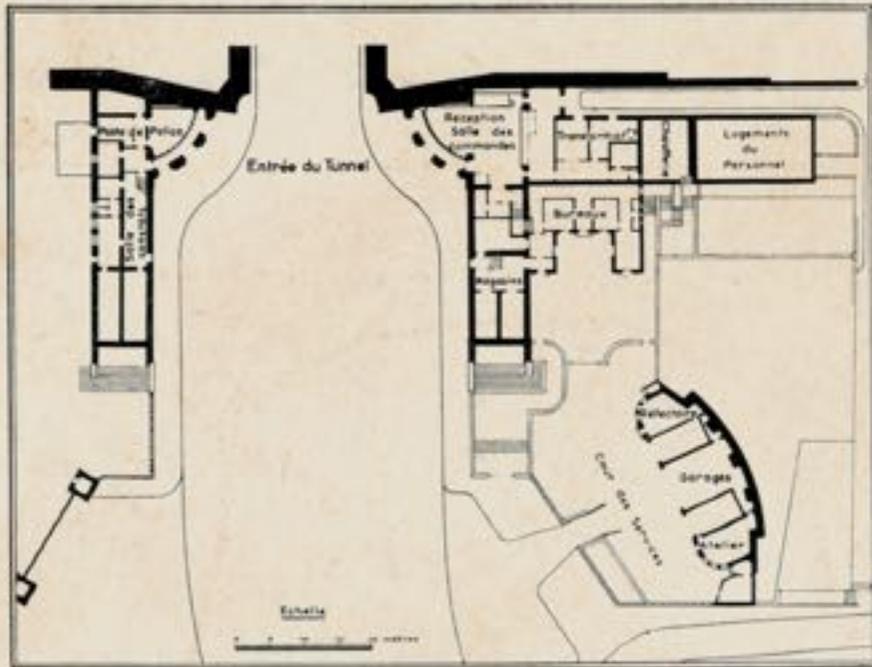


Fig. 25. — Plan des bâtiments d'exploitation.

a) Renseignements météorologiques : direction et force du vent, température, luminosité intérieure et extérieure ;

b) Enregistrement permanent de la teneur en oxyde de carbone et en gaz carbonique, mesurée à la baie d'aération avec dispositif d'alarme en cas de dépassement des pourcentages acceptables ;

c) Mise en marche et fonctionnement des différents régimes de ventilation (23) ;

d) Mise en service et interconnexion des différents postes de transformation et commande à distance des régimes d'éclairage du tunnel, normal et renforcé, pour chacun des deux circuits indépendants : piédroit Nord et tête Est — piédroit Sud et tête Ouest, ainsi que des éclairages annexes ;

e) Comptage de l'intensité du trafic ;
f) Signalisation lumineuse.

Dans la même salle qui est également utilisée comme salle de réception et de conférence (fig. 27) est installée la permanence téléphonique où aboutissent tous les appels effectués à partir des postes répartis sur l'ensemble de l'autoroute, et qui assure également les liaisons avec les Services de Police.

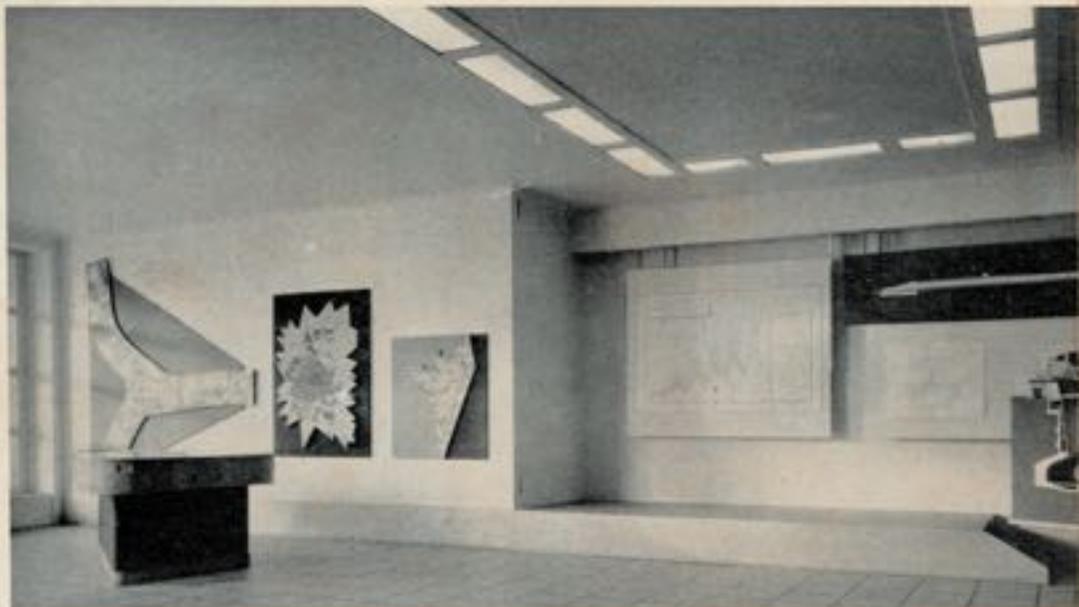


(Photos Jacob.)

↑
Fig. 26.
Vue du tableau
de commande du
poste central de
Saint-Cloud.

→
Fig. 27. — La salle
de réception et de
conférence au poste
central de Saint-
Cloud.

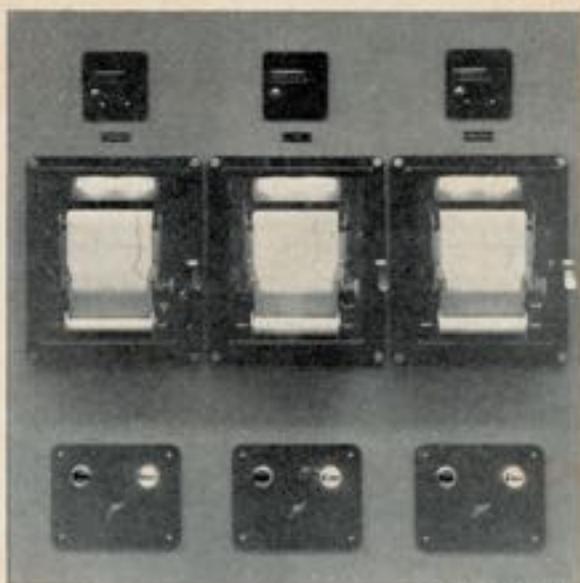
Le tableau de commande se trouve en retour sur la droite.



(23) Le fonctionnement du ventilateur avec l'un des moteurs de 12, 20, 50 ou 125 ch est commandé directement de ce tableau. Par contre, la mise en service du moteur de 145 ch ne peut être faite qu'à partir de la station de ventilation elle-même, en raison des organes manuels de sécurité que comporte l'embrayage correspondant.

Les appareils enregistreurs du trafic dont les renseignements sont continuellement utilisés pour le choix du régime approprié de ventilation artificielle, ainsi que pour la mise en place de la signalisation lumineuse, méritent une mention particulière. En dehors des compteurs numériques du type classique dont les chiffres sont relevés automatiquement tous les quarts d'heure, ils comportent en effet des appareils enregistreurs continus permettant de connaître, à tous moments, l'intensité du trafic passant dans chaque sens de circulation (fig. 28).

La détection des véhicules est assurée au moyen de pédales à contact électrique, disposées au voisinage de la tête Est, en



(Photo Jacob.)

Fig. 28. — Les appareils de comptage du trafic sur le tableau de commande.

En haut, les compteurs totalisateurs; à gauche et à droite, circulation vers Paris et circulation vers l'Ouest; au centre, circulation totale; au milieu, les compteurs enregistreurs continus avec, en dessous d'eux, les commutateurs permettant de changer l'échelle de l'enregistrement. Juste au-dessus de la bande d'enregistrement, le cadran sur lequel on peut lire à tout moment l'intensité du trafic en véh/h.

travers de la chaussée du tunnel et barrant chacune, l'une des cinq voies de circulation de 3 m (fig. 8 ci-dessus). La manière dont se fait, par-devant ou par-derrrière, l'attaque de la pédale permet d'autre part la discrimination du sens de circulation du véhicule.

Dans son principe, l'appareil enregistreur comprend essentiellement un condensateur auquel chaque impulsion du relai de groupage transmet une charge élémentaire donnée. La charge totale, prise par le condensateur au bout d'un intervalle de temps déterminé pris comme base, est donc proportionnelle au nombre de véhicules passés dans le même temps. Le niveau de cette charge enregistré sur une bande mobile, par un procédé électronique, avant renvoi à zéro, donne par conséquent une valeur de la circulation passée pendant le même laps de temps. On obtient ainsi une courbe à créneau fonction de la base de temps choisie qui a été prise égale à six minutes,

(24) Jusqu'à ce jour on n'a enregistré qu'un nombre infime d'incendies de voitures dans le tunnel, qui ont été immédiatement maîtrisés avec les moyens locaux.

(25) Cette équipe comprend un monteur électricien et son aide, un monteur mécanicien et un forgeron aide-mécanicien. En outre, deux chauffeurs sont affectés en permanence à la conduite de véhicules servant à diverses fins.

(26) On n'en sera pas étonné quand on saura que par le seul balayage des caniveaux (fig. 29) on évacue, chaque semaine, hors du tunnel, 10 à 12 brouettes, soit environ un demi-mètre cube, de fines poussières apportées par la circulation.

soit 1/10 d'heure. Le choix judicieux de la vitesse de déroulement de la bande d'enregistrement (1 cm/h) et de l'échelle des ordonnées, qu'on peut prendre différente suivant l'importance de la circulation, a pu permettre d'obtenir des graphiques très lisibles qui donnent à tout moment les valeurs du trafic en véhicules/heure.

..

Du point de vue de la circulation, et mis à part le fonctionnement des appareils d'éclairage, de ventilation et de signalisation, sur lequel nous ne pensons pas utile de revenir, le service d'exploitation se borne essentiellement à assurer la libre circulation sur la chaussée.

A l'intérieur de l'ouvrage, où le stationnement est interdit, pour des raisons évidentes de sécurité, l'Administration effectue d'office l'évacuation de tous véhicules en panne ou accidentés. Elle est d'autre part en mesure d'intervenir très rapidement en cas d'incendie, soit au moyen d'un matériel de premier secours : extincteurs à mousse carbonique, boîtes à sable, bouches d'incendie, etc., installés à demeure, notamment dans neuf des niches spécialement aménagées dans les piédroits et équipées d'appareils téléphoniques d'appel, soit avec un matériel mobile plus puissant monté sur une jeep avec remorque, garée à proximité (24).

Sur le reste de l'autoroute, les dépannages et dégagements sont effectués par des garagistes agréés avec lesquels les automobilistes en difficulté sont mis téléphoniquement en rapport, par l'intermédiaire du poste de permanence, et sans que l'Administration ait à intervenir directement.

..

Sur le plan plus particulier de l'entretien proprement dit, et indépendamment, bien entendu, de l'entretien courant des installations électriques et mécaniques effectué par une équipe spécialisée affectée en permanence au service de l'autoroute (25), un difficile problème est posé par l'obligation de

Fig. 29. — Balayeuse automobile pour le dépeussirage des caniveaux.

La flasque latérale a été enlevée pour montrer la chaîne des balais. Les deux réservoirs montés à l'arrière alimentent une petite rampe d'arrosage située sur le devant de la machine.

(Photo Jacob.)



procéder périodiquement au nettoyage de la voûte et des piédroits. Comme nous l'avons déjà mis en évidence, et en dehors de toute question d'aspect, l'encrassement rapide des parois du tunnel sous l'effet des poussières et de la condensation des gaz d'échappement, a un effet désastreux sur la qualité de l'éclairage. On saisira l'importance de ce travail quand on saura que la surface à nettoyer est d'environ 22 000 m², soit un peu plus de 2 ha, et qu'au bout de quelques semaines il n'y paraît plus (26).

Le nettoyage des piédroits est fait chaque semaine manuellement, et de jour, par une équipe

circulant sur les trottoirs (27). Pour le nettoyage de la voûte qui engage la chaussée et ne peut être fait que pendant les heures creuses de nuit, après différents essais plutôt décevants, un matériel spécial a été mis au point (fig. 30) comprenant un chariot élévateur Fenwick, type KFGP 501, supportant un groupe de lavage à vapeur sous pression Hafroy. Le nettoyage est fait au jet de vapeur avec addition de lessive. Un deuxième passage est effectué ensuite à la vapeur seule. Le rendement est d'environ 420 m² par séance de nuit. Le nettoyage général est fait 5 à 6 fois par an. Le prix de revient au mètre carré, y compris l'amortissement du matériel spécialisé, signalisation du chantier, vêtements de protection du personnel, etc., était, en 1955, de l'ordre de 35 F/m².

..

La dépense annuelle d'entretien courant et d'exploitation du tunnel de Saint-Cloud peut être évaluée, dans les circonstances économiques actuelles, à une douzaine de millions (28), non compris l'amortissement du matériel d'entretien, ni davantage les traitements et salaires du personnel du poste central de l'autoroute, qui comprend, sous l'autorité de l'Ingénieur des T. P. E. chargé de la Subdivision de l'autoroute :

- un conducteur de chantiers, Chef d'Exploitation ;
- un agent de travaux, magasinier ;
- un monteur électricien ;
- un aide-électricien ;

(27) L'équipe de nettoyage de jour et l'équipe de nettoyage de nuit sont composées chacune de deux manœuvres spécialisés. Elles alternent chaque semaine. L'équipe de nuit comprend en outre le chauffeur du véhicule.

(28) Dont 7 millions en chiffres ronds de fourniture de courant électrique : soit 5 millions pour l'éclairage et 2 millions pour la ventilation.

- un monteur mécanicien ;
- un forgeron aide-mécanicien ;
- deux chauffeurs ;
- deux peintres ;
- quatre manœuvres spécialisés ;
- trois standardistes dispatcheurs.

A l'exception des deux premiers, tous ces agents appartiennent à la catégorie administrative des Ouvriers de parc.

Il convient de signaler cependant que leur activité s'étend, pour une part non négligeable, à des tâches extérieures au tunnel et concernant l'entretien ou l'exploitation de l'autoroute elle-même.

C'est le cas, en particulier, pour le magasinier ; pour les ouvriers électriciens qui ont également le contrôle des installations d'éclairage du tronçon commun et des appareils de signalisation, du téléphone extérieur et des compteurs de trafic installés en différents points de l'autoroute ; pour les ouvriers mécaniciens chargés notamment de l'entretien de tout le matériel roulant, y compris les engins plus spécialement routiers ; pour l'un des chauffeurs, et pour les peintres qui assurent l'entretien général des bâtiments, engins, matériel, candélabres, barrières de sûreté, etc. Les standardistes eux-mêmes, en dehors de la surveillance permanente des appareils de contrôle du poste de commande, assurent également le service de dépannage et les liaisons téléphoniques sur l'ensemble de l'autoroute.

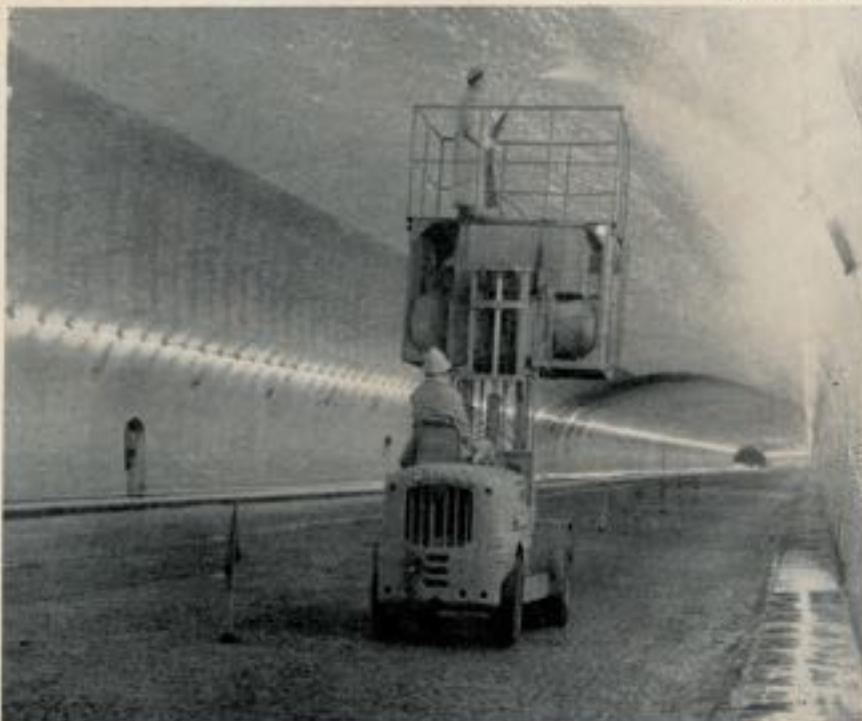
Une fois faites les ventilations nécessaires, la part des dépenses de personnel concernant le seul tunnel ressort, en chiffres ronds, à une dizaine de millions, charges sociales comprises. On arrive, dans ces conditions, pour l'entretien courant et l'exploitation, à une dépense totale annuelle de l'ordre de 20 à 25 millions.

M. DE BUFFÉVENT.

Fig. 30. — Nettoyage de la voûte du tunnel.

On remarquera le contraste entre les sections déjà nettoyées et celles restant à faire.

(Photo Jacob.)



Lundi, 7h00, mon véhicule ne démarre plus.

- Mon chantier attendra.
- J'emprunte la voiture de ma femme.
- Je reste serein : mon assureur SMABTP a tout prévu !



Franck, conseiller en assurance SMABTP

« Quand un problème arrive à l'un de nos clients, ce n'est jamais celui qu'il imaginait ! Heureusement notre savoir-faire nous permet d'anticiper pour lui : nous avons déjà tout envisagé. C'est pour cela que nous apportons à nos assurés la meilleure solution pour l'entreprise, leurs dirigeants et leurs collaborateurs. »

Fort de plus de 150 ans d'expérience, SMABTP assure les professionnels du BTP. Ses experts vous accompagnent à chaque instant.

Par exemple, en cas de sinistre auto, vos collaborateurs et vous-même bénéficiez d'une **assistance performante et complète**, avec la fourniture d'un véhicule de remplacement et l'expertise à distance. Tout ce dont vous avez besoin pour protéger votre activité !

Notre métier : assurer le vôtre

Retrouvez-nous sur
www.groupe-sma.fr

ACTIVITÉ Responsabilité décennale - Responsabilité civile
Dommages en cours de travaux - Protection juridique

BIENS PROFESSIONNELS Engins de chantier - Locaux - Véhicules

DIRIGEANTS ET SALARIÉS Couverture des engagements sociaux - Épargne
Prévoyance - Retraite collective et individuelle

SMABTP
BÂTIR L'AVENIR AVEC ASSURANCE

SMABTP, société mutuelle d'assurance du bâtiment et des travaux publics, société d'assurance mutuelle à cotisations variables, entreprise régie par le Code des assurances - RCS PARIS 775 684 764 - 114 avenue Emile Zola - 75739 PARIS Cedex 15



BUILD ON US

www.soletanche-bachy.com

→ **Intervenant partout dans le monde pour le compte de clients publics ou privés, Soletanche Bachy s'attache à proposer les meilleures solutions techniques et contractuelles** : elle apporte aussi bien des compétences polyvalentes d'ensemblier dans le cadre de grands projets d'infrastructures, que celles de spécialiste maîtrisant l'ensemble des procédés de géotechnique, de fondations spéciales, de travaux souterrains, d'amélioration et de dépollution des sols.



| Grand Paris ligne 15 – Boulogne-Billancourt | FRANCE |
Réalisation d'un puits (reconnaissance, puis ouvrage définitif) –
Hydrofraise compacte HC05.



SOLETANCHE BACHY