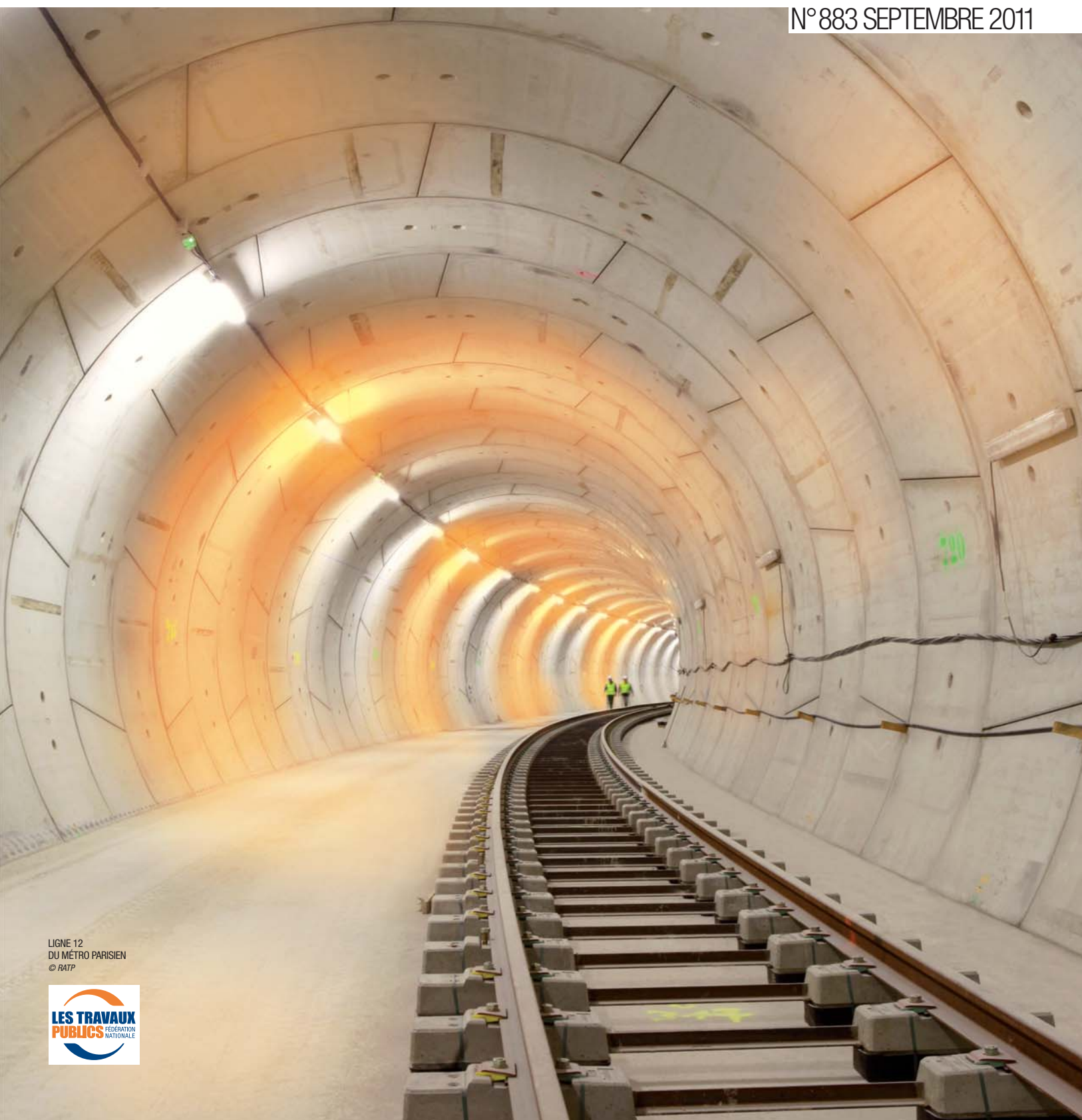


# TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

**TRAVAUX SOUTERRAINS.** LE PREMIER TUNNEL AUTOROUTIER AU MAROC. LES TUNNELS FERROVIAIRES LES PLUS LONGS DE BELGIQUE. LES OUVRAGES SOUTERRAINS DE LA CENTRALE NUCLEAIRE FLAMANVILLE 3. TUNNEL DE LA JOLIETTE EN MILIEU URBAIN A MARSEILLE. PROLONGEMENT DE LA LIGNE 12 DU METRO PARISIEN. LE TUNNEL DE TOULON TUBE SUD. PHASE 2 DU PROLONGEMENT DE LA LIGNE T4 DU TRAMWAY DE LYON

N°883 SEPTEMBRE 2011



LIGNE 12  
DU METRO PARISIEN  
© RATP



Directeur de la publication  
Patrick Bernasconi

Directrice déléguée  
Rédactrice en chef  
Mona Mottot  
3, rue de Berri - 75008 Paris  
Tél. : +33 (0)1 44 13 31 03  
Email : mottotm@fnfp.fr

Comité de pilotage  
Laurent Boutillon (Vinci Construction  
Grands Projets), Jean-Bernard Datry  
(Setec TPI), Stéphane Monleau  
(Solétanche Bachy), Louis Marracci  
(Bouygues), Jacques Robert (Arcadis  
ESG), Claude Servant (Eiffage TP),  
Philippe Vion (Systra), Jean-Marc Tanis  
(Egis), Michel Duviard (Egis), Florent  
Imberby (Razel), Mona Mottot (FNTP)

Ont collaboré à ce numéro  
Rédaction  
Monique Trancart  
Secrétariat de rédaction  
Julia Deck

Service Abonnement et Vente  
Com et Com  
Service Abonnement TRAVAUX  
Bât. Copernic - 20 av. Édouard Herriot  
92350 Le Plessis-Robinson  
Tél. : +33 (0)1 40 94 22 22  
Fax : +33 (0)1 40 94 22 32  
Email : revue-travaux@cometcom.fr

France (10 numéros) : 190 € TTC  
International (10 numéros) : 240 €  
Enseignants (10 numéros) : 75 €  
Étudiants (10 numéros) : 50 €  
Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)  
Multi-abonnement : prix dégressifs  
(nous consulter)

Publicité  
Régie Publicité Industrielle  
Christophe Bouterin  
9, bd Mendès France  
77600 Bussy-Saint-Georges  
Tél. : +33 (0)1 60 94 22 27  
Email : bouterin@rpi.fr

Site internet : [www.revue-travaux.com](http://www.revue-travaux.com)

Réalisation et impression  
Com'1 évidence  
8, rue Jean Goujon - 75008 Paris  
Tél. : +33 (0)2 32 32 03 52  
Email : contact@com1evidence.com

Maquette  
Idé Edition

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°0111 T 80259  
ISSN 0041-1906

## LES TRAVAUX SOUTERRAINS AU SERVICE DE L'HOMME



À cette période où l'audiovisuel découvre le relief en l'appelant 3G (3<sup>e</sup> génération, après le noir et blanc puis la couleur) et non 3D, il est bon de rappeler que les travaux souterrains sont nés avec, ce qui leur a permis depuis des millénaires d'aider l'homme à mieux vivre, que ce soit pour s'abriter, exploiter des matériaux, se déplacer ou évacuer du solide ou du liquide.

Les articles présentés dans ce numéro m'incitent à développer plus particulièrement le volet déplacement, les trois autres volets ayant toujours autant d'importance.

Quel que soit le moyen de déplacement qu'utilise l'homme qui devient de plus en plus mobile (est-ce vraiment un signe de développement et de bonheur de vivre ?), les travaux souterrains sont toujours aussi efficaces pour répondre à ce besoin tout en l'aidant à mieux vivre :

- **Pour le piéton**, ils lui permettent de reconquérir l'espace urbain de surface et de redécouvrir ce que flâner en ville veut dire ;
- **Pour le cycliste**, ils lui permettent de disposer d'espaces réservés en surface en canalisant les véhicules en sous-sol, certains projets en cours de réalisation comportant même une voie souterraine qui lui est dédiée ;
- **Pour l'automobiliste**, c'est le remède qui fluidifie la circulation et qui lui permet de redevenir piéton en zone urbanisée en lui proposant un stationnement pour son véhicule. En zone montagneuse, fluviale ou maritime, les travaux souterrains lui facilitent les liaisons ;
- **Pour l'utilisateur des transports en commun**, quel qu'en soit le type, ils facilitent l'accessibilité en tout point et permettent de réduire les temps de parcours. Même pour l'avion, ils facilitent l'accès à bord, les liaisons entre satellites et autres services.

Ainsi les travaux souterrains sont un vecteur important dans la recherche d'une meilleure utilisation de l'espace qui entoure l'homme pour améliorer ses conditions de vie.

Pour illustrer ces propos, je m'appuierai sur deux projets bien connus en France et qui méritent une attention particulière.

La liaison ferroviaire Lyon – Turin est le projet phare pour les travaux souterrains qui ne se limitent pas au tunnel de base de 52 km mais comportent de nombreux tunnels d'accès aussi bien en France qu'en Italie. Il serait regrettable que sa gestation soit aussi laborieuse que celle de son aîné, le tunnel sous la Manche ! Ce projet est très important à plusieurs titres et une construction de cette liaison en plusieurs étapes permettrait de respecter les diverses contraintes liées en particulier aux problèmes économiques actuels. Rappelons que la dernière traversée alpine en France (Fréjus) remonte à plusieurs décennies et qu'il serait dommage de continuer à ralentir la cadence dans un monde où tout s'accélère. Où et pour quand la prochaine traversée alpine ? Peut-être le Montgenèvre, s'il n'est pas considéré comme un serpent de mer !

Le projet de métro automatique du Grand Paris (200 km de lignes et 72 stations environ) occupe depuis quelques mois les politiques. Espérons qu'ils sauront mettre de côté leurs intérêts particuliers pour servir l'intérêt général d'une population de plus de 12 millions d'habitants qui subit quotidiennement des conditions de déplacement catastrophiques. Cette situation résulte d'un attentisme de plus de quarante ans. Dommage que la France cartésienne n'ait pas su ou plutôt voulu programmer sur cette longue période un tel équipement indispensable pour accompagner le développement de cette agglomération. Pour autant, il ne faut pas rêver de vouloir rattraper quarante ans de retard en une décennie. Immunisons-nous contre cette maladie du siècle qui veut raccourcir tous les délais, comme un enfant capricieux. Un tel grand projet se construit par étapes successives qui s'échelonnent dans le temps, ce qui permet aux ingénieries et aux entreprises de ne pas avoir une activité en dents de scie avec des périodes de surchauffe et des périodes de manque d'activité, conditions désastreuses tant sous l'angle économique qu'humain.

En conclusion, je souhaite que nos décideurs tiennent compte des expériences de nos aînés qui nous ont transmis des valeurs sûres : qui veut voyager loin ménage sa monture. Ces deux projets de travaux souterrains sont de véritables courses de fond : il ne faut pas partir trop vite au risque de s'asphyxier et de ne pas pouvoir franchir la ligne d'arrivée. Ingénieries et entreprises sont là pour apporter leur savoir-faire et leur valeur ajoutée, mais n'oublions pas de leur donner le temps nécessaire aussi bien pour une bonne conception qu'une réalisation des travaux dans le respect de la sécurité du voisinage, de la qualité voulue des ouvrages, des délais et des coûts prévisionnels.

Les travaux souterrains apportent une forte valeur ajoutée : ils sont une grande part du passé et de l'avenir de l'homme.

**JACQUES ROBERT**

EXPERT ARCADIS  
VICE-PRÉSIDENT DU COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE  
PRÉSIDENT DU COMITÉ GÉOTECHNIQUE DE SYNTEC-INGÉNIERIE

LISTE DES ANNONCEURS : SPIE FONDATIONS, 2<sup>e</sup> DE COUVERTURE - ARCADIS, P.9 - SOLEXPERTS FRANCE, P.10 - ALPHAROC, P.11 - SOTRES, P.12 - SEFI - INTRAFOR, P.15 - IDETEC, P.16 - BEKAERT FRANCE, P.17 - SADE, P.18 - SYSTRA, P.19 - AXIMA SEITHA, P.21 - ARAMINE, P.22 - MIRE, P.23 - CNETP, P.27 - MAPEI, P.35 - ROBIT ROCKTOOLS, P.37 - SMA BTP, P.69 - TERRASOL, P.84 - PRO BTP, 3<sup>e</sup> DE COUVERTURE - SOLETANCHE BACHY, 4<sup>e</sup> DE COUVERTURE



# LA PLACE DE L'ESPACE SOUTERRAIN DANS LE DÉVELOPPEMENT URBAIN

SELON L'ENQUÊTE QUE VIENT DE PUBLIER L'INSEE, L'URBANISATION DU TERRITOIRE A CRÛ DE 19 % ENTRE 1999 ET 2010, AU MÊME RYTHME QUE DANS LA PÉRIODE D'APRÈS-GUERRE ! Désormais, près de 22 % de la surface du pays est urbanisée, et la superficie occupée par les très grandes agglomérations s'est accrue de 30 %. L'utilisation optimisée de l'espace souterrain peut-elle apporter une dimension supplémentaire à un urbanisme durable ? Le sous-sol peut-il contribuer à l'augmentation de la densité urbaine dans une ville où il fait bon vivre ?

ENTRETIEN AVEC BRUNO BARROCA, MAÎTRE DE CONFÉRENCES AU DÉPARTEMENT GÉNIE URBAIN DE L'UNIVERSITÉ PARIS-EST MARNE-LA-VALLÉE. PROPOS RECUEILLIS PAR MONA MOTTOT ET MONIQUE TRANCART



« L'AMÉNAGEMENT DU SOUS-SOL DOIT ÊTRE PLANIFIÉ SI NOUS NE VOULONS PAS LE GASPILLER »

DOCTEUR EN GÉNIE URBAIN ET ARCHITECTE DPLG, BRUNO BARROCA A DEUX SPÉCIALITÉS DE RECHERCHE EN MATIÈRE DE VILLE DURABLE : L'ÉTUDE DU SOUTERRAIN ET CELLE DE LA RÉSILIENCE DE LA VILLE FACE AUX RISQUES NATURELS ET TECHNOLOGIQUES <sup>(1)</sup>.

Vous codirigez un ouvrage collectif *Penser la ville et agir par le souterrain : apports du génie urbain pour la conception et la gestion des infrastructures*, à paraître en 2012. Quels sont ses objectifs et à qui s'adresse-t-il ?  
Ce livre est la partie visible d'un travail de plusieurs années au département génie urbain de l'Université Paris-Est

Marne-la-Vallée réalisé en collaboration avec l'École des ingénieurs de la ville de Paris (EIVP). Il cherche à caractériser la complexité des infrastructures souterraines en milieu urbain. Le plus délicat est de dépasser l'infrastructure en tant qu'objet et de la placer comme actrice et ressource d'un territoire. Pour apprécier la durabilité d'un ouvrage souterrain,

© CEVA-ATELIERS JEAN NOUVEL

© EIFFAGE TP





il est indispensable d'analyser les contraintes techniques qui conduisent à la conception et à la gestion des infrastructures, mais également son inscription dans un territoire, dans les usages et les appropriations qui vont en découler. L'approche transversale du génie urbain fournit un bon cadre méthodologique. Nous souhaitons nous adresser au large public qui s'intéresse au sujet.

### Quels sont les enjeux du souterrain en milieu urbain ?

Avant d'aborder les enjeux du souterrain, revenons sur ceux de la ville aujourd'hui. Elle doit évoluer vers plus de durabilité et le sous-sol a un rôle important à jouer pour cette évolution. La Durabilité implique la compacité, la proximité, la mobilité durable, la ville décarbonée économe en énergie et qui recourt aux énergies nouvelles renouvelables, sans oublier la cohésion territoriale et l'équité sociale. Il convient donc de penser le souterrain à différentes échelles d'observation et de réfléchir à l'infrastructure dans la ville sur le long terme. Actuellement nous constatons un retard assez conséquent sur la prise en compte des potentialités du souterrain. Les enjeux pour y parvenir sont de deux ordres. Tout d'abord : se libérer des *a priori*. En effet, jusqu'à présent les aménageurs n'envisageaient le souterrain qu'en cas de nécessité absolue et uniquement pour des destinations précises - transport public, par exemple - sans avoir conscience qu'ils en compromettaient d'autres, pour le futur. Il faut convaincre de l'intérêt du souterrain mais il n'est pas la solution à tout. Il y a une complémentarité et une synergie à trouver avec la surface en fonction du contexte. Parmi les *a priori*, est souvent évoqué le coût important de l'urbanisme souterrain.

## UNE APPROCHE PLURIDISCIPLINAIRE DE LA VILLE EN SOUTERRAIN

**Le livre *Penser la ville et agir par le souterrain* propose une approche pluridisciplinaire de la conception et de la gestion des infrastructures souterraines par le génie urbain. L'ouvrage collectif est codirigé par Bruno Barroca, maître de conférences au département génie urbain de l'Université Paris-Est Marne-la-Vallée, Damien Serre, Directeur du pôle construction École des ingénieurs de la Ville de Paris) et Youssef Diab, Professeur à l'Université Paris-Est Marne-la-Vallée.**

**La partie introductive expose les représentations de la ville souterraine par les disciplines essentielles à son aménagement : architecture-urbanisme, géologie, histoire des techniques, ingénierie.**

**La suite de l'ouvrage approfondit l'interaction sol/sous-sol, la conception architecturale des espaces souterrains comme espaces à vivre, la maîtrise des risques projets, la gestion patrimoniale des ouvrages et la coordination dessus-dessous en termes d'acteurs. Chaque partie est analysée sous un triple regard : recherche, recherche appliquée et cas pratique détaillé. À paraître début 2012 aux Presses des Ponts.**

**1- Il est très important de travailler la lumière et les relations sous-sol/surface. Ici, la halte Chêne-Bourg (gare souterraine) sur la future ligne du train Ceva dans l'agglomération de Genève où une brique de verre est spécialement créée (image du concours en 2004).**

**2- Prolongement de la ligne 12 du métro parisien.**

**3 & 4- À Madrid, 10 ha d'espaces verts ont été récupérés par la mise en souterrain de l'autoroute M30 au bord de la rivière Manzanares.**

Or, il peut y avoir un aménagement du dessus qui permette de rentabiliser l'opération. À Madrid, par exemple, un million de mètres carrés d'espaces verts a été récupéré en enterrant l'autoroute M30<sup>(2)</sup>. Avec ce nouveau parc sur l'infrastructure on peut imaginer que les constructions puissent être densifiées autour, augmentant ainsi la qualité et la durabilité de la ville. Toujours en matière de coût, il faut arrêter de se focaliser sur la durée du chantier. La décision concernant le type d'ouvrage doit prendre en compte les enjeux globaux liés à la ville mais aussi à l'exploitation, ceci d'autant plus que ces infrastructures ont des durées de vie assez longues. Si on intègre ces données et en analysant le projet sur le long terme, la part du chantier dans la vie de l'ouvrage se réduit voire devient négligeable. Second axe de travail : la planification. Jusqu'à maintenant, elle n'existe pratiquement pas en France. Or, si nous voulons préserver la ressource que constitue l'espace

souterrain, il faut abandonner une vision élément par élément au profit d'une vue plus globale qui passe par la planification. Pour mieux utiliser le sous-sol des villes, il est nécessaire d'éviter le cumul d'usages cloisonnés qui aboutit à une multiplication de réseaux inextricable, des aménagements bloqués et des conflits entre usages. Par exemple, il peut y avoir conflit entre la température élevée d'eau extraite par géothermie qui viendrait « croiser » une nappe d'eau potable et en altérer la qualité, comme le souligne Aurèle Parriaux de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL, Suisse) qui dirige le projet Deep City (étude des interactions entre usages et ressources).

### Quels sont les acteurs du développement du souterrain ?

Les acteurs auxquels nous pensons immédiatement et qui ont les clés du souterrain sont les entreprises de construction spécialisées qui en assurent la faisabilité technique et les maîtres d'ouvrage comme la RATP, la SNCF, GDF Suez mais qui l'ont développé pour eux jusqu'à récemment. Les architectes et les urbanistes, chargés des études d'opportunité et de la planification de projets, doivent être plus sensibles à l'intérêt du souterrain. Ils forment un couple avec les collectivités territoriales qui impulsent les projets. Enfin, les chercheurs, y consacrent des travaux mais cela est récent et demande encore plus d'actions. Le pôle de compétitivité Advancity « Ville et mobilité durable » fédère différents partenaires sur le thème du souterrain. Au niveau européen, j'ai personnellement travaillé avec l'EPFL et avec Vincent Becue de la Faculté d'architecture de l'Université de Mons (Belgique) sur la résilience de l'architecture souterraine face aux risques naturels. Nous disposons du cadre pour avancer aujourd'hui. ▷

© DR



© DR





## Quelles sont les ressources du sous-sol et quelle peut être sa contribution à la ville durable ?

Les premières questions à se poser, sont : Quel futur pour la ville ? Qu'est-ce que la ville durable ? L'urbanisation rapide s'accompagne rarement des incertitudes liées aux effets du changement climatique. De fortes chaleurs, des inondations ont vite fait de désorganiser totalement une ville. Or, sous terre, nous sommes protégés de l'extérieur : canicule, neige, etc. Montréal et Moscou recourent aux larges espaces souterrains, très vivants, qui évitent de s'exposer à des conditions climatiques hostiles. Les cavités résistent mieux aux séismes que les ouvrages de surface. Ce côté positif du souterrain est encore peu investi. Le sous-sol contribue aussi à économiser l'énergie. La densification de l'habitat qu'il autorise peut diminuer le besoin de mobilité et simplifier l'accès aux transports collectifs. Du fait de sa moindre sensibilité au climat extérieur, il offre un environnement thermique moins variable. Sa température modérée peut servir à rafraîchir directement des bâtiments en surface. Citons, à titre d'exemple, le refroidissement des locaux en construction de l'École Supérieure des Travaux Publics de Cachan (Val-de-Marne) par de l'air extrait d'anciennes carrières.

Autre ressource du sous-sol : sa disponibilité. La densification de la ville peut se faire en hauteur ou en profondeur. À Kansas City (États-Unis), le parc d'activités Subtropolis déploie 5 millions de mètres carrés d'entrepôts dans une carrière de calcaire. Les carrières sous Paris (10 % de sa surface) pourraient, au lieu d'être comblées à cause des risques d'effondrement, être sécurisées et réutilisées. À Orly-Rungis (Val-de-Marne), Monique Labbé, architecte, propose d'agrandir la zone logistique sous terre.

## VILLE 10D, VILLE D'IDÉES RELIER URBANISME SOUTERRAIN ET DE SURFACE

**Bruno Barroca contribue au projet Ville 10D, ville d'idées, projet qui a pour ambition d'améliorer la connaissance du sous-sol comme ressource et de montrer qu'il peut constituer une alternative à l'aménagement en surface et en lien avec lui. Maître de conférences au département génie urbain de l'Université Paris Est Marne-la-Vallée, il va, avec l'École des ingénieurs de la Ville de Paris et la Faculté d'architecture de Mons (Belgique), explorer plus spécifiquement « Selon quelles configurations urbaines, techniques, morphologiques, programmatiques et sociales peut-on concevoir la contribution du souterrain à la résilience de la ville ? »**

**Plus globalement, le projet « Différentes dimensions pour un développement durable et désirable décliné dans une dynamique dessus-dessous » (Ville 10D, Ville d'idées) traite de la contribution du sous-sol au développement urbain durable et implique un ensemble d'acteurs. La partie scientifique est aboutie et le projet en est au stade de la recherche de financement.**

**À l'origine de Ville 10D : le comité spécifique de l'Association française des tunnels et de l'espace souterrain (Aftes) et l'Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil (Irex, voir pages 28). En septembre 2009, ils transmettent une note d'opportunité au Réseau génie civil et urbain afin de mettre sur pied un projet dit « national » (porté par le ministère de l'Écologie). À l'issue de l'étude de faisabilité, il est décidé que cette recherche se développerait par deux entrées. La première, thématique, étudie « Quelles sont les dimensions nécessaires pour assurer une dynamique dessus-dessous ? » Cognitive, environnementale, socio-économique, sociétale ? La seconde, empirique, progresse par type de lieux à disposition et analyse « Quelles sont les caractéristiques idéales pour un projet souterrain ? » Carrières et cavités, morphologie de plateau, urbanisme de dalle, infrastructure souterraine existante ou en projet ?**

### Comment vaincre les freins au développement du souterrain, quelle stratégie adopter pour en faire un lieu de vie ?

La question est délicate. Il n'existe pas de recettes. Qu'est-ce qu'un lieu de vie ? Quoi de commun entre un centre commercial souterrain, une station de métro et un entrepôt dans une carrière ? Il faut porter une attention particulière à l'interface sol/sous-sol, ce que développe Pierre Von Meiss (EPFL) dans son ouvrage

*20 000 lieux sous les terres.*

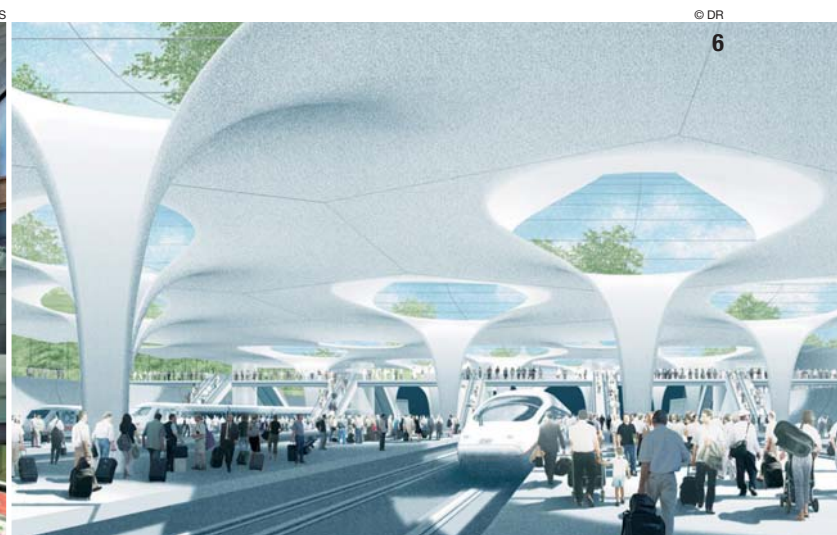
Il pointe les aspects auxquels il faut être attentif : seuil haut/dessous, dispositifs d'entrée, lumière et cohérence verticale. Le puits de lumière et les serres sur la ligne 14 du métro parisien (Gare de Lyon) me semble de bonnes réponses. Dans l'agglomération transfrontalière de Genève, Jean Nouvel et Éric Maria travaillent la transparence et la diffraction de la lumière avec les matériaux. Cela donne lieu à la création d'une brique de verre pour les gares souterraines de la liaison ferroviaire entre Cornavin et Annemasse (projet Ceva). Approcher le souterrain demande des connaissances spécifiques. Les sciences humaines nous sont utiles pour savoir comment on se comporte dans un espace sous terre. Si les critères de confort ne sont pas les mêmes qu'à l'extérieur, quels sont-ils ? Une autre nécessité incontournable de la durabilité est la conservation des données par l'archivage durable et le partage entre utilisateurs. Ce travail sur la gestion des données est l'une des actions proposées dans le projet Ville 10D.

### Quels sont les grands projets en France et en Europe ?

Les projets de tunnel sont nombreux. Je citerai le projet *Madrid Calle 3* concernant l'enterrement de l'autoroute au bord de la rivière Manzanares, l'extension vers le nord de la ligne 12 du métro parisien, et la préparation du Grand Paris-Express. En termes de mixité d'usages, l'agrandissement « par en dessous » de la gare Saint-Lazare à Paris retient mon attention parce qu'il y a création d'un centre commercial de 10 000 m<sup>2</sup> ouvert sur trois étages, deux niveaux de parking, une verrière qui éclaire l'ensemble jusqu'au niveau métro et des fluidités de circulation piétonne vers les différents secteurs.



5



6

Le thème sous-sol et vie urbaine fait l'objet de recherches<sup>(3)</sup>. La recherche s'est ouverte sur la société et se confronte avec les acteurs et les territoires pour stimuler une réflexion sur l'avenir. Aux partenaires de se saisir de la recherche et de les appliquer. Je m'attarderai sur un autre aspect, car le travail qui me semble le plus porteur est la transcription réglementaire d'une partie des résultats de Deep City. Ainsi la Suisse amorce la planification du sous-sol, c'est la condition pour ne pas gaspiller cet espace.

En France, il faudrait que le statut juridique du sous-sol évolue. Les droits de propriété sont imbriqués, le domaine public est étroitement limité, ce qui ne facilite pas les opérations à buts multiples, les plus intéressantes pour la collectivité. Le développement durable impose une réflexion qui part des ressources vers les besoins et non l'inverse, comme cela s'est pratiqué jusqu'à présent.

Au niveau du secteur de la construction, il est nécessaire d'avancer car il est multiple et divisé de par la

« **GÉNÉRALEMENT,  
PLUS L'OUVRAGE  
EST PROCHE DE  
LA SURFACE,  
DISONS À  
QUELQUES  
MÈTRES, PLUS IL  
SERA ÉCONOME  
EN ÉNERGIE ET  
ADAPTABLE À  
DES ÉVOLUTIONS  
FUTURES** »

taille des entreprises et l'éventail des activités correspondant aux différentes étapes de la vie de nombreux types de structure. Le potentiel d'innovation est pourtant là.

L'Union européenne a redéfini récemment le cadre des axes de recherche

prioritaires. Le document intitulé *Europe 2020 : une stratégie pour une croissance intelligente, durable et inclusive* présente 7 initiatives pour stimuler le progrès dont « une Europe efficace pour l'utilisation des ressources » où figure le développement urbain durable.

#### Qu'en est-il du projet Traci ?

Traci (tranchée couverte industrialisée), porté par Jean-Pierre Hamelin de Soletanche Bachy avec des industriels et des organismes de recherche<sup>(4)</sup>, s'est terminé en juin dernier. Ce projet abouti d'innovation technologique labellisée par le pôle Advancity constitue un saut technologique dans la réalisation de tranchées couvertes en milieu urbain. Les parois précoffrées remplacent les parois moulées ou préfabriquées. La machine est plus économe en énergie, plus légère, plus compacte, moins bruyante, d'où une meilleure insertion en urbain. Dans ce projet, nous avons construit un outil d'évaluation de la qualité urbaine et environnementale des ouvrages linéaires souterrains, qui servira à comparer différents types

d'ouvrages et de tracés. Jusqu'ici, les outils disponibles ne détaillaient jamais la dimension souterraine. Or, la question de la profondeur est importante.

En matière de transports en commun, une faible profondeur raccourcit les durées pour passer d'un mode à l'autre. Par ailleurs, en fonction de la profondeur de l'ouvrage, l'éclairage, la ventilation, les escalators et ascenseurs, engendre des consommations énergétiques qui varient fortement. Généralement, plus l'ouvrage est proche de la surface, disons à quelques mètres, plus il sera économe en énergie et adaptable à des évolutions futures. □

1- Sur ce point, voir Resilis, projet de recherche de trois ans commencé en 2010.

2- Cf. le Livre blanc de l'Itacis (International tunneling and underground space association, committee on underground space).

3- Exemples : études GIS Sol Urbain, D2SOJ (développement durable et sols urbains), Clé de sol, Riviera, Deep City 3D (Suisse), Ciudad multidimensional (Espagne), etc.

4- Avec Egis, Fehr Technologie, l'Université Paris-Est Marne-la-Vallée, l'EIVP, l'École des mines, etc.



Membre du Réseau Congés Intempéries BTP

## CAISSE NATIONALE DES ENTREPRENEURS DE TRAVAUX PUBLICS

Association agréée par arrêté ministériel du 6 avril 1937 - Déclarée en Préfecture sous le n° 174 662

### Au service de la Profession des Travaux Publics

**Au 31/12/2010, la CNETP :**

- . regroupe **7 197 entreprises adhérentes,**
- . a réglé **6 687 031 jours de congés à 271 963 salariés au titre de l'exercice congés 2010.**

**Au cours de la 64<sup>ème</sup> campagne (01/04/2009 au 31/03/2010), la CNETP a indemnisé 8 398 997 heures d'intempéries correspondant à 134 947 déclarations d'arrêts.**

Pour contacter la CNETP :

- . **Par courrier :**  
31 rue Le Peletier - 75453 PARIS CEDEX 09
- . **Par Internet :** [www.cnetp.fr](http://www.cnetp.fr)
  - pour les entreprises : un espace de travail sécurisé
  - pour les salariés : un espace personnalisé d'information
- . **Par e-mail :** [contact@cnetp.fr](mailto:contact@cnetp.fr)
- . **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
- . **Par fax :** 01.70.38.08.00





# L'IREX

## POUR DE NOUVELLES TECHNOLOGIES ÉPROUVÉES EN GÉNIE CIVIL

L'INSTITUT POUR LA RECHERCHE APPLIQUÉE ET L'EXPÉRIMENTATION EN GÉNIE CIVIL FÊTE SES VINGT ANS. IL A PILOTÉ ET CONTRIBUÉ À FAIRE CONNAÎTRE DE NOMBREUX TRAVAUX DE RECHERCHE APPLIQUÉE AUX MATÉRIAUX, LA GÉOTECHNIQUE ET LES FONDATIONS, LES PROCÉDÉS DE CONSTRUCTION, LA RÉHABILITATION ET LA MAINTENANCE, LE DÉVELOPPEMENT DURABLE. DE NOUVELLES THÉMATIQUES SE PRÉPARENT.



1 - Projet BHP2000 –  
Pont de Normandie.

© BOUYGUES





© BOUYGUES



© ASCO TP-DANIEL VANDROS



© BOUYGUES

**Ville 10D – Ville d'idées,** recherche sur la contribution du sous-sol au développement urbain durable, fait partie de trois nouveaux programmes dits nationaux coordonnés par l'Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil (Irex). Les deux autres projets ayant passé le stade de la faisabilité portent sur l'étude de la récupération des énergies marines, côtières et portuaires sur les ouvrages de génie civil (Emacop) et celle du recyclage complet du béton (Recybéton). D'autres recherches sont en cours de maturation, par exemple sur le développement d'une nouvelle maquette numérique à partir d'un modèle d'information propre aux infrastructures (modélisation des informations interopérables pour les infrastructures durables), ou encore des recherches liées aux risques naturels. Ces thématiques vont dans le sens de la volonté du ministère de l'Écologie (MEDDTL) d'explorer davantage la protection de l'environnement, la prévention des risques, les économies d'énergie et plus largement de répondre aux objectifs du Grenelle de l'environnement.

#### UNE STRUCTURE ADAPTÉE AU COLLECTIF

La mise en place de l'Irex s'est avérée nécessaire après l'élaboration en 1984 du Schéma directeur de la recherche en génie civil, visant à relier recherche et applications, et à déterminer ce qu'il "fallait encore chercher". Comme les expérimentations en génie civil ont lieu sur des ouvrages réels, la démarche ne pouvait être que collective. Les ministères déterminent un programme annuel sur proposition du Réseau Génie civil et urbain (RGC&U), à l'origine Conseil d'orientation et de recherche en génie civil. Cette recherche appliquée suit, pour chaque thématique, une procédure spécifique aux projets dits nationaux :

- 2- **Projet BHP2000 – Viaduc TGV Méditerranée à Avignon.**
- 3- **Projet CEOS.fr – Centrale nucléaire de St-Laurent-des-Eaux.**
- 4- **Projet VNB – Pont de l'Île de Ré.**

## NOTRE VOCATION : FACILITER ET ORGANISER DES PROGRAMMES DE RECHERCHE EN GÉNIE CIVIL

CHRISTIAN PARENT (PRÉSIDENT)  
ET XAVIER NEUSCHWANDER (VICE-PRÉSIDENT)

### LES PROJETS NATIONAUX

Les projets nationaux sont l'un des moyens de mener des opérations de recherche appliquée en génie civil choisi en 1984 par les ministères de l'Équipement et de la Recherche. Ils créent, en 1989, avec la Fédération nationale des travaux publics, l'Irex, association regroupant tous les acteurs de la construction – maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, entrepreneurs, industriels, laboratoires de recherche, universités et écoles – et chargée de les faire travailler ensemble.

### DES MOYENS ET DES COMPÉTENCES MUTUALISÉS

En un peu plus de vingt ans, l'Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil (Irex) a fait travailler ensemble 285 partenaires sur des projets dits nationaux de recherche et développement parfois couplés à des projets soutenus par l'Agence nationale de la recherche (ANR). Parmi ces acteurs de la construction qui ont participé, ont figuré 51 maîtres d'ouvrage, 64 centres techniques, sociétés d'ingénierie et bureaux d'études techniques, 55 entreprises du BTP, 56 industriels et 38 organismes de recherche (universités, écoles, etc.). Christian Bernardini, délégué général de l'Irex, a évalué à 76 millions d'euros le total des dépenses engagées pour ces projets jusqu'à présent, assurés à 79 % par les cotisations et les apports en nature des partenaires, 16 % par le ministère de l'Écologie (MEDDTL) et moins de 5 % par l'ANR et le ministère de l'Intérieur. À l'occasion du bilan des vingt ans, M. Bernardini a émis le souhait que « l'État (...) augmente le montant des crédits incitatifs (...) et que maîtres d'ouvrage et professionnels se mobilisent beaucoup plus pour participer à ces recherches collectives où sont mutualisés moyens et compétences. »

« À partir d'un thème général choisi par le ministère, le montage est confié à une équipe composée des acteurs de la filière qui précise le contenu et le fait exécuter, a rappelé Jean Chapon, président honoraire de l'Irex, à l'occasion des 20 ans de l'association. Il est très vite apparue la nécessité d'une structure adaptée au caractère collectif des projets et qui en assurerait le montage, le suivi et la diffusion des résultats. »

Les domaines retenus sont larges, par exemple, les voies nouvelles du béton, la réhabilitation des réseaux d'assainissement urbains, le comportement et l'évaluation des ouvrages spéciaux (fissuration, retrait), les bétons autoplaçants ou les bétons à hautes performances... Ces recherches « permettent de formaliser et de résoudre des problématiques de recherche ou de conduire des expérimentations qui n'étaient pas inscrites en tant que telles dans les thèmes, les procédures et les calendriers de l'Agence nationale de la recherche ou le Fonds unique interministériel, » a précisé Régine Bréhier, directrice de la recherche et de l'innovation au MEDDTL. Depuis 2009, le RGC&U s'est ouvert au bâtiment et au Grenelle de l'environnement. Son comité d'orientation est désormais présidé par une personnalité issue des entreprises de construction.

### DES PROJETS QUI RÉPONDENT AUX PROBLÉMATIQUES DE LA PROFESSION

Les budgets de ces opérations collectives dépassent généralement les 2 millions d'euros HT. Un projet se situe hors classe : Voies nouvelles du béton (1985-1991). Viennent ensuite, parmi les mieux dotés, Ceos sur "le comportement et l'évaluation des ouvrages spéciaux ; fissuration, retrait" prévu sur quatre ans à partir de 2008 ; le programme Rerau (1992-2004), sur la réhabilitation des réseaux d'assainissement urbains.





© VINCI  
5



© EMCC  
6



© FRANCIS VIGOUROUX / VINCI  
7

Quelques projets nationaux bénéficient de budgets plus modestes comme le travail sur la "méthode observationnelle pour le dimensionnement interactif des ouvrages" (2003-2005).

Le battage des pieux (projet Tuba, 1993-1996), la fissuration des chaussées en béton (Flore, 1992-1997), le vieillissement des ouvrages (Kronos, 1996-1999).

L'Administration finance les projets nationaux à hauteur de 20 %. Le reste est couvert par les cotisations des partenaires et par des contributions en nature.

**5- Projet ASIRI – Pont de Rion-Antirion.**

**6- Projet TUBA – Battage de pieux à Fos-sur-Mer.**

**7- Projet BaCaRa – Barrage de Wadi Dayqah en Oman.**

## EN SAVOIR PLUS SUR LES PROJETS NATIONAUX

Les résultats des projets de recherche montés par l'Irex (voir tableau) et les recommandations qui en sont tirées font l'objet de rapports, livres, guides techniques, conférences. Certaines publications sur des programmes terminés sont en préparation. Citons, à titre d'exemple parmi celles disponibles :

- *Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants*, Ed. AFGC et *Avancées technologiques dans le domaine des bétons autoplaçants, travaux du projet national B@P*, Presses de l'École nationale des ponts et chaussées (ENPC) ;
- *Le développement industriel des bétons de fibres métalliques*, Presses de l'ENPC ;
- *Nombreux ouvrages sur le projet Bétons hautes performances 2000* (Ed. Irex, Cerib, LCPC, ENPC) ;
- *Recommandations Clouterre 1991 pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des soutènements réalisés par clouage des sols et Additif en 2002*, Presses de l'ENPC ;
- *Guide technique sur la détection de cavités souterraines par méthodes géophysiques*, LCPC, programme Criterre (autre publication Cemagref sur le diagnostic de protection contre les crues) ;
- *Synthèse des résultats et recommandations du projet national sur les micropieux*, Presses de l'ENPC ;
- *Le béton compacté au rouleau, les barrages en BCR*, projet Bacara, Presses de l'ENPC et articles dans la revue Travaux ;
- *Fissuration des chaussées en béton, recommandations du projet national Flore*, Presses de l'ENPC ;
- *Microtunneliers et Forages dirigés*, FSTT/Hermès-Science publications (Lavoisier) ;
- *Ponts mixtes acier-béton : un guide pour les ouvrages innovants*, projet Mikti, Presses de l'ENPC ;
- *Guide technique 2006 : vibrofonçage*, Presses de l'ENPC ;
- *Les facteurs d'influence sur le vieillissement des ouvrages ponts caissons en béton précontraint*, projet Kronos, Ed. Irex ;
- *Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains et Restructuration des collecteurs visitables*, projet Rerau, Tec&Doc (Lavoisier) ;
- *Résultats et recommandations du projet national Calibé* (qualité des bétons), Presses de l'ENPC ;
- *Guide pratique des galeries multiréseaux, Clé de sol*, Ed. Technicités ;
- *La méthode observationnelle pour le dimensionnement interactif des ouvrages*, Presses de l'ENPC.

À consulter : [www.irex.asso.fr](http://www.irex.asso.fr).

Certaines parties d'opération ont pu accéder à un cofinancement de l'ANR. Les recherches appliquées pilotées par l'Institut portent sur les matériaux, les sols, les procédés et techniques de construction.

L'Irex en recense 25 dans la brochure qu'il publie pour ses 20 ans. Il propose un classement selon 5 grands thèmes (cf. tableau).

Citons dans le développement durable : Clé de sol (1999-2005) sur les galeries multiréseaux souvent en sous-sol, et Isi sur l'ingénierie de la sécurité incendie, prévu pour quatre ans en 2005.

### FAIRE AVANCER LES IDÉES

Deux projets qui viennent de se terminer ou sont sur le point de l'être vont dans le sens des préoccupations de Patrick Bernasconi, président de la FNTF : « Il faudra toujours concevoir des infrastructures et ouvrages neufs mais, de plus en plus, réhabiliter notre patrimoine de façon innovante, » a-t-il souligné. Erinoth sur l'érosion interne des ouvrages hydrauliques a débuté en 2007 pour quatre ans, de même que S3 sur la surveillance de la santé structurale des ouvrages d'art. Autres projets nationaux récents : Ceos



## IREX : 25 PROJETS DE RECHERCHE MARQUANTS

| Nom du projet   | Durée          | Thème central  |
|---|----------------|--|
| <b>Matériaux</b>  |                |  |
| B@P   | 2001-2006      | Bétons autoplaçants  |
| Befim   | 1995-2001      | Bétons de fibres métalliques   |
| BHP 2000  | 1995-2003      | Bétons à hautes performances   |
| Ceos.fr   | 2008-2013      | Comportement et évaluation des ouvrages spéciaux, fissuration, retrait                             |
| Voies nouvelles du béton  | 1985-1991      | (idem intitulé)  |
| <b>Géotechnique - Fondations</b>  |                |  |
| Asiri   | 2005-2009      | Amélioration des sols par inclusions verticales rigides  |
| Clouterre I et II   | 1986-1990      | Renforcement des sols par clouage  |
| Criterre  | 1998-2002      | Reconnaissance et identification des anomalies des terrains et contrôle des améliorations des sols |
| Forever   | 1993-2001      | Renforcement des sols par micropieux   |
| Solcyp  | 2008-2011/2012 | Comportement des pieux soumis à des sollicitations cycliques                                       |
| Tuba  | 1993-1996      | Battage des pieux  |
| <b>Procédés de construction</b>   |                |  |
| Bacara  | 1988-1996      | Bétons compactés au rouleau (BCR)  |
| Fabac   | 1995-1999      | Fatigue des chaussées en béton armé continu  |
| Flore   | 1992-1997      | Fissuration limitée et organisation du retrait des chaussées en béton                              |
| Microtunnels  | 1993-2002      | (idem intitulé)  |
| Mikti   | 2001-2006      | Ponts et passerelles mixtes de demain  |
| Vibrofonçage  | 1998-2006      | (idem intitulé)  |
| <b>Réhabilitation - Maintenance</b>   |                |  |
| Erinoh  | 2007-2012      | Érosion interne des ouvrages hydrauliques  |
| Kronos  | 1996-1999      | Facteurs de vieillissement des ouvrages  |
| Rerau   | 1992-2004      | Réhabilitation des réseaux d'assainissement urbains  |
| S3  | 2007-2011      | Surveillance de santé structurale  |
| <b>Développement durable</b>  |                |  |
| Calibé  | 1996-2001      | La maîtrise de la qualité des bétons   |
| Clé de sol  | 1999-2005      | Les galeries multiréseaux  |
| La Méthode observationnelle pour le dimensionnement interactif des ouvrages | 2003-2005      | (idem intitulé)  |
| Isi   | 2005-2012      | Ingénierie de la sécurité incendie   |

Source : 20 ans de recherche appliquée et d'expérimentation en génie civil, Irex, MEDDTL, FNTP, Mai 2011

(cité ci-dessus) et Solcyp sur le comportement des pieux soumis à des sollicitations cycliques.

Toutes les recherches appliquées de la classe "procédés et techniques de construction" sont terminées, selon l'Irex. Les plus récentes concernent les microtunnels (1993-2002), les ponts et passerelles mixtes de demain (Mikti, 2001-2006) et le vibrofonçage (1998-2006).

L'Irex, en vingt ans, a réussi à convaincre pour dépasser les réflexes de prudence d'un certain nombre d'acteurs de la construction.

« Les projets nationaux ont sans doute le plus contribué à faire avancer les idées et émerger de nouvelles technologies "ordinaires", disposant de références acceptables dès les premières propositions d'application, » observe Louis Demilecamps, président du comité d'orientation du RGC&U.

### « EN FAIRE PLUS AVEC MOINS »

Les opérations que l'association a montées ont été fortement marquées par le souci d'économie et ce n'est pas fini. « Les travaux publics du XXI<sup>e</sup> siècle se réaliseront selon la devise



8

© CEMAGREF



9

© HUBERT CANET - BALLOIDE PHOTO



10

DR

### 8- Projet ERINOH – Rupture de barrage.

### 9- Projet MIKTI – Viaduc de la Côtière.

### 10- Projet Clé de Sol – 17 km de galeries multiréseaux à Brno (République Tchèque).

"En faire plus avec moins" et cet objectif ne sera atteint qu'en poursuivant avec dynamisme les efforts de recherche qui intéressent la profession, » selon les président et vice-président de l'Irex qui souhaitent que « les perfectionnements acquis et la modernité du secteur soient davantage mis en valeur et que la diffusion des résultats soit renforcée. » Il sera davantage fait appel aux fonds européens. Toutefois, l'Irex devra rester une structure légère, ne peser que quelques pourcents du coût d'une opération (actuellement 5 % maximum), selon Jean Chapon. □





# PROJET DE NOUVEAU FASCICULE 69 DU CCTG LE MANAGEMENT DES RISQUES GÉOTECHNIQUES

AUTEURS : GILLES HAMAIDE ET ALAIN ROBERT, CETU (CENTRE D'ÉTUDES DES TUNNELS)

L'ACTUEL FASCICULE 69 DU CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES GÉNÉRALES (CCTG) « TRAVAUX EN SOUTERRAIN » A ÉTÉ APPROUVÉ PAR DÉCRET DU 14 JUIN 1982. DEPUIS, LES TECHNOLOGIES ET LES PRATIQUES EN MATIÈRE DE TRAVAUX SOUTERRAINS ONT ÉVOLUÉ DE SORTE QUE CE DOCUMENT SE TROUVAIT UN PEU DÉPASSÉ, SA MISE À JOUR ÉTAIT DEVENUE NÉCESSAIRE ET UN NOUVEAU PROJET DE FASCICULE 69 EST EN COURS DE RÉDACTION. LE PRÉSENT ARTICLE FAIT LE POINT SUR LE SUJET MANAGEMENT DES RISQUES GÉOTECHNIQUES TEL QUE VU PAR LE CETU.

En septembre 2006, le président du groupe permanent d'étude des marchés de travaux et de maîtrise d'œuvre (GPPEM/TMO) a lancé la révision du fascicule 69. Un groupe de travail rassemblant les trois grandes composantes de la profession : entreprise, maître d'ouvrage et maître d'œuvre a été mis en place.

Il a été présidé par Pierre Garnier, Ingénieur Général au MEDDTL. Cet article ne présente pas l'ensemble des dispositions contenues dans le projet de fascicule 69. Il traite uniquement du management des risques géotechniques qui compte parmi les sujets les plus novateurs du projet de fascicule. En effet ce dernier prévoit que soit

introduit dans le cadre des marchés de travaux en souterrain un Plan de Management des Risques (PMR) bien défini (voir encadré : Extrait du projet de fascicule 69 - art I.2.2.).

Il est prévu qu'un document d'aide pour l'application du nouveau fascicule 69 soit diffusé lors de sa publication. Ce document apportera en particulier des

indications pour la rédaction du PMR. Cet article présente une première analyse du CETU sur les conditions de mise en œuvre de ce PMR.

Pour le management des risques, le projet de fascicule 69 applique rigoureusement le vocabulaire et la démarche préconisés par la norme ISO 31000:2009.

Le management des risques est un processus continu et itératif mis en œuvre dès les toutes premières phases d'études et qui s'achève par la gestion du PMR lors de la contractualisation et de la réalisation des travaux.

## LA NORME ISO 31000:2009 « MANAGEMENT DU RISQUE - PRINCIPES ET LIGNES DIRECTRICES »

Sans rapporter toutes les définitions de la norme ISO, quelques extraits sont rappelés ici, accompagnés de notes sur leur application aux tunnels.

### L'APPRÉCIATION DU RISQUE

La démarche d'appréciation des risques géotechniques comporte trois étapes : l'identification, l'analyse et l'évaluation des risques géotechniques.

### L'IDENTIFICATION DU RISQUE

Le risque est défini comme l'effet de l'incertitude sur l'atteinte des objectifs :

- L'incertitude étant l'état, même partiel, de défaut d'information concernant la compréhension ou la connaissance d'un événement de ses conséquences ou de sa vraisemblance ;

- L'effet étant un écart, positif et/ou négatif, par rapport à une attente ; l'atteinte des objectifs étant pour le domaine des travaux souterrains comprise comme la réalisation des travaux de construction dans le respect des coûts et délai prévus, des performances de l'ouvrage attendues et dans le respect de l'environnement et des avoisinants.

Ainsi défini, le risque correspond à la possibilité que se produise un événement (changement d'un ensemble particulier de circonstances) qui constituerait un écart par rapport aux conditions attendues et dont la conséquence serait susceptible d'affecter sensiblement l'atteinte des objectifs.

L'identification du risque consiste en un processus de recherche, de reconnaissance et de description du risque.

En pratique, il s'agit, pour chaque incertitude recensée dans le « registre des incertitudes » de déterminer quel pourrait être l'événement susceptible de se produire et de créer ainsi un écart par rapport à la situation de référence.

### L'ANALYSE DU RISQUE

L'analyse du risque est le processus mis en œuvre pour comprendre la nature d'un risque et pour déterminer le niveau de risque caractérisant l'importance d'un risque exprimée en termes de combinaison des conséquences et



de leurs vraisemblances. En pratique, il est procédé pour tout risque identifié à une recherche des événements susceptibles de se produire ainsi qu'à l'estimation de la vraisemblance (probabilité que l'évènement se produise) et de la conséquence (effet d'un événement affectant les objectifs) de ces événements.

Le risque est alors caractérisé en référence à la vraisemblance et à la conséquence de l'évènement redouté sur tel ou tel objectif ou sur tous les objectifs. Le niveau de risque résultant de la combinaison de la vraisemblance et de la conséquence peut s'exprimer de manière quantitative, semi-quantitative ou qualitative.

### L'ÉVALUATION DU RISQUE

L'évaluation du risque est la comparaison des résultats de l'analyse du risque avec les critères de risque afin de déterminer si le risque est acceptable ou tolérable.

Les critères de risque sont des termes de référence choisis ou établis par le maître d'ouvrage et qui délimitent le domaine de son acceptabilité. Comme pour le niveau de risque, la détermi-

nation de la valeur des critères peut s'exprimer de manière quantitative, semi-quantitative ou qualitative.

### LE TRAITEMENT DU RISQUE

Le traitement du risque est le processus destiné à modifier le risque. Plusieurs actions sont possibles :

- Le refus du risque consistant à décider de ne pas poursuivre l'étude du projet considéré (abandon d'une variante par exemple) ;

- L'élimination de la source du risque (modification de la géométrie du projet par exemple) ;

- La réduction de la vraisemblance (par des reconnaissances géologiques par exemple) ;

- La réduction des conséquences (en adaptant les méthodes par exemple). Les risques qui ne sont pas totalement éliminés constituent les risques résiduels qui doivent être répartis et/ou assumés entre les différents acteurs.

### LE MANAGEMENT DES RISQUES EN PHASE ÉTUDES

Durant les études de conception, le management des risques géotechniques consiste à chaque phase

d'étude en l'application du processus décrit ci-dessus, à savoir :

- Synthèse raisonnée de toutes les données géotechniques disponibles ;

- Recensement des incertitudes concernant le modèle géologique proposé, le comportement du terrain encaissant en fonction des méthodes et techniques envisagées, ainsi que les effets éventuels de la construction de l'ouvrage sur tous les avoisinants (bâti, nappe, autres infrastructures, etc.) situés au sein de la zone d'influence géotechnique (ZIG) ;

- Appréciation des risques associés à ces incertitudes, c'est-à-dire identification des événements redoutés et détermination de leur vraisemblance et de leurs conséquences ;

- Définition des mesures de traitement des risques identifiés qui, durant ces phases d'étude de conception, consistent essentiellement en des campagnes de reconnaissances et éventuellement quelques études spécifiques visant à préciser la nature, la vraisemblance et les conséquences de chaque événement redouté afin d'être en mesure d'en réduire l'impact sur les objectifs du maître d'ouvrage.

À l'issue de la dernière phase de conception (phase Projet selon la loi MOP), le management des risques aboutit à un « Registre des risques » récapitulant tous les risques identifiés, avec les mesures de traitement associées ainsi que les risques résiduels demeurant à l'issue du processus d'étude.

### FORMALISATION DES RISQUES DANS LE DOSSIER DE CONSULTATION DES ENTREPRISES (DCE)

Dans l'esprit des recommandations de l'AFTES (GT32-Octobre 2004 et GT32-nouvelle recommandation à paraître), le projet de fascicule 69 sous-entend que le DCE comprenne les éléments suivants :

Un **cahier A** comportant toutes les informations géologiques, hydrogéologiques et géotechniques sous la forme de données brutes factuelles. Un cahier A' regroupant toutes les informations relatives au site (ouvrages existants enterrés, bâti et fondations, infrastructures existantes, etc.) également sous la forme de données brutes factuelles.

Un **cahier B** intitulé Mémoire de synthèse géologique, hydrogéologique et géotechnique (MSG) présentant la synthèse et l'interprétation retenue tant pour les données géotechniques que pour les données du site.

### EXTRAIT DU PROJET DE FASCICULE 69 - ART 1.2.2.

« Le Plan de Management des Risques liste les risques résiduels, à savoir ceux non couverts par les dispositions techniques prévues au marché et contre lesquels le maître d'ouvrage juge nécessaire de se prémunir. Il analyse les événements à leur origine, apprécie leur vraisemblance et en définit les conséquences prévisibles sur l'organisation du chantier. Il rappelle les dispositions techniques prévues pour prévenir les événements redoutés et limiter leurs conséquences (reconnaisances à l'avancement...). Il contient la description des dispositions techniques et organisationnelles envisagées : pour mettre le chantier en sécurité lors de leur survenance pour poursuivre le chantier. Le PMR propose enfin les principes ou modalités de rémunération de ces interventions. »



Ce cahier comprend un chapitre « Registres des incertitudes » qui indique toutes les incertitudes qui demeurent.

Un **cahier C** dénommé Mémoire de conception qui récapitule les hypothèses retenues pour le choix des méthodes constructives pour la part qui est imposée et les hypothèses concernant les paramètres déterminants à retenir (avec les fourchettes d'incertitudes) pour les méthodes qui peuvent être proposées par les entreprises dans leur offre.

Il indique les paramètres à retenir pour le dimensionnement des ouvrages à construire et pour l'étude du comportement des ouvrages existants.

Il définit également les processus de mesures, de suivi et de surveillance que le maître d'ouvrage souhaite voir mis en œuvre.

Un « Registre des risques » destiné à être présenté dans le cadre du PMR récapitule tous les événements incertains pouvant survenir et leurs conséquences.

Dans ce document, le maître d'ouvrage identifie tous les risques résiduels (subsistant après le traitement du risque), acceptés avec ou sans traitement.

## LE PLAN DE MANAGEMENT DES RISQUES

### LES RISQUES GÉOTECHNIQUES

Les risques résiduels traités peuvent être répartis en deux catégories :

→ Ceux pour lesquels il est possible lors du projet de définir un traitement qui sera inclus dans les dispositions techniques du marché ;

→ Ceux pour lesquels le traitement ne peut être que partiellement défini et auxquels s'applique le PMR.

La prise en compte des risques géotechniques (AFTES GT32-recommandation à paraître) permet d'illustrer cette répartition.

Parmi les incertitudes géotechniques susceptibles de constituer des sources de risques résiduels figurent :

→ Celles résultant de la variabilité propre aux matériaux naturels et qui portent sur les valeurs des caractéristiques physiques et mécaniques et sur les paramètres de comportement (dispersion des valeurs) ;

→ Celles portant sur la localisation exacte des limites entre sous-ensembles géotechniques réputés homogènes ainsi que sur la localisation des zones singulières bien identifiées par ailleurs (failles, zones de cisaillement, zones aquifères, etc.).

Ce sont des risques résiduels relevant de la première catégorie.



Figurent également parmi les incertitudes géotechniques celles portant sur les occurrences (nombres et localisation) d'événements possibles et dont les conséquences sont difficiles à apprécier précisément ou celles résultant de lacunes de connaissance et qui portent sur des événements peu ou mal connus. Ce sont des risques résiduels relevant de la seconde catégorie.

Les risques résiduels non traités doivent être « couverts » par une provision financière du maître d'ouvrage.

### FORMALISATION DU TRAITEMENT DES RISQUES RÉSIDUELS DANS LE PMR

Les objectifs visés par le PMR tel que décrit dans le projet de fascicule 69

sous-entendent que, pour la contractualisation des travaux de tunnel, il peut être demandé à chaque candidat lors de la consultation de procéder à l'analyse et à l'évaluation des risques identifiés dans ce PMR. Il peut aussi lui être demandé de préconiser des mesures de traitement et de fournir des indications sur l'impact de ces mesures sur la conduite des travaux.

Cependant il peut persister une véritable difficulté pour définir précisément les conséquences de certains événements redoutés ; dans tous les cas il doit être au moins demandé aux candidats de s'exprimer sur les mesures organisationnelles minimales pour réagir face à ces événements lors des travaux.

Le PMR annexé au CCTP doit ainsi contenir l'identification, l'analyse, l'évaluation et les mesures de traitement des risques résiduels.

## LE PILOTAGE DU CHANTIER

Le projet de fascicule 69 précise le rôle du maître d'œuvre pour le pilotage du chantier, dans le cadre de sa mission de direction de l'exécution du contrat de travaux (DET). En particulier il lui appartient de valider les propositions de l'entreprise vis-à-vis de l'adaptation des méthodes de creusement-soutènement aux conditions géologiques rencontrées, à l'occasion des réunions de chantier qu'il dirige ou de réunions spécifiques si nécessaire.

Les motivations de ces adaptations sont formalisées par l'entreprise, elles s'appuient notamment sur l'analyse des données recueillies lors du creusement et sur l'analyse des reconnaissances à l'avancement.

Cette démarche doit permettre à l'entreprise et au maître d'œuvre de situer les conditions rencontrées vis-à-vis des conditions attendues (situation de référence) et de constater contradictoirement si il y a ou non occurrence d'un événement redouté tel que listé au PMR, puis d'engager l'application des mesures prévues au PMR le cas échéant.

Le projet de fascicule 69 précise alors le rôle du maître d'œuvre dans ces conditions (voir encadré).

## CONCLUSION

Le projet de fascicule 69 du CCTG « travaux en souterrains » fixe dans les grandes lignes les objectifs du PMR mais laisse beaucoup de latitude aux maîtres d'ouvrage pour sa mise en œuvre.

Du fait de son large champ d'application, ce texte devait être suffisamment souple pour s'adapter aux différents points de vue des acteurs en présence et permettre sa transcription à différents types de contractualisation.

Dans ce domaine nouveau du management des risques, les bonnes pratiques restent encore à expérimenter.

Les groupes de travail actuels de l'AFTES auxquels participe le CETU ne manqueront pas de faire des propositions tant sur la prise en compte des risques lors de la conception des projets que sur leur intégration dans les contrats de travaux.

Le fascicule 69 laisse ainsi une marge de manœuvre suffisante pour de telles propositions. □

## PILOTAGE DU CHANTIER EN CAS D'OCCURRENCE D'UN ÉVÉNEMENT PRÉVU AU PMR

**« Dans le cas d'occurrence d'un événement prévu au PMR et constaté contradictoirement, les dispositions prévues dans ce document sont appliquées. Si nécessaire, l'adaptation des méthodes de traitement des événements aux conditions rencontrées correspondantes est faite, au fur et à mesure de l'avancement du chantier.**

**Les méthodes utilisées font l'objet d'un rapport présenté au maître d'œuvre par le titulaire dans les vingt quatre heures au plus tard après leur début d'exécution dans lequel il fournit :**

- **La synthèse des données géologiques, hydrogéologiques et géotechniques caractérisant les conditions de terrain rencontrées ;**
- **La description des dispositions adoptées ;**
- **Les écarts éventuels par rapport aux méthodes définies initialement au PMR ;**
- **Les modalités nécessaires pour prendre en compte ces écarts pour la suite du chantier.**

**L'examen de ce rapport est effectué au cours de réunions spécifiques. Les décisions et actions convenues sont validées par le maître d'œuvre et consignées dans un compte-rendu. Les procédures de traitement des événements doivent être actualisées. Toute décision portant sur des dispositions techniques non prévues au marché et entraînant des modalités de rémunération spécifiques doit être soumise au préalable à un accord du maître de l'ouvrage ou de son représentant. »**

# AUTOROUTE MARRAKECH – AGADIR : LE PREMIER TUNNEL AUTOROUTIER AU MAROC

AUTEURS : YASSIR BOUJEMAOU, DIRECTEUR DES ÉTUDES, AUTOROUTES DU MAROC (ADM) - ABDESLAM ERRIDAOU, DIRECTEUR, MAROC-SETEC - MICHEL PRÉ, DIRECTEUR DE PROJET, SETEC TPI - ALEXIS BONCOUR, INGÉNIEUR SÉCURITÉ, SETEC TPI - JEAN DOS SANTOS, INGÉNIEUR TRAVAUX TUNNELS, SETEC TPI

LE TUNNEL DE ZAOUÏAT AÏT MELLAL, SUR L'AUTOROUTE MARRAKECH-AGADIR, EST LE PREMIER TUNNEL AUTOROUTIER MIS EN SERVICE AU MAROC. FORMÉ DE DEUX TUBES À DEUX VOIES D'UNE LONGUEUR DE 546 M, IL FACILITE LE PASSAGE DE L'AUTOROUTE À TRAVERS LES COLLINES MARNO-CALCAIRES DES CONTREFORTS DU HAUT-ATLAS. LES CONDITIONS DE SÉCURITÉ DE L'EXPLOITATION ONT FAIT L'OBJET D'UNE ANALYSE RIGOUREUSE TENANT COMPTE DES SPÉCIFICITÉS DU TRAFIC ATTENDU ET DE L'ENVIRONNEMENT DE CE TUNNEL. LE TUNNEL A ÉTÉ DOTÉ D'ÉQUIPEMENTS ET DE MOYENS DE SUPERVISION PRÉSENTANT TOUTES LES GARANTIES DE CONFORT ET DE SÉCURITÉ POUR LES USAGERS. IL S'INTÈGRE AINSI DANS LE PROGRAMME LANCÉ PAR AUTOROUTES DU MAROC POUR LA MODERNISATION DE L'EXPLOITATION DE SON RÉSEAU AUTOROUTIER.



L'« autoroute Marrakech – Agadir, d'une longueur de 230 km constitue la dernière étape de l'ambitieux projet de liaison autoroutière Nord-Sud du Royaume du Maroc. Le tracé implique la traversée

des contreforts du Haut-Atlas, à une altitude d'environ 1 000 m. Pour cette traversée, le maître d'ouvrage, Autoroutes du Maroc (ADM), a choisi un tracé faisant appel à la construction d'un tunnel sur environ 500 m en

**1- Tête Nord, aspect final du tympan.**

**1- Northern portal, final appearance of the front wall.**

remplacement des variantes initiales qui prévoyaient un passage en très forts terrassements. En effet, l'étude d'impact a soulevé de nombreuses questions lors des revues d'avant-projet, liées aux conséquences qu'aurait



un tracé normal (déblai / remblai) sur la vallée de Zaouiat Ait Mellal dont l'importance écologique et culturelle ne pouvait être ignorée. Il s'agissait alors de mettre en place un niveau d'équipement et un système d'exploitation de cet ouvrage, qui est le premier de ce type sur le réseau autoroutier marocain, présentant le plus haut niveau possible de sécurité pour les usagers (figure 3).

Le présent article développe un certain nombre de particularités de la conception et de la réalisation de cette infrastructure exemplaire.

## CONCEPTION DE LA SÉCURITÉ DE L'EXPLOITATION DE L'OUVRAGE

### PROGRAMME FONCTIONNEL DE L'OUVRAGE

L'étude de trafic, prenant en compte le côté attractif de l'itinéraire autoroutier par rapport au réseau viaire existant dans cette région du Haut-Atlas, a dégagé les principales caractéristiques suivantes du trafic attendu dans l'ouvrage :

→ **Niveau** : environ 10 000 véhicules/jour pour les deux sens réunis à l'horizon 2020 choisi en référence. Le trafic devrait être à peu près équilibré entre les deux sens de circulation, relativement constant sur la semaine, un peu plus soutenu pendant les vacances d'été.



→ **Composition** : caractéristique du réseau routier marocain, le pourcentage de poids lourds est très élevé (environ 50 %), avec cependant une forte proportion de petits poids lourds (< 3.5 t). La nécessité d'admettre le transport de marchandises dangereuses, essentiellement hydrocarbures, sans restrictions spécifiques s'impose.

La vitesse maximale autorisée en tunnel sera de 100 km/h pour les véhicules légers et 80 km/h pour les poids lourds. Le gabarit maximal autorisé a fait l'objet de nombreuses discussions. En effet, on observe sur les routes marocaines de nombreux véhicules transportant des chargements très hauts, et les gabarits adoptés sous ouvrage tiennent en général compte de cette donnée. S'agissant d'un tunnel, un compromis

**2- Paysage de l'Atlas vu du Sud du tracé.**  
**3- Situation générale.**

**2- Atlas landscape viewed from the South of the route.**  
**3- General location.**

a dû être cherché entre l'intérêt d'ouvrir au maximum l'utilisation de l'itinéraire à tous types de véhicules, et le coût important représentant l'adoption de gabarits très hauts. Un gabarit de 5,00 m a finalement été retenu.

## ANALYSE DE RISQUES

Une analyse de risques spécifique détaillée a été menée afin de répondre aux deux objectifs majeurs suivants :

→ Recenser et prendre en compte les événements susceptibles de survenir en tunnel afin d'élaborer et de sélectionner des scénarios d'autoévacuation des usagers et d'intervention des services publics de secours ;

→ Déterminer le niveau d'équipements en tunnel à adopter suite à l'analyse de différents scénarios d'incident (dont incendie).

Le tunnel étant autorisé aux poids lourds, y compris avec transport de marchandises dangereuses, les deux événements standardisés préconisés par référence aux recommandations du Cetu sont : l'incendie de poids lourd standard de 30 MW ; l'incendie de poids lourd transportant des marchandises dangereuses de 200 MW (équivalent à l'incendie d'un camion-citerne transportant 20 t de carburant).

La forte proportion de poids lourds constitue une particularité par rapport aux compositions de trafic habituelles auxquelles sont appliquées les recommandations.

Il est donc apparu nécessaire de prendre en compte, comme événement déclenchant supplémentaire, l'incendie de poids lourd avec un chargement très fortement combustible à haut potentiel calorifique de 100 MW.

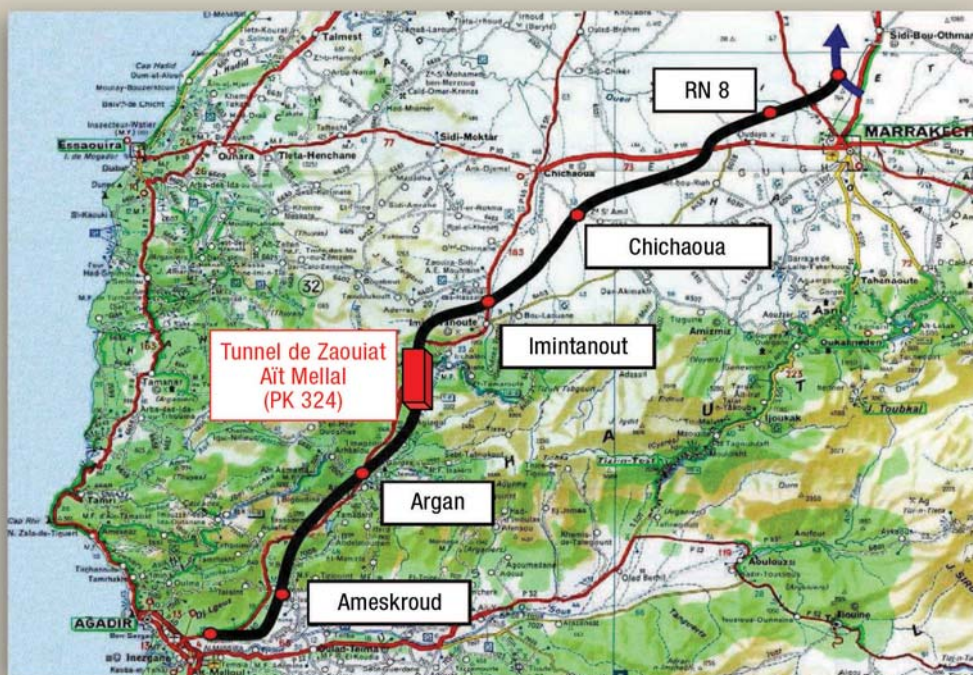
Il en est de plus résulté qu'afin d'offrir les meilleures conditions d'auto-évacuation aux usagers en cas d'incendie, on ne pouvait se contenter de dispositions « passives » (cheminements d'évacuation par des rameaux entre les deux tubes), mais qu'un système efficace de désenfumage présentait un avantage décisif.

## SYSTÈME DE DÉSENFUMAGE

Dans les tunnels à circulation unidirectionnelle, l'effet recherché avec un système de désenfumage longitudinal, la longueur du tunnel ne justifiant pas la mise en œuvre d'une ventilation transversale, est qu'il soit capable de prévenir une remontée de fumées en amont du véhicule incendié par rapport au sens de circulation : les usagers des véhicules « piégés » à l'arrière de l'incendie peuvent alors être évacués dans un air exempt de fumées, tandis que les usagers situés en aval sont supposés avoir pu continuer leur trajet dans leur véhicule (absence de congestion). La vitesse d'air minimum à créer pour obtenir cet effet est appelée la vitesse critique.

## SITUATION GÉNÉRALE

3



Le scénario le plus défavorable pour le dimensionnement du système de désenfumage est celui d'un incendie de véhicule dans le tube descendant, à une centaine de mètres de la sortie environ, alors que règne une surpression atmosphérique côté tête basse, évaluée, sur la base des données météorologiques disponibles, à 50 Pa maximum (figure 4).

Dans ce scénario, jusqu'à la mise en route des accélérateurs, l'effet cheminée et la contre-pression retenue poussent naturellement les fumées à remonter le tunnel vers les usagers bloqués par l'incendie : les fumées balayent la quasi-totalité de l'ouvrage en amont, rendant moins efficaces les accélérateurs soumis aux gaz chauds et en détruisant en partie ceux situés à proximité du foyer. Avec cinq batteries d'accélérateurs réparties dans le tunnel (maximum possible compte tenu du diamètre hydraulique de l'ouvrage), les calculs menés à l'aide du logiciel Camatt développé par la Setec en collaboration avec le Cetu, montrent que la vitesse critique pour un feu de 100 MW, qui est de 3,23 m/s pour la géométrie du tunnel, est atteinte dans le sens de circulation des véhicules (perte de batterie(s) d'accélérateurs et déperdition des performances prises en compte).

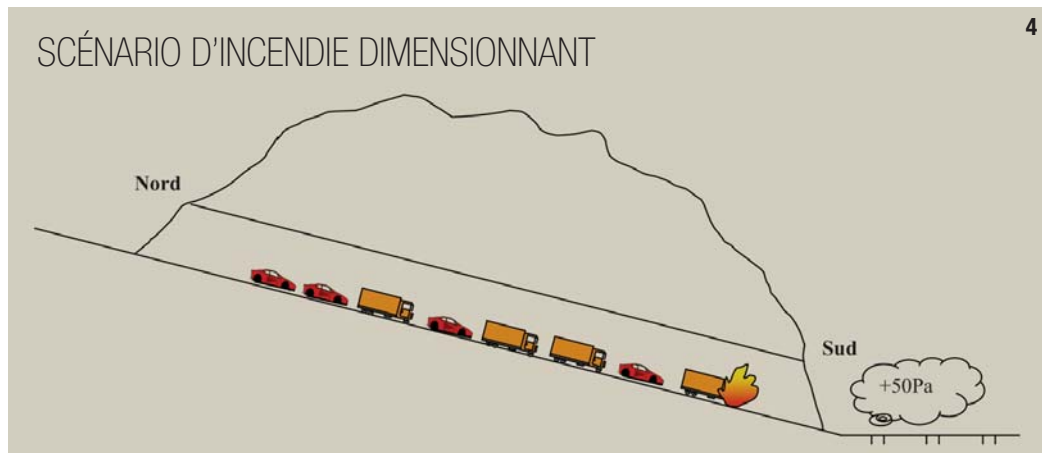
Le système de ventilation sera donc en mesure d'inverser le sens du courant d'air et facilitera alors l'autoévacuation des usagers et permettra l'accès des secours à l'incendie soit directement par le tube sinistré, soit par les communications intertubes.

À noter que le système sera également mis en œuvre dans l'autre tube pour éviter le phénomène de recyclage des fumées aux têtes.

En revanche, dans le cas d'un incendie de 200 MW, la puissance dégagée est telle qu'elle pourrait détruire tout ou partie des accélérateurs avant leur mise en route, même si ceux-ci sont prévus pour être résistants au feu (400°C pendant 2 heures).

Les simulations réalisées montrent que les équipements restant opérationnels permettent d'obtenir une vitesse amont d'environ 1 m/s, soit très inférieure à la vitesse critique qui est dans ce cas de 3,53 m/s : le retour de fumée (« back layering ») est donc dans ce cas inévitable.

Toutefois, l'analyse de risques basée sur une analyse de l'accidentologie marocaine montre que la probabilité d'occurrence d'un tel feu reste extrêmement rare et qu'alors, le traitement



**4- Scénario d'incendie dimensionnant.**

**5- Incendie sans déclenchement de la ventilation.**

**6- Incendie avec déclenchement de la ventilation au bout de 3 minutes.**

**7- Incendie avec déclenchement de la ventilation au bout de 10 minutes.**

**4- Critical design fire scenario.**

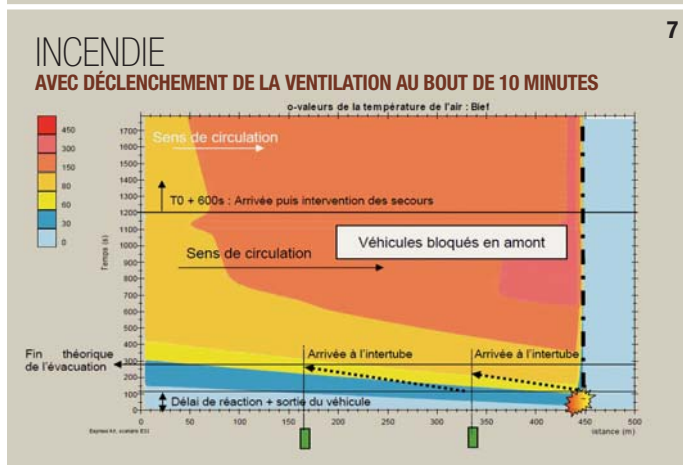
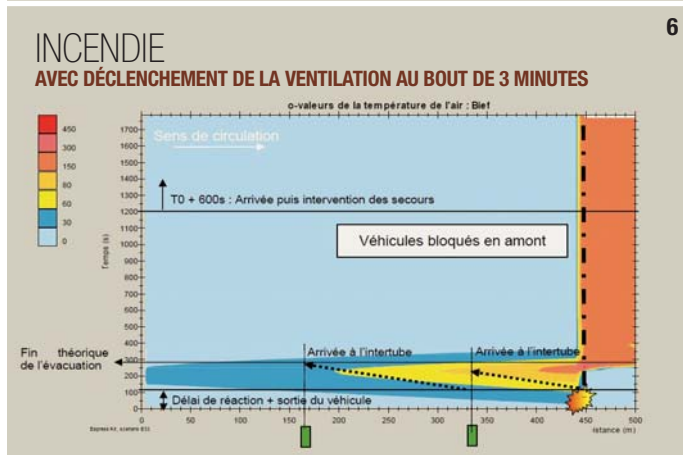
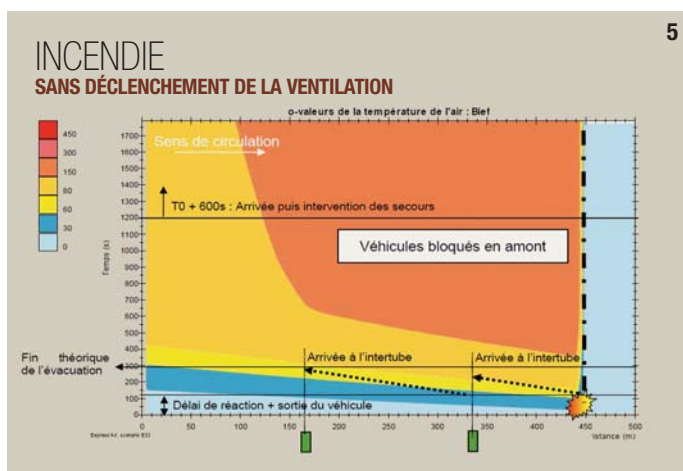
**5- Fire without tripping the ventilation system.**

**6- Fire with tripping of the ventilation system after 3 minutes.**

**7- Fire with tripping of the ventilation system after 10 minutes.**

retenu de ses conséquences, même partiel, est jugé acceptable (la criticité-probabilité x gravité- de cet évènement est faible).

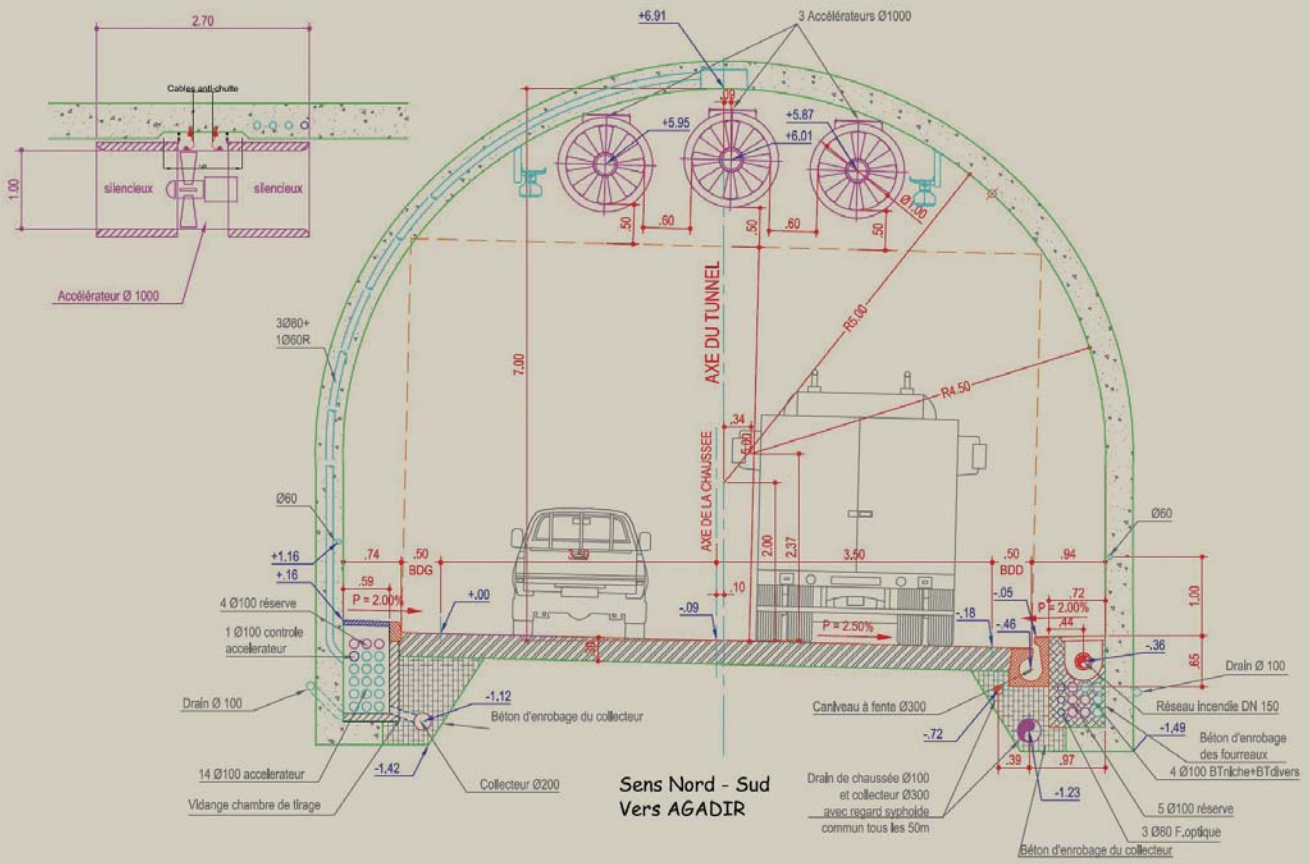
L'analyse de risques par scénario conduit nécessairement à prendre en compte dans l'analyse la chronologie possible des évènements (déterminée en fonction du niveau d'équipement du tunnel), ainsi que les effets liés aux phénomènes transitoires (arrêt du pistonement des véhicules, mise en route





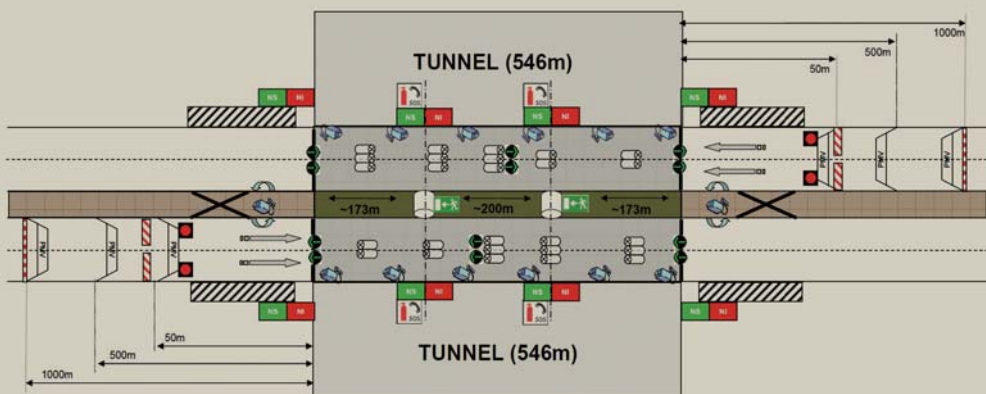
## COUPE TRANSVERSALE SUR UN TUBE

8



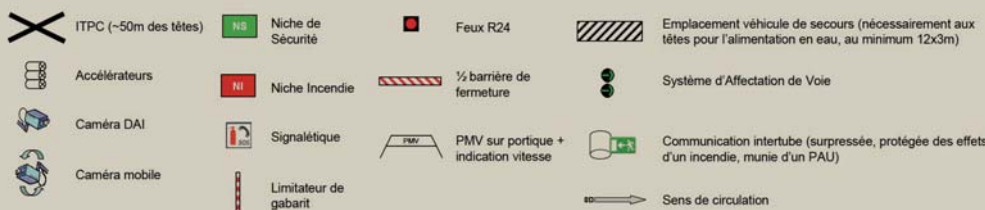
## SYNOPTIQUE DES ÉQUIPEMENTS D'EXPLOITATION ET DE SÉCURITÉ

9



8- Coupe transversale sur un tube.  
9- Synoptique des équipements d'exploitation et de sécurité.

8- Cross section on a tube.  
9- Block diagram of operating and safety facilities.



des équipements de désenfumage) : du démarrage de l'incendie et de sa détection par les équipements du tunnel ou par appel d'un usager, jusqu'à la transmission de l'alerte vers les services de secours (PC de surveillance) et leur arrivée sur site, l'évolution et la dangerosité des fumées des incendies sont déterminées par un logiciel de calcul adapté (Camatt) afin d'estimer les conditions d'autoévacuation des usagers.

Des enseignements sur le niveau d'équipement à retenir et sur les besoins en coordination entre les différents intervenants internes et externes sont tirés des conséquences de ces scénarios.

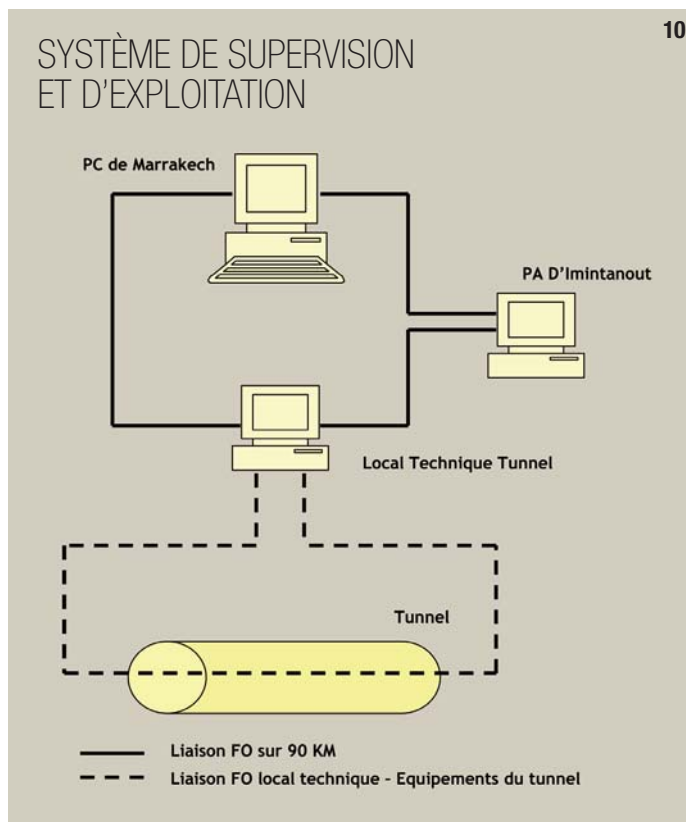
Le logiciel Camatt aide à établir des abaques donnant, pour tout point du tunnel, l'évolution des températures, de la toxicité de l'air et de l'opacité en fonction du temps, permettant ainsi de visualiser les conditions régnant lors de l'auto-évacuation des usagers. Les figures montrent les résultats obtenus pour le scénario pénalisant à 100 MW :

- 1- Sans déclenchement de la ventilation (figure 5) ;
- 2- Avec déclenchement de la ventilation au bout de 3 minutes (figure 6) ;
- 3- Avec déclenchement de la ventilation au bout de 10 minutes (figure 7).

Il en ressort clairement que la réactivité du système est un élément central de son efficacité. Technologiquement, c'est le système de détection automatique d'incident (DAI) qui permet d'obtenir la réactivité à 3 minutes. Les délais obtenus par des systèmes basés sur la détection par câbles de détection linéaire sont nettement plus aléatoires, et peuvent atteindre les 10 minutes. La DAI ayant également d'autres applications en exploitation (détection de tout incident en tunnel, tel que véhicule arrêté en cas de panne, intrusion, obstacle créé par un colis détaché d'un véhicule, ralentissement ou congestion en tunnel, etc.), celle-ci a été privilégiée par le Maître d'Ouvrage.

#### AUTRES ÉQUIPEMENTS DE SÉCURITÉ ET D'EXPLOITATION

Pour répondre à l'exigence du Maître d'Ouvrage d'obtenir un haut niveau de sécurité de l'exploitation, de nom-



breux autres équipements ont été mis en place, comme l'illustrent la coupe transversale sur un tube (figure 8) et le synoptique général (figure 9) :

- Communication intertubes munies de portes coupe-feu HCM120 ;
- Niches de sécurité en tunnel et aux têtes (poste d'appel d'urgence relié à un centre d'appel H24, extincteurs, prises électriques pour les services d'intervention) ;
- Réseau de lutte contre l'incendie associé à un réservoir de 180 m<sup>3</sup> (nourrices situées dans des niches incendie en tunnel et aux têtes) ;

#### 10- Système de supervision et d'exploitation.

#### 11- Profil en long géologique.

#### 10- Supervision and operating system.

#### 11- Geological longitudinal profile.

→ Dispositifs de recueil des eaux de chaussées par caniveau associé à un bassin de rétention d'une capacité de 200 m<sup>3</sup> ;

→ Capteurs de pollution (NOx, CO<sub>2</sub>, opacité) pour la gestion de la ventilation hygiénique ;

→ Éclairage dont éclairage renforcé aux têtes, éclairage de sécurité en tunnel sur alimentation secourue sans coupure, hublots de jalonnement tous les 10 m en tunnel ;

→ Signalétique de sécurité (niches de sécurité, issues de secours) ;

→ Réseau de signalisation et de régulation de trafic aux abords et entrée du tunnel (barrières et feux de fermeture, panneaux à message variable (PMV), feux d'affectation de voie (FAV)) ;

→ Surveillance permanente vidéo avec détection automatique d'incident (DAI) avec remontée d'alarme à un PC d'exploitation H24.

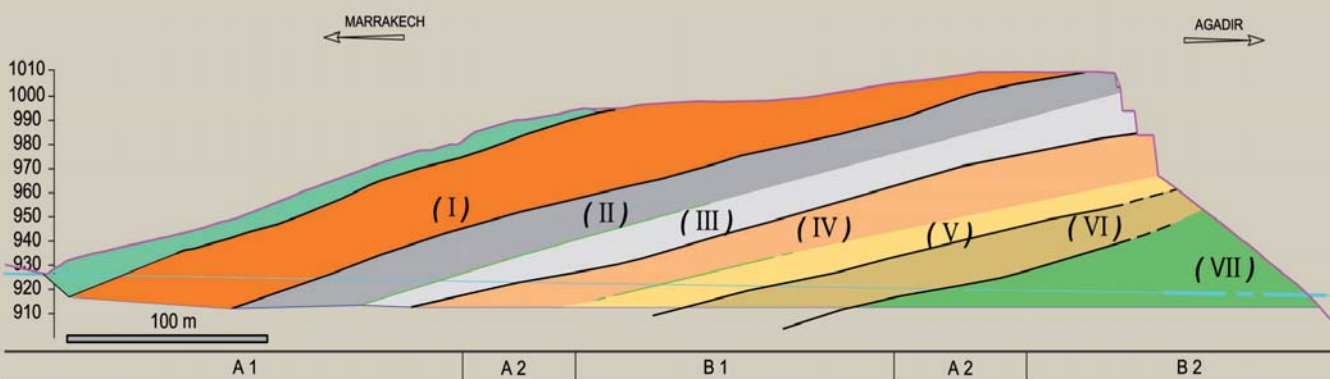
L'alimentation électrique du tunnel est assurée par une ligne moyenne tension spécialement dédiée secourue par groupe électrogène. De plus, les équipements dits de sécurité bénéficient d'une alimentation secourue sans coupure d'une autonomie de 30 min.

Le niveau obtenu est ainsi globalement au moins équivalent aux ouvrages souterrains les mieux sécurisés d'Europe.

#### LA SURVEILLANCE DE L'OUVRAGE ET LES PLANS D'INTERVENTION

Le tunnel de Zaouiat Aït Mellal est à ce jour le seul tunnel du réseau autoroutier marocain, et à ce titre constitue une première en termes d'exigence de surveillance permanente. Du fait de son isolement géographique, l'ouvrage est placé sous surveillance à distance depuis un poste de commandement permanent situé à l'échangeur de

#### PROFIL EN LONG GÉOLOGIQUE







12



13

Marrakech Targa (environ 100 km du site) dans une salle dédiée depuis laquelle sont gérées les remontées d'alarme, tous les équipements télécommandables par le biais d'une liaison en fibre optique avec l'ouvrage, et le lancement des alertes des services internes et externes et des autorités. Une équipe de deux opérateurs spécialement formés se relaie 24h/24 dans cette salle. À l'échangeur d'Imintanout (15 km au Nord de l'ouvrage), dans des locaux dédiés, un superviseur local dispose d'outils identiques pour coordonner l'action des personnels de terrain affectés à ce point d'appui (agents d'assistance, patrouilleurs et grutier) et assurer la liaison avec les services publics de sécurité également présents (peloton motocycliste de la Gendarmerie Royale, centre de secours spécialisé de la Protection Civile). Enfin, une surveillance humaine composée de deux gardiens postés à la tête Nord dans un local d'exploitation a une mission de protection contre le vol et le vandalisme des équipements, de surveillance via caméras des activités suspectes en tunnel, ainsi que de première assistance aux usagers en difficulté (figure 10).

### LA CONSTRUCTION CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET STRUCTURAL

L'ouvrage s'intègre dans un massif rocheux sédimentaire de l'Éocène et du Crétacé à dominante calcaire. La région

de l'ouvrage est affectée par une structure géologique en plis conjugués entre lesquels les bancs calcaires ont un pendage subvertical. L'implantation du tunnel a été choisie afin d'éviter que les charnières de ces plis, qui sont situées au Sud-Est et à l'Est de l'ouvrage ne recoupent l'axe ni l'emprise des têtes. Le tracé du tunnel et les ouvrages de tête ne sont donc pas affectés par cette structure et se trouvent dans un contexte tabulaire. Le pendage moyen de la stratigraphie y est incliné d'environ 15° dans la direction du Nord.

Certains faciès (zone de la tête Nord) présentent une composante gréseuse, d'autres une proportion importante de silice.

Du haut en bas de la série, les faciès sont les suivants (figure 11) :

→ Marnes et marno-calcaires localement gréseux, formant le versant Nord de la butte ;

→ Calcaire massif beige (type I), formant le sommet de la butte ;

→ Calcaire massif localement vacuolaire et siliceux (type II et III), formant le sommet de la falaise tête Sud ;

→ Calcaire fragmenté rognoneux (type IV et V) formant la partie médiane de la falaise tête Sud ;

→ Calcaire beige clair moyennement fracturé à fracturé (type VI) ;

→ Marno-calcaires et marnes gris-beige (type VII).

Les terrains des types I à VI ont des matrices calcaires qui ne présentent pas de caractère évolutif. En revanche,

### 12 & 13- Aspects de la falaise en tête Sud.

### 12 & 13- Views of the cliff at the southern portal.

les marnes et marno-calcaires du versant Nord de la butte et les marno-calcaires et marnes gris-beige du type VII sont des terrains présentant une composante argileuse sensible à l'eau. Aucune nappe phréatique n'affecte l'ouvrage, autour duquel ne sont à craindre que des infiltrations lors des épisodes pluvieux (assez rares, mais pouvant être très importants, comme les inondations subies en septembre 2008 dans le petit centre urbain tout proche d'Imintanout le montrent).

### PROBLÉMATIQUE DE LA TÊTE SUD

La zone d'implantation de la tête Sud est marquée par la présence en partie supérieure d'une falaise calcaire composée de 3 gradins successifs (faciès type II, III et IV). Elle surmonte une pente régulière (30 à 32°), correspondant à une succession de terrains marno-calcaires relativement sensibles à l'éro-

sion, dans laquelle doit s'implanter la tête Sud, et sur laquelle de nombreux blocs tombés de la falaise sont venus finir leur course. Les calcaires compacts formant la falaise au sommet du relief sont affectés par des diaclases et failles, de grande extension généralement à pendage fort à subvertical et dont certaines sont élargies par dissolution dans les niveaux de calcaire massif favorisant ainsi la formation de cavités karstiques dont la taille peut atteindre plusieurs mètres cubes, et délimitant également des blocs instables (photos 12 et 13).

Ces instabilités ont justifié les mesures suivantes :

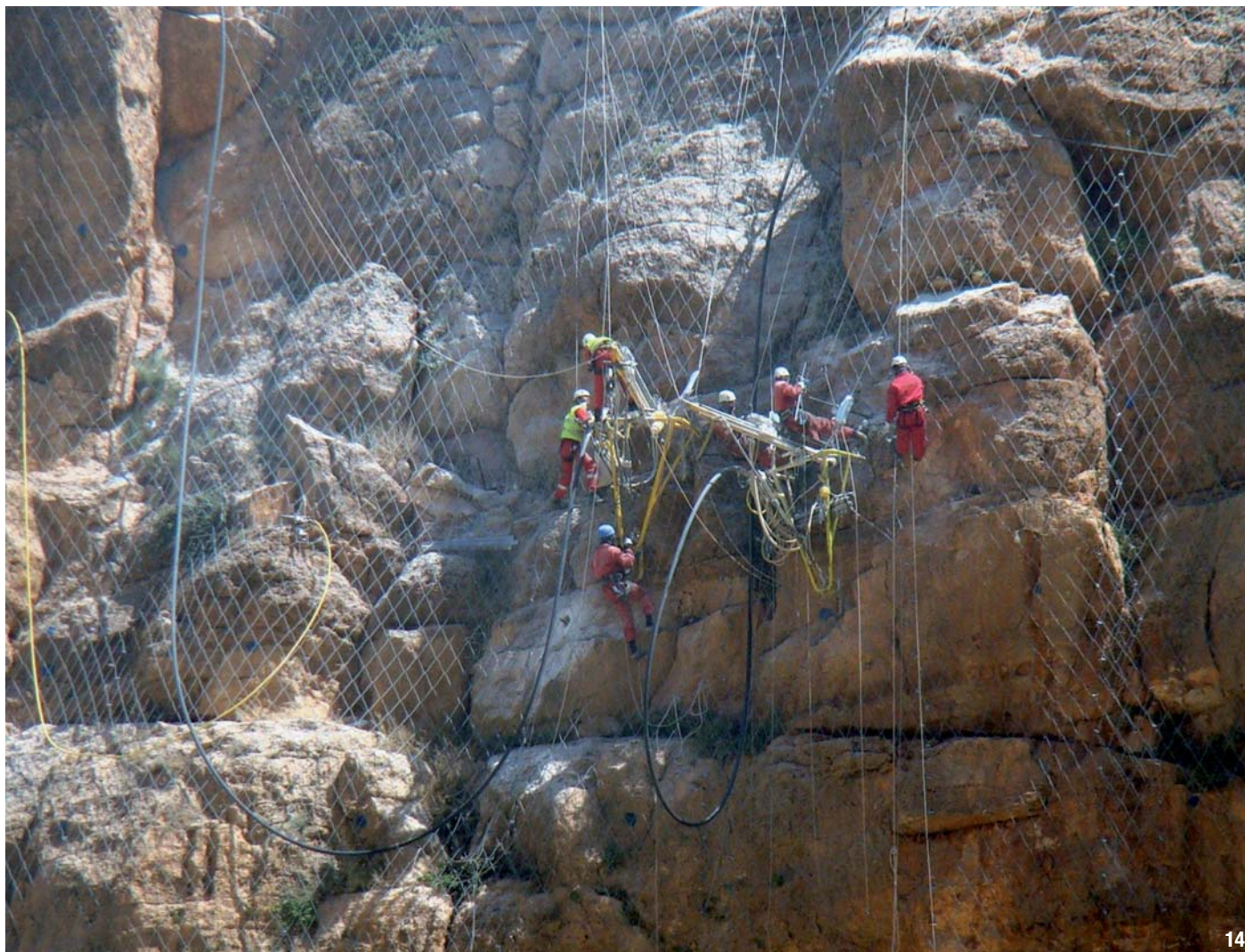
→ Afin de sécuriser les travaux de construction, purge de la falaise et mise en place par travaux acrobatiques d'une protection par un maillage métallique à haute limite élastique ancré par boulons (photo 13) ;

→ Détermination de la géométrie des ouvrages définitifs de la tête Sud à partir d'une étude trajectographique de chute de blocs rocheux : longueur des « faux-tunnels », merlons protecteurs. Par ailleurs, l'entrée en terre de l'excavation en tête Sud s'est faite sous la protection d'une voûte parapluie en tubes pétroliers de diamètre 109/127 et de 15 m de longueur.

### EXCAVATION ET SOUTÈNEMENT

La tête Sud présentant à la fois un accès plus difficile que la tête Nord, et nécessitant ces travaux de protection, ▷





14

qui ont requis près de 3 mois, l'excavation a été menée en parallèle sur les deux tubes à partir de la tête Nord.

L'excavation a été réalisée à l'explosif, en pleine section, le soutènement étant composé de boulonnage, à la densité adaptée aux faciès rencontrés et de béton projeté. Des cintres lourds ont remplacé le boulonnage dans les zones des deux têtes.

Les observations préalables, ainsi que les résultats des sondages, avaient pu faire redouter de devoir recourir à un creusement en section divisée dans la zone des calcaires fragmentés rogneux (types IV et V), quoique l'observation des failles et dissolutions de la falaise Sud ait montré que le risque de rencontrer des cavités en profondeur était faible.

Au creusement, la géologie s'étant révélée favorable, on a pu faire l'économie de ce phasage d'excavation en section divisée avec soutènement lourd, et en rester à une excavation pleine face et un soutènement par boulons et béton projeté.

#### REVÊTEMENT DÉFINITIF

Le revêtement définitif est constitué de béton coulé en place, non armé en voûte, et armé en piédroits compte tenu de leur forme verticale. Son épaisseur minimale est de 35 à 45 cm selon les profils. Un complexe drainant, complété dans les zones sensibles par un complexe d'étanchéité PVC, est interposé.

**14- Travaux de protection contre les chutes de blocs.**

**14- Works for protection against falling blocks.**

À chaque bétonnage (plots de 10 m), un contrôle du remplissage des hors profils est réalisé, des tubes de remplissage et pipes d'injection étant placés et utilisés après bétonnage pour assurer un parfait clavage du revêtement au terrain.

Les travaux de revêtements sont complétés par les travaux de réalisation des « faux-tunnels » d'une trentaine de mètres de longueur et des tympans architecturaux aux deux têtes (photos 1 et 15).

#### FINITIONS, CHAUSSÉES, ÉQUIPEMENTS

Les travaux de finition ont comporté la mise en œuvre d'un système d'assainissement incluant dans chaque tube un caniveau à fente verticale discontinu, équipé tous les 50 m par un regard siphonoïde pour renforcer la sécurité incendie vis-à-vis du risque d'épandage de liquide dangereux.

L'ouvrage est complété par les chaussées, la mise en œuvre des équipements, dont les batteries d'accéléra-

### PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE, MAÎTRE D'ŒUVRE ET EXPLOITANT :**  
Autoroutes du Maroc

**ASSISTANT MAÎTRE D'OUVRAGE :** Egis Tunnels

**ASSISTANT MAÎTRE D'ŒUVRE (CONCEPTION, SUPERVISION DE LA CONSTRUCTION, ASSISTANCE À LA MISE EN SERVICE) :**  
Setec (Setec Tpi, Setec Its, Maroc Setec, Terrasol), cabinet d'architectes AOA Lavigne-Chéron

**LABORATOIRE GÉOTECHNIQUE ET MATÉRIAUX :** LPEE

**ENTREPRISE DE GÉNIE CIVIL :** Tecnovia (Portugal)

**ENTREPRISE D'ÉQUIPEMENTS ÉLECTRO-MÉCANIQUES ET DE GTC :**  
Indra (Espagne)





15



16

teurs, l'éclairage, les dispositifs divers de surveillance, la conduite incendie et l'équipement des niches de sécurité incendie, la mise en peinture des piédroits (figure 16).

L'ouvrage comporte également, en tête Nord, un local technique extérieur abritant l'arrivée haute tension, un groupe électrogène, les équipements de GTC (gestion technique centralisée), un local d'exploitation, un réservoir incendie de 180 m<sup>3</sup> et, en tête Sud, un bassin de rétention de 200 m<sup>3</sup> destiné à recueillir les liquides dangereux et à éviter leur dispersion dans l'assainissement général.

### CONCLUSION

Autoroutes Du Maroc a su, à la faveur de la construction de ce premier tunnel, mettre en œuvre toutes les dispositions lui permettant de se doter d'un ouvrage présentant toutes les

garanties de confort et de sécurité pour les usagers, en l'intégrant dans son programme de modernisation de l'exploitation de son réseau autoroutier. □

15- Tête Sud, vue générale après mise en service.

16- Aspect intérieur du tunnel fini.

15- Southern portal, general view after commissioning.

16- Interior appearance of the finished tunnel.

## PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES

- Longueur totale couverte : 546 m
- Profil : bitube unidirectionnel à deux voies (2 voies de 3,50 m + 2 trottoirs de 0,75 m, bandes dérasées à droite et à gauche de 50 cm)
- Hauteur libre : 5,00 m + 50 cm de revanche de protection
- Deux communications intertubes
- Caniveau à fente avec regards siphoniques tous les 50 m dans chaque tube
- Par tube, 2 couples de niches de sécurité/incendie
- Ventilation mécanique longitudinale par 5 batteries d'accélérateurs dans chaque tube
- Réservoir incendie 180 m<sup>3</sup> et réseau en eau morte en tunnel

### COÛT TOTAL DES MARCHÉS DE CONSTRUCTION

- Génie civil : 190 millions de DH (environ 17,3 millions d'€)
- Équipements y compris marche à blanc et mise en service : 53,5 millions de DH (environ 5 millions d'€)

### CALENDRIER DE RÉALISATION

- Début des travaux de construction : mai 2008
- Percement des tunnels : mai 2009
- Mise en service : juin 2010

### ABSTRACT

#### MARRAKESH-AGADIR MOTORWAY: THE FIRST MOTORWAY TUNNEL IN MOROCCO

YASSIR BOUJEMAQUI, ADM - ABDESLAM ERRIDAQUI, MAROC-SETEC - SETEC TPI : MICHEL PRÉ - ALEXIS BONCOUR - JEAN DOS SANTOS

The Zaouiat Aït Mellal tunnel, on the Marrakesh-Agadir motorway, is the first motorway tunnel put into operation in Morocco. Formed of a two-lane twin-tube 546 m long, it facilitates the motorway's passage through the marly-calcareous hills of the High Atlas foothills. The operating safety conditions underwent rigorous analysis taking into account the specific features of the expected traffic and the environment of the tunnel. The tunnel has been provided with appurtenances and supervision facilities offering every guarantee of comfort and safety for the users. It forms part of the programme initiated by Autoroutes Du Maroc to modernise the operation of its motorway network. □

#### AUTOPISTA MARRAKECH – AGADIR: EL PRIMER TÚNEL DE AUTOPISTA EN MARRUECOS

YASSIR BOUJEMAQUI, ADM - ABDESLAM ERRIDAQUI, MAROC-SETEC - SETEC TPI : MICHEL PRÉ - ALEXIS BONCOUR - JEAN DOS SANTOS

El túnel de Zaouiat Aït Mellal, en la autopista Marrakech-Agadir, es el primer túnel de autopista que se ha puesto en servicio en Marruecos. Formado por dos tubos de dos carriles de una longitud de 546 metros, facilita el paso de la autopista a través de los montes marlo-calcareos de las montañas del Alto Atlas. Las condiciones de seguridad de la explotación fueron objeto de un riguroso análisis teniendo en cuenta diversas especificidades del tráfico esperado y del entorno de este túnel. El túnel se ha dotado de equipamientos y de medios de supervisión que presentan todas las garantías de confort y de seguridad para los usuarios. Este túnel se integra así en el programa iniciado por la entidad Autoroutes Du Maroc para la modernización de la explotación de su red de autopistas. □

# LA LIAISON FERROVIARE DU LIEFKENSHOEK À 40 M SOUS L'ESCAUT, LES TUNNELS FERROVIAIRES LES PLUS LONGS DE BELGIQUE

AUTEURS : LIONEL SUQUET, DIRECTEUR DE PROJET, VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS - PHILIPPE PATRET, DIRECTEUR DE PROJET DODIN CAMPENON BERNARD - DAMIEN ROY, RESPONSABLE QSE VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS - HÉLÈNE ROULET, INGÉNIEUR GÉOTECHNICIEN, VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS

**SITUÉE DANS LA ZONE PORTUAIRE D'ANVERS, CETTE CONCESSION DE 16 KM DE LIAISON FERROVIAIRE COMPRENANT DEUX TUNNELS DE 6 KM S'INSCRIT DANS LA STRATÉGIE D'INFRABEL D'AMÉLIORER LE FLUX DU TRAFIC FERROVIAIRE ENTRE LES RIVES GAUCHE ET DROITE DE L'ESCAUT.**

## FACILITER LE TRANSPORT DE MARCHANDISES EN BELGIQUE

Le port d'Anvers connaît actuellement une activité intense, en particulier sur la rive gauche de l'Escaut où 7,5 millions de conteneurs sont manipulés chaque année. Le nœud ferroviaire principal est situé sur la rive droite de l'Escaut. Pour rejoindre ce nœud à partir de la rive gauche en train, un seul passage existe actuellement et il est saturé. Il s'agit du tunnel ferroviaire Kennedy qui associe le fret aux transports de passagers. En 2014, une nouvelle ligne mettra en communication 11 lignes de chemin de fer entre le Sud et le Nord du port, et permettra aux trains de faire jusqu'à 100 allers et retours par jour sans avoir à quitter la zone portuaire.

## LE PROJET

Le contrat de concession de la liaison ferroviaire Liefkenshoek à Anvers a été signé le 5 novembre 2008 par le consortium Locorail, constitué de VINCI

Concessions (25 %), de CFE (25 %), dont VINCI détient 47 %, et du néerlandais BAM PPP (50 %).

Ce contrat de Partenariat Public Privé (PPP), d'un montant total de 841 millions d'euros et d'une durée de 42 ans, porte sur la conception, le financement, la construction et la maintenance d'une infrastructure ferroviaire d'une longueur de 16,2 km en double voie.

Elle crée une liaison supplémentaire entre la rive gauche et la rive droite de l'Escaut dans le port d'Anvers. Cette nouvelle infrastructure, destinée à assurer la circulation des trains de marchandises, permettra de réduire les distances à parcourir de 22 km et décongestionnera ainsi le trafic de la zone du port qui connaît un développement important de son activité de transport de marchandises.

La conception et la construction ont été confiées au groupement Locobouw, constitué de VINCI Construction Grands Projets (25 %), MBG (25 %), filiale de



1 - Vue générale du tunnel.

1 - General view of the tunnel.

CFE, CEI-De Meyer (25 %) et Wayss & Freytag (25 %), filiales du groupe BAM. Le concédant Infrabel est le gestionnaire de l'infrastructure du réseau ferré belge (figure 2).

## UNE MÉTHODE DE FINANCEMENT INNOVANTE

La société de projet Locorail est en charge de la conception, la construction, le financement et la maintenance (formule DBFM – Design, Build, Finance, Maintenance) de l'infrastructure pour le compte d'Infrabel. La rémunération du concessionnaire, couvrant le remboursement du financement et la maintenance des infrastructures pendant 38 ans, se fera sous la forme d'une redevance trimestrielle, dont le montant sera calculé en fonction de la disponibilité réelle des ouvrages (« availability payment »), soit environ 50 millions d'euros par an.

Le financement de ce projet en PPP couvre notamment la partie relative aux

travaux de génie civil (+/- 690 millions d'euros courants - Capex).

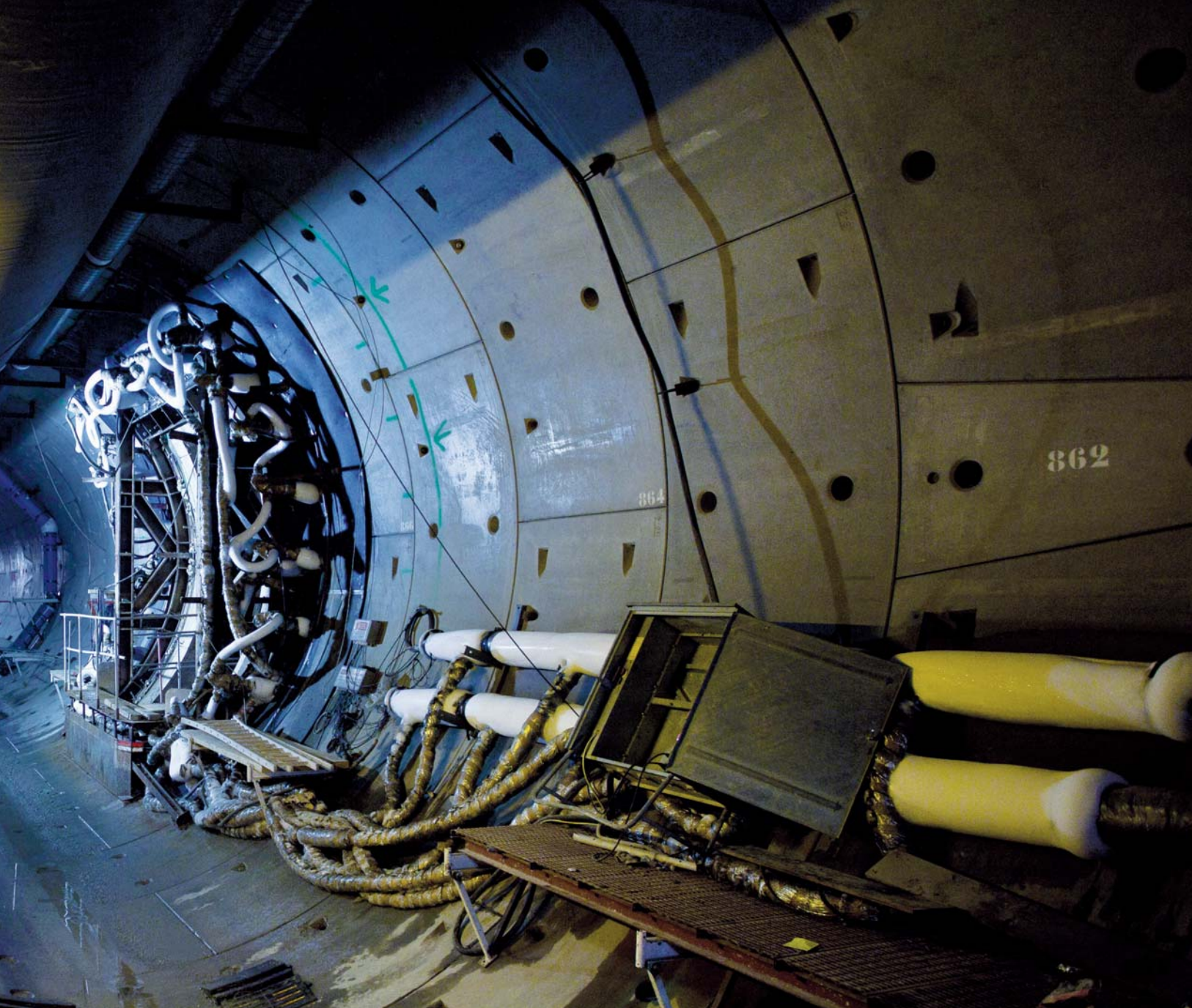
Le financement a été conclu auprès d'un consortium de six banques commerciales (BayemLB, Bank Nederlandse Gemeenten, Fortis Bank, ING Bank, Banco Santander et Société générale) et de la BEI. La Région Flamande intervient avec un cofinancement à hauteur de 107 millions d'euros.

Infrabel finance par ailleurs la construction de l'infrastructure ferroviaire pour un montant d'environ 75 millions d'euros (qui ne font pas partie de la formule DBFM). Afin de permettre au Port d'Anvers de rester concurrentiel, et pour de ne pas mettre en péril le transport de conteneurs par rail, les utilisateurs de la liaison ferroviaire Liefkenshoek ne verseront pas de taxe d'utilisation.

## CARACTÉRISTIQUES DE LA LIAISON

Les 16,2 km de liaison ferroviaire se divisent en 9 km de travaux extérieurs,





© JEAN-YVES GOVIN-SOIREL / PHOTOTHÈQUE VINCI

## 2- Schéma de la liaison ferroviaire.

### 2- Schematic of the rail link.

6 km de tunnel à construire et de 1,2 km de tunnel à réparer.

Avec ses 2,5 millions de déblais et remblais, les travaux extérieurs sont essentiellement des travaux de terrassement. Associés à ces travaux, les ouvrages de soutènement sont constitués de 700 m de tranchée couverte, de 600 m de tranchée ouverte, et de 500 m de mur de soutènement en bentonite ciment (photo 3).

Les ouvrages souterrains comprennent le creusement des deux tunnels de 6 km et l'exécution d'une dalle support de voies, associés à 8 puits d'évacua-



2

tion et 13 rameaux de communication. Le tunnel de Beveren long de 1 200 m a été construit en 1978 et n'a jamais été utilisé. Les travaux consistent à un contrôle de l'existant et à la mise aux normes (photo 4).

### TOPOGRAPHIE

Les caractéristiques du tracé sont les suivantes :

→ Rayon de courbure minimum de 1 500 m.

→ Pente maximale de 1,25 % dans les tunnels.

Cette limitation de la pente conduit à une couverture extrêmement réduite lors du passage sous le Kanaaldock puisque la couverture n'est que de 3 m par rapport au fond, ce qui a nécessité la mise en œuvre de précautions particulières décrites plus loin.

La couverture du tunnel est de 13 m dans les environs des puits de départ et d'arrivée et de 33,5 m maximum sur l'ensemble du tracé (photo 1).



## GÉOLOGIE ET HYDROGÉOLOGIE

La géologie le long du tracé se compose de remblai et sables quaternaires, de sables tertiaires et d'argile de Boom en partie basse qui forme la limite basse de l'aquifère.

Le tracé du tunnel est majoritairement situé dans les sables tertiaires avec un peu d'argile en radier. Toutefois sur une longueur de 600 m, l'argile a été rencontrée avec une proportion beaucoup plus importante jusqu'à 50 % de la section du tunnel.

Une attention particulière a été accordée au lit de l'Escaut avec ses dépôts de limon et ses couches de sols alluvionnaires ainsi qu'à celui du Kanaaldock.

L'hydrologie de l'aquifère principal est régie par la marée de l'Escaut. La variation de niveau de l'eau dans l'Escaut est -1 à +8 m TAW (Tweede Alge-meene Wateranpassing) (figures 5a & 5b).

## LA SÉCURITÉ INCENDIE

La sécurité incendie dans les tunnels a constitué une priorité pour Infrabel qui s'est basé sur les recommandations incendie pour la conception de structure des Pays-Bas. La courbe RWS développée par le Rijkswaterstaat, ministère des Transports des Pays-Bas, a été appliquée. Cette courbe, qui est un peu plus contraignante que la courbe Hydrocarbure Majorée classique, est basée sur l'hypothèse de l'incendie d'un camion-citerne ou d'un réservoir contenant jusqu'à 50 m<sup>3</sup> de carburant ou de pétrole, et générant un incendie d'une puissance de 300 MW pendant 120 minutes. La courbe RWS a été basée sur les résultats des tests effectués par le TNO aux Pays-Bas en 1979 (figure 6).

## LE BÉTON FIBRÉ

Afin d'assurer les critères de la courbe RWS pour la stabilité du revêtement de tunnel lors de l'incendie, les spécifications techniques imposaient l'ajout de 3 kg par m<sup>3</sup> de fibres de polypropylène (PP).

L'efficacité des fibres a été testée par des essais au feu à grande échelle impliquant les voussoirs préfabriqués sur une durée de 230 minutes.

Les essais ont été réalisés à la *Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH (MFPA Leipzig GmbH)*. Plusieurs séries d'essais ont été programmées avec différentes quantités (1,2 et 3 kg/m<sup>3</sup>) et 2 types de fibres Polypropylène (2,8 dtex/6 mm et 7,8 dtex/6 mm).



© LUC BENEVELLO / PHOTOHÉQUE VINCI

Seuls les voussoirs contenant plus de 2 kg/m<sup>3</sup> ont satisfait au critère « perte de masse/profondeur écaillage ». Les fibres de géométrie 7,8 dtex/6 mm ont été retenues car elles dégradent beaucoup moins la rhéologie du béton frais et donc sa facilité de mise en œuvre comparée aux fibres 2,8 dtex/6 mm.

## LE BÉTON PROJETÉ FIBRÉ

En complément au béton fibré des voussoirs, Infrabel a spécifié l'application

**3- Réalisation des parois moulées pour les ouvrages extérieurs.**

**3- Execution of diaphragm walls for external structures.**

d'une couche de protection supplémentaire sur l'intrados des voussoirs constituée de béton de fibres de céramique mis en œuvre par projection. Ces travaux seront réalisés à la fin des travaux de génie civil en tunnel.

## LE SYSTÈME INCENDIE

La détection incendie est assurée par caméra et capteurs de température. Dès que la température s'élève au-dessus de 59 °C, le système de protection actif contre l'incendie (automatic



4- Tunnel de Beveren.  
5a- Coupe géologique sous l'Escaut.  
5b- Coupe géologique.

4- Beveren tunnel.  
5a- Geological cross section under the Escaut.  
5b- Geological cross section.

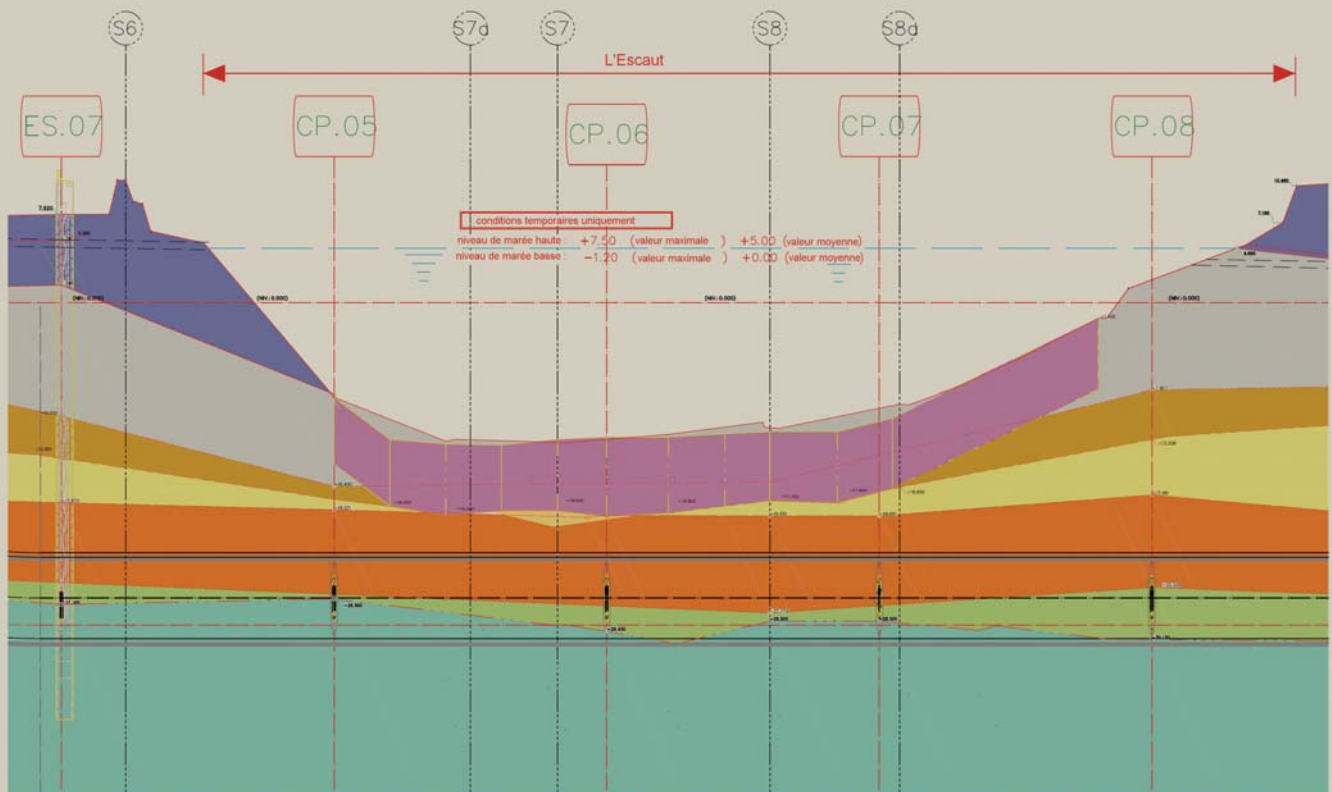


© PHOTO THÉQUE VINCI

4

### COUPE GÉOLOGIQUE SOUS L'ESCAUT

5a



5b

fire fighting System), est lancé automatiquement.

Ce système est basé sur la production et l'expansion rapide de mousse, composée d'eau, d'air et d'un adjuvant qui, en l'espace de 3 minutes, va complètement remplir le tunnel sur une longueur de 180 m centrée sur la zone de l'incendie afin de l'étouffer.

Les liquides inflammables déversés dans le tunnel sont recueillis par des pompes et évacués à l'extérieur pour traitement.

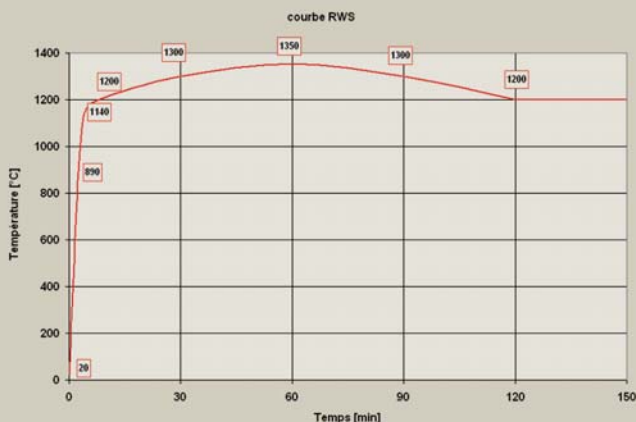
| LEGENDE COUPE GEOLOGIQUE     |                 |
|------------------------------|-----------------|
| REMBLAI DE SURFACE           | SOLS DE SURFACE |
| ALLUVIONS                    |                 |
| VASE IN SITU                 |                 |
| VASE IN SITU A SUBSTITUER    |                 |
| COMPLEXE QUATERNAIRE         |                 |
| LILLO - SABLE TERTIAIRE      |                 |
| MERKSEM- & KRUISSAND (SABLE) |                 |
| LILLO - SABLE TERTIAIRE:     |                 |
| LID VAN OORDEREN(SABLE)      |                 |
| LILLO - SABLE TERTIAIRE :    |                 |
| FORMATION KATTENDIJK (SABLE) |                 |
| SABLES DE BERCHEM            |                 |
| ARGILE DE BOOM               |                 |

En parallèle, lorsqu'un incendie est détecté, une surpression est générée dans chaque passage de communication dans le but d'éloigner la fumée des voies d'évacuation.

En complément, des prises d'eau pour les pompiers sont installées tous les 60 m.

Un système d'évacuation de la fumée et de la chaleur est installé dans le milieu du Beveren tunnel, ainsi qu'à l'entrée et la sortie des tunnels Sud et Nord.

## COURBE RWS

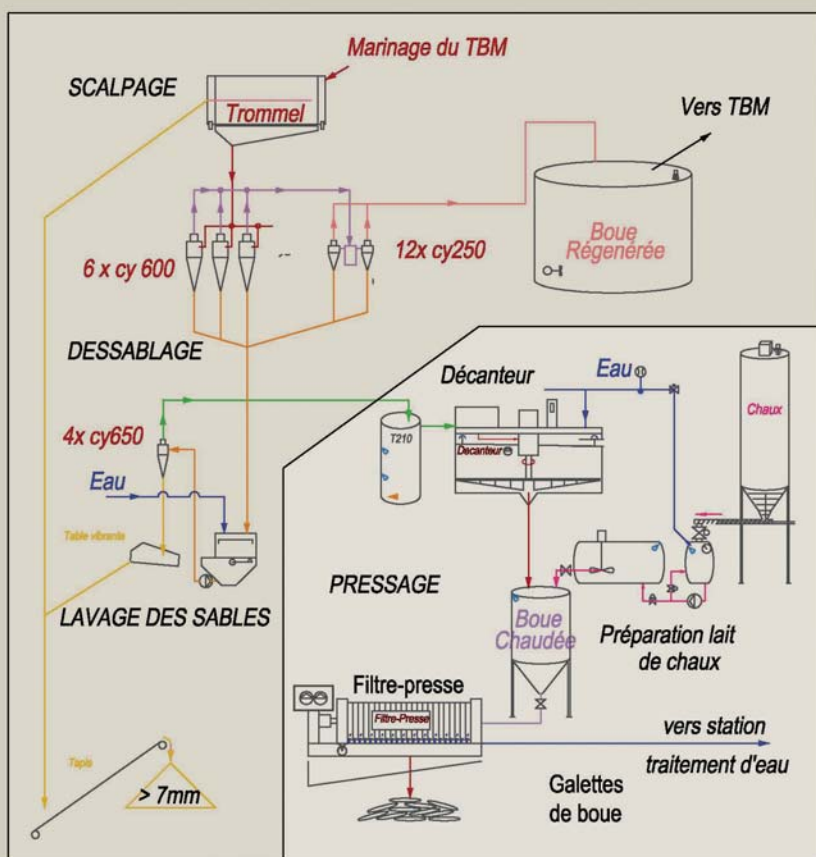


6



7

## SCHÉMA DE PRINCIPE DE LA STP



8

6- Courbe RWS.  
7- Roue de coupe du tunnelier en usine.  
8- Schéma de principe de la STP.

6- RWS curve.  
7- Cutting wheel of the tunneller in factory.  
8- Block diagram of the STP.

### CARACTÉRISTIQUES DU BOUCLIER DU TUNNELIER

Deux tunneliers ont été utilisés en parallèle pour forer les 5 972 m du tunnel Sud et les 5 979 m du tunnel Nord. Il s'agit de tunneliers à pression de boue de type fermé particulièrement bien adaptés à ce type de terrain. Ils ont été fournis par la société Herrenknecht AG et possèdent les caractéristiques générales suivantes :

→ La roue de coupe a un diamètre de 8,39 m de façon à obtenir un tunnel de 7,30 m de diamètre intérieur fini avec un revêtement composé de voussoirs de 40 cm d'épaisseur. Elle est équipée de 110 dents et de 18 molettes double disque de 17" de diamètre. Sa motorisation, d'une puissance maximale de 1 100 kW, permet une vitesse de rotation de 2,65 t/mn dans les deux sens avec un couple nominal de 5 644 kN.m.

→ La course de forage maximale est de 2,5 m permettant l'installation des voussoirs de 1,80 m de largeur. La vitesse de coupe instantanée est de 65 mm/min soit presque 4 m à l'heure. → Le bouclier a une masse de 580 t, un diamètre de 8,38 m et une longueur de 9,00 m. Il permet de forer avec une pression de service maximum de 4,5 bars et assure une poussée d'un peu plus de 6 000 t grâce aux 28 vérins

disposés en couronne. Sa puissance totale installée est de 3 600 kW.

→ L'étanchéité entre le revêtement en voussoir et la jupe (Joint de queue) est assurée par 2 rangées de brosses et 1 rangée d'écaillés.

→ Le système de marinage est dimensionné pour permettre un débit de 1 650 m<sup>3</sup>/h, il est équipé, en sortie de roue de broyeurs à rouleaux. Les conduites d'amenée et de retour ont un diamètre de 406 mm et une épaisseur 8 mm. Deux séries de 3 pompes Warman 14/12 d'une puissance 700 kW assurent respectivement le pompage des circuits aller et retour (photo 7).

### STATION DE TRAITEMENT DES BOUES DE CREUSEMENT

La boue de forage et son traitement sont assurés par une station de traitement des boues, fabriquée par l'entreprise française MS.

Le traitement de la boue consiste à isoler les matériaux excavés de la boue de forage et à lui redonner les caractéristiques requises.





#### QUATRE PHASES DE TRAITEMENT DES BOUES

L'horizon géologique différent à un instant donné entre les 2 tunneliers nécessite un traitement indépendant de la boue de forage. Quatre phases de traitement (figure 8) :

**1- Le scalpage** est assuré par un trommel rotatif de 2 m de diamètre, ayant une capacité d'évacuation de 150 t/h pour un débit maximum de 1 650 m<sup>3</sup>/h. Il permet de récupérer les éléments supérieurs à 7 mm.

**2- Le dessablage** est effectué par deux étages de cyclones, le premier comprend 6 hydro-cyclones type 600 (80 µm) d'une capacité de 1 800 m<sup>3</sup>/h, le second se compose de 2 batteries de 12 hydro-cyclones type 250 (50 µm) d'une capacité de 1 700 m<sup>3</sup>/h.

**3- Le lavage des sables** consiste à diluer les sables en provenance des hydro-cyclones, puis de les traiter par 4 hydro-cyclones type 650 (63 µm) suivies de tables vibrantes.

**4- Le pressage** permet après une sédimentation accélérée de traiter ces particules inférieures à 50 µm au lait de chaux et de restituer des galettes de boue.

9- Percée du tunnel Sud.

10- Parc de stockage des voussoirs.

11- Train d'approvisionnement des voussoirs.

9- Drilling the South tunnel.

10- Storage yard for segments.

11- Train for the supply of segments.

#### LE TUNNELIER PARCOURT EN MOYENNE 15 M PAR JOUR

Le 1<sup>er</sup> avril 2010, le second tunnelier a entamé le forage du tunnel Sud qui s'est achevé le 16 mai 2011, soit une cadence moyenne record de quasiment 15 mètres par jour (450 m par mois), en travaillant 7 jours sur 7, 24 h sur 24. Le premier tunnelier a entamé le creusement du tunnel Nord le 18 février 2010 et a percé le 23 juillet 2011, soit 18 mois d'excavation pour 5 979 m. Sa cadence inférieure est due au fait que le percement est ralenti par les travaux de réalisation des puits et des rameaux de communication, tous effectués à partir du tunnel Nord pendant l'avancement du tunnelier (photo 9). Le tableau 1 résume les caractéristiques d'avancement des deux tunneliers au 30 juin 2011.

#### PROGRAMMATION DE LA MAINTENANCE DE LA TÊTE DE COUPE

Afin de limiter les opérations hyperbares, les deux maintenances des têtes de coupe ont été programmées à l'abri de parois souples en bentonite permettant le travail à pression atmosphérique.

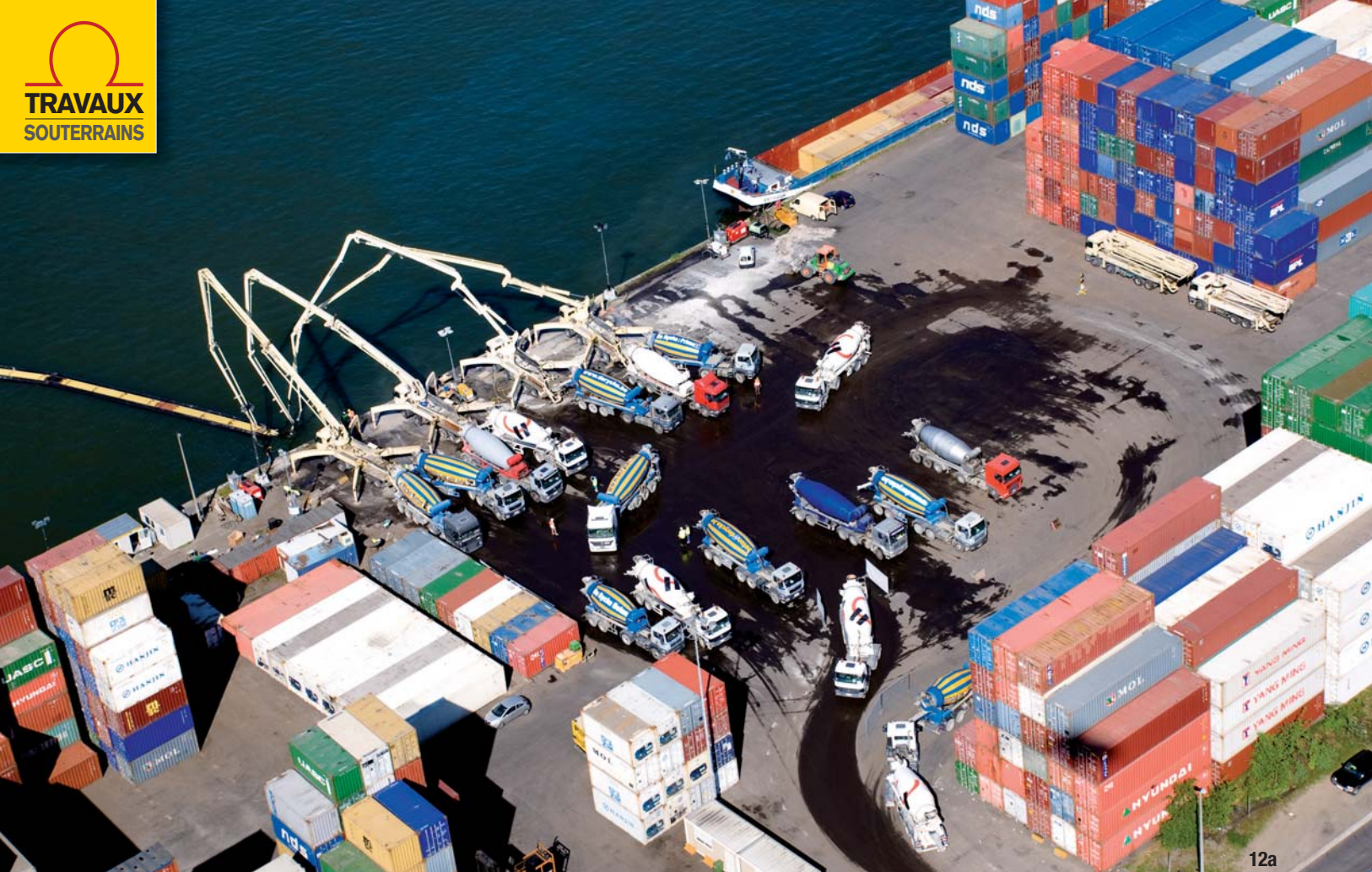
La réalisation de ces boîtes depuis la surface a été couplée avec ceux d'un puits d'évacuation.

Le filtrat, la densité, la « yield value », le pH et la souplesse de la boue (« cake ») sont les principales caractéristiques de boue mesurées en permanence. De la bentonite fraîche avec additifs ou non est régulièrement ajoutée à la boue avant son retour à front.

La STP est dimensionnée pour une vitesse de creusement de 60 mm/min, soit 30,6 m d'excavation par tunnelier et par 24 h, avec un débit et une densité maximum de boue respectivement de 1 650 m<sup>3</sup>/h et de 1,35 pour des concentrations maximum de sable de 60 mg/l et de silt de 25 mg/l.

Les traitements des eaux et boues usées se font en commun pour les deux tunneliers.





12a

© LUC BENEVELLO / PHOTOTHÈQUE VINCI

### LE REVÊTEMENT DU TUNNEL

Le revêtement du tunnel est réalisé à l'aide d'anneaux constitués chacun de 8 voussoirs préfabriqués d'une longueur développée d'environ 3,5 m, d'une largeur de 1,8 m, et d'une clé de voûte trapézoïdale fermant l'anneau. Le revêtement des 2 x 5 980 m de tunnel a nécessité la préfabrication de 53 216 voussoirs produits par la société allemande Max Bögl Fertigteilewerke GmbH & Co KG dans son usine de Hamminkeln en Allemagne. Les voussoirs sont de conception clas-

sique. Néanmoins, afin de limiter la quantité de soutènement complémentaire à mettre en œuvre pour permettre le percement du revêtement au niveau des rameaux et des puits d'évacuation, des anneaux spéciaux ont été produits et mis en œuvre dans ces zones. Ces anneaux contiennent un ferrailage renforcé et, surtout, des réservations permettant d'installer des pièces de cisaillement entre les voussoirs d'un anneau et entre les anneaux adjacents. Ces pièces, appelées bi-cônes en référence à leur forme, ont été développées

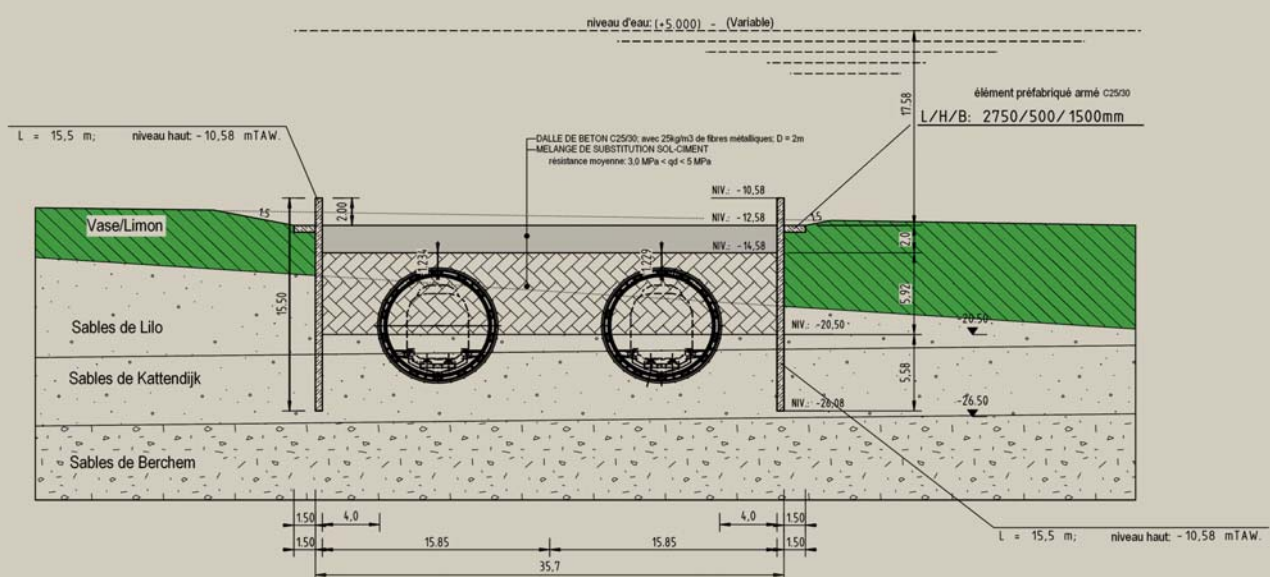
**12a- Bétonnage du Kanaaldock.**  
**12b- Coupe schématique du bétonnage du Kanaaldock.**

**12a- Concreting the Kanaaldock.**  
**12b- Schematic cross section of Kanaaldock concreting.**

il y a quelques années déjà par VINCI Construction Grands Projets en collaboration avec la société Sofrasar. Elles permettent de créer un monolithisme du revêtement qui le rend beaucoup plus apte à transférer les efforts de poussée du sol malgré la présence de l'ouverture qui perturbe le fonctionnement normal des anneaux. La production des voussoirs, réalisés en béton C50/60-XF2 m, a débuté en mai 2009 et s'est terminée en juin 2011. Elle a nécessité la quantité de 290 000 tonnes de béton armé (photo 10).

### COUPE SCHÉMATIQUE DU BÉTONNAGE DU KANAALDOCK

12b



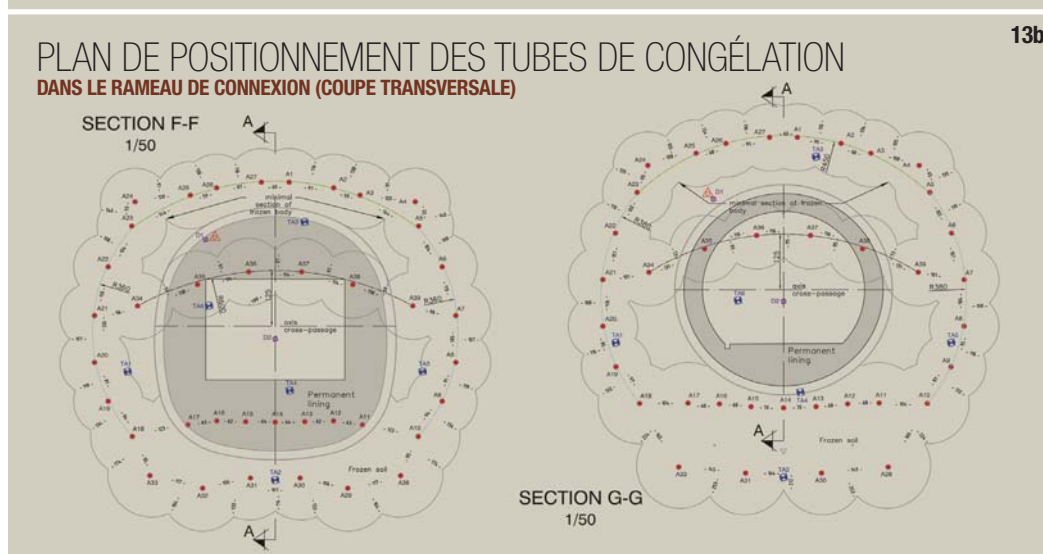
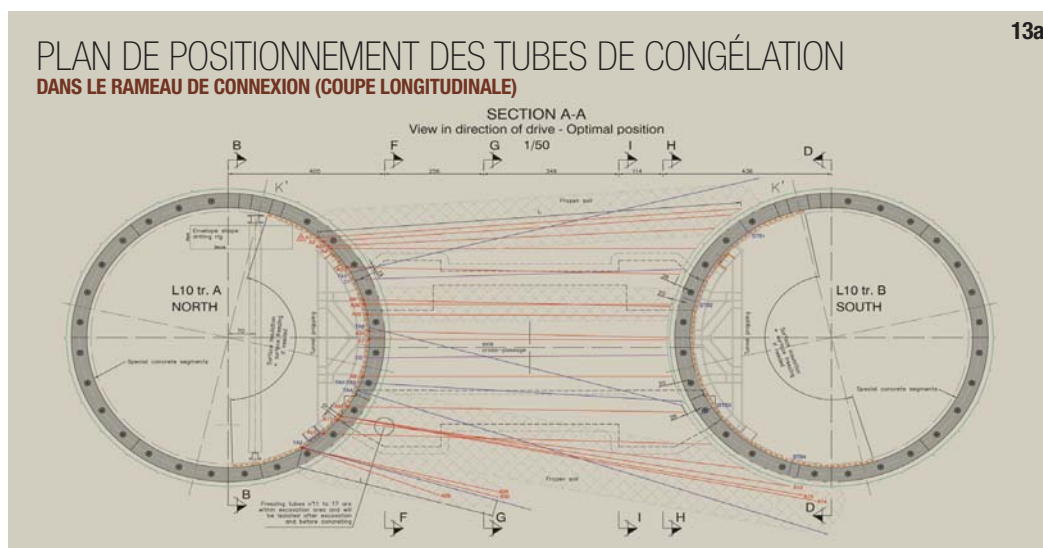


13a- Plan de positionnement des tubes de congélation dans le rameau de connexion (coupe longitudinale).

13b- Plan de positionnement des tubes de congélation dans le rameau de connexion (coupe transversale).

13a- Drawing of the positioning of freezing pipes in the cross-passage (longitudinal section).

13b- Drawing of the positioning of freezing pipes in the cross-passage (cross section).



## L'APPROVISIONNEMENT DES VOUSOIRS

Cette production très décentralisée, combinée à un besoin hebdomadaire au pic d'environ 1 500 voussoirs par semaine, a posé un problème de logistique important. La solution de transport ferroviaire a finalement été préférée à la solution transport routier. En effet ce dernier aurait requis un total de 12 800 camions, soit environ 60 camions par jour et entraîné une congestion de la circulation sur le site étroit du puits de départ (photo 11).

Ainsi une extension de la ligne ferroviaire a été réalisée jusqu'au chantier ce qui a permis d'acheminer 200 voussoirs par train directement depuis l'usine de préfabrication. La cadence moyenne a été de 6 trains par semaine. Les voussoirs chargés sur le train

sur l'aire de production sont déchargés en tête de puits par un palonnier permettant de manipuler une pile de 3 voussoirs. Cette pile est reprise en l'état pour être chargée sur les trains sur pneu alimentant le tunnelier. Outre l'aspect fonctionnel, cette solution a eu un impact positif sur le bilan

carbone du projet. Les 12 800 allers et retours de 220 km en camion auraient produit environ 11 000 t de CO<sub>2</sub> tandis que les 266 trains n'ont émis « que » 2 700 t soit une économie de 8 600 t et donc un impact très significatif en termes de développement durable.

## PASSAGE DÉLICAT SOUS L'ESCAUT

Le passage sous l'Escaut a posé la première vraie difficulté du chantier. D'une part, la couverture est faible (inférieure à 1 m de diamètre) et la majeure partie de cette couverture est formée de sables tertiaires d'une densité faible de 14 kN/m<sup>3</sup>. L'étude de sol réalisée par Infrabel avait reconnu une couche de limon au-dessus de ces sables mais ne permettait pas d'en apprécier l'épaisseur. Des mesures sismiques haute résolution dans l'Escaut ont permis de confirmer l'épaisseur très fine de ces limons.

D'autre part, la pression hydrostatique au niveau du tunnelier fluctue avec le

niveau de la marée d'un delta pouvant atteindre 8,50 m, soit un delta de pression de presque 1 bar.

Un dispositif de mesure en temps réel du niveau de l'Escaut, relié à la cabine de pilotage du tunnelier par GSM, a permis d'ajuster en continu la pression de confinement.

Cette faible couverture interdisait toute intervention hyperbare sous l'Escaut. Un arrêt pour maintenance a donc été programmé juste avant la traversée.

## PASSAGE SOUS LE KANAALDOCK

La seconde grosse difficulté du chantier a été le passage sous le Kanaaldock. En effet, le tracé du tunnel n'autorisait qu'une couverture de 3 m au passage sous le canal sachant que la nature du sol était similaire à celle de l'Escaut. Afin de stabiliser la zone dans laquelle devaient passer les deux tunneliers, le fond du canal a été préalablement dragué (62 000 m<sup>3</sup>) à l'intérieur d'un double rideau de palplanches (2 220 t) encadrant le tracé des tunnels.

TABLEAU 1 : CARACTÉRISTIQUES D'AVANCEMENT DES TUNNELIERS

|   | Tunnel Nord                                   | Tunnel Sud                                    |
|---|---|---|
| <b>Caractéristiques</b>                         | Longueur : 5 979 m<br>3 321 anneaux de 1,80 m | Longueur : 5 972 m<br>3 317 anneaux de 1,80 m |
| <b>Début de creusement</b>                      | 18/02/2010                                    | 1/04/2010                                     |
| <b>Fin de creusement</b>                        | (prévu) 07/2011                               | 16/05/2011                                    |
| <b>Meilleur jour</b>                            | 39,6 ml<br>le 14/03/2011                      | 45,0 ml<br>le 19/04/2011                      |
| <b>Meilleure semaine</b>                        | 250,2 ml<br>semaine 11 en Mars 2011           | 221,4 ml<br>semaine 16 en Avril 2011          |
| <b>Meilleur mois</b>                            | 838,8 ml<br>en Juin 2011                      | 815,4 ml<br>en Mars 2011                      |
| <b>Performance mensuelle cumulée (Nord+Sud)</b> | 1 265,4 ml<br>en Janvier 2011                 |   |
| <b>Cadence moyenne</b>                          | 6,3 anneaux/jour                              | 8,1 anneaux/jour                              |

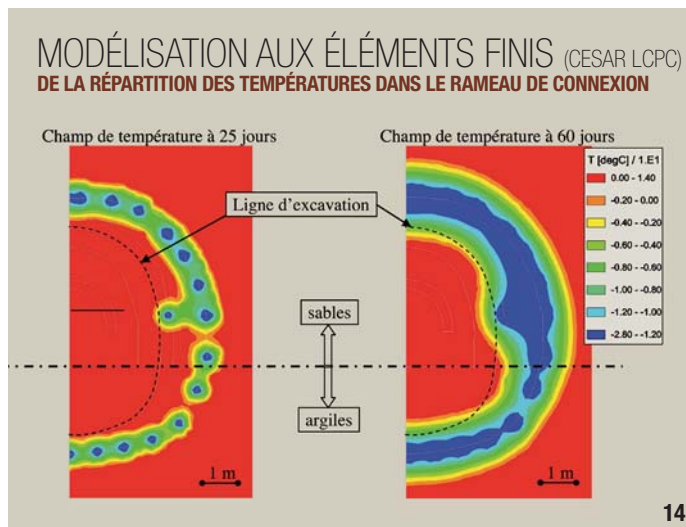
Le volume de limon excavé a été remplacé par une première couche de mortier de 25 000 m<sup>3</sup> coulée en une seule opération qui a duré quatre jours (du 21 au 24 mai 2010), et a mobilisé 4 centrales à béton, 4 pompes et 240 personnes au total, dont plusieurs plongeurs et près de 120 chauffeurs de toupie.

La résistance à la compression du mortier est de l'ordre de 5 MPa.

En juillet 2010, un second bétonnage tout aussi délicat a eu lieu. 17 000 m<sup>3</sup> de béton fibré dosé à 33 kg/m<sup>3</sup> ont été coulés dans les mêmes conditions. Ce béton sert de contrepoids lors du creusement, et de protection contre les chocs des ancrages des bateaux sur les futurs tunnels.

Enfin, un ballast complémentaire temporaire de 20 000 t réalisé avec des plaques d'acier a été mis en place au droit des berges.

Les deux tunneliers ont ainsi franchi le Kanaaldock avec seulement quelques mètres de béton de couverture sous le fond du canal ainsi reconstitué (photo 12a et figure 12b).



#### PUITS ET RAMEAUX

Les 8 puits d'intervention et les 13 rameaux de communication entre tunnels établissent une voie d'évacuation tous les 300 m, distance réduite à 250 m pour le passage sous l'Escaut. L'excavation a été réalisée dans des terrains injectés par de la bentonite

ciment pour 9 ouvrages et à l'abri d'un sol congelé pour les 14 autres, selon le contexte hydrogéologique.

#### LA CONGÉLATION DE SOL

La congélation des sols est assurée par la circulation d'une saumure à environ -28°C/-30°C acheminée depuis un

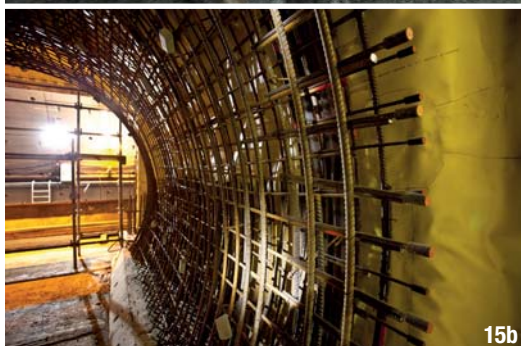
groupe de froid situé à l'extérieur du tunnel ou dans le tunnel.

Dans le massif à congeler, la saumure circule dans des tubes à double enveloppe, orientés parallèlement et autour du rameau afin de créer un anneau de sol gelé tout autour de la future excavation (figures 13a & 13b).

L'épaisseur de l'anneau gelé est dimensionnée afin d'assurer la stabilité de l'excavation à très court terme (24 h). Pour définir les caractéristiques mécaniques du sol gelé, des essais sont menés sur des échantillons de sol gelé à -10°C. Afin de pouvoir assimiler ces dernières à celles d'un volume de sol gelé avec des températures hétérogènes, les frontières extérieures de l'anneau sont définies par :

- Température moyenne inférieure ou égale à -10°C ;
- Température maximum inférieure ou égale à -5°C.

L'objectif est ensuite à la fois d'optimiser le nombre de tubes de congélation et le temps nécessaire à la formation de cet anneau gelé, afin qu'il puisse assurer son rôle en phase de travaux.



**14- Modélisation aux éléments finis (Cesar LCPC) de la répartition des températures dans le rameau de connexion.**

**15a- Excavation d'un rameau de connexion.**

**15b- Ferrailage d'un rameau de connexion.**

**15c- Bétonnage du portail Nord d'un rameau de connexion.**

**14- Finite element modelling (LCPC's Cesar) of the temperature distribution in the cross-passage.**

**15a- Excavation of a cross-passage.**

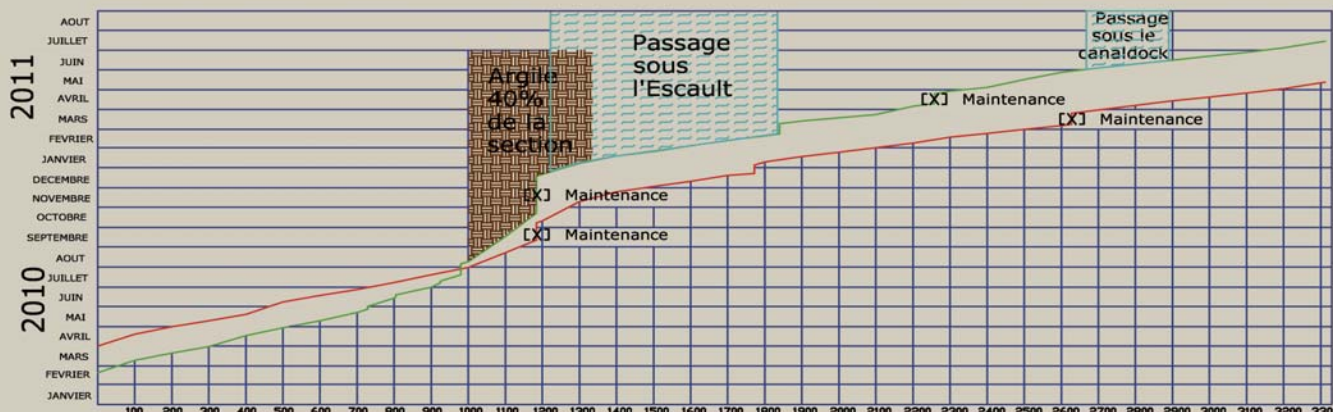
**15b- Reinforcing bars for a cross-passage.**

**15c- Concreting of the northern portal of a cross-passage.**

PHOTOS 15b & 15c © JEAN-YVES GOVIN-SOREL / PHOTOTHÈQUE VINCI



## PLANNING



## HISTORIQUE ET DATES-CLÉS

**SIGNATURE DU CONTRAT :** 5 novembre 2008

**DÉBUT DES TRAVAUX :** Novembre 2008

**DÉBUT DE CREUSEMENT DES TUNNELIERS :**

• **TUNNELIER NORD :** 18 février 2010

• **TUNNELIER SUD :** 1<sup>er</sup> avril 2010

**FIN DE CREUSEMENT DES TUNNELIERS :**

• **TUNNELIER NORD :** 23 juillet 2011

• **TUNNELIER SUD :** 16 mai 2011

**FIN DES TRAVAUX DE GÉNIE CIVIL :**

Programmé en juin 2013

**MISE EN SERVICE :**

Programmée pour mi 2014

Ceci est réalisé à l'aide d'un logiciel aux éléments finis (César LCPC muni du module de calcul GELS). L'évolution du champ de température dans le sol pendant la congélation est ainsi modélisée en prenant en compte le changement de phase liquide à solide et ses effets sur la vitesse de progression du front de froid (figure 14). L'optimisation du nombre de tubes de congélation est aussi tributaire de l'installation de l'ensemble des ouvrages adjacents, en particulier des renforcements locaux du soutènement, qui limitent le choix des implantations.

Par ailleurs, l'orientation des tubes doit aussi prendre en compte les contraintes techniques d'encombrement de la machine de forage qui limitent les inclinaisons de ces tubes. Enfin, le design doit être suffisamment robuste pour tolérer une certaine déviation angulaire des tubes lors du forage.

### LA CONSTRUCTION D'UN RAMEAU

Préalablement à l'ouverture des voussoirs, des cintres de soutènement sont placés en tunnel pour soutenir le revêtement jusqu'à la fin des bétonnages.

### 16- Planning.

### 16- Planning chart.

L'excavation est réalisée en sections divisées à l'aide de brise-roches et de fraises (figure 15a). Le soutènement provisoire est assuré par des cintres réticulés et du béton projeté. Une membrane PVC assure l'étanchéité. Le revêtement définitif est réalisé en béton armé C40/50 renforcé par un ferrailage de 400 kg/m<sup>3</sup> (figures 15b & 15c).

Le phasage retenu est :

→ Bétonnage du radier. La difficulté de cette phase est la présence de tubes de congélation dans le massif.

→ Bétonnage de la partie centrale.

→ Bétonnage des piédroits des portiques latéraux.

→ Bétonnage de la voûte des portiques latéraux.

### CONCLUSION

Le tracé, le contexte géologique, l'environnement portuaire et autoroutier ainsi que les délais ont conduit le Groupement à mettre en place une organisation, des méthodes et des techniques innovantes à l'échelle de cet ambitieux chantier. Les résultats sont au rendez-vous. Quatre méritent d'être soulignées :

→ Un montage financier et contractuel innovant ;

→ 15 m moyen par jour, soit 450 m moyen par mois pour creuser les 6 km du premier tunnel ;

→ 3 m de couverture sous le Kanaal-dock pour le passage des tunneliers ;

→ Une industrialisation de la technique de la congélation de terrain. □

## PRINCIPALES QUANTITÉS

**EXCAVATION EXTÉRIEURE :**  
262 000 m<sup>3</sup>

**EXCAVATION SOUTERRAINE :**  
800 000 m<sup>3</sup>

**REMBLAIS :** 1 500 000 m<sup>3</sup>

**AMÉLIORATION DE SOL :**  
75 000 m<sup>3</sup>

**PAROIS MOULÉES :**  
120 000 m<sup>2</sup>

**PAROIS SOUPLES :**  
200 000 m<sup>2</sup>

**ACIER :** 40 000 t

**BÉTON :** 400 000 m<sup>3</sup>

**MORTIER :** 33 000 m<sup>3</sup>

**VOUSSOIRS :** 53 216

**TUNNEL :**  
12 km, section 55 m<sup>2</sup>

## ABSTRACT

### THE LIEFKENSHOEK RAIL LINK 40 METRES UNDER THE ESCAUT, THE LONGEST RAIL TUNNELS IN BELGIUM

LIONEL SUQUET, VINCI - PHILIPPE PATRET, DODIN CAMPENON BERNARD - DAMIEN ROY, VINCI - HÉLÈNE ROULET, VINCI

This 16 km rail link concession including two 6 km tunnels, located in the port area of Antwerp, forms part of INFRABEL's strategy for improving the flow of rail traffic between the left and right banks of the Escaut. □

### EL ENLACE FERROVIARIO DE LIEFKENSHOEK A 40 METROS POR DEBAJO DEL RÍO ESCAUT, LOS TÚNELES FERROVIARIOS MÁS LARGOS DE BÉLGICA

LIONEL SUQUET, VINCI - PHILIPPE PATRET, DODIN CAMPENON BERNARD - DAMIEN ROY, VINCI - HÉLÈNE ROULET, VINCI

Ubicada en la zona portuaria de Amberes, esta concesión de 16 kilómetros de enlace ferroviario que consta de dos túneles de 6 kilómetros se inscribe en la estrategia de Infrabel con el propósito de mejorar el flujo del tráfico ferroviario entre las riberas izquierda y derecha del río Escaut. □



1- Raccordement  
en mer fini.

1- Completed  
connection at sea.

# LES OUVRAGES SOUTERRAINS DE LA CENTRALE NUCLÉAIRE FLAMANVILLE 3

AUTEURS : P. JARRIN ET G. DEVEZE, EDF - L. SUQUET ET F. RENAULT, VINCI CONSTRUCTION - J.-L. GOBERT DE SOLETANCHE BACHY

COMME POUR LES DEUX RÉACTEURS VOISINS, LE RÉACTEUR DE LA CENTRALE NUCLÉAIRE FLAMANVILLE 3 EST REFROIDI PAR EAU DE MER, GRÂCE À UNE STATION DE POMPAGE IMPLANTÉE DANS UN CHENAL ARTIFICIEL. POUR ÉVITER LA RECIRCULATION, LES EAUX AYANT SERVI AU REFROIDISSEMENT SONT ENSUITE REJETÉES AU LARGE PAR UN CIRCUIT SOUTERRAIN CONSTITUÉ D'UN PUIS À TERRE ET D'UN PUIS EN MER CREUSÉ SELON LA TECHNIQUE *BLIND SHAFT DRILLING* À 600 M AU LARGE, RELIÉS ENTRE EUX EN PIED PAR UNE GALERIE DE 900 M CREUSÉE AU TUNNELIER. LE PRÉSENT ARTICLE PRÉSENTE LES TRAVAUX DE RÉALISATION DE CE CIRCUIT SOUTERRAIN CONFISÉS PAR ÉLECTRICITÉ DE FRANCE À SOLETANCHE BACHY ET VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS.

## LE PROJET FLAMANVILLE 3

Électricité de France construit sur le site de Flamanville (département de la Manche) un réacteur nucléaire de type EPR « European Pressurised Reactor » de 1 650 MW à proximité immédiate de deux tranches existantes

1 300 MW mises en service en 1985 et 1986 (figure 3). En 1979, les terrassements principaux du site, conçu pour accueillir quatre tranches, ont consisté en la création d'une plate-forme partiellement gagnée sur la mer. Cette plate-forme se situe à la cote +12,40 NGF.

Pour les terrassements de cette tranche EPR, la mise hors d'eau des fouilles s'effectue par pompage à l'abri d'une enceinte étanche ceinturant l'ensemble des travaux. Cette enceinte est constituée d'un noyau en matériaux étanches entre +7 et +1 NGF, poursuivi jusqu'au

rocher (-9 NGF au point le plus bas) par un rideau injecté multilinéaire.

Comme pour les deux réacteurs voisins, cette nouvelle tranche est refroidie par eau de mer, par l'intermédiaire d'une station de pompage implantée dans un chenal artificiel.



Pour éviter la recirculation, les eaux sont ensuite rejetées au large par un circuit souterrain (figures 4 et 5).

Le débit de rejet de la tranche EPR est de 63 m<sup>3</sup>/s. Le diamètre du circuit est de 5 m fini afin de maintenir des vitesses interdisant la fixation de mollusques sur les parois. Cet ouvrage n'est pas classé Important Pour la Sécurité Nucléaire. Il doit être visitable et est donc conçu pour être batardé.

Le présent article traite de la réalisation de ce circuit souterrain, qui comporte :

- Un puits en mer de 63 m de profondeur, situé à environ 600 m au large, creusé par la technique du *blind shaft drilling* ;

- Un puits à terre, déporté pour des contraintes géologiques et pour des raisons de planification des travaux du bassin de rejet de la centrale auquel il a été ultérieurement relié par une galerie de liaison réalisée en fouille ouverte ;

- Une galerie d'environ 900 m linéaires creusée au tunnelier qui relie le pied de ces 2 puits.

## CONDITIONS GÉOLOGIQUES DU PROJET

Le site de Flamanville se trouve sur la bordure occidentale du batholite granitique de Flamanville, intrusif dans une série sédimentaire dévonienne plissée. La mise en place du pluton granitique a affecté les terrains du flanc sud du Synclinal de Siouville, vaste pli d'extension régionale dissymétrique et déversé vers le Sud. Elle s'est accompagnée du refoulement des couches sédimentaires, d'où l'apparition de nouveaux plis moulés sur la bordure occidentale du pluton, avec des axes grossièrement parallèles à la côte, de direction N30°E. Ces plis, d'amplitude hectométrique, ont évolué en plis-failles et apparaissent assez fortement déversés.



Cette série métamorphique a été jalonnée de multiples filons de microgranite ou d'aplite, parfois totalement désagrégés par des phénomènes d'altération hydrothermale. Le métamorphisme de contact a engendré une grande variabilité lithologique, en relation avec les différentes lithologies de la série sédimentaire originelle et avec l'éloignement du contact avec le batholite. La présence dans ces terrains métamorphiques d'hématite et surtout de magnétite a été à l'origine d'une exploitation minière jusqu'en 1962.

Les couches de minerai, très redressées, ont été exploitées par la méthode des chambres / magasins à des profondeurs variant entre les cotes -70 et -130 NGF sous le niveau moyen de la mer.

**2- Descente du bouclier dans le puits de démarrage.**  
**3- Projet EPR – Flamanville 3.**

**2- Lowering the shield into the starting shaft.**  
**3- EPR project – Flamanville 3.**

L'emprise de cette mine sous-marine s'est développée devant le site, essentiellement devant la tranche EPR. La variabilité lithologique entraîne une très grande variabilité des paramètres géotechniques.

Globalement la matrice est moyennement fragile, extrêmement dure à très dure, extrêmement raide, extrêmement résistante et extrêmement abrasive.

Certains faciès présentent des caractéristiques extrêmes :

- Abrasivité des quartzites, pouvant dépasser 5 points Cerchar ;

- Résistance à la compression des cornéennes amphibolitiques, pouvant atteindre 507 MPa ;

- Densité du minerai de fer, pouvant atteindre 4 500 kg/m<sup>3</sup>.

La comparaison des résistances à la compression à terre et en mer (à 600 m du contact, cf. 4<sup>e</sup> ligne du Tableau 1) témoigne de l'affaiblissement des caractéristiques matricielles avec l'éloignement au contact.

Les vitesses sismiques sont comprises entre 2 700 à 3 200 m/s dans les 15 premiers mètres sous le fond rocheux, ce qui témoigne, eu égard aux excellentes caractéristiques matricielles, d'un massif rocheux fracturé et plutôt ouvert, conforme avec l'histoire géologique régionale (tectonique ancienne et exondation quaternaire).

Les caractéristiques moyennes de fracturation dans la partie amont de la galerie de rejet, sont les suivantes :

- Discontinuités moyennement espacées (20/60 cm) à très rapprochées (< 6 cm) ;

- Rock Quality Designation RQD moyen : 59 %.

Le RMR a été estimé à 60 au droit du puits à terre et à 46 au droit du puits en mer (figure 6).

D'un point de vue topographique, le fond marin est en pente irrégulière vers le large, entre -9 NGF au droit du puits à terre (creusé à sec à l'abri de l'enceinte étanche, en pied de la digue à la mer) et -14 NGF au droit du puits en mer. Des reconnaissances géophysiques dédiées ont confirmé que le fond marin est typiquement rocheux et que les épaisseurs des recouvrements sableux sont négligeables.

## CHOIX DU TRACÉ DES OUVRAGES

L'implantation du puits en mer a été fixée à partir de modélisations hydrodynamiques, visant notamment à minimiser la recirculation des eaux de rejet. Les deux extrémités du circuit étant fixées, il convenait alors de retenir un tracé en plan et en cote de la galerie. Les études ont rapidement exclu le passage de la galerie au travers ou au-dessus des quartiers d'exploitation de la mine sous-marine de Diélette, pour des raisons évidentes de réalisation et de pérennité, respectivement.

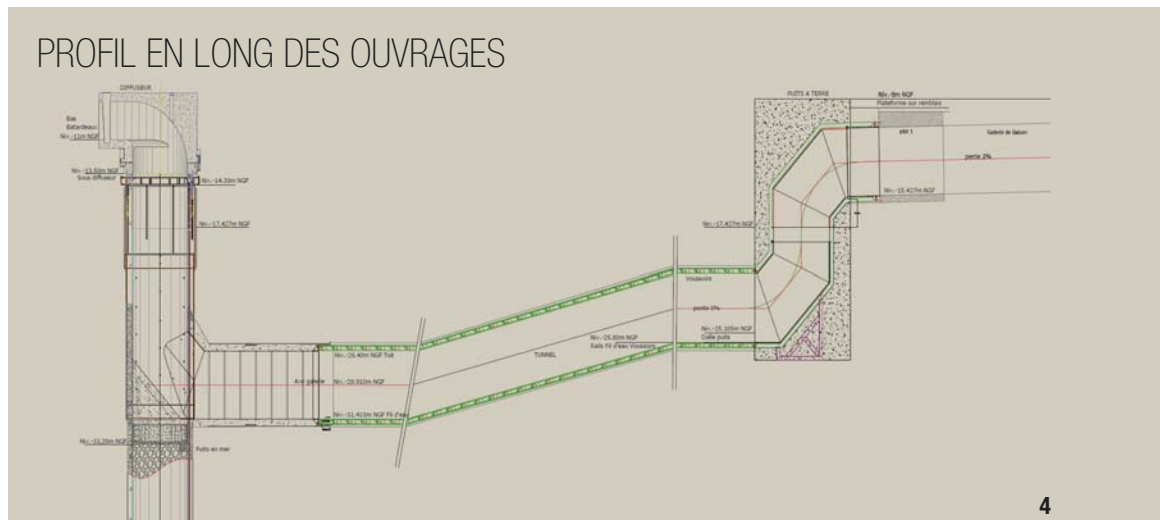
TABLEAU 1 : CARACTÉRISTIQUES MATRICIELLES DES TERRAINS MÉTAMORPHIQUES

|  | Moyenne                                  | Min.      | Max.      | Nb d'essais | Classification GT1 AFTES |
|--|--|-----------|-----------|-------------|--------------------------|
| Masse volumique (t/m <sup>3</sup> )          | 2,86                                     | 2,76      | 4,47      | 33          |                          |
| Module d'Young (Gpa)                         | 88 ⊥ à la strati.<br>115 // à la strati. | 55        | 114       | 27          | DE1 : > 50 GPa           |
| Résistance à la compression Rc (MPa)         | 213                                      | 21,5      | 507       | 100         | RC1 : > 200 MPa          |
| Rc à terre / en mer                          | 273 / 73                                 | 47 / 21,5 | 507 / 169 | 61 / 32     | RC1 / RC3                |
| Résistance à la traction indirecte Rtb (MPa) | 17                                       | 5,3       | 25,6      | 9           |                          |
| Abrasivité Cerchar                           | 4,4                                      | 1,3       | 6         | 8           | AIN1                     |
| Abrasivité LCPC                              | 1 322                                    | 40        | 2 100     | 3           |                          |

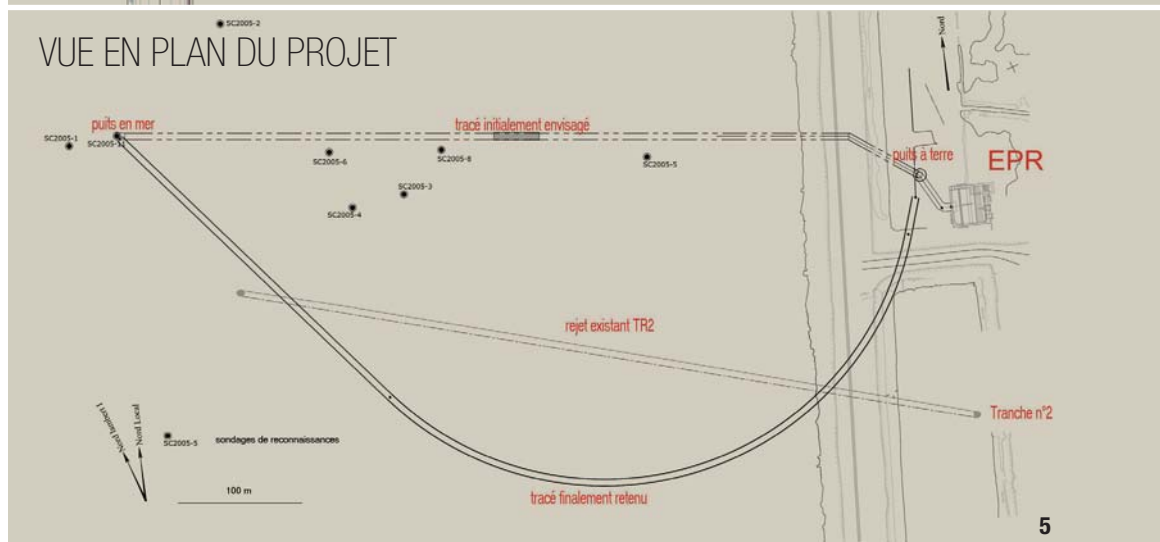
Les données issues de l'exploitation de la mine sous-marine et du creusement des galeries de rejet des deux tranches 1 300 MW voisines témoignaient clairement de fortes venues d'eau, même à -130 NGF, à la traversée des failles plis, parallèles à la côte, et des filons de microgranite altérés perpendiculaires à la côte. Les quartiers d'exploitation de la mine fuyaient ces zones aquifères. Les travaux de creusement des deux galeries de rejet préexistantes à la côte -57 NGF s'étaient heurtées en 1982-84 à de fortes venues d'eau et des déboussages, triplant le prix et quadruplant le délai de réalisation de ce chantier, notamment à cause d'une injection préventive systématique en auréoles concentriques (50 km de forages, 7 500 m<sup>3</sup> de coulis, 1 500 m<sup>3</sup> de gel) pour les 2 galeries de 600 m. Le positionnement retenu à l'issue des études pour les ouvrages de rejet de la tranche 3 était un calage à -150 NGF, passant sous la mine et remontant vers le large. Ce positionnement devait minimiser les débits d'exhaure et les opérations d'injection. Il nécessitait toutefois la réalisation d'un puits à terre de 150 m de profondeur, avec injections préalables. La profondeur du puits en mer était fixée à 63 m de profondeur sous le fond marin pour demeurer en-dessous de la zone décomprimée, donc potentiellement aquifère, du massif rocheux.

L'implantation de la galerie à l'écart des filons de microgranite altérés fut validée par une campagne de reconnaissances en mer, incluant 9 sondages carottés (504 m en cumulé) et 79 profils traînés de sismique réflexion haute résolution (35 m de longueur unitaire, avec 46 à 48 hydrophones espacés de 0,75 m). Cette même campagne a également permis de vérifier l'absence d'accident tectonique majeur dans la zone du puits en mer. La méthodologie de creusement de la galerie devait par contre envisager la traversée en travers-bancs de failles aquifères et potentiellement déboussantes, notamment lors du passage de puissants bancs de quartzites. Les études retinrent un creusement en traditionnel avec reconnaissance systématique à l'avancement et injections de traitement le cas échéant.

Le contrat fut notifié en novembre 2006, pour un début des travaux sur site en mars 2007. Diverses difficultés constatées lors du creusement du puits à terre ont laissé entrevoir un retard global de l'ensemble de l'ouvrage, pénalisant potentiellement la date de couplage de la tranche EPR.



4



5

En novembre 2008, un changement de tracé, de cote de calage, et donc de méthodologie de creusement fut acté pour minimiser ce retard.

Le changement de tracé de la galerie consista à retenir un tracé courbe permettant à la galerie d'échapper à l'emprise de la mine sous-marine, et se prolongeant ensuite par un tracé rectiligne vers le puits en mer, avec une excavation au tunnelier.

Pour des raisons pratiques de chantier, la cote de la calotte de la galerie fut calée à 10 m sous le fond marin. Ce tracé superficiel recoupait deux fois la galerie de rejet de la tranche 2 existante, avec une garde verticale d'environ 30 m (figure 5). Il imposait un rebouchage partiel des deux puits récemment creusés et notamment du puits en mer, intégralement réalisé à la date de cette décision.

#### CREUSEMENT ET REVÊTEMENT DU PUIITS DE REJET EN MER

La solution proposée par Soletanche Bachy consista à forer le puits selon

#### 4- Profil en long des ouvrages.

#### 5- Vue en plan du projet.

#### 4- Longitudinal profile of the works.

#### 5- Plan view of the project.

la méthode du *blind shaft drilling* et à revêtir l'ouvrage définitif par un liner métallique scellé au terrain et coiffé par un diffuseur (tête de rejet batardable). Cette méthode ne nécessite pas la mise hors d'eau du puits (évitant ainsi la construction d'un batardeau, dans des conditions de mer difficiles) et évite l'intervention de personnel dans le puits (offrant ainsi un gain important sur la sécurité du personnel). La machine fonctionne en effet sur le principe de la circulation inverse, une injection d'air mettant en dépression une chambre à l'arrière de la tête de coupe, ce qui

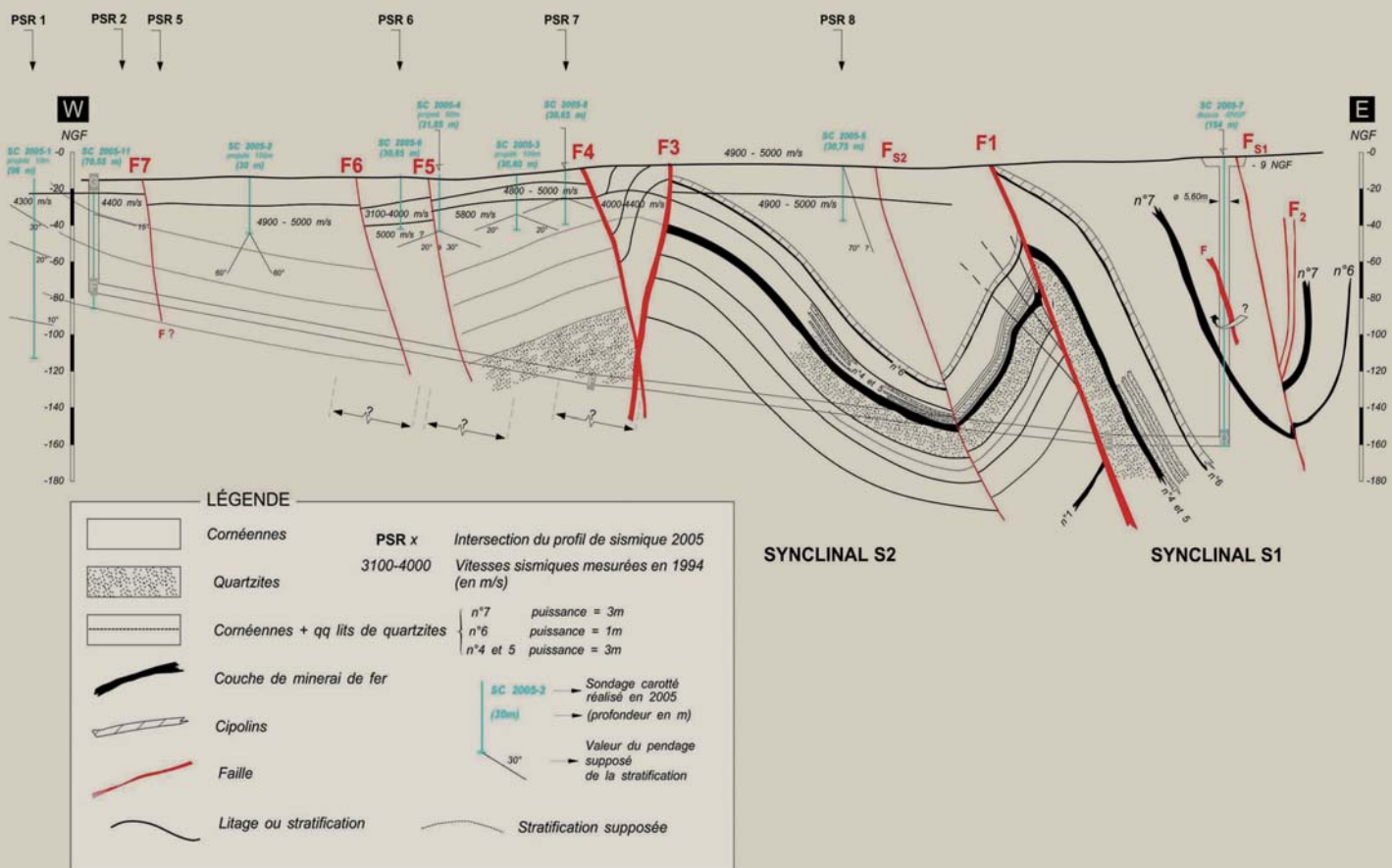
permet l'aspiration des déblais de foration qui sont alors rejetés au large par des conduites immergées. Le débit de l'air-lift était de l'ordre de 300 m<sup>3</sup>/h.

La foration en pleine section par la technique du *shaft drilling* était une première mondiale en ce diamètre (5,85 m), qui demeure à ce jour un des plus gros jamais forés. La machine d'entraînement de l'outil de coupe a été spécialement construite pour le chantier par Fugro-Seacore, par développement à partir d'un modèle existant de plus petite puissance, la Teredo 40. Cette machine Teredo 90 offre un couple supérieur à 90 t.m permettant ainsi le creusement pleine face dans le diamètre requis de 5,85 m. Elle a été installée sur la plate-forme autoélevatrice Excalibur de Fugro-Seacore, qui assurait également la logistique du chantier (photos 7 et 8).

La tête de coupe était une tête conique comportant 70 molettes à picots en carbure de tungstène, chargées entre 1 et 3 t. L'effort vertical total était assuré par un système de masses-tiges



## STYLE TECTONIQUE DU MASSIF MÉTAMORPHISÉ (COUPE PRÉVISIONNELLE DU TRACÉ INITIAL)



6

(jusqu'à 200 t). Le risque majeur, en particulier dans ce diamètre, concerne de possibles instabilités de dièdres en paroi, pouvant conduire à un éboulement du puits, non soutenu lors du creusement, donc à un coincement de la tête de coupe ou une perte de l'ouvrage.

Des reconnaissances spécifiques ont préalablement été réalisées pour quantifier ce risque et identifier d'éventuelles zones à conforter. Elles ont consisté en trois forages carottés (190 ml au total),

### 6- Style tectonique du massif métamorphisé (coupe prévisionnelle du tracé initial).

### 6- Tectonic style of the metamorphosed rock mass (projected cross section of the initial route).

avec diagraphies différées (caliper + BHTV). Le traitement des données a mis en évidence une fracturation abondante du terrain sur les 18 premiers mètres, nécessitant un soutènement par deux tubages perdus télescopés (ci-après 1<sup>er</sup> et 2<sup>e</sup> casing dans le Tableau 2).

La foration (puits de 63 m de profondeur et de 5,85 m de diamètre) s'est déroulée entre le 02/06/2008 et le 11/09/2008, soit une vitesse moyenne de 0,63 m/j (hors mise en station de la plate forme et mise en place du liner).

Le chantier de creusement s'est déroulé sans difficulté majeure, autres que celles liées aux conditions off-shore particulières du site (hauteur d'eau moyenne 15 m, houles décennale 6,3 m, marnage de 10,80 m pour une marée de coefficient 120, courants : 1,3 m/s) perturbant les manœuvres, notamment les plongées ou les descentes des outils dans le puits.

Le Tableau 2 présente les vitesses moyennes de foration selon les trois diamètres réalisés. Les diamètres importants nécessaires à la mise en place des deux casings étaient obtenus par déploiement d'aléseurs latéraux, qui étaient ensuite rentrés pour la foration en 5,85 m.

La verticalité du puits fut contrôlée, tous les 4 m dans les 24 premiers mètres par deux systèmes inclinométriques (EZ Dip et Boretrack).

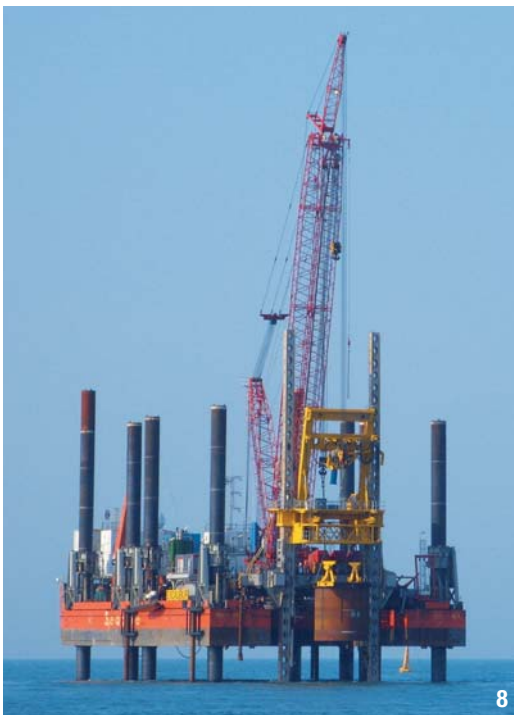
Le liner métallique (H = 63 m, épaisseur variant entre 22 et 40 mm en partie courante, diamètre intérieur 4,95 m, poids 304 t) fut acheminé par remorque depuis Saint-Malo.

TABLEAU 2 : PHASAGE DU CREUSEMENT DU PUITS EN MER

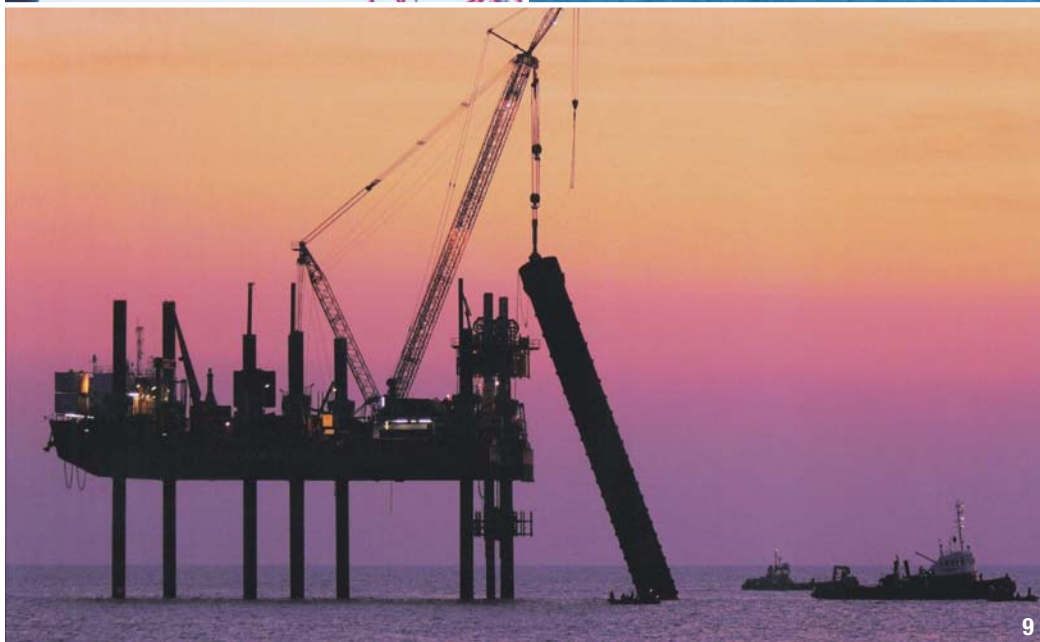
|                  |                       | Diamètre de foration | Diamètre extérieur du casing | Vitesse de foration | Durée                     |
|------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------|---------------------|---------------------------|
| Premier casing   | -14,3 NGF à -20,2 NGF | 6,40 m               | 6,13 m                       | 2 cm/h              | 31 j y compris scellement |
| Deuxième casing  | -20,2 à -31,2 NGF     | 6,08 m               | 6,04 m                       | 4 cm/h              | 12 j sans scellement      |
| Section courante | -31,4 à -77,13 NGF    | 5,85 m               |                              | 3,8 cm/h            | 48 j                      |



7



8



9

7- Vue de la tête de coupe de l'outil, en cours de manutention sur la plateforme Excilibur.

8- Plate-forme autoélevatrice Excilibur, avec Teredo 90 au premier plan en train de mettre en place le casing n°1 de 12 m de hauteur.

9- Vue générale de l'opération de levage du liner pour mise en place dans le puits venant d'être foré.

7- View of the cutting head of the tool, during handling on the Excilibur platform.

8- Excilibur self-jacking platform, with Teredo 90 in the foreground in the process of placing in position casing No. 1, 12 metres high.

9- General view of the liner lifting operation for placing in the shaft that has just been drilled.

Il fut levé et posé les 20 et 21 septembre 2008, lors de conditions de mer particulièrement favorables, à l'aide de 4 vérins à câbles de 80 t chacun (photo 9).

La dégradation des conditions de mer en début d'automne 2008 a perturbé les opérations de scellement du liner, qui ont été terminées le 11 et 12 octobre par hélipontage à l'aide d'un Super Puma 3 (capacité CMU : 4,5 t), avec des bennes de 1,2 m<sup>3</sup>.

Pour les mêmes raisons, la pose du diffuseur, structure mixte métal-béton de 9 m de hauteur et de 450 t a été reportée et finalement réalisée en avril 2009.

## CREUSEMENT DE LA GALERIE SOUS LA MER

### Conception du tunnelier

La conception de la machine a considéré les conditions géologiques suivantes, attendues sur tracé à la cote superficielle du creusement :

→ Matrice dure et abrasive, massif rocheux fracturé et mal serré, générant potentiellement des blocs instables au front, perméabilité élevée (pour un massif rocheux, compris entre 10<sup>-4</sup> et 10<sup>-6</sup> m/s), avec une charge hydrostatique fluctuante, correspondant au niveau de la marée ;

→ Hétérogénéité du front (filon redressé et altéré pris en enfilade,

stratification subverticale en direction) ;  
→ Occasionnellement terrains très durs et extrêmement abrasifs (couches de quartzites).

La machine a été construite par Herrenknecht, sous le numéro S-518, dans un délai très réduit de 6 mois.

La méthodologie retenue a été celle d'un tunnelier à roue de coupe de type roche dure à marinage hydraulique et à front confiné, avec pose du revêtement à l'avancement (voussoirs). Afin de garantir la possibilité d'intervention dans la chambre d'abattage à des pressions raisonnables, la cote du radier de la galerie fut calée à 40 m sous les plus hautes marées, soit une calotte à

environ à 10 m sous le fond rocheux. La pression d'air dans la chambre à bulle était établie en fonction de la marée, le pilote en assurait la programmation suivant un abaques.

Le diamètre extérieur de la jupe était de 6,11 m pour un diamètre excavé de 6,15 m. Le bouclier, de 11 m de longueur, était composé de deux corps. L'articulation était assurée par 4 paires de vérins (360/240-400) autorisant un passage dans une courbe théorique de rayon 140 m, pour un rayon de 250 m effectif.

La puissance demandée pour vaincre la résistance offerte par le massif rocheux a nécessité un entraînement de gros



TABLEAU 3 : CARACTÉRISTIQUES DU TUNNELIER S 518

|                          |                           |   |  |
|--------------------------|---------------------------|---|--|
| Puissance                | 2 000 + 1 500 kW          | Roue de Coupe   | 34 molettes simple disque 17"            |
| Couple nominal           | 4 000 kN.m                |   | 4 molettes double-disque 17"             |
| Couple maximal           | 4 850 kN.m                | Largeur des disques                                     | 19 mm                                    |
| Poussée maximale         | 40 000 kN                 | Espacement molettes                                     | 67 à 98 mm (hors molettes périphériques) |
| Vérins de poussée        | 11 paires de type 260/220 | Effort nominal  | 25 t / molette                           |
| Débit de refroidissement | 70 m³/h                   | 6 racleurs et calibreurs « Scrappers and grizzly bars » |  |
| Circuit de marinage      | 1 200 m³/h 3,5 à 4,5 m/s  | Étanche sous 4 bars                                     |  |

diamètre comparé au petit diamètre de la machine. En conséquence, cet encombrement important a imposé une chambre des moteurs pressurisable séparant le sas de la chambre à bulle. Les caractéristiques de la machine sont précisées dans le Tableau 3.

La machine et en particulier la roue de coupe, ont été conçues pour faire face aux caractéristiques extrêmes envisagées pour la matrice rocheuse. Herrenknecht et Vinci ont mutualisé leur retour d'expérience issu du chantier d'Hallandsås en Suède, dans des conditions analogues. On notera en particulier :

- Le faible espacement entre les molettes ;
- L'important dispositif de protection anti-usure en périphérie, sur la face avant de la roue et à l'avant des molettes ;
- L'épaisseur des conduites de marinage (épaisseur 12,5 mm pour un diamètre de 12").

La roue de coupe, à centre tournant, présentait deux réservations pour le passage d'éventuels sondages carottés de reconnaissance, dans l'axe de l'ouvrage. Cette possibilité n'aura finalement jamais été utilisée sur le chantier. 11 réservations pour forages d'injections étaient implantées entre les 11 paires de vérins de poussée.

10- Vue du bouclier lors de sa réception en usine.

11- Avancement du creusement de la galerie sous la mer.

10- View of the shield during its in-plant acceptance testing.

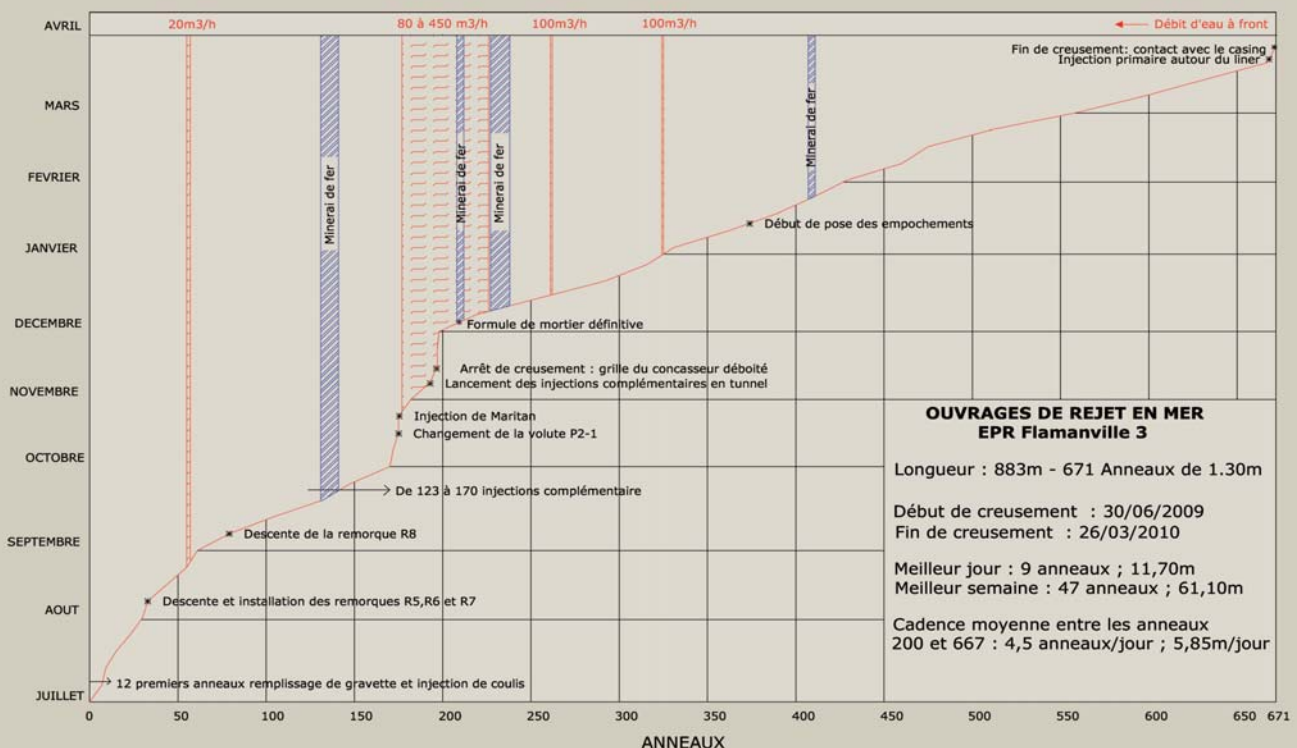
11- Progress on excavation of the gallery under the sea.



10

## AVANCEMENT DU CREUSEMENT DE LA GALERIE SOUS LA MER

11



Ces réservations, permettant la réalisation de forages divergents, inclinés de 9° par rapport à l'axe du tunnelier, devaient permettre de garantir, par un traitement du terrain en avant du front, une intervention dans la chambre en toutes conditions hydrogéologiques. Elles ont uniquement été utilisées lors des opérations de raccordement aux puits en mer (photo 10).

Le train suiveur était composé de huit remorques, sur une longueur de 80 m. Le circuit de marinage, composé d'une ligne d'amenée et d'une ligne de retour doublée, était raccordé à une centrale de traitement des boues de fabrication MS, entièrement marinisée. Cette centrale était composée d'une partie dédiée à la préparation de la bentonite (malaxeur Bentomix 20 m<sup>3</sup>/h, silo 80 m<sup>3</sup> et bac stockage B5 320 m<sup>3</sup>), d'une unité de dessablage (1 crible horizontal 2 étages coupant à 40 et à 5 mm, 6 cyclones de diamètre 250 mm et 2 essoreurs vibrants) aboutissant à des boues de granulométrie 0/50 µm, puis d'une unité de gestion de ces boues (4 bacs de 200 à 400 m<sup>3</sup>, 49 plateaux filtres presses de 16 bars de pression maximale, 1 silo à chaux et 1 réacteur à chaux 3 m<sup>3</sup> (le chaulage étant nécessaire pour améliorer le pressage)).

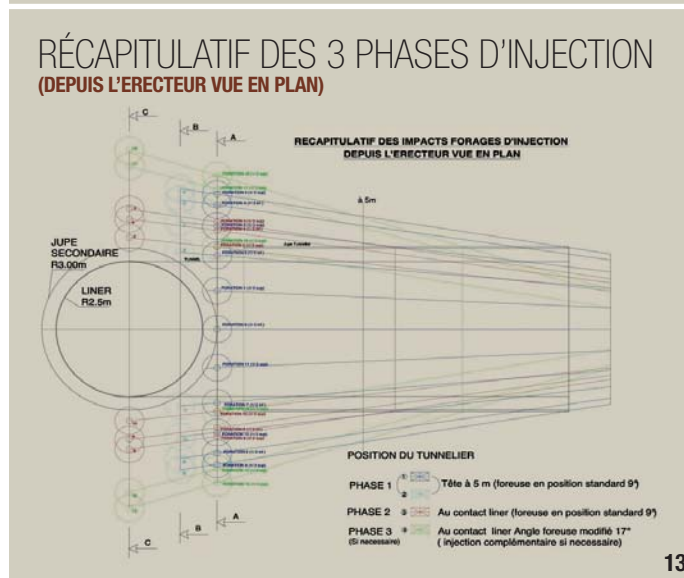
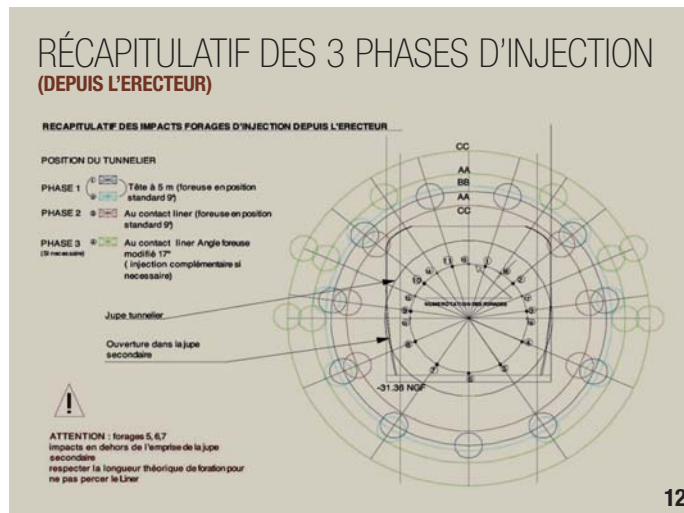
Les anneaux de voussoirs présentaient une longueur de 1,3 m et une épaisseur de 0,40 m. Ils étaient composés de 5+1 voussoirs de type universel préfabriqués en usine. Le béton était de classe C50/60.

Le remplissage du vide annulaire est fait en continu pendant l'avancement du tunnelier, à l'arrière des brosses de queue par deux pipes d'injection. Une injection systématique de collage au coulis de ciment est effectué après les remorques du tunnelier, à partir d'une remorque indépendante, à raisons de cinq points d'injections par anneau.

#### Déroulement des travaux

La mise en place du tunnelier a nécessité l'élargissement du puits initial de 5 m à 10 m de diamètre utile et sur 17 m de profondeur, réalisé dans l'axe du puits à terre préalablement rebouché. Le pied de ce puits de démarrage comportait une galerie de recul de 32 m de longueur et de 24 m<sup>2</sup> de section et une galerie d'attaque de 13,5 m<sup>2</sup> et de 36 m<sup>2</sup>. Ces deux galeries ont été réalisées en traditionnel (drill and blast), avec un soutènement de type boulons et béton projeté.

La proximité de la station de pompage, en cours de construction, a imposé un phasage particulier de travaux, afin



d'éviter les interférences entre les tirs et la prise des bétons jeunes âges. Un amorçage électronique a été nécessaire, avec de faibles charges unitaires instantanées (jusqu'à 500 g) pour les tirs les plus proches afin de minimiser les vibrations.

Le bouclier a été descendu le 8 mai 2009, pour un début de creusement le 30 juin 2009 (photo 2). Compte tenu de l'exiguïté du site, le démarrage du creusement s'est effectué avec les remorques 5 et 6 (groupes électriques), 7 (zone de télescopage du circuit de marinage et extension réseaux) et 8 (cassette ventilation, groupe de secours et caisson de survie) en tête de puits. Le dernier anneau (anneau 672 au PM 883) a été foré le 26 mars 2010. Le graphique d'avancement du creusement de la galerie sous la mer (figure 11) met en évidence :

→ Une montée en cadence progressive tant que la totalité du train suiveur n'a pas été descendue, sur les 100 premiers mètres ;

#### 12 & 13- Récapitulatif des 3 phases d'injection.

#### 12 & 13- Summary of the 3 injection phases.

- Deux arrêts de trois semaines entre les anneaux 172 (PM 233) et 198 (PM 267) ;
- Des vitesses records entre les anneaux 468 (PM 618) et 671 (PM 883), dans le tronçon rectiligne final du tracé. C'est durant ce dernier tronçon qu'ont été établis les records d'avancement du chantier :
- Maximum journalier : 11,70 m ;
- Maximum hebdomadaire : 61,10 m ;
- Maximum sur 30 jours consécutifs : 222,30 m.

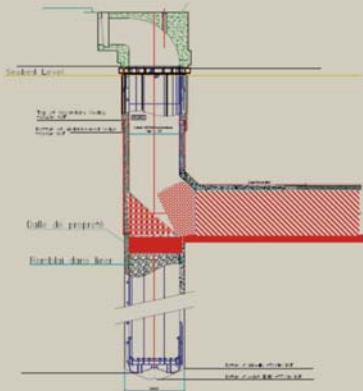
L'arrêt n°1 du 7 au 29 octobre correspond d'une part à un arrêt maintenance du circuit de marinage, remplacement de la pompe de retour P2.1 et contrôle de l'usure des tuyaux et d'autre part sur un ajustement de la formule mortier vis à vis des circulations d'eau sur l'extrados du revêtement. Une campagne d'injection de collage au coulis de ciment a aussi lieu pendant cette période. L'arrêt n°2 du 11 au 29 novembre correspond à une zone de cornéennes très bloqueuses avec une densité élevée et de fortes venues d'eau (jusqu'à 450 m<sup>3</sup>/h). Le blocage brutal de l'aspiration du circuit de marinage à l'anneau 198 a entraîné un arrêt instantané de l'avancement. Cet arrêt comprend d'une part 8 jours de nettoyage de la chambre d'abattage et à bulle à la main sous un débit moyen d'eau de 250 m<sup>3</sup>/h, et d'autre part 11 jours de réparation pour la grille de calibrage et le concasseur.

Les conditions géologiques ont été conformes à l'attendu :

- Succession de cornéennes noires, de cornéennes rubanées et de cornéennes quartzitiques, recoupées avec un fort pendage. Aucun banc de quartzite pur n'a été rencontré ;
- Les filons de microgranite qui ont été recoupés étaient globalement peu altérés ;
- Les veines de minerai de fer et les trois failles plis qui ont été recoupées étaient positionnées conformément aux prévisions. La faille la plus redoutée (faille F1) s'est traduite par un linéaire d'environ 60 m de rocher très fissuré avec des venues d'eau atteignant ponctuellement 450 m<sup>3</sup>/h (débit mesuré en mode ouvert) ;
- Creusement en travers bancs avec ou contre le pendage (OR2a et OR2b) puis en direction compte tenu de la courbure de la galerie ;
- La fracturation se traduisait par un espacement ES3 à ES4, localement ES5 (faille F1), ES2 dans la partie terminale de la galerie ;
- L'altération se traduisait par un degré AM1a à AM1b, sauf localement dans les zones de failles, où il pouvait atteindre AM3. Cela s'est traduit par une abrasivité et une densité élevée des déblais, nécessitant une maintenance accrue, notamment sur les pièces du circuit de marinage hydraulique :
- Changement sur les pompes de marinage retour de 2 corps, 3 turbines et 4 portes (l'épaisseur initiale du corps de pompe de 80 mm était de 10 mm à ces changements) ;



## COUPE-TYPE DU RACCORDEMENT EN MER



14



15

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :**  
EDF

**MAÎTRE D'ŒUVRE :**  
EDF CNEPE

**ENTREPRISE PUIITS EN MER :**  
SOLETANCHE BACHY FRANCE

**ENTREPRISE TUNNEL :**  
Groupement VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS /  
SOLETANCHE BACHY FRANCE

→ Un contrôle régulier a été mis en place pour suivre l'usure des points singuliers tels que les coudes, les compensateurs, les télescopes, les changements de direction des conduites et aussi l'usure des tuyaux en tunnel.

L'usure de la roue de coupe est demeurée conforme à l'attendu, notamment en ce qui concerne les racleurs. Il a été nécessaire de recharger les bras de malaxage, ainsi que d'apporter des modifications au concasseur, notamment l'ouverture de la grille d'aspiration (passage d'un maillage de 120 par 120 mm à 150 par 150 mm). Le taux de changement de molettes a été relativement faible, sauf pour les molettes périphériques, le ratio a été d'une molette pour 600 m<sup>3</sup> de terrain excavé. Toutes les opérations de maintenance de la roue de coupe (notamment le changement des molettes) ont pu s'effectuer à la pression atmosphérique, la tenue du terrain et les débits d'eau autorisant l'intervention dans la

chambre. Par conséquent, la bentonite n'a jamais été utilisée.

La variabilité du front a été confirmée dans les zones de transitions entre les différents faciès. Le passage d'un massif rocheux localement très massif et serré à un massif très bloqu coast et décomprimé, générant des blocs de densité élevée a conduit à des difficultés de circulation des matériaux dans la chambre et par voie de conséquence à l'extraction.

### **Raccordement du puits en mer**

Le raccordement de la galerie au puits en mer préalablement batardé s'est effectué après démontage intégral du tunnelier. Seule la jupe est restée en place et a été intégrée au coffrage définitif du coude de raccordement.

Avant le démontage du tunnelier, la zone de rocher située entre l'extrémité de la jupe et le liner du puits (1,3 m à l'axe du tunnel) a été consolidée et étanchée par injection de deux auréoles emboîtées de bentonite ciment (environ

**14- Coupe-type  
du raccordement  
en mer.**

**15- Galerie  
reliant les 2 puits.**

**14- Typical  
cross section of  
the connection  
at sea.**

**15- Gallery  
linking the  
2 shafts.**

1 t de ciment) et 4 500 l de gel de silice (figures 12 et 13).

Après démontage du tunnelier, les travaux du raccordement se sont déroulés en 7 phases (figure 14 et photo 1) :

→ Bétonnage du radier dans la partie tunnel,

→ Excavation autour du liner,

→ Découpage du liner,

→ Bétonnage du bouchon,

→ Coffrage du tunnel et du coude extérieur,

→ Coffrage et bétonnage du coude intérieur,

→ Bétonnage du tunnel et du coude extérieur.

### **CONCLUSION**

La réalisation des ouvrages de rejet en mer de la tranche EPR de Flamanville a été le lieu de deux succès techniques, dans des conditions géologiques très particulières et dans des délais très serrés :

→ Le creusement du puits en mer, en conditions offshore dans une gamme de diamètre jamais foré en pleine section ;

→ Le creusement de la galerie sous la mer avec une couverture verticale réduite, de l'ordre de 10 m.

Cette réussite est le fruit d'une très bonne collaboration de l'ensemble des acteurs de ce projet : EDF, Entreprise et fournisseurs principaux. □

### **ABSTRACT**

## **UNDERGROUND WORKS FOR THE FLAMANVILLE 3 NUCLEAR POWER STATION**

P. JARRIN ET G. DEVEZE, EDF - L. SUQUET ET F. RENAULT, VINCI CONSTRUCTION - J.-L. GOBERT DE SOLETANCHE BACHY

*Like the two neighbouring reactors, the reactor of the Flamanville 3 nuclear power station is cooled by seawater, by means of a pumping station located in an artificial channel. To prevent recirculation, the waters that have been used for cooling are then discharged off the coast via an underground circuit consisting of a land shaft and a sea shaft sunk using the blind shaft drilling technique 600 m from the coast, connected together at the base by a 900-metre gallery dug by tunnel boring machine.*

*This article describes the works for execution of this underground circuit awarded by Electricité de France to Soletanche Bachy. □*

## **LAS OBRAS SUBTERRÁNEAS DE LA CENTRAL NUCLEAR DE FLAMANVILLE 3**

P. JARRIN ET G. DEVEZE, EDF - L. SUQUET ET F. RENAULT, VINCI CONSTRUCTION - J.-L. GOBERT DE SOLETANCHE BACHY

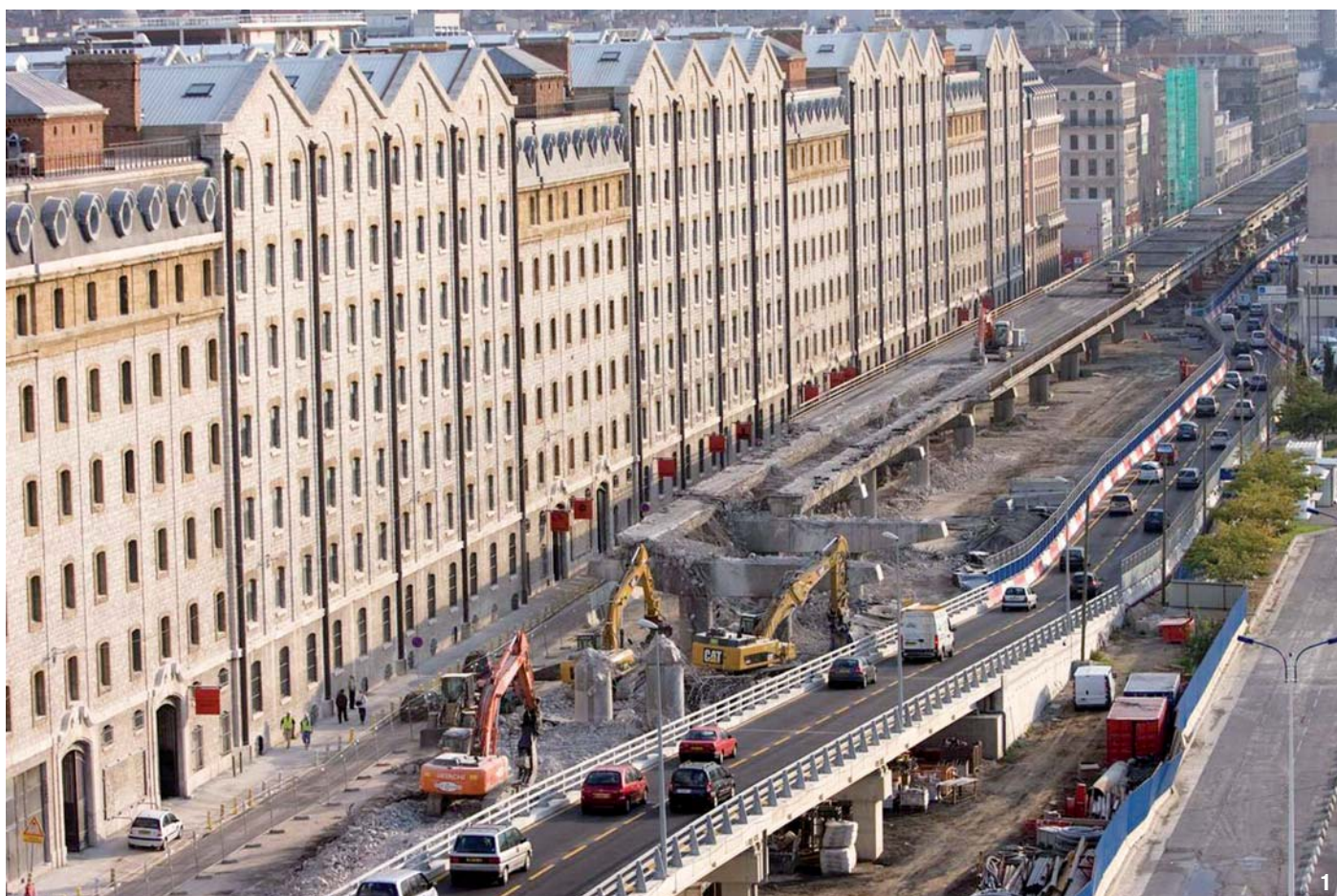
*Del mismo modo que para los dos reactores cercanos, el reactor de la central nuclear de Flamanville 3 se refrigera mediante agua de mar, gracias a una estación de bombeo implantada en un canal artificial. Para evitar la recirculación, las aguas que se han utilizado para la refrigeración se vierten a continuación hacia el alta mar por un circuito subterráneo formado por un pozo en tierra y un pozo en el mar perforados según la técnica blind shaft drilling a 600 metros en alta mar, que están unidos en la base por una galería de 900 metros excavada mediante una tuneladora.*

*El este artículo se presentan los trabajos de ejecución del circuito subterráneo encargados a Soletanche Bachy por Electricité de France. □*

# TUNNEL DE LA JOLIETTE À MARSEILLE UN CHANTIER EN MILIEU URBAIN DENSE

AUTEURS : JEAN-JACQUES ATAMIAN, CAMPENON BERNARD SUD-EST - HASSAN FARHAT, ARCADIS - JEAN-BAPTISTE RAPETTI, EGIS - JOËL VANNI, COMMUNAUTÉ URBAINE MARSEILLE PROVENCE MÉTROPOLE

LE PRÉSENT ARTICLE DÉCRIT LES TRAVAUX DU TUNNEL DE LA JOLIETTE À MARSEILLE DANS LE SENS NORD/SUD. SONT PRÉSENTÉES D'UNE FAÇON SUCCINCTE LES CONTRAINTES LIÉES AU CONTEXTE URBAIN DENSE ET LES SOLUTIONS ADÉQUATES. LA GESTION DU TRAFIC ROUTIER SUR CET AXE MAJEUR D'ENTRÉE EN VILLE A ÉTÉ SATISFAISANTE. LES MÉTHODES D'EXÉCUTION DES TRAVAUX DE SOUTÈNEMENT ONT ÉTÉ ADAPTÉES AUX CONDITIONS GÉOTECHNIQUES MAIS AUSSI AUX EMPRISES DE CHANTIER TRÈS RÉDUITES.



## OBJECTIF : RECONQUÉRIR LA FAÇADE LITTORALE

L'opération de l'Axe Littoral sens Nord/Sud s'inscrit dans le cadre de la future Z.A.C. de la Cité de la Méditerranée. Elle consiste notamment à démolir le viaduc autoroutier au droit des Docks et à construire un tunnel sous la voie des

quais, jusqu'au tunnel du Vieux Port. En continuité de l'autre sens de circulation réalisé avec le tunnel de la Major en décembre 2002, l'Axe Littoral sens Nord/Sud permet de poursuivre la reconquête de la façade littorale. Le tunnel de la Joliette est en circulation à sens unique suivant l'axe Nord/Sud. Il comprend deux

**1- Vue d'ensemble  
du chantier côté  
de l'A55 devant les  
Docks de Marseille.**

**1- General view of  
the project in front of  
the Marseille Docks.**

voies de circulation entre son entrée au droit des Docks et le boulevard des Dames et s'élargit à trois voies de circulation jusqu'à son raccordement au Tunnel du Vieux-Port (photo 1 et figure 2). C'est un ouvrage à gabarit réduit, limité aux véhicules de moins de 3,20 m de haut et de moins de 3,5 tonnes.



## CONTENU DU MARCHÉ

Le marché de génie civil comporte une tranche ferme et deux tranches conditionnelles :

→ Tranche ferme (TF) : un tronçon en tunnel et trémies de 1 180 m de longueur et un tronçon en viaduc avec sa rampe de 175 m de longueur, démolitions du viaduc autoroutier existant et de la passerelle provisoire de déviation de la circulation, voirie et réseaux ;

→ Tranche conditionnelle n°1 (TC1) : réalisation des ouvrages de raccordement avec le Pont Vaudoier ;

→ Tranche conditionnelle n°2 (TC2) : réalisation des ouvrages d'accès Nord et Sud au parking des Terrasses du Port. La réalisation de cet ouvrage dans un contexte urbain dense et dans un délai tendu représentait un défi technique et d'organisation pour l'ensemble des intervenants. Parmi les difficultés auxquelles les intervenants ont fait face :

→ La gestion du trafic routier sur un axe important d'entrée dans le centre ville de Marseille ;

→ La concomitance des travaux de démolition du viaduc existant avec celle de la réalisation de la paroi moulée ce qui a nécessité l'adaptation du matériel de paroi moulée ;

→ La réalisation des ouvrages de rétablissement de collecteurs importants comme le déversoir Montricher.

## CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET GÉOTECHNIQUE

Trois grandes unités sont identifiées. Il s'agit des remblais, des alluvions fines ou grossières et des terrains appartenant au Stampien.



© COMMUNAUTÉ URBAINE MARSEILLE PROVENCE MÉTROPOLE

**Les remblais** peuvent être argilo-sableux, limoneux ou vasard, avec des éléments détritiques grossiers.

**Les alluvions** sont constituées de sables et galets, de sables argileux et galets et de sables vasards et galets.

**Les différents faciès du Stampien** correspondent à différentes natures de roches : des poudingues, des grès et des marnes qui peuvent être franches argileuses ou sablo-gréseuses.

Le site est caractérisé par une nappe qui baigne les remblais et les alluvions. Il est important de rappeler que les remblais ont permis la mise hors d'eau

**2- Réseau des tunnels marseillais.**

**3- Ouvrage terminé. Section à 3 voies.**

**2- Marseille tunnel network.**

**3- Completed structure.**

du site au droit des différentes anses traversées par les ouvrages. Cette nappe est essentiellement réglée par les nappes alluviales du ruisseau des Ayalades et du vallon de la Joliette, et par le niveau de la mer à l'Ouest.

Le sens d'écoulement est généralement dirigé vers la mer, soit vers l'Ouest. De ce fait, il a été prévu la réalisation de « fenêtres » dans la paroi moulée, au-dessus de la dalle et tous les 3,50 m, afin de créer des passages pour assurer l'écoulement de la nappe, et éviter les effets de barrage. Le positionnement de ces réservations devait prendre en compte plusieurs contraintes (figure 4) :

→ La position de la fenêtre par rapport à la dalle ;

→ La position des fenêtres selon le profil en long et les singularités de l'ouvrage (rameaux des issues de secours, collecteur 10, déversoirs Montricher et Tourette, usine de ventilation, remontée du profil en long, bretelle Dames, etc.).

## TECHNIQUES DE RÉALISATION DES SOUTÈNEMENTS

Les techniques de soutènement mises en œuvre devaient s'adapter aux conditions du terrain mais aussi à l'environnement urbain dense : emprise à gabarit réduit, présence de réseaux et d'ouvrages sensibles.

→ **Paroi moulée.** C'est la technique principale de soutènement de la tranchée. Le matériel a été adapté aux différents terrains rencontrés : terrains meubles, terrains moyennement durs (marnes) et terrains très durs (grès poudingues).



© AFRCADIS

3

Le matériel a également été adapté aux conditions d'encombrement et de gabarit réduit sous l'ancien viaduc dont la démolition a été exécutée en phase ultérieure (photos 5 et 6).

→ **Pieux sécants.** Cette technique a été utilisée dans le cadre de la mise en œuvre d'un soutènement provisoire et étanche pour la réalisation d'un déversoir d'orage et de son réseau d'assainissement (photo 7).

→ **Paroi Géomix.** Cette technique a été mise en œuvre pour la réalisation d'un soutènement provisoire et étanche destiné à un collecteur principal en pro-

fondeur et à proximité d'un bâtiment sensible. Il s'agit des anciens établissements Margnat en voûte sous l'Esplanade de la cathédrale de la Major. Cette paroi Géomix a été réalisée sur 250 ml de longueur avec une épaisseur de 800 mm, soit environ 1 500 m<sup>2</sup> de paroi à une profondeur moyenne de 7 m (photo 8).

**GESTION DU TRAFIC**

La déviation provisoire de la circulation de transit autoroutière a nécessité la réalisation d'aménagements de voirie et d'équipements importants pour gérer la

**4- Extrait du profil géotechnique.**

**5- Hydrofraise devant la cathédrale de la Major.**

**6- Minifraise sous le viaduc avant démolition.**

**4- Excerpt from the geotechnical profile.**

**5- Hydro-cutter in front of La Major Cathedral.**

**6- Mini cutter under the viaduct before demolition.**

circulation depuis la partie préservée du viaduc A55 (au Nord) jusqu'au tunnel du Vieux Port.

Outre la déviation de la circulation de transit, il fallait également maintenir les accès piétons à la gare maritime de la Major et à la gare maritime de La Corse depuis le centre ville. Concernant la circulation, il a été mis en œuvre :

→ Du Nord au Sud, une chaussée à deux voies puis trois voies qui longeait les emprises du Grand Port maritime de Marseille (GPMM) pour rejoindre le tunnel du Vieux Port et le carrefour du pont Vaudoier ;

EXTRAIT DU PROFIL GÉOTECHNIQUE

4







## UN OUVRAGE SOUTERRAIN EN TRANCHÉE COUVERTE

Les terrassements ont été réalisés pour une majeure partie à ciel ouvert. Certains tronçons ont été réalisés en taupe.

Principales dimensions et quantités :

- **PAROI MOULÉE** : 2 x 1100 ml soit environ 32 000 m<sup>2</sup> (profondeur moyenne 13 m)
- **TERRASSEMENTS** : 115 000 m<sup>3</sup>
- **BÉTON POUR GÉNIE CIVIL** : 30 000 m<sup>3</sup>
- **ARMATURES POUR GÉNIE CIVIL** : 3 000 tonnes

→ Des équipements de gestion pilotés depuis le PC tunnel du Vieux Port (trois portiques avec panneaux à messages variables (PMV) et signaux d'affectation de voie (SAV), panneau prisme) ;

→ Deux ponts routiers de franchissement de la fouille ;

→ Quatre portails d'accès pour les pompiers.

Pour maintenir les accès piétons aux gares maritimes, ont été mises en œuvre deux passerelles de franchissement de la déviation de la circulation, équipées de deux ascenseurs protégés (1 600 kg) permettant aux piétons et aux personnes à mobilité réduite de

**7- Machine à pieux (paroi en pieux sécants).**

**8- Réalisation de la paroi en Géomix.**

**7- Piledriving machine (secant pile wall).**

**8- Geomix wall execution.**

franchir en élévation la déviation provisoire de la circulation afin d'accéder à la gare maritime (photo 9).

### RÉTABLISSEMENT DES DÉVERSOIRS

Outre les déviations de réseaux divers réalisés avant le démarrage des travaux, le marché prévoyait le rétablissement de déversoirs importants d'assainissement.

#### *Le déversoir de Montricher*

Cet ouvrage hydraulique date de l'époque de réalisation du Canal de Marseille au dix-neuvième siècle. Il est situé sous le boulevard des Dames et

traverse d'Est en Ouest le quai de la Joliette. Les travaux de rétablissement de cet ouvrage ont été rendus difficiles par les nombreuses contraintes dont :

→ La nécessité de maintenir les écoulements d'eau. En cas de fortes pluies les débits de cet ouvrage deviennent très importants ;

→ La découverte de réseaux EDF non répertoriés dans les plans de synthèse des réseaux ;

→ La nécessité de rétablir en parallèle une conduite GDF existante dans l'ouvrage ;

→ La concomitance avec les travaux de démolition du viaduc.





© ARCADIS

### La traversée-siphon de la Tourette

Il s'agit d'un déversoir d'orage d'une station de relevage des eaux usées dénommée station de la Tourette. Ce franchissement a été réalisé en ouvrage siphon. Le soutènement provisoire du cadre a été exécuté selon la technique Géomix décrite ci-dessus (photo 10).

### UN OUVRAGE QUI AMÉLIORE LA QUALITÉ DE VIE

L'ouvrage a été ouvert à la circulation en mars 2011 et inauguré officiellement en avril 2011. Il a permis de libérer la voirie en surface du trafic de transit et de supprimer le viaduc autoroutier dans cette partie

### 9- Déviation de la circulation et passerelle piétonne.

### 10- Rétablissement du déversoir de Montricher.

### 9- Traffic deviation and pedestrian foot bridge.

### 10- Restoration of the Montricher storm overflow.

du centre-ville de Marseille, en ouvrant ce quartier au port et à l'esplanade du J4. Les difficultés liées au caractère urbain dense et au trafic routier ont été résolues grâce à une concertation permanente entre les divers acteurs du projet.

Il s'agit d'un chantier qui a nécessité la mise en œuvre des techniques et des méthodes adaptées aux différentes contraintes : emprises réduites, circulations routières et piétonnes, contexte géotechnique et hydrogéologique pour un ouvrage souterrain.

C'est l'exemple type d'ouvrages en milieu urbain que les villes ou collectivités devront mettre en place pour améliorer la qualité de vie des quartiers et centres villes. □

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRISE D'OUVRAGE :**  
Communauté Urbaine  
Marseille Provence Métropole

**GROUPEMENT MAÎTRISE D'ŒUVRE :**  
Arcadis (mandataire) -  
Egis - Mascarelli (architecte)

**CONTRÔLE TECHNIQUE :**  
Bureau Veritas

**GROUPEMENT D'ENTREPRISES :**  
Campenon Bernard  
Sud-Est (mandataire) -  
GTM Sud - Botte Fondations -  
Soletanche Bachy - Spie  
Batignolles - Intertravaux -  
Eurovia Méditerranée

## ABSTRACT

### LA JOLIETTE TUNNEL IN MARSEILLE A PROJECT IN A DENSE URBAN ENVIRONMENT

JEAN-JACQUES ATAMIAN, CAMPENON BERNARD - HASSAN FARHAT, ARCADIS -  
JEAN-BAPTISTE RAPETTI, EGIS - JOËL VANNI

This article describes the works on La Joliette tunnel in Marseille in the North/South direction. The constraints due to the dense urban environment and the appropriate solutions are described briefly. Road traffic control on this major artery entering the city was satisfactory. The methods for execution of retaining structure works were adapted to the geotechnical conditions but also to the very small site area available. □

### TÚNEL DE LA JOLIETTE EN MARSELLA UNA OBRA EN ENTORNO URBANO DENSO

JEAN-JACQUES ATAMIAN, CAMPENON BERNARD - HASSAN FARHAT, ARCADIS -  
JEAN-BAPTISTE RAPETTI, EGIS - JOËL VANNI

En el presente artículo se describen los trabajos del túnel de la Joliette en Marsella en el sentido Norte/Sur. Se presentan de forma compendiada las restricciones vinculadas al contexto urbano denso así como las soluciones adecuadas. La gestión del tráfico vial en este importante eje de entrada en la ciudad fue satisfactoria. Los métodos de ejecución de los trabajos de contención se han adaptado a las condiciones geotécnicas pero además a la superficie sumamente reducida de la obra. □



1- Tunnel depuis  
la station Front  
Populaire.

1- Tunnel from  
the Front Populaire  
station.

© RATP

# PROLONGEMENT DE LA LIGNE 12 DU MÉTRO PARISIEN DE LA PORTE DE LA CHAPELLE À AUBERVILLIERS : PHASE 1

AUTEURS : PHILIPPE MOYAL, CHEF DE PROJET LIGNE 12, RATP - PHILIPPE RAUZY, DIRECTEUR TECHNIQUE, XÉLIS - PHILIPPE BARBEZ, DIRECTEUR D'AGENCE GÉNIE CIVIL, CHANTIERS MODERNES BTP - PASCAL HAMET, DIRECTEUR RÉGIONAL DÉLÉGUÉ, EIFFAGE TRAVAUX PUBLICS

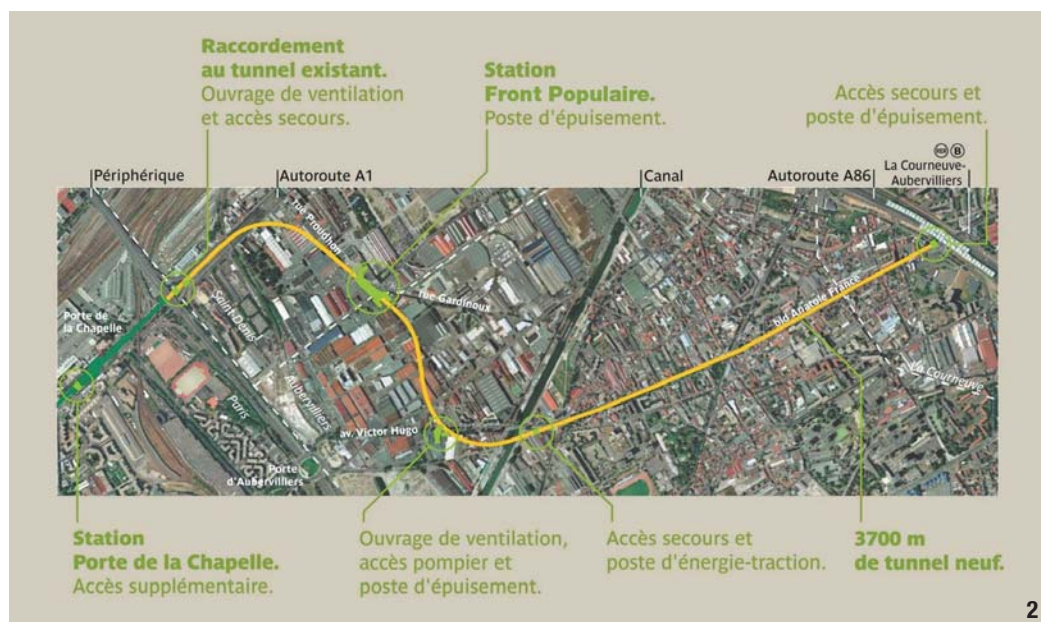
LA PREMIÈRE PHASE DU PROLONGEMENT DE LA LIGNE 12 DU MÉTRO, DEPUIS LA PORTE DE LA CHAPELLE JUSQU'À AUBERVILLIERS, CONSTITUE L'UN DES PLUS IMPORTANTS CHANTIERS DE TRAVAUX SOUTERRAINS EN COURS DE RÉALISATION EN ILE-DE-FRANCE. UN TISSU URBAIN DENSE, UN CONTEXTE GÉOTECHNIQUE DÉLICAT, DES CONTRAINTES D'INSTALLATION ET DE FONCTIONNEMENT DU CHANTIER DIFFICILES, SONT LES CARACTÉRISTIQUES DE CE PROJET. CELUI-CI CONSISTE À CONSTRUIRE UN TUNNEL DE 3 880 M, QUATRE OUVRAGES DE VENTILATION ET D'ACCÈS POMPIERS, AINSI QU'UNE NOUVELLE STATION. LE GÉNIE CIVIL DES OUVRAGES EST RÉALISÉ À L'ABRI DE PAROIS MOULÉES. LE TUNNEL, DE 3 600 M DE LONG ET DE 8 M DE DIAMÈTRE INTÉRIEUR, EST CREUSÉ À L'AIDE D'UN TUNNELIER À PRESSION DE TERRE SUR 3 600 M.

## UNE LIGNE QUI SE DÉVELOPPE DEPUIS PLUS DE 100 ANS

Concédée dès 1901 à la Compagnie Nord Sud, la ligne A fut inaugurée en 1910. D'abord conçue pour relier Montmartre à Montparnasse, elle prend le nom de ligne 12 lors de la fusion de la Compagnie du chemin de fer métropolitain de Paris avec la Société du chemin de fer électrique souterrain Nord-Sud de Paris. Elle relie alors la porte de Versailles à Notre-Dame-de-Lorette. Après plusieurs extensions vers le Nord, jusqu'à la porte de la Chapelle puis au Sud-Ouest vers la mairie d'Issy-les-Moulineaux, elle se présente sous sa forme actuelle dès 1934, s'étendant sur 14 km et desservant 28 stations. La ligne a transporté près de 83 millions de passagers en 2009.

## LES OBJECTIFS DU PROLONGEMENT

Le nouveau prolongement, en cours de construction, a été entériné par l'État, la Région Ile-de-France, le département de Seine-Saint-Denis et la RATP, tous cofinanceurs du projet. Le Stif (Syndicat des transports d'Ile-de-France) a désigné la RATP maître



d'ouvrage pour la réalisation de la phase 1, qui consiste à creuser l'intégralité du prolongement et à ouvrir la station Front Populaire. L'ordre de service permettant le lancement de la période de préparation a été transmis en février 2008, pour une mise en service en 2012. Les principaux objectifs de ce pro-

2- Schéma du projet.

2- Schematic of the project.

longement au Nord consistent principalement à :

→ Accompagner les projets urbains d'envergure en cours dans ce secteur de la Plaine Saint-Denis, comme le campus Condorcet à Front Populaire ou le centre commercial du Millénaire et son parc d'activités à proximité du pont de Stains ;



→ Améliorer l'accès à la commune d'Aubervilliers (10 min de la porte de la Chapelle et moins de 30 min du cœur de Paris), pour tenir compte de sa forte croissance démographique (+16 % entre 1999 et 2006) par un moyen de transport rapide et fiable ;  
 → Réduire la circulation routière entre la Seine-Saint-Denis et Paris, déjà très dense, même en l'absence de travaux. Le prolongement permettra la suppression à terme de près de 520 000 déplacements en voiture chaque année ;  
 → Améliorer l'intermodalité des réseaux au Nord, en synergie avec l'extension progressive du tramway T3, sur le boulevard des Maréchaux.

### LE PROJET D'EXTENSION

Pour des raisons d'étalement du projet sur le plan financier, la construction de l'extension est prévue en deux phases (figure 2). La phase 1, objet des travaux en cours, comprend :

→ Le lot S1 avec la création de la station Front Populaire (station de fin de ligne temporaire), dans le quartier en pleine rénovation de la Plaine Saint-Denis. Elle se trouvera à environ 1 500 m de la porte de la Chapelle (figure 3).

→ Le lot T1 comportant un tunnel de longueur 3 880 m, qui relie l'actuel terminus de la porte de la Chapelle à l'ouvrage d'épuisement Valmy, qui servira de puits de sortie du tunnelier.

Le tunnel est réalisé depuis un puits central situé au pont de Stains.

Ce lot T1 concerne également quatre puits de ventilation et d'accès pompiers sur le tracé du tunnel.

Quant à la phase 2 (hors marchés



3  
© RATP

des lots T1 & S1), elle concerne l'un des ouvrages du lot T1, le pont de Stains, qui sera agrandi pour la construction d'une nouvelle station. Celle-ci se trouvera alors à 2 400 m du terminus actuel et portera le nom d'Aimé Césaire. De plus, une dernière station en remontant vers le Nord sera construite devant la mairie d'Aubervilliers, qui deviendrait alors le nouveau terminus de la ligne, à 3 300 m de la porte de la Chapelle.

### LES TRAVAUX DE LA PHASE 1 : LOTS T1 ET S1

#### CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

Les terrains prévus dans le contrat s'étagent selon une morphologie particulière. Au milieu du tracé, au pont de Stains, à partir de la cote 42 NGF (épaisseurs arrondies) on rencontre, depuis la surface, les remblais sur 3 m, les marnes infra-gypseuses sur 3 m, les sables de Monceau sur 2 m, les calcaires de Saint-Ouen sur 11 m,

ceux de Ducy sur 1,50 m, enfin les sables de Beauchamp supérieurs sur 6 m puis les médians et inférieurs à partir de la cote 16 NGF. Compte tenu des pendages subhorizontaux, les épaisseurs des ces 3 strates de Beauchamp sont plus faibles à la

**3- La nouvelle station Front Populaire.**

**4- Emprise du chantier au pont de Stains.**

**5- Puits de travail au pont de Stains.**

**3- The new Front Populaire station.**

**4- Site area covered at Stains Bridge.**

**5- Work shaft at Stains Bridge.**

porte de la Chapelle au Sud du projet, et on intercepte les marnes et caillasses à partir de la cote 12 NGF au puits Valmy, côté Nord.

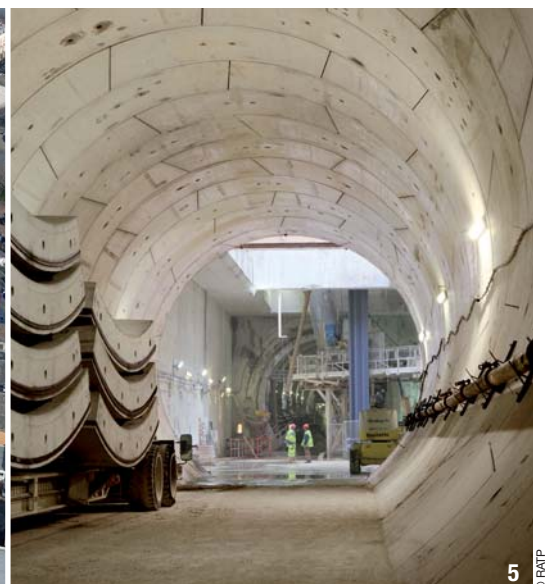
Le toit de la nappe se rencontre dès 4 à 7 m de profondeur, suivant les sites. Les perméabilités annoncées sont faibles. Néanmoins, les seules méthodes efficaces pour construire les ouvrages verticaux en toute sécurité, et assurer la stabilité des avoisinants restent l'emploi des techniques de fondations spéciales.

Caractéristique complémentaire du sous-sol dans cette région du Nord parisien : certains de ces terrains contiennent du gypse, avec des zones potentiellement karstiques. Ils requièrent une attention toute particulière, notamment au cours de la réalisation des parois moulées des puits (détermination des fiches), des pompages à réaliser au cours de leurs terrassements, avec la nécessité impérieuse de les limiter, pour éviter les entraînements de fines, potentiellement génératrices de tassements en surface. La proximité d'ouvrages sensibles tels qu'un pont SNCF, une conduite stratégique du Sedif (Syndicat des eaux), l'autoroute A1 et le périphérique, le canal Saint-Denis, ainsi qu'un habitat vétuste et fragile, associés à la faible profondeur du tunnel, justifiaient la prise en compte de précautions tout au long de l'opération. Plusieurs sondages ont d'autre part relevé des parties très altérées dans toutes ces strates.

Le tunnel est principalement creusé à l'interface entre les calcaires de Saint-Ouen, et les sables de Beauchamp supérieurs pour le tronçon



4



5

© RATP





6

© RATP

Sud, le tronçon Nord ayant à traverser les 3 couches de Beauchamp, avant de terminer dans les marnes et caillasses, au puits Valmy ; le point le plus profond du tunnel se trouve alors à 28 m de profondeur. Quant au point le moins profond, il se situe au droit de la porte de la Chapelle, où ne subsiste qu'un diamètre de « couverture » au-dessus du tube construit !

## ENVIRONNEMENT DE SURFACE ET LOGISTIQUE

Plusieurs sites comportaient des difficultés spécifiques pour la réalisation du chantier, dont principalement le pont de Stains et la porte de la Chapelle.

### Le pont de Stains

Situé à l'intérieur de la petite couronne parisienne, dans le département le plus densément peuplé (93), le chantier s'inscrit dans un contexte très urbanisé (photo 4). Aussi, les contraintes d'implantation des ouvrages sont importantes, les surfaces des emprises de travail réduites et la circulation de surface malaisée sur l'ensemble du tracé. Les sites sont si exigus que l'installation du tunnelier n'est possible à aucune extrémité du tracé. Ceci aurait permis de s'affranchir de plusieurs démarrages et d'un transfert. Mais devant cette impossibilité, l'emprise retenue se situe au point médian du tracé, le long du canal Saint-Denis, conduisant à utiliser ce puits du pont de Stains pour réaliser d'abord le tronçon vers la porte de la Chapelle. Puis, une fois

**6- Entrée du tunnelier à la station Front Populaire.**

**6- TBM entering the Front Populaire station.**

la machine récupérée et remontée, un nouveau départ est amorcé pour creuser le tronçon vers le puits Valmy au Nord. Ce site permettait également de répondre à l'exigence contractuelle consistant à utiliser le canal, pour évacuer les 240 000 m<sup>3</sup> générés par le creusement du tunnel, et de faciliter l'approvisionnement par voie d'eau des 14 140 voussoirs constituant le revêtement définitif. Le transport par barge a ainsi permis d'éviter le recours à plus de 20 000 camions.

L'aire disponible en surface laissait la possibilité de construire un puits dont la longueur intérieure ne pouvait excéder 41 m, pour y installer un tunnelier dont les caractéristiques habituelles en marche « courante », nécessitent le double !

Néanmoins, cette emprise exiguë sur la rive droite du canal suffisait à la réalisation des parois moulées de cet ouvrage. Cependant, pour le creusement du tunnel, la logistique d'évacuation des déblais a été optimisée. En effet, compte tenu de la nature

des terrains rencontrés et leur saturation en eau, la pente prévue pour le convoyeur incliné initialement imaginée lors de l'étude rendait risquée cette solution, pour remonter les déblais du tunnel depuis le fond du puits jusqu'à la surface. Consultations et visites de chantiers comparables en Europe ont conduit à l'installation d'un convoyeur vertical, ce qui constituait une première en France. Les 2 bandes transporteuses qui le composent, par système astucieux de galets et de tendeurs, vont enserrer les déblais provenant du convoyeur horizontal depuis le tunnelier, pour les remonter verticalement sur une vingtaine de mètres jusqu'à la surface. Le système a fait ses preuves dans les terrains meubles sous nappe rencontrés, et s'est avéré l'outil approprié. Ce problème résolu, il fallait aussi mettre en configuration le chantier en surface, pour s'adapter aux cadences de pointe du tunnelier. Pour que le marinage des déblais ne se trouve pas sur le chemin critique, au risque de freiner le creusement du tunnelier, il fallait disposer d'emprises de surfaces plus étendues que celles prévues. Après sollicitation des services de la Navigation, il a été proposé d'utiliser une emprise supplémentaire, de l'autre côté du canal. Aussi, pour assurer la poursuite du cheminement des déblais depuis le haut du puits, le convoyeur vertical s'est vu prolonger par un nouveau convoyeur, horizontal cette fois, enjambant le canal, par le biais d'une passerelle métal-

lique construite à cet effet. En fin de parcours, il alimente à son extrémité 2 bacs de 1 000 m<sup>3</sup>, servant de tampon et de tri (dans le cas de pollution) pour le chargement régulier des déblais par une pelle hydraulique sur les barges navigant sur le canal.

### La porte de la Chapelle

Autre site délicat, celui permettant le raccordement du nouveau prolongement sur le réseau existant, à la porte de la Chapelle. En effet, il se situe à l'aplomb d'un nœud routier stratégique de l'Île-de-France, le raccordement de l'autoroute du Nord, avec le périphérique parisien. Ces 2 axes, en surélévation par rapport au terrain naturel, appuient leurs structures sur des fondations, dont les ouvrages à construire pour le raccordement interceptent les zones d'influence du sous-sol qui les supporte. C'est aussi la zone où il faut sortir le tunnelier au bout de ses 1 800 premiers mètres depuis le pont de Stains. Le puits réalisé à cet effet servira par la suite de puits de ventilation et d'accès pompiers.

L'autre difficulté à prendre en compte est la faible profondeur de l'existant au droit du raccordement, que ce soit pour la partie à réaliser en méthode traditionnelle (tunnel cadre sur 20 m et tunnel voûté sur 33 m), que pour la fin du tronçon au tunnelier, puisque la couverture n'excède pas 1 diamètre. La très grande proximité des fondations des existants se rajoute donc à leur présence. ▷



## L'APPRÉHENSION DES OBSTACLES

En complément des classiques mesures de nivellement continu, les ouvrages sensibles évoqués ci-dessus ont conduit à la mise en œuvre de systèmes de vérinage permettant de compenser d'éventuels tassements différentiels. Mais une part importante des travaux de consolidation préalables, principalement par jet grouting, a été réalisée à proximité de tous les appuis de l'A1, nécessitant l'amenée de matériels compacts (espaces réduits en hauteur notamment), et de nombreux forages à forte inclinaison.

D'autres ouvrages ont nécessité la prise en compte de dispositions particulières, afin d'assurer leur stabilité.

→ **Le canal Saint-Denis.** Premier obstacle à franchir par le tunnelier au démarrage au pont de Stains, un traitement par injection, à partir de 2 puits traditionnels, descendus à 10 m de profondeur, a permis d'en consolider le fond.

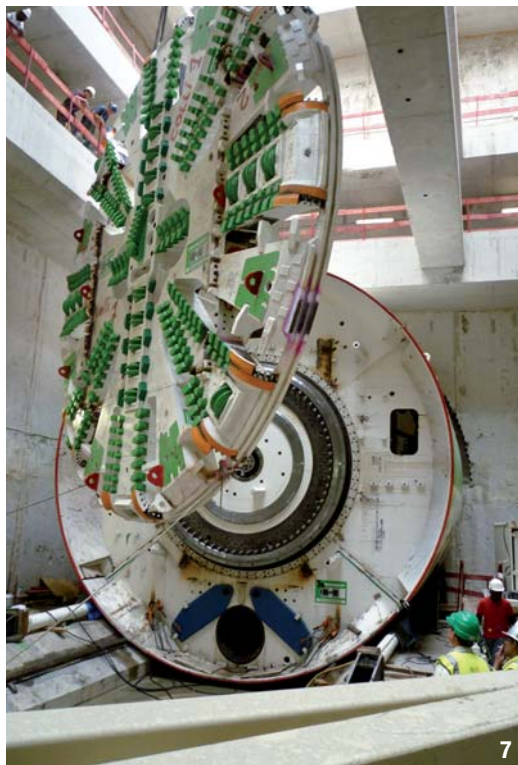
→ **La galerie du Syndicat des eaux d'Ile-de-France.** Une canalisation structurante de diamètre 1,25 m pour le transport d'eau potable dans le Nord parisien est installée à l'intérieur d'une galerie visitable. L'état dégradé de cette dernière a nécessité un renforcement par pose de profilés métalliques par une équipe de plongeurs.

→ **Les collecteurs du Conseil Général de Seine-Saint-Denis.** Les parois moulées de deux ouvrages verticaux tangentiaient de quelques centimètres seulement, exigüité des sites oblige, des ovoïdes en service. Leur renforcement a, lui aussi, été assuré par la pose d'étalement en intrados.

## LE LOT S1 : CONSTRUCTION DE LA STATION « FRONT POPULAIRE »

Constituant l'un des éléments structurants visible par le public, une attention toute particulière a été apportée à son architecture par la RATP. Bien que profonde et entièrement enterrée, une section significative du volume de cette nouvelle station sera baignée par un puits de lumière naturelle, traversant la dalle de couverture. Une dalle mezzanine intermédiaire vient compléter l'architecture de la station, avant l'accès aux quais (figure 3).

Longue de 91 m, large de 19 m, les usagers embarqueront à terme dans cette station à 20 m de profondeur. La construction complexe de cette station s'est déroulée en plusieurs



7



8

© RATP

étapes. Tout d'abord, un traitement par injection de coulis a permis de consolider les zones décomprimées reconnues. L'enveloppe verticale a ensuite été constituée de parois moulées d'un mètre d'épaisseur, réalisées par panneaux standards de 7,00 m, descendus à 40 m de profondeur, afin d'y chercher l'ancrage dans les marnes et caillasses.

En complément, compte tenu des perméabilités réellement mesurées, un traitement par injection de la future sous-face du radier a permis d'étanchéifier l'ensemble.

La portée longitudinale importante de cet ouvrage imposait la réalisation des différents planchers structurants, au fur et à mesure du terrassement, à commencer par la dalle de couverture. Une fois coulée, le terrassement en taube a pu s'effectuer par paliers successifs. Cependant, et pour permettre le passage du tunnelier dans cette station, tous les planchers ne pouvaient être immédiatement construits, et ont été substitués provisoirement par des butons métalliques. Une fois le radier coulé, le tunnelier pouvait y faire son entrée, après ses premiers 900 m depuis le pont de Stains (photo 6). Ce n'est qu'une fois le tunnelier reparti en direction de la porte de la Chapelle, que le génie civil de la station pouvait être finalisé, sans que cette prestation n'impacte le creusement du tube.

**7- Montage  
de la roue  
de coupe.**

**8- Tunnel fini –  
une voie posée.**

**7- Mounting  
the cutting  
wheel.**

**8- Finished  
tunnel – one  
track laid.**

Coffrages et étalements spécifiques, isolant totalement ces 2 phases du chantier, ont permis d'atteindre cet objectif (photo 1). Les travaux de génie civil des futurs accès passagers complètent ceux de grande masse.

## LE LOT T1

Ce lot comprend les principaux ouvrages suivants :

→ Un tunnel au tunnelier, sur 3 800 m environ, traversant principalement les sous-sols des communes de Saint-Denis et d'Aubervilliers pour terminer, au Nord, à la Courneuve, à réaliser en deux tronçons.

→ Le puits de travail pour le tunnelier au pont de Stains à Aubervilliers (d'un volume correspondant à une demi-station), commun aux deux tronçons.

→ Le raccordement entre l'actuel terminus de la porte de la Chapelle,

et le nouveau tunnel, réalisé en souterrain, en méthode conventionnelle, sous l'A1 et le périphérique (déjà évoqué plus haut), et intégrant le premier puits de sortie du tunnelier.

→ Quatre autres ouvrages destinés à la ventilation et aux accès de secours, répartis sur le tracé, et dont l'un servira à extraire le tunnelier, une fois achevé son second tronçon vers le Nord.

## ELODIE : UN TUNNELIER DE DERNIÈRE GÉNÉRATION

Le futur tunnel pour le métro est un monotube de 8 m de diamètre intérieur, à 2 voies.

Le contexte hydro-géotechnique conduisait au choix d'un tunnelier à pression de terre. Dès la notification, le groupement d'entreprises confiait à Herrenknecht, constructeur allemand, la fabrication de celui-ci. La mise au point de la conception définitive (aboutissement des offres faites lors de l'étude), et la construction d'un tel outil, représentent un délai d'une année complète. C'est un ensemble de 1 350 tonnes, de plus de 80 m de long et de 9,17 m de diamètre qu'il faut dessiner, construire par parties démontables, assembler en usine, tester à blanc, redémonter entièrement, transporter par voie fluviale, et réassembler au fond du puits du pont de Stains.

Le principe de fonctionnement de ce tunnelier à pression de terre est classique.

Cet équipement de travail intègre de façon simultanée un grand nombre de fonctions très différentes :

→ Le creusement des terrains en assurant la stabilité du front de taille.

→ L'évacuation des déblais vers l'arrière du bouclier, au travers d'une vis pressurisée, permettant la bonne régulation de la pression de terre.

→ La sécurité des opérateurs chargés de son fonctionnement.

→ La construction à l'avancement du revêtement définitif, constitué de voussoirs en béton armé. En complément, un système d'injection du vide annulaire résiduel (entre l'extrados de l'anneau assemblé et le diamètre creusé) est intégré dans l'épaisseur de la jupe, et permet le remplissage en continu par un mortier préparé en surface.

→ Le respect des trajectoires à l'aide d'un système de guidage intégré, permettant la construction de courbes tant en planimétrie qu'en altimétrie. Dans le cadre de ce projet, le tracé comporte des courbes de 250 m de rayon.

→ Quelques options complémentaires équipent cette machine de dernière génération : un système de confinement de la jupe à l'aide d'un coulis de bentonite ; la possibilité de mettre en place un confinement complémentaire par air comprimé, qui permet par ailleurs les interventions de maintenance de la roue de coupe pour les changements d'outils usés ; un caisson de survie, pressurisé et équipé d'une protection anti-feu de 24 h, permettant d'assurer la sécurité des salariés en cas d'incendie.

Ainsi constitué, l'ensemble est apte à remplir sa mission consistant à tra-

verser les calcaires de St-Ouen, les sables de Beauchamp, les marnes et caillasses, le tout avec une pression de nappe de près de 2 bars. Les 3 800 m de l'opération sont découpés en 3 parties : deux tronçons de 1 900 m chacun environ, dont le premier lui-même divisé en deux, avec la traversée de la station Front Populaire au bout de 900 m.

De plus, le contexte du chantier rend difficile la mise en rendement, puisque le temps passé à assembler, mettre en route, déboucher en station, redémarrer, déboucher à nouveau à la Chapelle, tout démonter et réassembler à nouveau au pont de Stains, est bien plus long que le temps à être en régime de croisière. Ainsi, entre son arrivée en pièces détachées, en mai 2009 (photo 7) et son démontage final prévu en février 2012, soit 33 mois, le temps de creusement effectif ne représente que 12 mois ! Mais pendant ces 12 mois, tout doit être méticuleusement réglé : 3 à 4 000 tonnes de déblais extraites du sous-sol quotidiennement, 24h/24 (5j/7), plus de 100 voussoirs à assembler, 150 m<sup>3</sup> de mortier de bourrage à confectionner pour caler définitivement le tunnel dans son nouvel environnement.

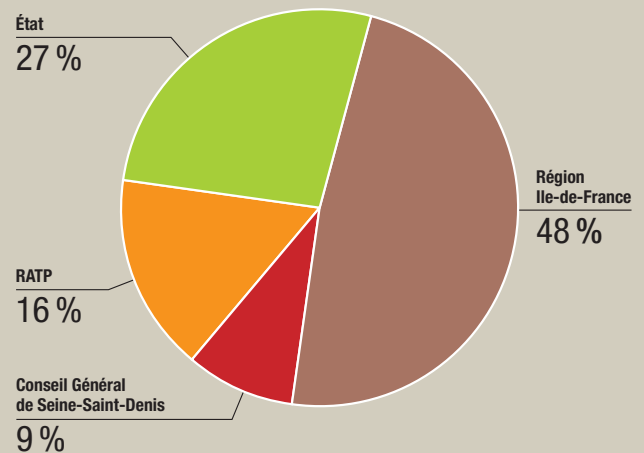
Même si la sophistication et la mécanisation du travail est importante aujourd'hui, la part laissée aux compagnons et à leur encadrement reste considérable. Et pour protéger les équipes et maintenir les traditions, outre Sainte-Barbe, sainte patronne des Travaux souterrains, la RATP a choisi Elodie, conductrice de métro de la ligne 12 comme marraine.

Entre habitués des galeries, le courant ne pouvait que bien passer... et les pilotes du tunnelier, fiers et ravis de faire découvrir à celle qui empruntera le résultat de leur travail, attendront, en retour, d'être conduits par

Elodie dans « leur » tunnel ! (photo 8). Un prochain article permettra de dresser un bilan global de l'opération et d'en décrire les quelques péripéties jusqu'à la mise en service de 2012.

À suivre... □

## FINANCEMENT DE LA PHASE 1 : 240 M€ (VALEUR 2010)



## PRINCIPAUX ACTEURS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** RATP

**MAÎTRE D'ŒUVRE :** Xelis

**GROUPEMENTS D'ENTREPRISES :**

- Pour le lot S1 : Chantiers Modernes - Eiffage TP - TPI
- Pour le lot T1 : Chantiers Modernes - Eiffage TP - Dodin Campenon Bernard

**Pour des raisons d'efficacité et de coordination entre les 2 lots, les 2 groupements ont organisé le chantier en une seule opération, en imbriquant les moyens.**

### ABSTRACT

## EXTENSION OF PARIS METRO LINE 12 FROM PORTE DE LA CHAPELLE TO AUBERVILLIERS: PHASE 1

PHILIPPE MOYAL, RATP - PHILIPPE RAUZY, XÉLIS - PHILIPPE BARBEZ, CHANTIERS MODERNES BTP - PASCAL HAMET, EIFFAGE TRAVAUX PUBLICS

**The first phase of extension of metro line 12, from Porte de la Chapelle to Aubervilliers, is one of the largest underground works projects underway in the Ile-de-France region. Features of this project are a dense urban fabric, a sensitive geotechnical environment, and problematic site installation and operating constraints. The project involves building a 3880-metre tunnel, four ventilation and fire-fighter access structures, and a new station.**

*Civil engineering for the structures is carried out sheltered by diaphragm walls. The tunnel, 3600 metres long and of inside diameter 8 m, is dug using an EPB tunnel boring machine, called Elodie. The final lining consists of concrete segments, placed as work progresses. Given the highly urban environment of the project, the Paris public transport operator RATP is endeavouring to minimise the environmental impact by giving priority to procurements and removal of excavated material by river transport. □*

## PROLONGACIÓN DE LA LÍNEA 12 DEL METRO DE PARÍS DESDE LA PUERTA DE LA CHAPELLE HASTA AUBERVILLIERS: ETAPA 1

PHILIPPE MOYAL, RATP - PHILIPPE RAUZY, XÉLIS - PHILIPPE BARBEZ, CHANTIERS MODERNES BTP - PASCAL HAMET, EIFFAGE TRAVAUX PUBLICS

**La primera etapa de la prolongación de la línea 12 del metro, desde la puerta de la Chapelle hasta Aubervilliers, constituye una de las más importantes obras de trabajos subterráneos en curso de realización en Ile-de-France. Un entramado urbano denso, un contexto geotécnico delicado, diversos imperativos de instalación y de funcionamiento de obra difíciles, constituyen las características de este proyecto. Este último consiste en la construcción de un túnel de 3.880 metros, cuatro estructuras de ventilación y de accesos para los bomberos, así como una nueva estación. La ingeniería civil de las obras se ha ejecutado al resguardo de las pantallas continuas. El túnel, de una longitud de 3.600 metros y de 8 metros de diámetro interior, se ha excavado por medio de una tuneladora a presión de tierra, denominada Elodie. El revestimiento definitivo está formado por dovelas de hormigón, tendidas por empuje. El contexto sumamente urbanizado de la obra ha llevado a la RATP a actuar de modo a minimizar el impacto medioambiental, privilegiando los aprovisionamientos y las evacuaciones de los escombros por vía fluvial. □**





1a- Enceinte en paroi berlinoise permettant la réalisation des forages de compensation.

1a- Chamber in Berlin-type retaining wall allowing performance of compensation grouting drilling.

© SOLETANCHE BACHY



# TUNNEL DE TOULON TUBE SUD INJECTIONS DE COMPENSATION SOUS DEUX BATIMENTS

AUTEURS : ALAIN GUILLOUX, TERRASOL - HERVÉ LE BISSONNAIS, TERRASOL - ROBIN BETEND, SOLETANCHE BACHY - GILLES BOYER, SOLETANCHE BACHY TUNNELS

UN CONTEXTE GÉOLOGIQUE DÉFAVORABLE, UN SITE PARTICULIÈREMENT CONTRAINT... SONT PARMI LES NOMBREUSES DIFFICULTÉS DE CE CHANTIER DU TUNNEL DE TOULON TUBE SUD, SITUÉ DANS UN ENVIRONNEMENT FORTEMENT URBANISÉ ET COMPLEXE. SOLUTIONS MISES EN ŒUVRE : UN SOUTÈNEMENT TRÈS RIGIDE, AVEC RENFORCEMENT DU FRONT PAR COLONNES DE JET GROUTING ET VOÛTE PARAPLUIE, ET RECOURS DANS UNE ZONE À DES INJECTIONS DE COMPENSATION.



© SOLETANCHE BACHY

1b

## UN ENVIRONNEMENT TRÈS DIFFICILE

L'excavation du tube Sud du tunnel de Toulon s'inscrit dans un environnement difficile du fait de sa situation sous le centre-ville ancien de Toulon et de son contexte géologique et géotechnique très complexe.

La zone comprise entre les PM 1670 et 1720 dite « Fabié – Marchand » constitue un « concentré » de ces difficultés.

**1b- Forage en cours pour mise en place des tubes à manchettes métalliques.**

**1b- Drilling in progress for placing tubes with metallic spool pieces.**

En effet, ce secteur est marqué par un contexte géologique défavorable qui a conduit aux plus fortes déformations lors de l'excavation du tube Nord (100 à 150 mm) et par un fontis majeur débouchant en surface ayant conduit à l'arrêt de l'excavation pendant plus d'une année.

De plus, dans le cas du tube Sud, il se trouve directement sous 2 bâtis R+7 datant des années 1950 (nommés K6

– l'Esplanade et K7 – le Dauphin). Dès le début des études du projet en 2003, ce secteur avait été identifié comme étant particulièrement difficile : les deux bâtiments avaient en effet déjà subi des déformations liées au creusement du premier tube et les premières reconnaissances par sondages montraient la présence de terrain de qualité particulièrement médiocre (poches d'argile molle issue de la dissolution du gypse).

Un soutènement très rigide avec renforcement du front par colonnes de jet grouting et voûte parapluie avait été défini, avec recours à des injections de compensation en tranche conditionnelle en cas de déformations trop importantes en surface.

Pour optimiser la sécurité et le délai global de l'opération, il avait également été décidé de réaliser l'excavation de ce secteur par deux attaques intermédiaires (nommées attaque Marchand Ouest et Est) à partir d'un puits d'accès.

## DESCRIPTION GÉOLOGIQUE DU SECTEUR MARCHAND

Le secteur de la rue Fabié et de la voie Tessé se situe en extrémité Est d'une importante zone de charriage, constituée de brèches argilo-silteuses hétérogènes, déstructurées et altérées. La base des brèches est en contact avec les formations du Muschelkalk par l'intermédiaire d'un plan de décollement nommé  $\varphi_2$  situé à proximité du radier du tunnel. Ce plan de chevauchement est caractérisé par la présence de gypse, au toit du Muschelkalk. ▷

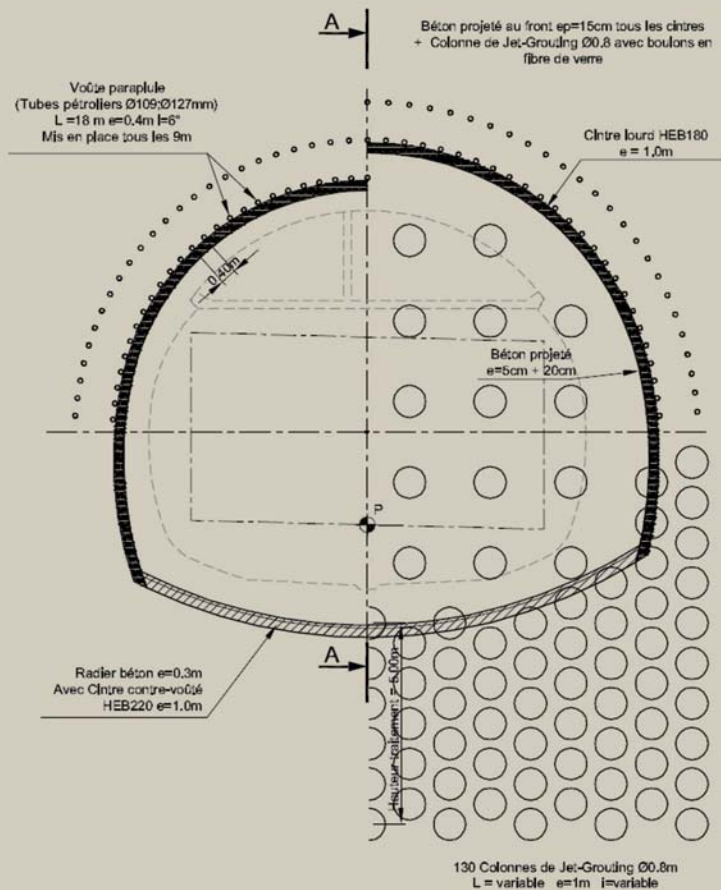


## ZONE MARCHAND - GÉOLOGIE



2

## PROFIL PS8 DÉFINI AU MARCHÉ



3

Ce gypse a tendance à se décomposer localement en présence d'eau, en formant une argile noire très plastique. Le radier du tunnel est situé à environ 40 m de profondeur.

La zone délicate concerne environ 38 ml à l'Est du puits intermédiaire, avec environ 20 ml sous le bâti.

Le secteur a fait l'objet de très nombreux sondages (forages carottés, sondages pressiométriques) et d'un plot d'essais en 2006 pour tester la faisabilité de réalisation de colonnes de jet grouting et d'injections dans ces formations.

Ces reconnaissances ont permis :

- De confirmer la présence de poches d'argile molle noire, issue de la dissolution du gypse à proximité de la semelle de charriage. Ces poches sont majoritairement situées en partie inférieure de la section d'excavation et sous le radier du tunnel ;
- De confirmer la faisabilité du traitement par jet grouting des pélites et des brèches du permien charrié ;
- De montrer la faible efficacité de traitement par injection et l'extrême réactivité du terrain (plusieurs cm de

soulèvement en surface avec des injections à plus de 35 m de profondeur).

### HISTORIQUE DE L'ATTAQUE MARCHAND CHOIX DE LA MÉTHODE DE CREUSEMENT

À l'issue des études projet et du plot d'essai, après avoir examiné avec le maître d'ouvrage et ses assistants

(CETU, CETE, groupe d'experts) la faisabilité d'un grand nombre de méthodes envisageables (entre autres : excavation phasée de type nouvelle méthode autrichienne, pré-soutènement en voûte parapluie par tubes foncés ou réalisés par micro-tunnelier avec remplissage béton), il a été retenu une méthode ayant déjà fait ses preuves lors de la reprise du creu-

sement du tube Nord après le fontis. Cette méthode (figure 3) consiste à renforcer de manière très importante la section d'excavation et la zone située sous le radier par colonnes de jet grouting subhorizontales, complété par une voûte parapluie particulièrement rigide (50 tubes parapluies de 18 ml, diamètres 109/127 mis en place tous les 9 ml).



4

2- Zone Marchand – géologie.

3- Profil PS8 défini au marché.

4- Front au PM 1701 le 02/03/2009.

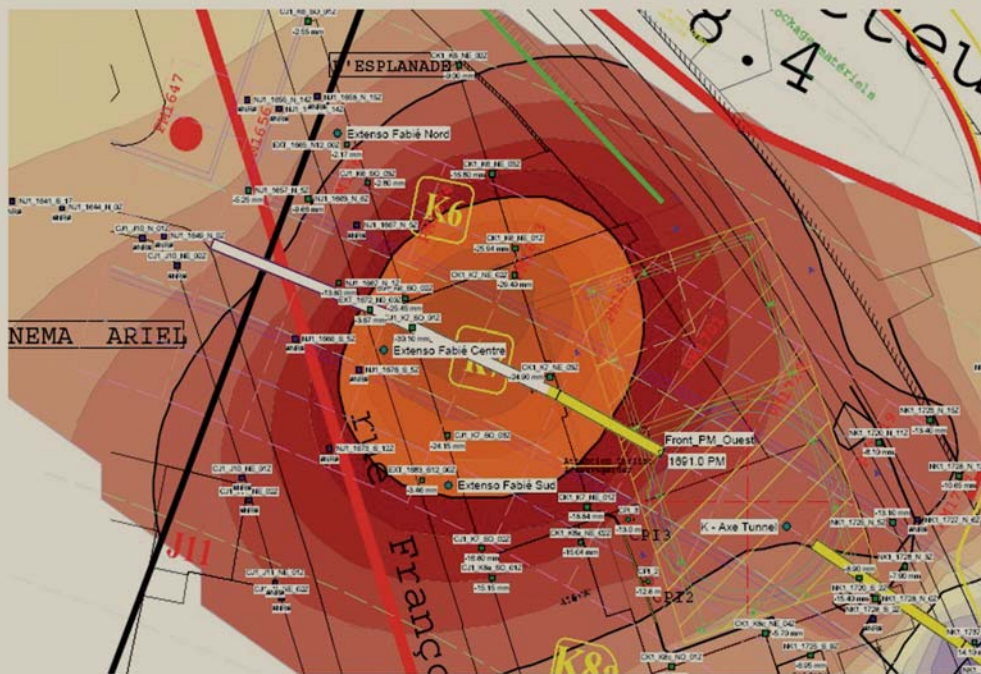
2- Marchand area – geology.

3- PS8 profile defined in the contract.

4- Tunnel face at PM 1701 on 2.3.2009.

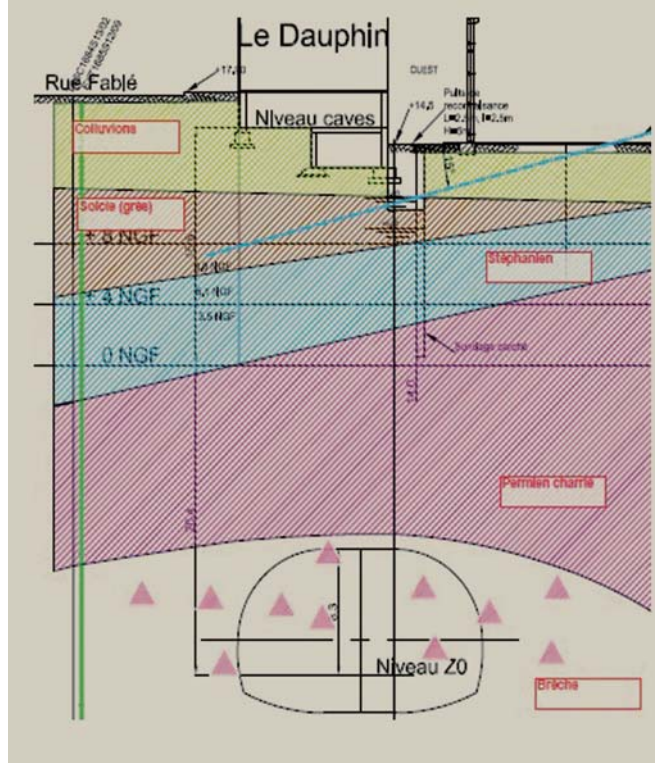


## CUVETTE DE TASSEMENT



5

## IMPLANTATION DU MATELAS DE RÉPARTITION



6

5- Cuvette de tassement.  
6- Implantation du matelas de répartition.

5- Subsidence basin.  
6- Layout of load distributing mattress.

### DÉBUT DES TRAVAUX D'EXCAVATION

Le puits Marchand (16 m de diamètre) a été réalisé en paroi moulée de 1,2 m d'épaisseur et 55 m de profondeur à l'aide d'une hydrofraise. Le radier se situe à 38 m de profondeur. Le front de l'attaque vers l'Ouest est à quelques mètres de la façade du bâtiment K7. Bien qu'aucune difficulté particulière n'ait été constatée, la réalisation des différentes opérations à proximité des bâtis (paroi moulée, terrassements de puits, sondages de reconnaissance, voûte parapluie, colonnes de jet grouting) a conduit à environ 12 mm de tassement du K7, confirmant la sensibilité du terrain.

Dès le démarrage de l'attaque Ouest parapluie) : si au droit de l'excavation, le terrain était de nature compacte avec des déformations en tunnel et en surface tout à fait normales et conformes aux prévisions, il a été constaté des déformations en surface très en avant du front et nettement supérieures aux

prévisions : en effet, à plus de 25 m du front, il était mesuré après 9 m d'excavation plusieurs millimètres de tassement avec des vitesses de l'ordre de 0,5 mm/j, au niveau de la façade Ouest des bâtiments K6 et K7. Une cuvette centrée à la jonction des deux bâtiments commençait à se former, dans une zone que le traitement par colonnes de jet grouting n'avait pas encore pu atteindre (figure 4). De plus, le bâti K6 (R+7) commençait à subir des désordres significatifs sur le second œuvre alors que les tassements mesurés en surface étaient relativement faibles (de l'ordre de 25 mm). Le bâtiment K7, avec un niveau de déformation légèrement plus important, se comportait de manière plus normale, sans désordre significatif. Après avoir réalisé le traitement par jet grouting prévu au marché sur toute la zone située sous le bâti, les prévisions de déformations maximales effectuées par les différents intervenants étaient pour les tassements absolus de l'ordre de 60 à 70 mm (figure 5), avec des tassements différentiels de 1,8 ‰, soit de l'ordre de grandeur des seuils d'alerte fixés au marché pour ce secteur (66 mm en absolu et 1,8 mm/m en différentiel).

Vu le comportement anormal du bâtiment K6 et le niveau de déformation envisagé, le Bureau Veritas, en charge du suivi du bâti pour le maître d'ouvrage, a estimé que le bâti ne serait pas capable de supporter les déformations supplémentaires générées par le passage du tunnel.

L'arrêt de l'excavation a alors été demandé par le maître d'ouvrage, avec un tassement absolu qui avait atteint 32 mm pour le K6.

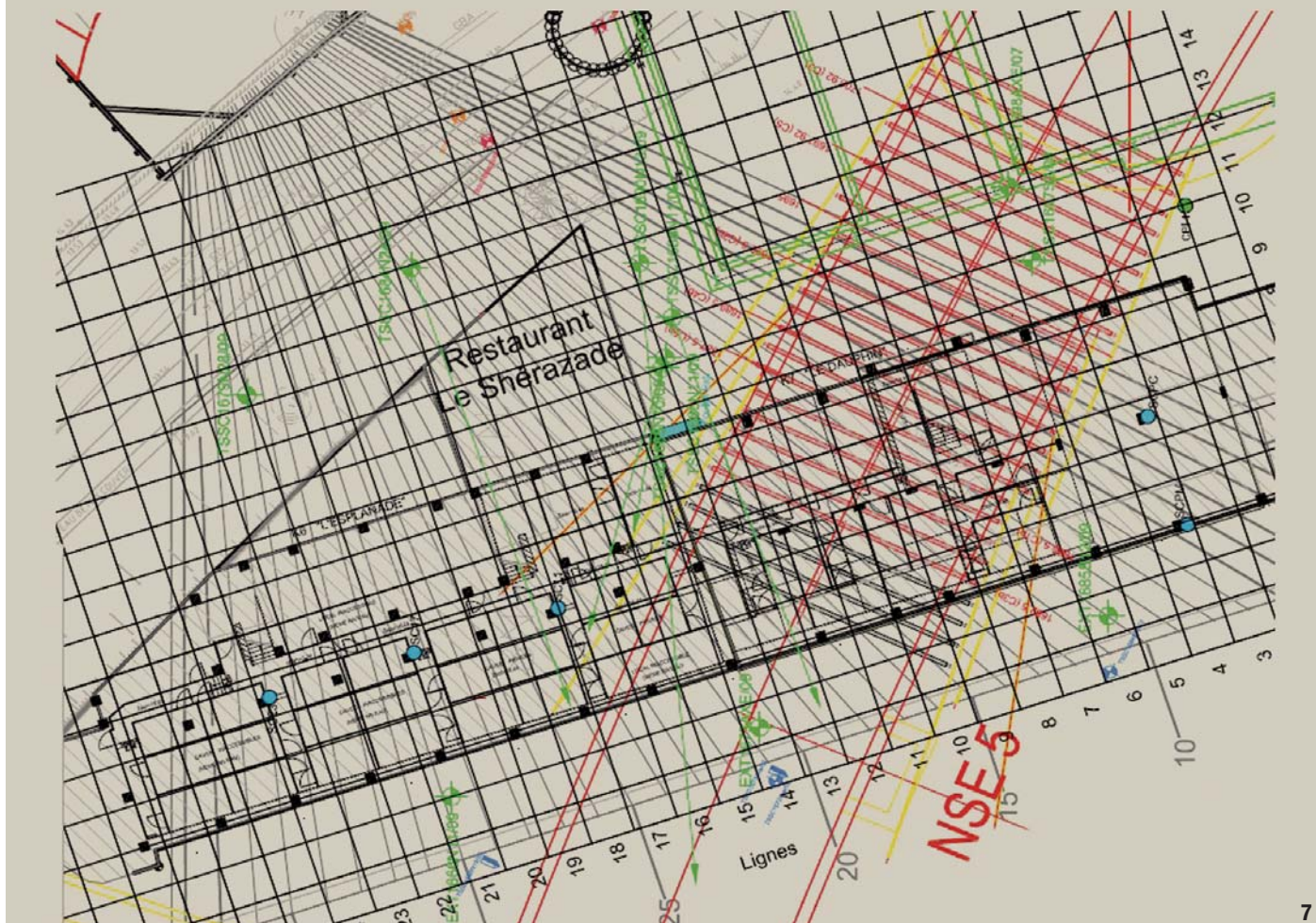
Plusieurs solutions ont été envisagées pour la poursuite de l'excavation :

- Un confortement du bâti avec mise en place de renforts métalliques à partir des caves ;
- Une évacuation du bâtiment avec la poursuite du creusement selon la méthode de base renforcée puis la réparation de l'immeuble ;
- La solution injection de compensation envisagée en tranche conditionnelle au marché. Cette solution ne faisait pas l'unanimité des intervenants du fait de l'absence de retour d'expérience dans un terrain aussi hétérogène que le sous-sol de Toulon et de la nécessité d'imposer des critères particulièrement stricts vis-à-vis des déformations du bâti encore acceptables, en limite de ce qui avait déjà pu être réalisé sur d'autres expériences similaires.

►



## IMPLANTATION DES FORAGES POUR INJECTION



7 © SOLETOUCHE BACHY

La première solution a d'abord été retenue et étudiée de manière approfondie par le Bureau Veritas, pour finalement aboutir à une impossibilité technique du fait d'une structure des fondations plus complexe que prévue (découverte lors des reconnaissances complémentaires d'une file d'appuis intermédiaires non connue lors du diagnostic du bâti).

De ce fait, il a finalement été décidé de mettre en place un dispositif d'injections de compensation dans le terrain sous les fondations des immeubles K6 et K7 afin de limiter les tassements lors de la reprise, et d'éventuellement redresser les bâtiments au préalable. Des critères très stricts d'augmentation acceptables de tassements différentiels ont été imposés, afin de limiter toutes nouvelles dégradations structurelles du bâti.

Ces critères d'augmentation ou de diminution de la pente initiale ont été fixés entre les 2 limites suivantes : +1.2 ‰ en soulèvement et -0.5 ‰ en tassement.

### PRÉSENTATION DU DISPOSITIF PRINCIPE DES INJECTIONS DE COMPENSATION

Le principe de base des injections de compensation est d'éviter le tassement en surface lié à l'excavation, en injectant des quantités de coulis dosées avec précision entre le tunnel et le bâtiment. La localisation des points d'injection et les quantités de coulis mises en œuvre sont adaptées en permanence aux différentes mesures réalisées sur le bâtiment et sur le terrain en temps réel. Les injections de compensation nécessitent trois phases principales :

- La réalisation d'un matelas de répartition entre le tunnel et le bâti par injection de coulis à partir de forages subhorizontaux ;
- Une phase de conditionnement servant à étalonner le dispositif, complétée pour ce chantier par un pré-soulèvement ;
- Une phase de compensation pendant l'excavation du tunnel sous les bâtis.

### 7- Implantation des forages pour injection. 8- Plate-forme d'injection.

### 7- Layout of boreholes for grout injection. 8- Grout injection platform.

### LE MATELAS DE RÉPARTITION

La première difficulté du projet d'injection de compensation appliqué aux bâtiments K6 et K7 a été de déterminer la position du matelas de répartition, en fonction de la position des fondations et de la nature géologique du sous sol. D'importantes reconnaissances complémentaires du niveau de fondations des bâtiments ont été menées depuis les



8

© SOLETOUCHE BACHY



caves et en façade extérieure (fouilles manuelles, sondages carottés de 3 à 5 ml), montrant une altitude très variable de la base des semelles superficielles. De nouveaux sondages de reconnaissance ont également été réalisés pour montrer que les variations importantes des faciès situés sous les fondations (colluvions, socle gréseux, lambeaux de schiste du Stéphien, pélites du Permien) ne permettaient pas d'implanter la totalité des forages dans une seule formation homogène (figure 6).

**9- Dispositif d'auscultation sur le bâtiment K6.**

**10- Schéma du dispositif d'injection.**

**9- Monitoring system on building K6.**

**10- Schematic of the grout injection system.**

Plutôt que de rechercher une géologie homogène nécessitant d'approfondir la fosse nécessaire à la réalisation des forages ou la réalisation de forages inclinés, une position du matelas de répartition relativement proche des semelles (entre 5 et 10 m) a été retenue. Pour réaliser ces forages en limitant leurs inclinaisons et leurs longueurs, plusieurs solutions ont été étudiées :

→ Réalisation des forages depuis une plate-forme intermédiaire implantée dans le puits Marchand existant :

l'intérêt de cette solution était d'éviter la réalisation de nouveaux terrassements, et d'avoir la possibilité de réaliser les forages à une profondeur plus importante. Cette solution n'a pas été retenue car elle nécessitait la réalisation de forages de grande longueur pour atteindre l'ensemble de la zone à compenser ;

→ Réalisation de nouveaux puits de diamètre plus réduits : cette solution permettait de mieux optimiser les longueurs de forages, mais elle a également été écartée car elle nécessitait la réalisation de deux nouveaux ouvrages importants et conduisait à une surface de travail réduite pour chaque zone d'injection ;

→ Réalisation d'une plate-forme en tranchée : cette dernière solution a été finalement retenue car elle permettait, avec des terrassements relativement réduits sans ouvrage de soutènement complexe, d'avoir rapidement une plate-forme de surface importante.

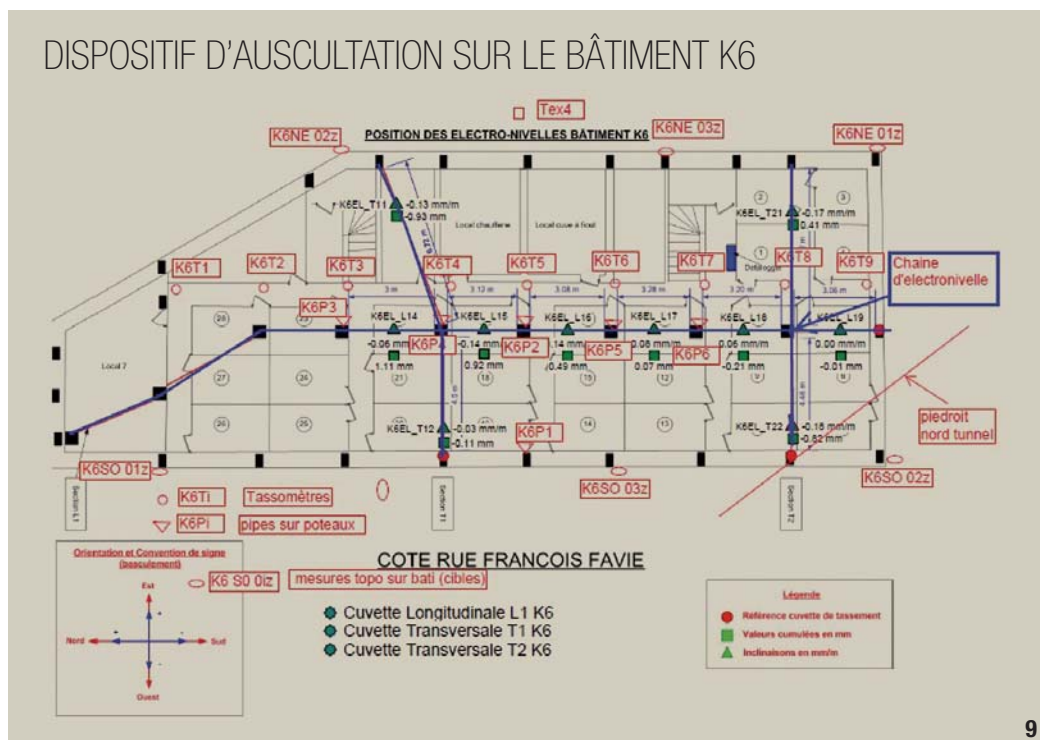
Le dispositif final se compose de 57 forages pseudo-horizontaux de 40 m en moyenne (jusqu'à 55 m) répartis en 3 lits situés entre 5 et 12 m de profondeur. Chaque forage est équipé de tubes métalliques à manchettes (2", soit 51 mm de diamètre) permettant d'injecter du coulis de ciment en tout point sous le bâti (figure 7).

Les tubes métalliques, plutôt que des tubes PVC classiquement utilisés ont été retenus car ils permettaient d'avoir une meilleure résistance aux multiples reprises d'injections sélectives à l'obturateur double ainsi qu'aux pressions générées lors des injections adjacentes et aux nettoyages sous haute pression. Le rôle de renforcement mécanique du matelas ainsi armé de trois nappes de tubes métallique a également été évoqué, bien que cet effet soit difficile à quantifier (photo 8).

Afin de limiter les tassements pendant la phase de mise en place des tubes d'injection, plusieurs méthodes de foration ont été envisagées : forage carotté ou destructif classique, forage avec outils perdus (méthode RTA), forage avec une machine *sonic drilling* (vibration à très haute fréquence d'un tube de 140 mm de diamètre équipé d'une couronne creuse destructurant le terrain par résonance). Pour tester cette dernière méthode encore peu utilisée en France, plusieurs essais ont été réalisés :

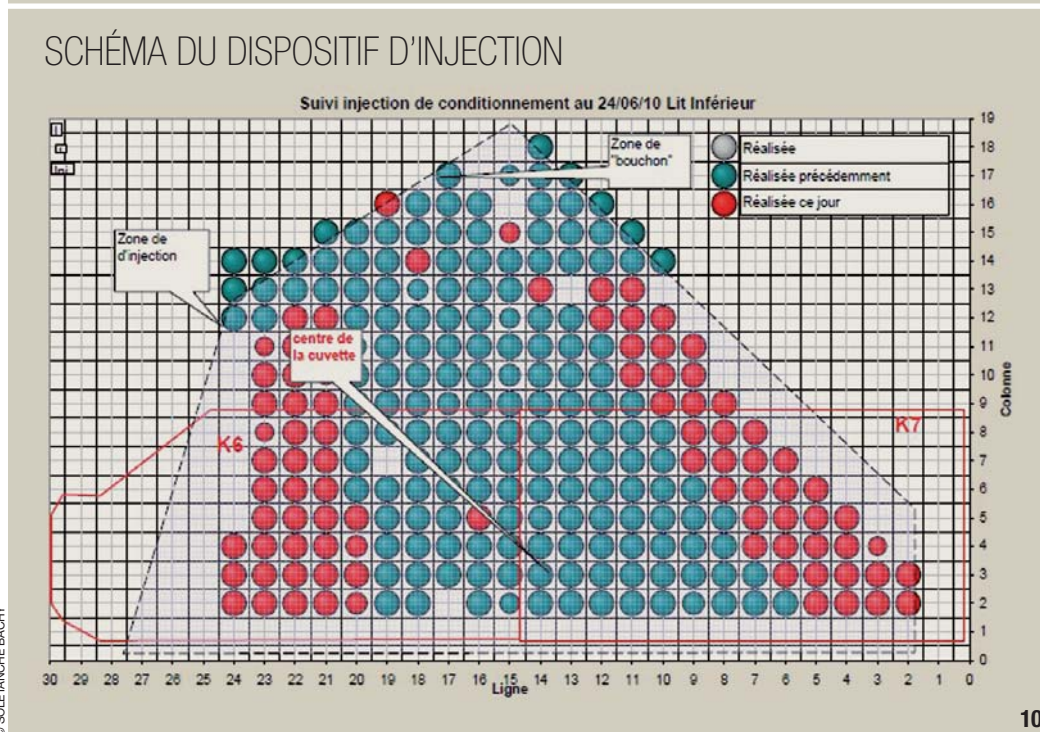
→ Forage destructif avec outil perdu pleine face sur 40 ml équipé en tube PVC ;

**DISPOSITIF D'AUSCULTATION SUR LE BÂTIMENT K6**



9

**SCHÉMA DU DISPOSITIF D'INJECTION**



10



→ Forage destructif avec outil type « couronne ouverte » sur 40 ml équipé en tube métallique ;

→ Forage destructif à sec avec 2 types d'outils (outil Fishtail, outil perdu pleine face) équipés en tube PVC. L'essai à sec a été interrompu à 7,72 m et prolongé jusqu'à 55 m avec de l'eau ;

→ Forage carotté à sec sur 40 ml équipé en tube PVC.

Ces 4 tests de forages ont permis de montrer que la méthode *sonic* était bien adaptée au contexte sensible et hétérogène du site. Les quatre forages ont pu atteindre leur objectif, soit 40 à 55 m de foration sans que l'on mesure des tassements significatifs sur le bâti (topo et électro-nivelles), tout en respectant les critères de déviation recherchés. Il a également été mis en évidence que :

→ La méthode *sonic* à sec ne fonctionne pas correctement dans ces terrains (un minimum d'eau est nécessaire, sinon on constate un échauffement trop important de la tête) ;

→ Les déviations mesurées par trajectométrie ont montré une bonne précision des forages, quelle que soit la méthode (de l'ordre de 0,5° à 0,6°, soit 35 à 40 cm sur 40 m).

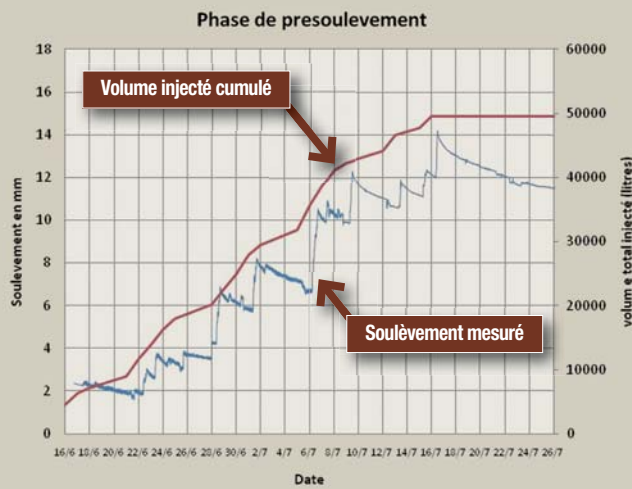
La méthode par forage *sonic drilling* destructif avec un outil perdu type couronne pleine face a été retenue : elle permettait de limiter l'apport d'eau lors du forage (19 m<sup>3</sup> pour 40 ml au lieu de 75 à 100 m<sup>3</sup> pour les forages RTA), une bonne maîtrise de la trajectoire, une compaction locale du terrain autour du tube et des vitesses d'avancement raisonnables et ce, sans provoquer de tassements lors du test.

## DISPOSITIF D'AUSCULTATION

La réalisation des injections de compensation nécessite un système d'auscultation complexe et automatique permettant de suivre les mouvements du bâti très précisément et en temps réel. Le dispositif initialement mis en place a été largement renforcé pour aboutir à l'ensemble suivant (figure 9) :

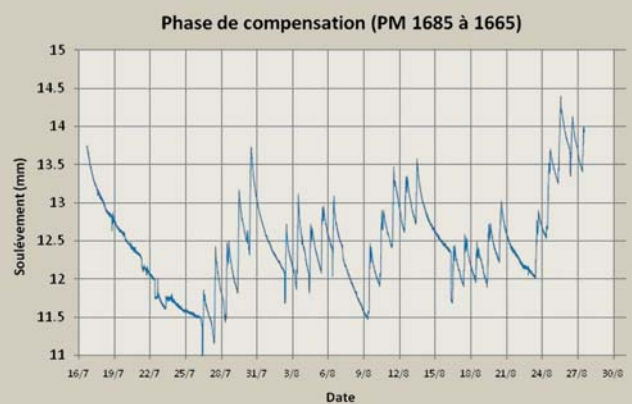
→ Un réseau de 36 électro-nivelles disposées dans les caves. Les électro-nivelles automatisées permettent une mesure très précise de l'inclinaison locale du bâti ; en les reliant entre elles pour former une chaîne, elles permettent de calculer les tassements différentiels longitudinaux et transversaux et les tassements absolus au droit des poteaux des bâtiments. Trois chaînes longitudinales d'électro-nivelles ont été formées (deux sous le K6 et une sous le K7). Le matériel permettait de réaliser une mesure toutes les 4 minutes, et

## SOULÈVEMENT ET VOLUME INJECTÉ



11

## COMPENSATION PENDANT LE CREUSEMENT SOUS BÂTI (SOULÈVEMENT RELATIF MESURÉ SUR ÉLECTRO-NIVELLE)



12

**11- Soulèvement et volume injecté.**

**12- Compensation grouting pendant le creusement sous bâti (soulèvement relatif mesuré sur électro-nivelle).**

**11- Uplift and volume injected.**

**12- Compensation grouting during excavation under buildings (relative uplift measured on electronic level gauge).**

un transfert immédiat sur la base de données Geoscope ;

→ Plus de cinquante cibles topographiques disposées sur les façades extérieures mesurées par quatre théodolites automatisés (fréquence maximale : 1 mesure toutes les 8 minutes) ;

→ Des tassomètres mis en place dans les caves mesurés manuellement ;

→ Des pipes de tassements (mesures topos classiques disposées sur les poteaux) ;

→ De 3 extensomètres en forage sur la rue Fabié ;

→ De jauges de contrainte sur les structures poteaux + poutres ;

→ De fissuromètres au droit des principales fissures recensées dans les appartements ;

→ Des mesures en galerie (convergences, extrusions du front) à partir d'un théodolite automatisé ;

→ Mise en place d'un extrusimètre au front.

L'ensemble des mesures (automatisée ou manuelles) était consultable par internet, sous forme de graphiques sur la base de donnée Geoscope mis en place par SolData.

## PILOTAGE DES TRAVAUX - RETOUR D'EXPÉRIENCE

### PHASE DE FORATION

La phase de foration pour la mise en place des tubes d'injection a permis de confirmer la bonne adéquation de la méthode *sonic drilling* et de tester la fiabilité et la précision du dispositif d'auscultation.

Il a d'abord été constaté :

→ Que les forages ne provoquaient pas de tassements supplémentaires : au contraire, un léger soulèvement millimétrique du bâti a été enregistré en fin de phase de foration ;

→ Une très grande précision des électro-nivelles ;

→ Une bonne maîtrise de l'inclinaison des forages (déviations mesurées en moyenne inférieures au degré) ;

→ Un avancement tout à fait satisfaisant de la foration.

### PHASE DE CONDITIONNEMENT

La mise en place des 57 forages avec des manchettes tous les 33 cm permettait de disposer d'un réseau de 297 cellules d'une surface de 2 m x 2 m. Chaque cellule disposait d'environ 10 points d'injections répartis sur les 3 lits (figure 10).

Les injections ont démarré par une phase dite de « conditionnement – pré-soulèvement ». Cette première phase poursuivait trois objectifs :

→ Tout d'abord, consolider et resserrer le terrain afin d'homogénéiser son comportement vis-à-vis des injections ;

→ Tester le dispositif et définir les quantités à injecter par manchette pour la phase de pré-soulèvement puis de compensation ;

→ Ensuite, réaliser un pré-soulèvement du bâti avant la reprise de l'excavation à partir du lit intermédiaire.

Le conditionnement a été d'abord essentiellement réalisé à partir du lit de forage supérieur puis inférieur.

Les injections par le lit médian ont été testées sur la fin de cette phase.

Cette phase de conditionnement a été réalisée en 28 jours (8 juin au 16 juillet 2010) ; les quantités injectées ont été d'abord de l'ordre de quelques centaines de litres par jour à partir d'un vingtain de manchettes (30 litres max. par manchette, avec une pression limitée à 10 bars), puis, compte tenu de la bonne réactivité du bâtiment sans

création de désordres complémentaires, le nombre de manchettes et le volume total injecté ont été progressivement augmentés, jusqu'à 3 900 litres par jour sur 130 manchettes.

Au total, 1 730 passes d'injection ont été réalisées, conduisant à la mise en place de 50 m<sup>3</sup> de coulis de bentonite ciment.

Le dispositif de suivi, et plus particulièrement les chaînes d'électro-nivelles ont permis de mettre en évidence la bonne proportionnalité entre les volumes injectés et les soulèvements mesurés : on constate par exemple un soulèvement de 3,3 mm le 6/07 pour un volume injecté de 3 900 litres ; on constate également un phénomène de relaxation lié à la dissipation des pressions interstitielles, conduisant à un tassement lors des phases d'arrêt des injections pouvant atteindre quasiment 50 % du soulèvement (figure 11).

À la fin de ces travaux préparatoires, le pré-soulèvement a atteint 10 à 12 mm au maximum au centre de la cuvette de tassement. De même, cette phase a permis de réduire les pentes mesurées sur les façades extérieures : parallèlement aux façades, on constate une diminution significative, avec une valeur de la pente longitudinale passant de 1,3 ‰ à 1,1 ‰. Transversalement, les pentes sont restées globalement stables ; aucun mouvement significatif

en tunnel n'a été mesuré (ni convergence du soutènement, ni extrusion du front).

Cette phase a permis d'estimer le coefficient d'efficacité, coefficient correspondant au rapport volume injecté sur volume soulevé : les estimations ont permis de montrer que ce coefficient était de l'ordre de 5,5 à 6,6 pour le lit inférieur, 4,5 pour le lit médian et 5 pour le lit supérieur. Ces valeurs étaient conformes aux valeurs disponibles dans la bibliographie (généralement comprises entre 3 et 7).

À partir de ce coefficient d'efficacité, le volume de coulis nécessaire pour compenser le tassement lié au creusement du tunnel a été défini : il a été

estimé que pour compenser un tassement de l'ordre de 0,5 mm/j au centre de la cuvette, 50 cellules devaient être injectées (soit 1,5 m<sup>3</sup>).

### PHASE DE COMPENSATION

Après ces étapes de préparation du dispositif, l'excavation a pu reprendre mi-juillet 2010 et les injections dites de « compensation » ont démarré.

La méthode consiste à injecter du coulis chaque jour de manière à créer des soulèvements permettant de compenser le tassement mesurés ou estimés la veille.

Ces injections sont donc réalisées de manière très ciblée sous certaines zones du bâti, à partir du lit de forages intermédiaires. Le programme d'injection de la journée est décidé de manière tripartite à l'occasion de réunions de pilotage entre le Bureau Veritas, le groupement d'entreprises et le maître d'œuvre.

Le creusement du tunnel a repris avec un rythme de l'ordre de 1 m/jour.

Le nombre de cellules injectées a été compris entre 40 et 70 manchettes par jour.

Le soulèvement journalier nécessaire pour compenser le tassement lié au creusement a été conforme aux prévisions établies en fin de phase de conditionnement : environ 1,2 mm de soulèvement étaient mesurés la journée.

Il était enregistré ensuite une relaxation sur 12 h de l'ordre de 0,3 à 0,5 mm. Pendant les arrêts plus longs (WE), la relaxation atteignait environ 1,5 mm.

Il a également été constaté une réactivité quasi-immédiate du bâti vis-à-vis des sollicitations du coulis : dès le début des injections, un soulèvement était mesuré sur les électro-nivelles, permettant de contrôler de manière très précise la compensation et d'adapter en permanence la localisation et les quantités de coulis injecté.

La figure 12 (soulèvement relatif calculé sur l'électro-nivelle L19 située au centre de la cuvette) permet de mettre en évidence l'effet de chaque injection journalière (soulèvement de l'ordre de 1,2 mm), suivi par une phase de relaxation débutant immédiatement après l'arrêt des injections.

Après plus de 20 ml d'excavation sous les bâtiments et un tassement « compensé » estimé à 13 mm, les bâtis ont pu être maintenus en permanence dans leur position initiale avant reprise du creusement à plus ou moins 1 mm tout en respectant les seuils de tassements différentiels.

La phase de compensation a ensuite été maintenue pendant environ deux mois supplémentaires jusqu'à ce que le front du tunnel ait dépassé les bâtiments de plus de 40 m (jusqu'au PM1615). Ce maintien (avec des quantités injectées réduites petit à petit) a permis de limiter l'effet de relaxation (2 mm de tassement mesurés).

Après l'arrêt de la phase proprement dite de compensation par injection, le dispositif d'auscultation est resté opérationnel, afin de contrôler l'évolution des déformations.

L'ensemble du dispositif d'injection restait également opérationnel, afin de pouvoir intervenir immédiatement en cas d'évolution anormale des tassements.

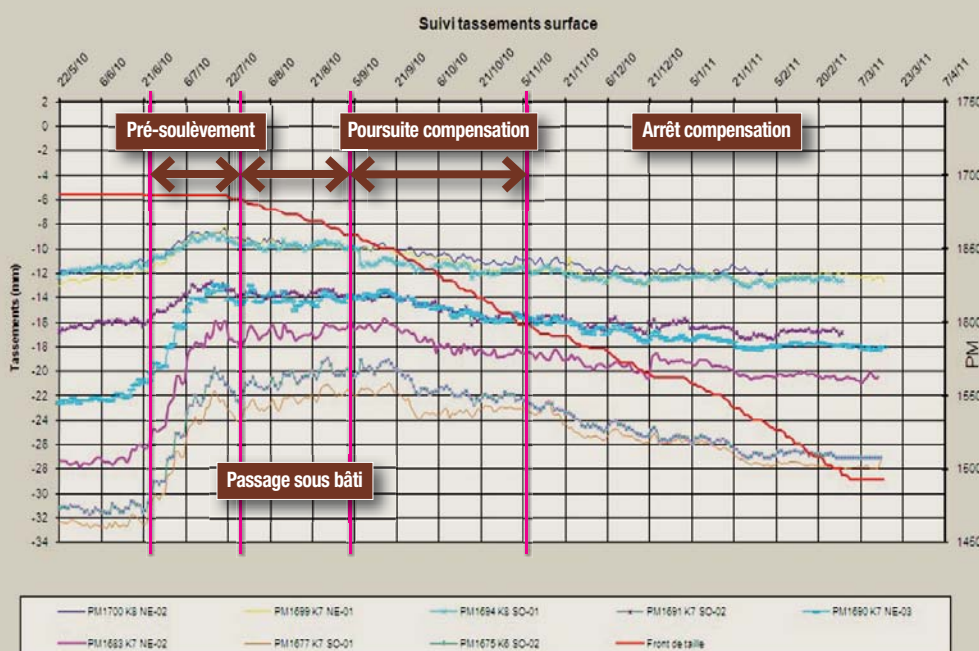
Cette phase de veille a été maintenue pendant toute la durée du creusement du rameau 8, rameau situé à proximité du bâti K6, mais il n'a pas été nécessaire de procéder à de nouvelles injections (tassement complémentaire millimétrique, lié à la poursuite de la relaxation du terrain et à la dissipation des surpressions provoquées par les injections).

Après stabilisation complète des tassements, il a été constaté un tassement maximal total provoqué par la reprise du creusement du tunnel de l'ordre de 6 mm, soit environ la moitié du soulèvement obtenu en phase de conditionnement (figure 13).

### 13- Suivi topographique du tassement en surface pendant et après reprise du creusement.

### 13- Topographic monitoring of surface subsidence during and after resumption of excavation.

## SUIVI TOPOGRAPHIQUE DU TASSEMENT EN SURFACE PENDANT ET APRÈS REPRISSE DU CREUSEMENT





**CONCLUSION**

Pour une première application de la méthode en France, les injections de compensation ont parfaitement rempli leur rôle, en permettant la reprise du creusement sans provoquer de tassements significatifs et donc de désordres complémentaires sur les bâtis K6 et K7.

De nombreux enseignements ont pu être mis en évidence :

→ La réalisation de forages horizontaux par la méthode *sonic drilling* permet d'éviter tous tassements liés à

la foration et mise en place des tubes d'injection ;

→ L'hétérogénéité des formations géologiques sous les bâtiments n'est pas incompatible avec la mise en œuvre de la méthode qui passe par la réalisation d'un matelas de répartition efficace ;

→ La précision du dispositif d'auscultation (mesures topographiques automatisées et électro-nivelles) associée à un maillage dense des points d'injection permet de respecter des critères de tassements/soulèvement de l'ordre du millimètre. □

**PRINCIPAUX INTERVENANTS**

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** Direction Régionale de l'Équipement PACA, Service Maîtrise d'ouvrage

**ASSISTANTS AU MAÎTRE D'OUVRAGE :** CETE Méditerranée, CETU, Véritas (suivi du bâti), Laboratoire ville de Toulon (suivi qualité eaux), Optia Méditerranée (contrôle topo), MS GC-TP (coordination SPS), AtmoPaca (suivi qualité air), Acouplus (suivi acoustique), CETE (Contrôles matériaux)

**MAÎTRISE D'ŒUVRE :** Setec tpi, Terrasol

**GROUPEMENT D'ENTREPRISES POUR LE GÉNIE CIVIL :** Bouygues Travaux Publics, Soletanche Bachy France, Colas Midi Méditerranée, Screg Sud Est, sous-traitant auscultation SolData

**ABSTRACT**

**TOULON TUNNEL SOUTHERN TUBE  
COMPENSATION CEMENT GROUTING  
UNDER TWO BUILDINGS**


ALAIN GUILLLOUX, TERRASOL - HERVÉ LE BISSONNAIS, TERRASOL - ROBIN BETEND, SOLETANCHE BACHY - GILLES BOYER, SOLETANCHE BACHY TUNNELS

*An unfavourable geological environment and surface deformation of the buildings due to excavation of the first tube are among the numerous difficulties of this Toulon Tunnel southern tube project, situated in a highly urbanised and complex environment. Solutions employed: a very rigid retaining structure, with reinforcement of the tunnel face by jet grouting columns and umbrella arch, and use of compensation grouting in places. □*


**TÚNEL DE TOULON TUBO SUR  
INYECCIONES DE COMPENSACIÓN  
DEBAJO DE DOS EDIFICIOS**

ALAIN GUILLLOUX, TERRASOL - HERVÉ LE BISSONNAIS, TERRASOL - ROBIN BETEND, SOLETANCHE BACHY - GILLES BOYER, SOLETANCHE BACHY TUNNELS

*Un contexto geológico desfavorable, diversas deformaciones de los edificios en superficie relacionadas con la excavación del primer tubo, etc. constituyen las principales dificultades de esta obra del túnel de Toulon tubo Sur, ubicado en un contexto ampliamente urbanizado y complejo. Las soluciones que se han puesto en obra son: una contención sumamente rígida, con refuerzo del frente mediante columnas de jet grouting y bóveda parabólica, así como el recurso en ciertos lugares a inyecciones de compensación. □*

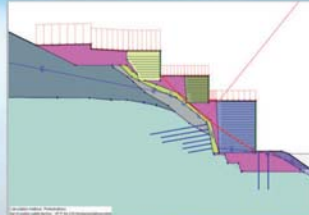
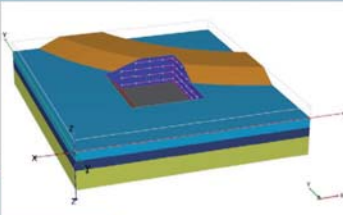



## Complémentarité et synergie



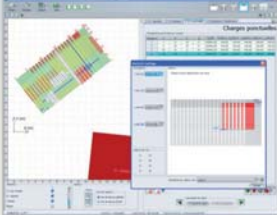
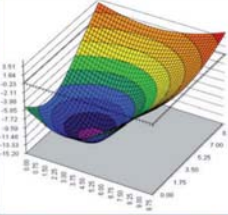
**Ingénierie géotechnique**





Conception  
Maîtrise d'œuvre  
Expertise



**Logiciels géotechniques**





**Développement**

Assistance technique  
Formation

Crédits photos : Fondation Louis Vuitton - N Borel / RATP - Marguerite Bruno



**TERRASOL recrute des ingénieurs géotechniciens**

TERRASOL – Immeuble Central Seine - 42/52, quai de la Râpée – CS 71230 - 75583 Paris Cedex 12 - Tél : + 33.1.82.51.52.00 - Fax : + 33.1.82.51.52.99 - [www.terrasol.com](http://www.terrasol.com) - Email : [info@terrasol.com](mailto:info@terrasol.com)

TERRASOL RHONE-ALPES - Immeuble l'Orient - 10, place Charles Béraudier - 69428 Lyon Cedex 3 - Tél : + 33.4.27.85.49.35 - Fax : + 33.4.27.85.49.36 - [www.terrasol.com](http://www.terrasol.com) - Email : [lyon@terrasol.com](mailto:lyon@terrasol.com)





1- Passage sous l'avenue des Frères Lumière et en premier plan, préparation d'un ouvrage parking pieux tirantés et béton projeté à gauche.

1- Passage under Avenue des Frères Lumière and, in the foreground, preparation of the tension-pile parking structure and shotcreting on the left.

© GCC

# PHASE 2 DU PROLONGEMENT DE LA LIGNE T4 DU TRAMWAY DE LYON

AUTEUR : BERNARD CROST, DIRECTEUR D'EXPLOITATION GCC AGENCE RHÔNE-ALPES

AFIN D'OFFRIR UNE MEILLEURE DESSERTE EN TRANSPORTS EN COMMUN ET D'OUVRIER LES DIFFÉRENTS QUARTIERS DE LA VILLE DE LYON, LA LIGNE DE TRAMWAY T4 EST RÉALISÉE EN 2 PHASES. MISE EN SERVICE EN AVRIL 2009 APRÈS 3 ANS DE TRAVAUX, LA PHASE 1 DU T4 DESSERT 10 KM ENTRE FEYZIN – LES MINGUETTES ET LA PLACE MENDÈS FRANCE (JET D'EAU) DANS LE 8E ARRONDISSEMENT. LA PHASE 2, LANCÉE EN JUILLET 2007 POUR 4 ANS DE TRAVAUX, PROLONGERA À TERME LA LIGNE T4 DE LA PLACE MENDÈS FRANCE À LA STATION THIERS LAFAYETTE DE T1, JUSQU'AU CAMPUS DE LA DOUA – GASTON BERGER DANS LE 3<sup>e</sup> ARRONDISSEMENT. CE PROLONGEMENT DE 2,3 KM COMPRENDRA 3 NOUVELLES STATIONS DONT LA MANUFACTURE DES TABACS, OUVRAGE TECHNIQUE RÉALISÉ PAR L'AGENCE GCC RHÔNE-ALPES, MANDATAIRE DU GROUPEMENT D'ENTREPRISES.

La conception technique décrite ci-après a été mise au point par l'équipe de maîtrise d'œuvre Arcadis ; cette même équipe assure le suivi des travaux en étroite collaboration avec le groupement d'entreprises.

## UN ENVIRONNEMENT CONTRAIGNANT

Même si le chantier de la phase 2 ne s'étend que sur 2,3 km, la technicité requise est aussi importante que l'environnement est contraignant. Tout d'abord, il s'agit là d'un chantier

en plein site urbain, dont les axes sont très fréquentés : 35 000 habitants vivent à moins de 300 mètres de la ligne, avec une circulation maintenue.

Mais c'est tout le réseau de transport en commun lyonnais qui est impacté.

En effet, à chaque raccordement avec les lignes T1 & T3, l'exploitation est interrompue.

Par ailleurs, les ouvrages d'art présents sur une distance de 700 mètres, du Nord au Sud le long de la voie ferrée, rendent l'exécution ▷





2- Rampe d'accès rue Marius Berliet, paroi moulée à droite, ouvrage Frères lumière au fond.  
3- Passage sous l'avenue des Frères Lumière et quai de la Manufacture (en arrière plan).  
4- Plan de repérage (Nord à gauche).

des travaux particulièrement difficile et contraignent considérablement le site pour l'exécution des travaux. Ces ouvrages techniques sont le pont-cadre sous la voirie Albert Thomas, le passage sous la Maison du Directeur, le mur de soutènement le long de la Faculté, le pont-cadre sous l'avenue des Frères Lumière, le mur de soutènement le long de la rue Marius Berliet et celui le long de l'Hôtel de Police.

### UN CHANTIER COMPLEXE

Compte tenu des nombreuses contraintes du site (exiguïté, présence de réseaux, circulation à maintenir pendant les travaux sur l'avenue Frères Lumière et le cours Albert Thomas, proximité des voies ferrées

circulées, site de la Manufacture des Tabacs, etc.), les ouvrages les plus complexes sont le passage sous la Maison du Directeur et l'ouvrage au-dessus des structures du métro car ils nécessitent des modifications importantes de structures existantes. Les ouvrages suivants ont été successivement réalisés du Sud vers le Nord :

### UNE RAMPE D'ACCÈS AU SOUTERRAIN SUR LA RUE MARIUS BERLIET

Une trémie de descente du tramway est réalisée au niveau des voies ferrées RFF dans la rue Marius Berliet, par la construction d'une paroi moulée auto-stable sur un linéaire de 70 mètres, ainsi qu'un mur de soutènement de faible hauteur.

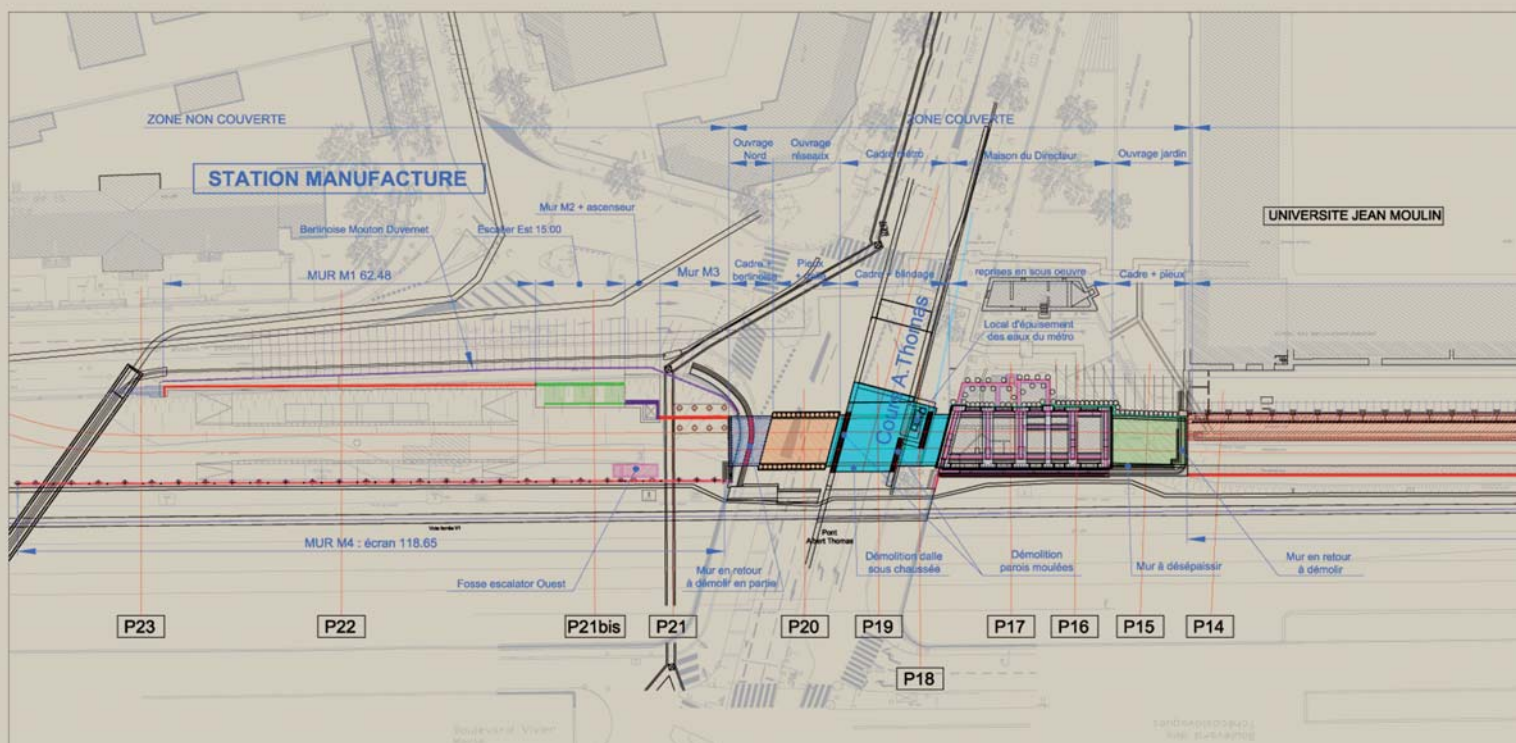
Des terrassements généraux sont également mis en œuvre en déblais pour la création de la rampe, avec des garde-corps en granit (photo 4).

### LE PASSAGE SOUS L'AVENUE DES FRÈRES LUMIÈRE

Le pont-cadre en béton armé sous cette avenue est exécuté par demi-ouvrage pour maintenir la circulation sur l'autre chaussée et la déviation définitive des réseaux. Cet ouvrage de passage inférieur nécessite la construction d'un système en portique constitué d'une dalle reposant sur des pieux jointifs tirantés, réalisée par un simple pré-terrassement et le sciage de murs de soutènement (photos 2 & 3). Des terrassements sont exécutés en taube sous la dalle réalisée en pre-

2- Marius Berliet access ramp, diaphragm wall on the right, Frères Lumière structure in the background.  
3- Passage under Avenue des Frères Lumière and Quai de la Manufacture (in the background).  
4- Location drawing (North on the left).

## PLAN DE REPÉRAGE (NORD À GAUCHE)



© GCC



## LE CHANTIER EN CHIFFRES

**BÉTON : 3 000 m<sup>3</sup>**  
**COFFRAGES : 4 800 m<sup>2</sup>**  
**ARMATURES : 300 tonnes**  
**PIEUX DIAMÈTRE 800 : 190 unités**  
**PAROIS MOULÉES : 900 m<sup>2</sup>**  
**MICROPIEUX : 80 unités diamètre 140**  
**JET GROUTING : 50 colonnes diamètre 800**  
**BERLINOISE : 175 ml**

**DÉLAI**  
**24 mois à partir d'août 2010**

micropieux au fur et à mesure du terrassement en taupe, formant ainsi les parois latérales du tunnel du tramway (photos 1 & 6). Ces travaux sont effectués à l'abri côté Est d'une paroi de soutènement définitive de pieux jointifs dans la zone extérieure à la Maison, et de colonnes de jet grouting pour la zone intérieure de la Maison et côté Ouest du mur de soutènement SNCF. Cette reprise en sous-œuvre directement sous la Maison a également nécessité la réalisation de colonnes de jet grouting sous les fondations d'une partie latérale de la maison (ne surplombant pas directement le tracé du tramway).

### **La démolition des anciens quais de la Manufacture**

Une fois terminé le passage sous le pont des Frères Lumière, l'ancien quai de déchargement de la Manufacture en béton armé est démolit, puis une paroi de soutènement en berlinoise clouée est réalisée sur 180 mètres de long et d'une hauteur vue de 1,8 mètres, complétée par différents travaux d'assainissement et de terrassement pour la plate-forme de tramway.

### **L'ouvrage sous le parking Sud de la Manufacture**

Pour permettre le terrassement, une autre paroi berlinoise provisoire et tirantée est réalisée. Les murs de soutènements existants ont été démolis et désépaisés.

mière phase, ainsi qu'un contre-mur d'habillage par béton projeté des pieux constituant les piédroits.

### **LES OUVRAGES DE LA MANUFACTURE DES TABACS**

Cette opération est particulièrement complexe car le tracé du tramway passe sous la Maison du Directeur de la Manufacture des Tabacs (monument classé) et juste au-dessus de la

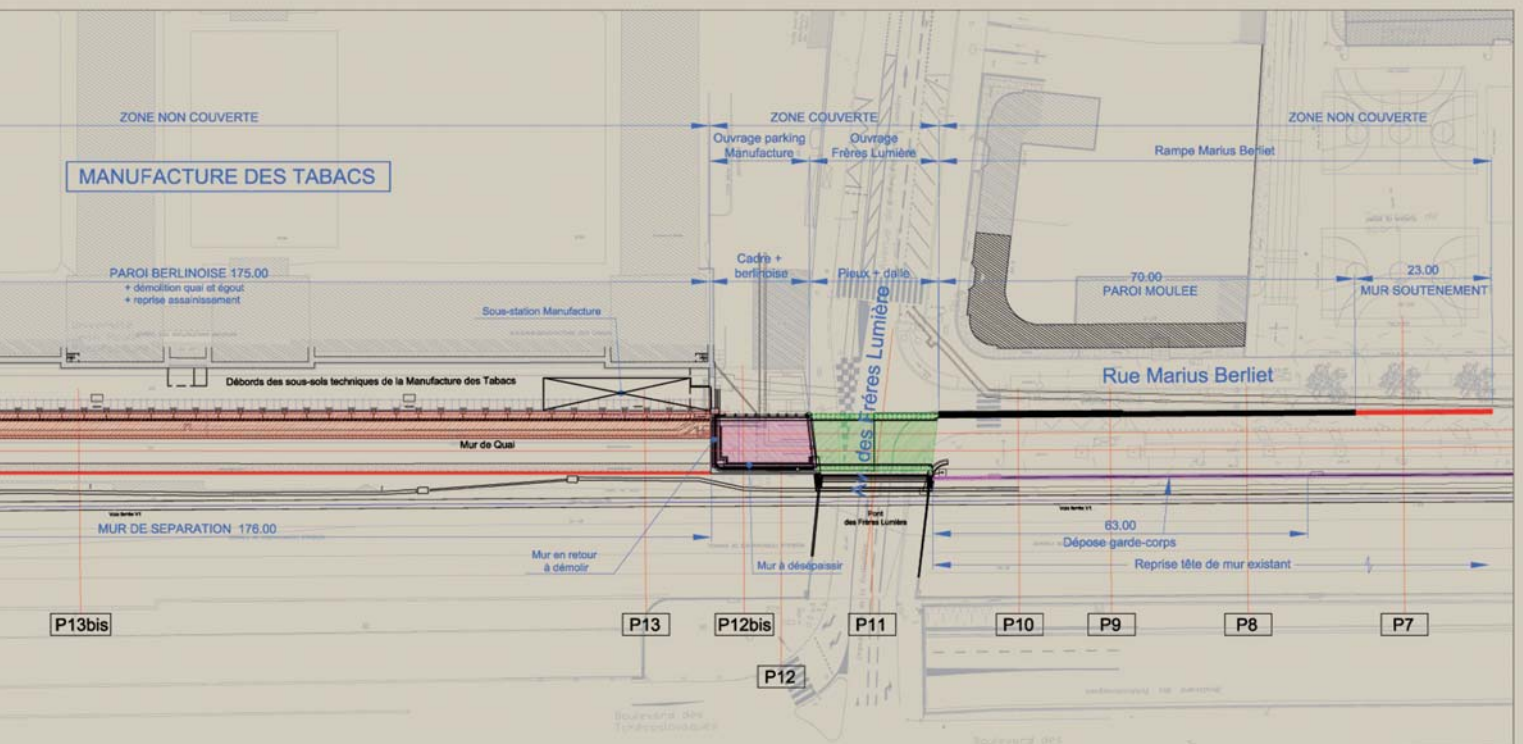
**5- Maison du Directeur, ferrailage poutre primaire Ouest de reprise en sous-œuvre.**

**5- «Maison du Directeur» building, reinforcement of the western underpinning primary beam.**

ligne D du métro. Plusieurs ouvrages sont nécessaires :

### **Le passage en sous-œuvre sous la Maison du Directeur**

La création de ce passage nécessite la reprise en sous-œuvre de la majeure partie des murs et des fondations de ce bâtiment en brique et en maçonnerie des années 1920, par moilage des fondations, à l'aide d'un réseau de poutres en béton armé reposant sur 80 micropieux fondés. Des murs englobent ces







6- Maison du Directeur, micropieux sous poutre primaire de reprise en sous-œuvre.

7- Maison du Directeur, ferrailage de la poutre secondaire de reprise en sous-œuvre.

8- Maison du Directeur, poutre secondaire bétonnée.

6- «Maison du Directeur» building, micropiles under eastern underpinning primary beam.

7- «Maison du Directeur» building, reinforcement of underpinning secondary beam.

8- «Maison du Directeur» building, secondary beam in concreted underpinning.

## LE PASSAGE INFÉRIEUR SOUS LE COURS ALBERT THOMAS ET AU-DESSUS DES STRUCTURES DU MÉTRO

Sous le cours Albert Thomas, les anciennes structures utilisées pour la construction du métro sous les voies ferrées sont toujours présentes.

La première partie des travaux consiste à démolir ces structures, en sciant la dalle de couverture existante et les 2 parois moulées butonnées du métro sous rue pour permettre le passage du tramway, et à construire un ouvrage cadre en béton armé sur voûte du métro. La seconde partie des travaux se concentre sous la partie Nord du

cours Albert Thomas reposant principalement sur les déviations réseaux : pose de pieux jointifs, tablier coulé au sol, terrassement en taupe et construction des contre-murs d'habillage des pieux constituant les piédroits.

## LE GÉNIE CIVIL DE LA STATION DE LA MANUFACTURE DES TABACS

Bien que la station soit à ciel ouvert, des travaux de génie civil sont prévus pour reprendre le dénivelé existant entre le cours Albert Thomas et le bas de la rue Mouton-Duvernet. Pour ce faire, il faut construire à l'abri d'une paroi berlinoise un mur de soutènement intégrant un escalier d'accès, une fosse d'ascenseur

et, côté voies SNCF, un mur de séparation des voiries SNCF composé de pieux, de profilés métalliques et de panneaux en béton armé, et procéder à des terrassements. □

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRISE D'OUVRAGE :** SYTRAL (Syndicat mixte des transports pour Le Rhône et l'agglomération lyonnaise)

**MAÎTRISE D'ŒUVRE :** Groupement Systra (mandataire), Arcadis, Ilex

**BUREAU D'ÉTUDES D'EXÉCUTION :** Cogeci

**GROUPEMENT D'ENTREPRISES :** GCC (mandataire), Maia-Sonnier, Demathieu et Bard, Soletanche Bachy (soutènements), Coiro (réseaux)

## ABSTRACT

### PHASE 2 OF EXTENSION OF LYON TRAMWAY LINE T4

BERNARD CROST, GCC RHÔNE-ALPES

*In order to provide a better public transport service and improve access to the various districts of the city of Lyon, the T4 tramway line has been executed in two phases. Phase 1 of the T4 line, put into operation in April 2009 after three years' work, covers 10 km between Feyzin–Les Minguettes and Mendès France square (Jet d'Eau) in the 8th district of Lyon. Phase 2, started in July 2007 and involving four years' work, will extend the T4 line from Mendès France square to the Thiers Lafayette station of T1, up to the La Doua–Gaston Berger campus in the 3rd district. This 2.3 km extension will have three new stations including Manufacture des Tabacs, an extremely technical structure, executed by the GCC Rhône-Alpes branch, leader of the consortium. □*

### ETAPA 2 DE LA PROLONGACIÓN DE LA LÍNEA T4 DEL TRANVÍA DE LYÓN

BERNARD CROST, GCC RHÔNE-ALPES

*Con el propósito de brindar un mejor servicio de transportes públicos y abrir los distintos barrios de la ciudad de Lyon, la línea de tranvía T4 se ha ejecutado en 2 etapas. Puesta en servicio en abril de 2009 tras 3 años de trabajo, la etapa 1 del T4 da servicio a 10 kilómetros entre Feyzin – les Minguettes y la plaza Mendès France (Choro de agua) en el distrito 8 de Lyon. La etapa 2, iniciada en julio de 2007 para 4 años de trabajos, permitirá prolongar la línea T4 desde la plaza Mendès France hasta la estación de Thiers Lafayette de T1, hasta el campus de la Doua – Gaston Berger en el distrito 3. Esta prolongación de 2,3 kilómetros incluirá 3 nuevas estaciones entre las cuales la Manufactura de Tabacos, obra particularmente técnica, realizada por la agencia GCC Rhône-Alpes, mandatario de la agrupación de empresas. □*