

TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

TRAVAUX SOUTERRAINS. LIGNE 15 SUD DU GRAND PARIS EXPRESS - OUVRAGE ANNEXE OAP10. REHABILITATION DES TUNNELS FERROVIAIRES DE LIART. TRUNK ROAD T2 ET CHA KWO LING TUNNEL A HONG KONG. POSTE DE VENTILATION MECANIQUE DU METRO DE MONTREAL. TUNNEL DE LA NERTHE A MARSEILLE. ESTIMATION ET SUIVI DES DEFORMATIONS INDUITES PAR DES TRAVAUX. STATION D'EPURATION DE BONNEUIL-EN-FRANCE - OUVRAGE 100% ULTRA BAS CARBONE. INNOVATION LIGNE 16-1 DU GRAND PARIS EXPRESS

N°977 AVRIL/MAI 2022



TUNNEL
DE LA NERTHE
A MARSEILLE
© STUDIO
DRM PRODUCTION
ALEXANDRE NOTTIN





La protection
de l'ensemble
de vos projets
immobiliers

Retrouvez toutes
nos solutions
d'assurance sur
www.auxiliaire.fr

GLOBALE MAÎTRE D'OUVRAGE

**Promoteurs immobiliers,
investisseurs, collectivités territoriales,
maîtres d'ouvrage publics ou privés,
sécurisez votre activité de manière
innovante grâce à notre contrat
GLOBALE MAÎTRE D'OUVRAGE.**

l'Auxiliaire
Entreprendre avec assurance

50, cours Franklin Roosevelt - BP 6402 - 69413 Lyon cedex 06
Tél : 04 72 74 52 52 - auxiliaire@auxiliaire.fr

Siret 77564905800014 - Code APE 6512 Z
Entreprise régie par le code des assurances - Société d'assurance mutuelle à cotisations variables
Société d'assurance exonérée de plein droit de la TVA (article 261 C. 2° Du C.G.I.)

Directeur de la publication
Bruno Cavagné

Directeur délégué
Rédacteur en chef
Michel Morgenthaler
3, rue de Berri - 75008 Paris
Tél. +33 (0)1 44 13 31 03
morgenthalerm@fnfp.fr

Comité de rédaction

Erica Calatozzo (Systra), Jean-Bernard Datry (Setec), Olivier de Vriendt (Spie Batignolles), Denis Etienne (Bouygues), Philippe Gotteland (Fnfp), Florent Imbert (Razel-Bec), Nicolas Law de Lauriston (Vinci), Romain Léonard (Demathieu Bard), Claude Le Quéré (Egis), Véronique Mauvisseau (Ingerop), Stéphane Monleau (Soletanche Bachy), Jacques Robert (Arcadis), Claude Servant (Eiffage), Nastaran Vivian (Artelia), Michel Morgenthaler (Fnfp)

Ont collaboré à ce numéro

Rédaction
Monique Trancart (actualités),
Marc Montagnon

Service Abonnement et Vente

TBS GROUP
Service Abonnement Revue Travaux
235, avenue le Jour se Lève
92100 BOULOGNE BILLANCOURT
Tél. +33 (0)1 40 94 22 22
Fax +33 (0)1 40 94 22 32
revue-travaux@cometcom.fr

France (9 numéros) : 190 € TTC
International (9 numéros) : 240 €
Enseignants (9 numéros) : 75 €
Étudiants (9 numéros) : 50 €
Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)
Multi-abonnement : prix dégressifs
(nous consulter)

Publicité

Rive Média
10, rue du Progrès - 93100 Montreuil
Tél. : 01 41 63 10 30
www.rive-media.fr

Directeur de clientèle
Bertrand Cosson -
b.cosson@rive-media.fr
L.D. : 01 41 63 10 31

Site internet : www.revue-travaux.com

Édition déléguée

Com'1 évidence
2, chemin dit du Pressoir
Le Plessis
28350 Dampierre-sur-Avre
Tél. bureaux : +33 (0)2 32 32 03 52
revuetravaux@com1evidence.com

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

Tous droits de reproduction, adaptation, totale ou partielle, France et étranger, sous quelque forme que ce soit, sont expressément réservés (copyright by Travaux).

Ouvrage protégé : photocopie interdite, même partielle (loi du 11 mars 1957), qui constituerait contrefaçon (code pénal, article 425).

Éditions Science et Industrie SAS
9, rue de Berri - 75008 Paris
ISSN 0041-1906

LE CHANTIER SOUTERRAIN DU SIÈCLE



© DR

200 kilomètres de métro en cours de construction, soit autant que le réseau parisien historique ; 68 gares qui sortent de terre, dont certaines sont creusées à plus de cinquante mètres de profondeur ; quatre nouvelles lignes qui mettront un terme à l'enclavement de certains territoires de la métropole et qui offriront de formidables facilités en matière d'accès à l'emploi, aux équipements de soins, de loisirs et de culture : les chantiers du Grand Paris Express avancent ! Grâce au nouveau métro, le secteur des travaux souterrains en France connaît un pic d'activité inégalé depuis près de 20 ans, époque des travaux du RER E entre Magenta et Haussmann Saint-Lazare et ceux de la Ligne 14 entre les stations Madeleine et Bibliothèque François-Mitterrand.

Déjà, plus de 130 chantiers tournent à plein régime, témoignant de l'ampleur des travaux engagés sur toutes les lignes. Le défi technique est en partie relevé avec, à ce jour, près de 70 km de tunnels creusés. Pas moins de 23 tunneliers ont été engagés dans cette aventure, dont 17 qui ont terminé leur creusement. Autant dire une véritable

révolution dans le monde des travaux souterrains. L'utilisation d'un tunnelier, exceptionnelle il y a encore 30 ans, est devenue une norme : les méthodes de réalisation ne sont plus une contrainte qui limite l'ampleur du projet ; en remplaçant presque totalement les méthodes classiques de souterrain traditionnel ou de tranchée couverte, plus chères, plus lentes et plus génératrices de nuisances, le tunnel foré ouvre une voie quasi sans limite à l'ambition des projets.

La pose des rails a déjà commencé sur la Ligne 15 Sud et sur les prolongements nord et sud de la Ligne 14. Les premiers trains d'essai sortent des usines Alstom. Une aventure exaltante aussi synonyme de risques, d'aléas géologiques, de tensions pour certains métiers spécialisés dans les travaux souterrains, de crises imprévisibles dont les conséquences sur la progression du projet peuvent être lourdes, comme nous l'avons vu avec la pandémie.

Le Grand Paris Express a ainsi donné un nouveau souffle au secteur des travaux souterrains en France. Les entreprises ont formé de nouveaux compagnons aux métiers du souterrain, notamment de nombreux pilotes de tunnelier, et les majors du BTP se sont appuyés sur le savoir-faire des compagnons mobilisés, depuis 20 ans, pour des travaux souterrains ailleurs dans le monde, pour la réalisation des métros en Asie ou encore au Moyen-Orient. In fine, c'est l'ensemble du secteur du BTP qui va bénéficier du savoir-faire acquis par les entreprises pour la réalisation du Grand Paris Express. La réussite du projet va bien au-delà du périmètre de la seule maîtrise d'ouvrage et de ses intérêts : l'ambition de la Société du Grand Paris est de permettre à notre pays de renforcer encore une ingénierie déjà forte, dotée de constructeurs capables d'innover, de relever des défis colossaux et dont le savoir-faire sera reconnu dans le monde entier.

JEAN-FRANÇOIS MONTEILS
PRÉSIDENT DU DIRECTOIRE
DE LA SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

LISTE DES ANNONCEURS : L'AUXILIAIRE, 2^e DE COUVERTURE - PRO BTP, P.9 - BOTTE FONDATIONS, P.11 - SETEC/TERRASOL, P.12 - CNETP, P.17 - BTP BANQUE, P.42 - SMA BTP, 3^e DE COUVERTURE - SOLETANCHE BACHY, 4^e DE COUVERTURE



TRAVAUX SOUTERRAINS

EXTENSION DE LA STATION D'ÉPURATION DE BONNEULLE-EN-FRANCE © PHOTO THÉOQUE YES CHANOT



04 ALBUM

08 ACTUALITÉ

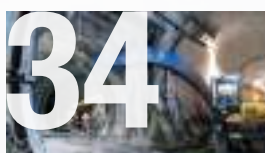


18

**ENTRETIEN AVEC
BRUNO BARROCA**

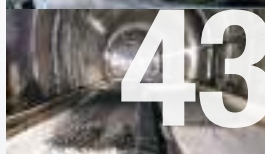
UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL -
L'ESPACE SOUTERRAIN,
AVENTURE URBAINE DU XXI^e SIÈCLE ?

**26 CENTRE D'ESSAIS AU FEU (CERIB) :
TESTER, CALCULER ET SIMULER LE FEU
POUR MIEUX LE PRÉVENIR**



34

**LIGNE 15 SUD
DU GRAND PARIS EXPRESS**
L'ouvrage annexe OAP10



43

**RÉHABILITATION DES
TUNNELS FERROVIAIRES
DE LIART (08)**



50

**TRUNK ROAD T2
ET CHA KWO LING
TUNNEL**
à Hong Kong



60

**LE POSTE
DE VENTILATION
MÉCANIQUE FULLUM**
du métro de Montréal



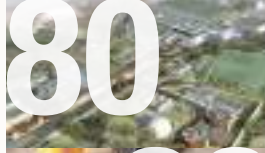
66

**TUNNEL
DE LA NERTHE**
à Marseille



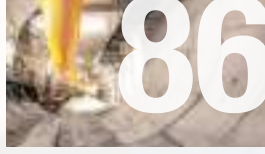
72

**ESTIMATION
ET SUIVI**
des déformations induites
par la construction
des ouvrages et tunnels



80

PREMIÈRE MONDIALE :
un ouvrage 100% Ultra Bas
Carbone pour l'extension
de la station d'épuration
de Bonneuil-en-France



86

**INNOVATION SUR
LA LIGNE 16-1 DU
GRAND PARIS EXPRESS**
Un partenariat réussi





VICTORIA ET RHEA, 14 M DE TOUR DE TAILLE, SE PROMÈNENT ENSEMBLE 50 MÈTRES SOUS LES MERS À HONG KONG

Bouygues Travaux Publics, construit le tunnel sous-marin bitube de 3,5 km Trunk Road T2 et ses ouvrages annexes. C'est l'un des principaux projets d'infrastructure actuellement en cours à Hong Kong. Les tunneliers Victoria et Rhea évoluent simultanément dans une géologie complexe. Ils sont équipés de têtes de coupe accessibles innovantes. Les dernières technologies seront appliquées, visant à optimiser la maintenance pour réduire l'empreinte carbone. (Voir article page 50).



© BYTP

© BYTP



OUVRAGE RÉSISTANCE, LE BIEN NOMMÉ, À 45 M DE PRO- FONDEUR EN BORD DE SEINE

Le groupement Horizon

(Bouygues Travaux Publics Régions France (mandataire), Soletanche Bachy France, Bessac, Soletanche Bachy Tunnels) réalise l'ouvrage annexe OAP10, encore appelé Ouvrage Résistance, de la Ligne 15 Sud du Grand Paris Express. Sur ce chantier complexe à 45 m de profondeur en bord de Seine, le groupement déploie une partie de son catalogue de techniques et de savoir-faire : palplanches, combiwall, tirants, micropieux, pieux forés, barrettes, parois moulées, injections, cintres, béton projeté, boulons en fibre de verre.

(Voir article page 34).



© YVES CHANOIT



SOLETANCHE BACHY

ENTRER DANS LE VIF DE LA LUTTE CONTRE LE CHANGEMENT CLIMATIQUE PAR L'INNOVATION

Les trophées des travaux publics décernés par la FNTP le 24 février, ont récompensé des innovations qui améliorent le bilan carbone du secteur (3,5% des émissions de gaz à effet de serre) ou favorisent la biodiversité.



© CHRISTIAN FEDROTTI

Parking à Villeurbanne (Rhône) où peuvent stationner les camions qui approvisionnent les chantiers de Lyon Part-Dieu, en attente de leur créneau de livraison (trophée organisation et logistique de chantier).

« Il y a eu des divergences dans le jury, » ont déclaré Jérémy Bellanger et Sandra Freeman, animateurs de la remise des trophées des travaux publics sur le thème "innovations et écologie", le 24 février, au Forum des travaux publics (FNTP) à Paris. « L'enjeu était que la proposition témoigne d'un engagement véritable, » ont-ils précisé. Quarante-cinq dossiers avaient été déposés pour concourir dans huit catégories.

Le grand prix a été décerné à Eiffage Route pour l'emploi de l'enrobé recyclé végétal Biophalt sur 2 km de l'A40, en octobre 2020. APRR, concessionnaire de l'autoroute, veut limiter l'impact environnemental de ses chantiers. Ont été épanchées 2 000 tonnes du Biophalt qui contient dans ce cas précis, plus de 40% d'enrobés recyclés. Le mélange comprend un liant végétal en substitution du bitume d'origine pétrolière. Il se fabrique à une température de 140°C au lieu de 160-170°C. Depuis 2019, il est expérimenté par d'autres maîtres d'ouvrage et suivi par le Cerema⁽¹⁾.

→ Sédiments à la place du ciment

Le jury a été surpris par le Capisorb d'Ecofhair et lui a accordé son "coup de cœur". Il s'agit d'un boudin contenant

des cheveux récupérés dans des salons de coiffure et sur lesquels se fixent les hydrocarbures lors d'une pollution maritime.

La catégorie "éclaireurs" distinguait des chercheurs. La lauréate, Lisa Monteiro, ingénieure en génie civil et environnement, est doctorante au laboratoire I2M (Université de Bordeaux). Le jury a salué l'approche collective autour de la conception du béton Valosed qui utilise des sédiments vaseux non séchés et des sédiments sableux en fraction granulométrique à la place du ciment. Les essais ont eu lieu sur des matériaux sortis du port de Bordeaux.

La Rochelle, Bayonne et les bassins d'Arcachon mettent aussi à disposition des sédiments de dragage pour cette recherche qui implique NGE, Spie Bati-gnolles Mallet, Eiffage et Solétanche Bachy.

La thèse de doctorat de Lisa Monteiro se termine fin 2023. Elle est financée par la région Nouvelle Aquitaine, le Grand port maritime de Bordeaux et la FNTP.

→ Contre les plantes envahissantes

Le trophée "biodiversité" a été remis à NGE. Le groupe a exploré avec des chercheurs quels paramètres favorisent ou

empêchent la colonisation d'un site par des plantes exotiques envahissantes après travaux. Il a conçu un outil qui détermine le mélange de graines locales capables de leur résister et propices à la biodiversité.

Dans la catégorie "sobriété et décarbonation des engins", le lauréat est Charier pour sa démarche de conception d'un tracteur de 200 CV à hydrogène d'origine renouvelable, avec Ineo. Son moteur électrique est alimenté par une pile à combustible. L'entreprise veut initier une filière en Pays-de-la-Loire et partager cette expérience avec d'autres. Des autorisations ont été nécessaires pour transporter de l'hydrogène à haute pression et le stocker sur chantier.

En catégorie "organisation et logistique du chantier", a été récompensée une filiale du groupe Colas pour son dispositif numérique et physique qui planifie les livraisons en évitant les embouteillages.

La solution Queivo de "Mobility by Colas" est déployée par la Société publique locale Lyon Part-Dieu sous le nom de Reguly et par la Société du Grand Paris, sous Solideo.

Les camions, en attente, stationnent sur des aires de régulation à distance du chantier. Les chauffeurs sont guidés ensuite sur des itinéraires dédiés. Au préalable, ils auront réservé leurs créneaux de livraison sur une plateforme internet. Sur les chantiers du quartier de

la Part-Dieu, 800 maîtres d'ouvrage et entreprises utilisent ce système.

→ 2 100 trajets en camion évités

En "économie circulaire", le jury a distingué Demathieu Bard Construction pour la réutilisation de matériaux extraits par un tunnelier directement dans la grave de remplissage de la partie inférieure d'un tunnel destinée à recevoir les voies du prolongement de la Ligne B du métro de Lyon⁽²⁾. Une centrale sur place sépare sables, fines et graviers, afin de reconstituer une grave aux caractéristiques de compactage requises, à laquelle a été ajouté un correcteur à hauteur de 25%. La solution a évité 2 100 trajets de semi-remorques.

Enfin, citons le béton ultra bas carbone de Vinci Construction, lauréat en "mise en œuvre de matériaux bas carbone". Exegy a été utilisé en fondations au port du Havre par Solétanche Bachy en mars 2021 et dans des anneaux de tunnel sur la Ligne 18 du Grand Paris Express en septembre. Il comprend du liant "alcalin activé Ecocem ultra" à la place du ciment.

Vidéos à voir sur :

www.lemoniteur.fr/article/trophees-des-tp-2022-eiffage-remporte-le-grand-prix.2192872 ■

⁽¹⁾ Retenu en 2019 par le Comité innovation routes et rues.

⁽²⁾ En groupement avec Implenia.



© CHARIER

Charier souhaite partager son expérience d'un tracteur à hydrogène (trophée sobriété et décarbonation des engins).

NOUS AVANÇONS SUR LA MÊME ROUTE QUE LES TRAVAUX PUBLICS

Nous connaissons bien votre métier et tous ses risques.
Nous les couvrons avec des garanties adaptées pour mieux vous
protéger, mieux vous assurer et vous soutenir en cas de besoin.
Et comme nous faisons aussi partie de la famille du BTP,
nous ferons toujours route commune.



PRO BTP
GROUPE

www.probtp.com



NUCLÉAIRE : FORMATIONS SOUTENUES

La construction de nouveaux réacteurs nucléaires en

France, comme annoncé par le président de la République le 10 février au nom de la production d'électricité décarbonée, se traduit par 470 millions d'euros d'aide à la relance de la filière.

La formation de personnel en est une des conditions, en particulier dans les métiers suivants : électricien industriel, chaudronnier, tuyautier, mécanicien machines tournantes et soudeur.

Dès cette année, 50 élèves de 10 lycées pilotes vont recevoir une bourse de 600 euros par mois. Ce nombre montera à 200 dans une vingtaine d'établissements en 2022-2023 et 2023-2024. Peuvent en bénéficier des élèves en BTS, bac professionnel et CAP. Par ailleurs, 14 projets de développement des compétences et de formation professionnelle ont été retenus dans le cadre d'un appel d'offres. Les investissements induits de 38 millions d'euros seront aidés par l'État à hauteur de 13 millions.

La modernisation des sites industriels, leur développement, la recherche et développement, sont soutenus à travers différents appels à projets, notamment depuis 2020.



© ANTOINE SOUBIGOU/ENF

Le soudage et l'usinage sont des compétences recherchées. Ici, l'EPR de Flamanville (Manche) en chantier (août 2019).

55 DÉCHARGES À RÉSORBER EN DIX ANS



© MAIRIE DE FOURAS-LES-BAINS

Ce cercle métallique témoigne d'une érosion par la mer sur 25 cm de haut de la côte à Fouras-les-Bains (Charente-Maritime).

La décharge de Fouras-les-Bains (Charente-Maritime) figure parmi les trois premières aidées par l'Etat parce que les acteurs concernés remuent ciel et terre depuis longtemps.

La mer en érodant l'anse de Fouras a rattrapé la limite de la décharge du Magnou qui a reçu tous déchets, de 1964 à 1977. La nature a repris ses droits camouflant les déchets. C'était sans compter sur la mer qui a grignoté 75 m de 1996 à 2014. Bouteilles, ferraille, plastiques, fibrociment ressortent des couches superposées et sont déplacés vers le large, ce qui pollue les aires de conchyliculture.

→ 6,9 millions d'euros

En 2014, la communauté d'agglomération de Rochefort Océan (Caro) demande à Eparis de caractériser les déchets et d'établir le périmètre de la décharge. Elle couvre 1,7 ha sur une épaisseur de plus de 2 m au centre à 50 cm en périphérie⁽¹⁾. Suite à une seconde étude par Artelia et Biotope, il a été décidé que les 22 400 m³ seront triés sur place, valorisés ou évacués s'ils contiennent des traces de métaux, tout en protégeant la biodiversité qui s'est installée (oiseaux).

Coût de l'opération : 6,9 millions d'euros HT. Le feu vert de l'État, en février, était la seule pièce manquante à la résorption. Il s'est engagé à payer 50 %, la région Pays-de-la-Loire et le département de la Charente-Maritime (maître d'ouvrage), 20 % chacun, la Caro et la ville, 5 % chacune. Le plan de relance a contribué à ce déblocage.

Le projet était déjà budgété par les collectivités territoriales. Le Conseil départemental s'est porté maître d'ouvrage en 2019 quand la commune a réuni tout le monde autour de la table dont le Conser-

vatoire du littoral qui avait déjà un projet ficelé et financé, et qui va acquérir le terrain et le rendre à la nature.

→ Jetés du haut d'une falaise

Deuxième décharge bénéficiant d'une aide de l'État cette année : le dépôt de déchets par quatre entreprises du BTP sur un total d'1 km de falaise au nord du Havre (Seine-Maritime). Terres, gravats, plastiques, métaux étaient déversés par des camions du haut de la falaise.



© ANNE BETTINA BRUNET/VILLE DU HAVRE

Au pied des falaises de Dollemard (Le Havre), les déchets du BTP se sont accumulés et sont repris par la mer.

Se sont ainsi accumulés 300 000 à 400 000 m³ que la mer emporte au large. Suite à un test sur 1/10^e en 2021, il ressort qu'il s'agit de déchets inertes à 90%. Le conseil municipal doit statuer au printemps sur la méthode de réhabilitation. Les falaises de Dollemard, site Natura 2000, sont protégées par le Conservatoire du littoral.

Troisième site prioritaire annoncé par Bérangère Abba, secrétaire d'État à la Biodiversité, le 18 février : la décharge de l'anse Charpentier, à la Martinique. Un peu moins d'un hectare de forêt qui contient 10 000 m³ de déchets, est lui aussi menacé par l'érosion. Le projet est porté par l'EPCI Cap Nord.

→ Inventoriées par le BRGM

Au total, le BRGM a dénombré « 55 décharges présentant à court terme le plus fort risque de déversement de déchets en mer » et en a fait l'inventaire⁽²⁾. Le gouvernement souhaite les résorber en dix ans. ■

⁽¹⁾ Cf. Lettre du maire de Fouras, n°65, 4^e trimestre 2021.

⁽²⁾ À consulter sur : www.georisques.gouv.fr/node/11705.



BOTTE
FONDATIONS

VINCI
CONSTRUCTION

FRANCIS

Créateur de Solutions

- Parois moulées & Soutèvements
- Pieux de fondations & Micropieux
- Sondage de reconnaissance
- Clous & Tirants d'ancrage
- Reprise en sous-œuvre
- Comblements de carrières
- Traitement de terrains
- Jet grouting
- Congélation de sol
- Fondations de pylônes & éoliennes

NOUS CONTACTER

Siège Social : 01.49.61.48.00

Pour en savoir plus, suivez-nous sur [LinkedIn](#)

Où rendez-vous sur notre site <http://www.botte-fondations.fr>

LA SÉLUNE (MANCHE) LIBÉRÉE DES BARRAGES

La déconstruction du barrage de la Roche-qui-boit sur la Sélune à Ducey-les-Chéris (Manche) commence en juin et se terminera en 2023. Une brèche de 45 cm sur 7-9 m de haut sera ouverte au milieu de l'ouvrage de 16 m de large afin de laisser passer une crue millénaire, le cas échéant, pendant la démolition.

Puis la rive gauche sera détruite avant la droite qui abrite l'usine électrique. Le lit naturel du fleuve sera ensuite reconstruit, ce qui facilitera la migration des poissons (anguilles et saumons). Pour effacer ce barrage, les sédiments accumulés en amont ont été extraits de juillet 2020 à septembre 2021. Les 165 000 m³ ont été séchés dans 110 géotubes de 14 m de large et 60 m de long déposés dans l'ancienne retenue du barrage de Vezins à 10 km, avant d'être étalés sur les berges.

La vidange du réservoir d'eau commence en mai 2022, après le printemps de façon à ne pas abonder les crues.



Cet effacement succède à celui du barrage de Vezins en 2020, en amont (Isigny-le-Buat).

→ **Un fleuve de 85 km**

La Sélune prend sa source encore plus à l'est, à Saint-Cyr-du-Bailleul, et coule sur 85 km jusqu'à la baie du Mont Saint-Michel.

L'effacement du barrage de la Roche-qui-boit coûte 15 millions d'euros dont 60% pris en charge par l'Agence de l'eau Seine-Normandie. L'ouvrage n'ayant été soumis qu'à autorisation vis-à-vis de l'en-

vironnement, il appartient à EdF, contrairement à Vezins, sous concession.

→ **Meilleure qualité de l'eau**

La restauration du cours d'eau avait été décidée en 2009, suite au Grenelle de l'environnement de 2007 (loi Grenelle 1). L'Agence de l'eau et le Syndicat mixte du bassin de la Sélune sont concernés notamment au titre d'une meilleure qualité de l'eau. La réappropriation d'espace contribue au maintien d'éleveurs de bovins et la renaturation, à embellir le paysage. ■

DAVANTAGE DE PRÉVENTION

Un nouveau cadre d'intégration de la prévention des risques professionnels dans la formation aux métiers du BTP est redéfini par le Comité de concertation et de coordination de l'apprentissage du BTP en partenariat avec l'Organisme professionnel de prévention du BTP.

Les deux organismes ont signé une convention spécifique fin novembre dernier.

Les engagements pour mieux intégrer ces domaines dans la formation des élèves ou des salariés s'étendent aux formateurs.



La prévention des risques est porteuse de performance en entreprise.



terrasol
setec
L'ingénierie géotechnique à forte valeur ajoutée
www.terrasol.com

INGÉNIERIE **FORMATIONS** **LOGICIELS**

» Conception, Maîtrise d'œuvre, Expertise Développement, Assistance technique «

Terrasol est un leader reconnu dans le domaine de l'ingénierie géotechnique, en France comme à l'étranger.
Parmi nos références récentes en France : Grand Paris Express, Ecole, Projet Lyon Part-Dieu, Liaison ferroviaire Lyon-Turin, Projet Cigéo à Bure, Projet Bipole - liaison souterraine Paris Nord / Paris Est, Quais Joannès Couvert et Hermann du Pasquier au Havre, Galerie de la Sarenne... **Et à l'international :** Ligne à Grande Vitesse HS2 (UK), Tour F à Abidjan (Côte d'Ivoire), Viaduc Grenland (Norvège), EPR Hinkley Point et Sizewell (UK), 4^{ème} pont d'Abidjan (Côte d'Ivoire), Tour Mohamed VI (Maroc), Pénétrante de Tizi Ouzou (Algérie), TER de Dakar (Sénégal)...

	Paris	Lyon	Maroc	Tunisie
	Tel : +33 (0)1 82 51 52 00	Tel : +33 (0)4 27 85 49 35	Tel : +212 (561) 16 20 78	Tel : +275 71 23 83 14
	Fax : +33 (0)1 82 51 52 99	Fax : +33 (0)4 27 85 49 36	Fax : +212 (537) 77 48 41	Fax : +256 71 75 32 88
	Email : terrasol@setec.com	Email : terrasol@setec.com	Email : ahmed.skalisonhaji@setec.com	Email : info@terrasol.com.tn

FUSION DANS LE BÉTON

Le Syndicat français de l'industrie cimentière (Sfic), le Centre d'information sur le ciment et ses applications (Cimbéton) et l'Association technique de l'industrie des liants hydrauliques (Atilh) ont fusionné dans « une logique d'efficacité opérationnelle. » La décision prise fin 2021 a été annoncée le 12 janvier.

Le Sfic poursuit les actions des deux autres organismes dont la tenue du bureau de normalisation des liants hydrauliques (BNHL).



Le Sfic regroupe désormais trois organisations.

2022 : CHIFFRE D'AFFAIRES DES TRAVAUX PUBLICS EN LÉGÈRE HAUSSE

Sans surprise, l'année 2021 aura été meilleure que 2020, à +10% du chiffre d'affaires. Elle reste sous 2019, à -9%. Le nombre d'appel d'offres n'a pas non plus rattrapé celui de 2019.

Pour 2022, la Fédération nationale des travaux publics avançait, au 22 février, une hausse de 4% en valeur et 1,5% en volume. « Nous avons devant nous un mur d'investissements », a estimé Bruno Cavagné, président de la FNTP. Nous

allons encourager les entreprises et les maîtres d'ouvrage à passer aux actes en matière de transition écologique. Les sommes à mettre dans la maintenance sont considérables. »

Outre la création d'un comité de suivi de la décarbonation du secteur des travaux publics, Bruno Cavagné a annoncé la préparation d'un baromètre de l'innovation qui servirait à établir un modèle économique des innovations. « Nous souhaitons que les élus passent commande pour un but à atteindre - la baisse des émissions de GES -, quelque soit le moyen », a indiqué Bruno Cavagné.

→ Rapport programmation des infrastructures

Par ailleurs, le Conseil d'orientation des infrastructures, créé en 2021, devait remettre fin février un rapport sur ce qui a marché ou non depuis cinq ans en matière de programmation des infrastructures de transport. ■

SUIVRE LA DÉCARBONATION DES TP

Un comité de suivi de la trajectoire de décarbonation dans les TP a été mis sur pied au début de l'année. Brice Lalonde en est le "président d'équilibre des énergies".

Autres membres : Valérie David (Eiffage) ; Jean-Christophe Louvet, Christian Tridon, Christian Surget et Xavier Neuschwander de la FNTP ; Alexandra Mathiolon (Serfim) ; Bernard Sala (Routes de France) ; Dominique Jaumard (département de l'Hérault) ; Élisabeth Laville (Utopies) ; Benoît Leguet (Institut pour le climat et l'économie) ; Cécile Maisonneuve (Institut Montaigne) ; Éric Ollinger (DGITM) ; Anne Ventura (Université Gustave Eiffel) ; non nommé à mi-mars : représentant de la DGEC.

INVESTISSEMENTS EN HAUSSE POUR VOIES NAVIGABLES DE FRANCE



© VOIES NAVIGABLES DE FRANCE

Vue de la tête "est" du tunnel du canal de Saint-Albin (Haute-Saône) dont l'entrée et les parements du soutènement ont été refaits dans une pierre résistante au gel.

Voies navigables de France consacre 4,5 millions d'euros TTC à la restauration des têtes du tunnel du canal de Saint-Albin (Haute-Saône), à 20 km à l'ouest de Vesoul. Le canal raccourcit de 8 km le trajet des bateaux de plaisance en coupant une boucle de la petite Saône. Il mesure 2,2 km dont 681 m en souterrain.

Les têtes du tunnel sont en pierre calcaire poreuse qui se casse au gel. Elle a été problématique dès 1852, peu après la 1^{re} phase de sa construction débutée en 1843. Ce qui a exigé une surveillance constante. Il a été décidé de la remplacer par de la pierre de Chandoré (Champdor, Ain) poreuse à 0,2% au lieu de 20% pour celle d'origine.

Les travaux ont démarré en 2020. Les têtes sont détruites et reconstruites, ce qui inclut les parements des murs de soutènement (rampes). La tête amont, côté est, est terminée depuis novembre.

Celle, en aval, le sera fin 2023 du fait que ses rampes forment une courbe en S. Ces têtes de tunnel sont inscrites au titre des monuments historiques. Leur réfection a été confiée à Hory-Marçais (Dijon). Rappelons que « les bateliers qui empruntaient le tunnel détachaient les chevaux ou bœufs de traction progressant sur le chemin de halage avant l'entrée du tunnel, raconte Jérôme Guittard, responsable de l'unité territoriale d'itinéraire. Les bêtes le franchissaient par l'extérieur en remontant les rampes, et étaient réattelées de l'autre côté. Les bateliers halaient alors leur embarcation à la main grâce à une chaîne courant le long du tunnel. »

→ Canal Seine Nord Europe : 70 millions

Citons parmi les autres rénovations importantes par VNF cette année : le rehaussement du pont de Camon sur le canal du Rhône à Sète (Hérault) de

2,3 millions d'euros et la reconstruction du barrage du Batardeau à Auxerre (Yonne) de 5 millions.

Se poursuivent également des travaux sur la Moselle canalisée pour plus de 50 millions ainsi que la mise en place de la téléconduite sur le réseau grand gabarit du Nord et du Pas-de-Calais (36 millions). La réfection du barrage réservoir de Bouzey près d'Épinal (Vosges) doit être lancée. La liaison Seine-Escaut comprenant le Canal Seine Nord Europe (107 km) ainsi que le passage à grand gabarit des canaux (1 000 km), absorbera 70 millions d'euros en 2022.

→ Signes de vieillissement partout

Au total, le gestionnaire des 6 700 km de voies fluviales pour l'État va investir 345 millions d'euros en 2022. Le montant est supérieur aux 300 prévus⁽¹⁾.

VNF suit 4 000 ouvrages dont un certain nombre ont besoin d'être entretenus voire rénovés. Tous montrent des signes de vieillissement, qu'ils datent du 19^e siècle et ont été conçus pour de petites péniches, ou des années 1960-1970.

Les investissements montent en puissance puisqu'ils étaient de 170 millions en 2019, de 220 en 2020 et 320 en 2021. Les 345 millions de 2022 incluent une dotation du plan de relance de 175 millions sur trois ans (2021-2023). La régénération des infrastructures capte les trois quarts du budget. ■

⁽¹⁾ Cf. Travaux n°968, avril-mai 2021, page 8.



© VOIES NAVIGABLES DE FRANCE

Les têtes du canal de Saint-Albin (Haute-Saône) sont inscrites au titre des monuments historiques.

CENTRE HOSPITALIER AGRANDI

Vinci Construction a remporté les lots gros œuvre et clos couvert du 1^{er} bâtiment de l'extension du Centre hospitalier Princesse Grace à Monaco, contrat de 98 millions d'euros. Il s'agit de réaliser 16 étages plus 6 niveaux de parking souterrain (65 000 m²).

Les travaux de terrassement et de soutènement seront couverts d'une bâche acoustique de façon à réduire le bruit émis d'au moins 12 dB(A). La bâche de 2 800 m² comporte trois couches : PVC, ouate polyester et grille PVZ, le tout pesant 1,34 kg/m². Le béton Exegy de Vinci au liant bas carbone* sera employé à 85%. Fin des travaux prévue en 2025.

* Voir 1^{re} page des actualités.

© A&L LIFE DESIGNERS-NMI-AAA INGÉNIERIE-TRACTEBEL



Vue du Centre hospitalier Princesse Grace à Monaco en 2025.

WESTON WILLIAMSON DANS EGIS

Egis a pris une participation majoritaire dans Weston Williamson Partners, cabinet international d'architecture et de design, exerçant notamment dans les transports et le développement urbain, implanté en Angleterre, Australie et Canada.

Le conseil d'administration (CA) de Weston Williamson Partners comprendra les fondateurs, Chris Williamson et Rob Naybour, qui restent président et directeur général, l'associé gérant Philip Breese, et quatre membres seniors du CA d'Egis.

PETITS CANAUX DU GRAND EST

Le ministre des transports, Voies navigables de France et la région Grand Est ont signé un partenariat le 24 février pour revitaliser les petits canaux de la région.

Ces voies d'eau touristiques ont un potentiel de développement important notamment le canal des Ardennes, celui de la Meuse, le canal des Vosges, celui du Rhône au Rhin (branche sud), selon une étude récente.

EOLIEN MARIN : PROGRAMMES R&D

France énergies marines est le nom de l'Institut de la transition énergétique des énergies marines renouvelables.

L'établissement est porté par une société par actions simplifiée (SAS). Il fédère 18 membres associés et dix membres contributeurs.

Les activités de l'Institut, plateforme interdisciplinaire, sont organisées autour de 4 programmes de recherche centrés sur l'éolien en mer : caractérisation des sites marins propices aux énergies renouvelables, dimensionnement et suivi des installations, intégration environnementale et optimisation des parcs.

Par exemple, France énergies marines pilote la création d'observatoires des déferlantes de tempête, très dommageables pour les éoliennes. Une vague de 24,6 m a été enregistrée en 3D par des caméras sur le phare de la Jument à l'île d'Ouessant (projet Dime 2017-2021). La recherche se poursuit à travers le projet Dimpact, débuté en 2020, avec une éolienne flottante en Norvège. Il s'agit de modéliser les efforts de "claque" et de faire évoluer les documents de certification.

L'Observatoire des énergies marines renouvelables, qui émane du Cluster maritime français, consacre sa note n°14 (décembre 2021) à l'Institut.

Les notes de l'Observatoire n°14 sur :

<https://merenergies.fr/media/note-OEM-14.pdf>



© FRANCE ÉNERGIES MARINES

Un radar sur le phare de la Jument au large de l'île d'Ouessant (Finistère) contribue à mieux connaître l'impact des déferlantes sur les structures d'éoliennes.

TROPHÉES BÉTON ÉCOLES : LA COULEUR EN VEDETTE



Musée ethnographique d'histoire et d'art à Porto-Novo (Bénin) vu par Majoie Tsadok Kpoviessi (Ensa Strasbourg).

© MAJOIE TSADOK KPOVIESSI

Rouge brique est la couleur du musée ethnographique d'histoire et d'art de Porto-Novo (Bénin) imaginé par Majoie Tsadok Kpoviessi, étudiant à l'École nationale supérieure d'architecture (Ensa) de Strasbourg. L'emploi de béton à base de terre de barre rouge disponible en quantité au Bénin lui a valu de remporter le 1^{er} prix des trophées béton écoles remis en janvier par l'association Bétocib et le Centre d'information sur le ciment et ses applications (Cimbéton).

Le gouvernement béninois envisage un tel musée dans le cadre de son programme d'action touristique et culturelle "Le Bénin révélé". Le site sur lequel a planché Majoie Tsadok Kpoviessi pour son projet de fin d'études, se situe à l'entrée de la capitale administrative, sur un espace jouxtant un pont fermé et s'accompagne de la mise en place de transport sur l'eau. Le 1^{er} prix est doté de 5000 euros.

→ Granulats de gaize

Le 2^e prix (4000 euros) a été décerné à Quentin Risaletto, étudiant à l'Ensa de Clermont-Ferrand pour le réaménagement d'un ancien golf à Manchester (Angleterre), inondable. Il projette d'y cultiver du miscanthus, graminée dont la fibre peut être incorporée à du béton pour le rendre plus isolant ou être cultivée à des fins énergétiques. Le golf, reconverti et bâti en partie, animerait le quartier pavillonnaire de Withington.

Le 3^e prix (3000 euros) a été remporté par Guillaume Porche de l'Ensa de Strasbourg pour sa conception d'un "historial", lieu d'apprentissage, de mémoire et

de vie sur l'ancien village de Vauquois (Meuse), poste d'observation de la 1^{re} Guerre mondiale, détruit par 538 bombes souterraines. Son musée de 4725 m², situé à l'ouest du nouveau village, serait construit en béton contenant des granulats de gaize, roche présente sur le site et qui le colore en ocre.

→ Voûtes croisées

Douze projets avaient été sélectionnés et présentés au jury des trophées béton écoles, dans deux catégories "projet de fin d'études" (voir ci-dessus) et "réinterprétation d'une œuvre en béton" (étudiants 1^{er} et 2^e cycles).

Deux réinterprétations ont été lauréates et ont reçu 2000 euros. Nicolas Nugue (Ensa Versailles) s'est inspiré de la fabrique de rhum de Bacardi de Félix Candela (Mexico, 1960). Son Palais populaire reprend le principe des voûtes

en béton armé, croisées et reliées par leur sommet, structure qui libère le sol et laisse entrer la lumière en abondance. L'étudiant propose une préfabrication avec un coffrage en textile.

Zaid Chafaqi et Clément Chafaie ont revisité en maquette l'église du Raincy (Seine-Saint-Denis) des frères Perret où le béton a été laissé brut de décoffrage.

→ Mention ingénieurs-architectes

Enfin, pour la 1^{re} fois, l'Association des diplômés ingénieurs-architectes et architectes-ingénieurs (AIAI) s'est jointe aux trophées. Elle a décerné une mention spéciale au projet de fin d'études de Loris Bied (Ensa Saint-Étienne) pour un centre social et culturel à Beausoleil (Alpes-Maritimes) au nord de Monaco sur la parcelle d'une villa du 19^e siècle. La pierre excavée sur place, de couleur rouge, est réinjectée dans le béton. ■



Nicolas Nugue (Ensa Versailles) s'est inspiré de la fabrique de rhum de Félix Candela, à Mexico (1960).

© NICOLAS NUGUE

LES PHÉNOMÈNES MÉTÉOROLOGIQUES BOULEVERSENT LA RÉFLEXION SUR LA GESTION DES OUVRAGES



© SNCF RÉSEAU DT OCCITANIE-TOULOUSE

Un dispositif d'alerte doit permettre que les trains soient stoppés en gare. Sur la photo, situation après des dégâts sur une ligne dans le Gard, en septembre 2021.

Les phénomènes liés au changement climatique détruisent ponts, murs de soutènement, digues, et obligent à repenser les méthodes de travail. Adapter les ouvrages à ce paramètre était le thème de la journée du Comité français de mécanique des sols et de géotechnique, le 9 décembre⁽¹⁾.

« Depuis vingt ans, nous sentons que les événements sont plus importants et, depuis cinq ans, il y a plus de problèmes de ruissellement, a témoigné Michel Triquet, chef adjoint du département voies et abords de SNCF Réseau. Maintenant, tous les ans, il y a un événement marquant. » À l'appui de son témoignage, il montre l'impact des 290 mm de pluie tombés en trois heures, le 14 septembre

2021, sur une ligne près de Montpellier (Hérault). « Nous avons eu 13-15 km de dégâts en plaine et il a fallu plus de 15 jours pour rétablir la circulation, » précise-t-il.

Même emballement de phénomènes constaté par Marie Colin, directrice projets résilience des infrastructures de transport au Cerema : « En 2016, nous avons été sollicités deux-trois fois par des gestionnaires. En 2021, c'est plus de vingt fois. Pour avoir de la résilience suite à un événement, il faut penser la gestion d'un ouvrage sur le moyen ou long terme, au lieu du court terme qui est le plus fréquent, et sensibiliser le personnel. Les gestionnaires connaissent mal leurs infrastructures, par exemple l'emplace-

ment des buses d'assainissement. Ils relient peu informations sur papier et données numériques. »

→ Infiltrer ou transférer les eaux

À SNCF Réseau où les moyens d'entretien vont davantage aux voies qu'aux ouvrages, ces derniers doivent être plus robustes pour mieux résister aux intempéries mais il faut aussi un suivi et un dispositif d'alerte. « Nous devons arrêter les trains avant qu'ils soient sur le lieu du problème, les retenir en zone sûre, explique Michel Triquet. Le plus grave, c'est un train qui déraile. Par ailleurs, c'est très compliqué d'envoyer des secours dans une zone inaccessible. Il faut regarder au-delà de l'ouvrage. Par le passé, une ligne de train pouvait être entourée de bocage ou de cultures qui absorbaient l'eau. Aujourd'hui, l'eau ruisselle sur des surfaces urbanisées. La solution est d'implanter des zones d'infiltration ou de transfert en concertation avec les collectivités locales. »

→ Route petite mais vitale

Il faut aussi, selon Marie Colin, se demander quel est l'objectif de l'adaptation de l'infrastructures : « Une petite route peut être vitale localement si elle mène chez un gros employeur, comme nous l'avons vécu en Lozère avec la Direction interdépartementale des routes Méditerranée. En 2016-2018, les questions environnementales remontaient peu dans la hiérarchie. Aujourd'hui, la réflexion repose sur une stratégie qui redescend dans les différents métiers, c'est plus efficace. »

« Peut-on s'adapter à tout, a interrogé Gonéri Le Cozannet, chercheur au BRGM. Il ne faut pas perdre de vue la nécessité de réduire le réchauffement à moins de 2°C notamment pour arrêter la perte de biodiversité. En ce qui concerne la mer, faut-il défendre la côte à tout prix, amortir les débordements par des solutions basées sur la nature ou laisser faire ? »

→ Gros travaux à Noirmoutier

L'île de Noirmoutier (Vendée) qui a beaucoup souffert lors de la tempête Xynthia (février 2010), protège son port par des portes anti-tempête au-dessus des 4 m de la submersion de Xynthia, par des digues plus hautes et du renforcement d'enrochement. Les travaux se terminent en 2023. ■

⁽¹⁾ Cet article reprend des interventions de l'après-midi.

ÉCLAIRAGE PUBLIC SOBRE

Barbara Pompili, ministre de la Transition écologique, a lancé le programme Lum'acte, le 17 février, pour encourager les collectivités locales à prendre en mains l'amélioration de leur éclairage public. Cet éclairage représente 40 % de leurs consommations d'électricité, soit 5 térawattheures (5000 GWh). 40% des équipements ont plus de vingt-cinq ans.

L'État apporte 10 millions d'euros pour faciliter la rénovation de 2,5 millions points lumineux sur les 10 millions existants.

Le programme comprend : l'accompagnement au diagnostic du patrimoine ; le suivi des actions et travaux par le réseau des économistes de flux (conseillers en économies d'énergie du programme Actee) ; conception d'un centre de ressources et d'expertise sur l'éclairage public.

Modalités de candidatures à paraître. Les lauréats pourront s'engager dans un schéma directeur d'aménagement lumière (Sdal).



© P. BAUDRY/ISTOEV

Éclairage public en Vendée.

BASE DE DONNÉES COURS D'EAU

L'État met à disposition de tout un chacun les données sur les hauteurs et débits des cours d'eau, depuis le 25 janvier, sur le site : www.hydro.eaufrance.fr. Elles sont historiques ou en temps réel.

L'Hydroportail donne accès à des statistiques qu'il est possible d'extraire. Il fournit des informations sur l'écoulement y compris en cas de crues ou d'étiage.



TRANSPORTS DE MOYENNE DISTANCE

« La décarbonation des transports ne se fera pas sans le maillage incomparable de la route, écrit André Broto, auteur de *Transports, les oubliés de la République*. Ce livre a pour but aussi bien d'inviter le lecteur à redécouvrir l'histoire de la route et ses vertus que d'imaginer un système fondé sur l'intermodalité (...) pour que chacun retrouve une mobilité choisie et non subie. »

André Broto, ingénieur des Ponts et chaussées, s'interroge sur les moyens de transport de quelques dizaines de kilomètres, là où les lignes de cars express rencontrent un certain succès quand ils existent. L'ouvrage de 250 pages illustrées reprend les évolutions de la route, fait le point sur la situation actuelle et propose des pistes d'amélioration. Éditions Eyrolles (*La fabrique de la Cité*).

MAINTENANCE DES OUVRAGES DE PROTECTION

Le Cerema publie un mémento sur la maintenance des ouvrages de protection contre les chutes de blocs. En 120 pages, téléchargeables, le guide fournit des informations techniques, réglementaires et de coût. Il est écrit par des maîtres d'ouvrage.

RECTIFICATIF

Webuild est un groupe italien et non autrichien comme nous l'avons écrit par erreur dans les actualités de janvier-février. Par ailleurs, son partenaire sur le projet Snowy 2.0 en Australie est Clough et non Lough. Nous prions Webuild de nous en excuser et nos lecteurs, de rectifier.

MIEUX CONNAÎTRE LES TERRES EXCAVÉES



© OLMIER BRUNET/SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

Pour réutiliser les terres excavées, il faut connaître leur composition. C'était l'objet de la 2^{de} conférence sur ce thème par le CFMS.

Des terres pyriteuses ont été excavées lors du creusement du tunnel entre Nanterre et Paris sur la ligne Eole ouest. Elles provenaient de couches géologiques de l'Yprésien rarement atteintes car profondes, constituées de sables de Cuise, sable supérieur et fausses glaises⁽¹⁾. « Au sortir de la conduite de marinage, elles ont été déclarées conformes aux seuils d'acceptabilité des installations de stockage de déchets inertes mais un ou deux ans plus tard, une odeur d'œuf pourri caractéristique de l'hydrogène sulfuré (H₂S) s'est dégagée de leur stockage à Sandrancourt (Yvelines) et des traces ocre rouge étaient apparues », a relaté Myriam Duc, chercheuse au laboratoire Sols, roches et ouvrages géotechniques⁽²⁾, lors de la

2^{de} conférence sur les terres excavées du CFMS⁽³⁾.

→ Repérer les pyrites

Les pyrites (disulfure de fer) sont responsables de ces phénomènes. Stables en l'absence d'oxygène, elles se dégradent si mises au contact d'air et d'eau. Elles produisent alors des sulfates qui peuvent générer des gonflements en présence de ciment. Elles acidifient les eaux et dégagent dans certaines conditions de l'H₂S. Les bactéries du sol peuvent accélérer cette dégradation.

On peut repérer leur présence sur des carottes de sols avant travaux. Une fois séchées, apparaissent des macro-pyrites de couleur ocre/doré cerclée d'oxydes rougeâtre ou de blanc (gypse), des grains cubiques voire des grains jaunes de

soufre natif. Les efflorescences blanches au niveau des veines de lignite dans les fausses glaises, s'avèrent être du sulfate de fer. Mais la majeure partie des pyrites restent uniquement visibles au microscope.

→ Réduire l'oxydation

Les pyrites se trouvent fréquemment dans le sous-sol du Bassin parisien, le plus souvent associées à des carbonates (calcaire, craie) qui évitent l'acidification. C'est pourquoi l'ajout de carbonates est une des solutions pour gérer l'impact de l'oxydation dans les terres, mais il reste le relargage des sulfates dans les eaux d'écoulement. L'immersion sous eau limitera l'accès de l'oxygène tout comme le compactage.

Des calculs et essais permettent aussi de les repérer, selon la norme EN 15875 et l'essai cinétique du rapport technique CEN/TR16 363.

→ Caractérisation express

Lors de la conférence du CFMS, a aussi été exposée une méthode express de caractérisation des terres sur site, Diagnosticsol (Guintoli/NGE), créée à partir du chantier du Grand Paris Express. De plus, a été présenté le Guide de valorisation des terres excavées en technique routière par des projets d'infrastructure linéaire de transports (Cerema/UMTM) à paraître fin 2022. ■

⁽¹⁾ Yprésien : époque Éocène, 56-48 millions d'années.

⁽²⁾ Université Gustave Eiffel.

⁽³⁾ Le 8 mars. 1^{re} conférence CFMS sur les terres excavées, le 8 février.

DIAGNOSTIC DE CONDUITES D'EAU POTABLE

Le Paris de Paris a utilisé la Smartball de Pure Technologies pour connaître l'état de l'aqueduc de la Voulzie de 39 km entre son usine de Longueville (Seine-et-Marne) et un poste de regroupement en forêt de Fontainebleau, fin 2021.

La Smartball mesure 7 cm de diamètre, et 18 avec la mousse compressible qui la protège. Lancée dans le courant d'une conduite d'eau potable sous pression, elle détecte par acoustique des fuites et des poches de gaz. Elle communique avec l'agent qui la suit à des points de contrôle extérieurs. Elle peut cartographier une canalisation, localiser les

pièces métalliques comme des joints qui, quand elles correspondent à des fuites, simplifient le repérage des réparations. La Smartball rend service dans les réseaux difficilement visitables par du personnel comme l'aqueduc de la Voulzie de 1 250 mm de diamètre avec peu d'accès.

→ Serpent à pétales

Pure Technologies du groupe Xylem propose également le Pipediver, un "serpent à pétales", capable d'analyser la structure d'une conduite notamment par la perte d'épaisseur. Il est utilisé par le Seneo, distributeur d'eau potable auprès de 600 000 habitants de l'Ouest de l'Île-

de-France, dans trois conduites d'eau potable de 1,5 km après passage de la Smartball. ■

© XYLEM



La Smartball contient une batterie de capteurs et appareils de mesure. À droite, sa protection en mousse bleue.

La CNETP regroupe **8 800 entreprises** de Travaux Publics et assure le calcul et le versement de prestations dues auprès de **284 000 salariés**.

NOS MISSIONS

- La gestion des congés payés auprès des salariés des Travaux Publics
- La mise en œuvre du régime de chômage intérimaires auprès des entrepreneurs de Travaux Publics



CAISSE NATIONALE
DES ENTREPRENEURS DE TRAVAUX PUBLICS

Au service de la Profession des Travaux Publics



Membre du Réseau Compétences Intégrées BTP

NOUS CONTACTER

📍 31 rue le Pelletier 75453 PARIS CEDEX 09

📞 Entreprises : 01.70.38.07.70

📞 Salariés : 01.70.38.09.00

 sur Internet : www.cnetp.fr
 sur l'appli mobile : **CNETP Salarié**


AGENDA

ÉVÉNEMENTS

Nous invitons les lecteurs à vérifier par internet que les événements annoncés dans cette rubrique sont maintenus, à quelle date et dans quelles conditions (en présentiel et/ou à distance).

• 27 MAI AU 3 JUIN

27^e congrès, Commission internationale des grands barrages, et réunion du Comité français des barrages et retenues

Lieu : Marseille

<https://cigb-icold2021.fr/fr>

• 31 MAI

Diagnostic et réparation du béton armé dégradé par corrosion (Ingénierie maintenance génie civil)

Lieu : Paris (FNTP)

www.afgc.asso.fr

• 31 MAI ET 1^{er} JUIN

Ville sans tranchée

Lieu : Paris (Parc floral)

www.salon-villesantranchee.com

• 3 JUIN

Maintenance et sécurité des ponts en Europe

Lieu : Bruxelles (Belgique)

www.afgc.asso.fr

• 9 ET 10 JUIN

Journées de la géothermie

Lieu : Aix-les-Bains (Savoie)

<https://journées-geothermie.fr>

• 15 AU 17 JUIN

Seenergy

Lieu : Le Havre

www.seenergy-forum.com

• 22 AU 24 JUIN

Ingénierie géotechnique pour la conservation des monuments et sites historiques

Lieu : Naples (Italie)

<https://tc301-napoli.org>

• 28 AU 30 JUIN

11^e journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

Lieu : Lyon (Cité internationale)

<https://jnng2022.sciencesconf.org>

FORMATIONS

• 8 AU 10 JUIN

Techniques d'excavation et de soutènement en site urbain

Lieu : Paris

<https://formation-continue.enpc.fr>

• 13 ET 14 JUIN

Exécution des travaux de réparation d'ouvrages d'art

Lieu : Paris

<https://formation-continue.enpc.fr>

NOMINATIONS

AFGC :

Le conseil d'administration de L'Association Française de Génie Civil (AFGC) a élu le 5 avril dernier sa nouvelle présidente en la personne de Claude Le Quéré, pour un mandat de 4 ans. Claude Le Quéré, ancienne élève de l'école Polytechnique et de l'école des Ponts et Chaussées, est actuellement Directrice des Ouvrages d'Art chez EGIS. Elle

succède à Bruno Godart, jeune retraité de l'Université Gustave Eiffel.

LÉGION D'HONNEUR :

Valérie Bernhardt, directrice générale de Terrasol, a reçu le 19 mai 2022 les insignes de Chevalier dans l'Ordre National de la Légion d'Honneur, qui lui ont été remis par Alain Pecker, membre de l'Académie des Technologies.

LYON PART-DIEU :

Depuis le 1^{er} mars, Florent Sainte Fare Garnot remplace Ludovic Boyron à la direction générale de la Société publique locale Lyon Part-Dieu, chargée de la transformation du quartier.

SNCF RÉSEAU :

Catherine Trevet a été nommée directrice territoriale en Occitanie suite au départ d'Emmanuèle Saura à la direction générale projets, maintenance, exploitation de SNCF Réseau à Paris.

UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL L'ESPACE SOUTERRAIN, AVENTURE URBAINE DU XXI^e SIÈCLE ?

Bruno Barroca est architecte DPLG, urbaniste et professeur à l'Université Gustave Eiffel. Il est également chercheur au Lab'Urba et enseignant au département Génie Urbain, il dirige la revue bilingue Risques Urbains/Urban Risks et a publié de nombreux articles scientifiques et ouvrages dont "Penser la ville et agir par le souterrain". Ce parcours l'a amené à "regarder" la ville avec des angles différents, les formes architecturales, la conception urbaine, les risques, ou encore les sciences de l'information géographique. Il nous livre les raisons pour lesquelles il pense que les espaces souterrains pourraient être l'aventure urbaine du XXI^e siècle. **Entretien avec Bruno Barroca, architecte DPLG et urbaniste.** PROPOS RECUEILLIS PAR

MARC MONTAGNON



1- Bruno Barroca, architecte DPLG et urbaniste.

Comment avez-vous été amené à vous intéresser aux espaces souterrains ?

Mon parcours universitaire m'a conduit à regarder la ville au niveau de sa conception, ce qui est propre à une école d'architecture mais avec une attention forte pour les espaces souterrains, du fait de mon intérêt pour le génie urbain. En génie urbain, l'espace souterrain est extrêmement important notamment comme réceptacle des infrastructures qui composent la majorité des systèmes techniques urbains. L'espace souterrain constitue donc un sujet d'intérêt pour le département Génie Urbain que j'ai intégré au milieu des années 2000. Mon premier projet de recherche au sein du département Génie Urbain traitait d'ailleurs de technologies de construction de tranchées couvertes

à partir de parois structurelles verticales de type Prémur. Parallèlement, à cette époque, les notions de durabilité émergeaient fortement chez les urbanistes. La compacité urbaine apparaissait alors comme le corollaire de la ville durable. De ce fait, je me suis intéressé à construire des connaissances orientées vers la ville dense, compacte, en m'intéressant au développement urbain dans des espaces à fortes contraintes : l'espace souterrain, d'une part, et les zones soumises à des risques, notamment aux risques d'inondations, d'autre part.

Je me suis donc intéressé à ces espaces sur lesquels les contraintes sont importantes afin d'étudier les manières dont ils peuvent être investis, ce qui participe à assurer une certaine compacité urbaine. Le souterrain ne m'intéressait pas donc pas tant dans

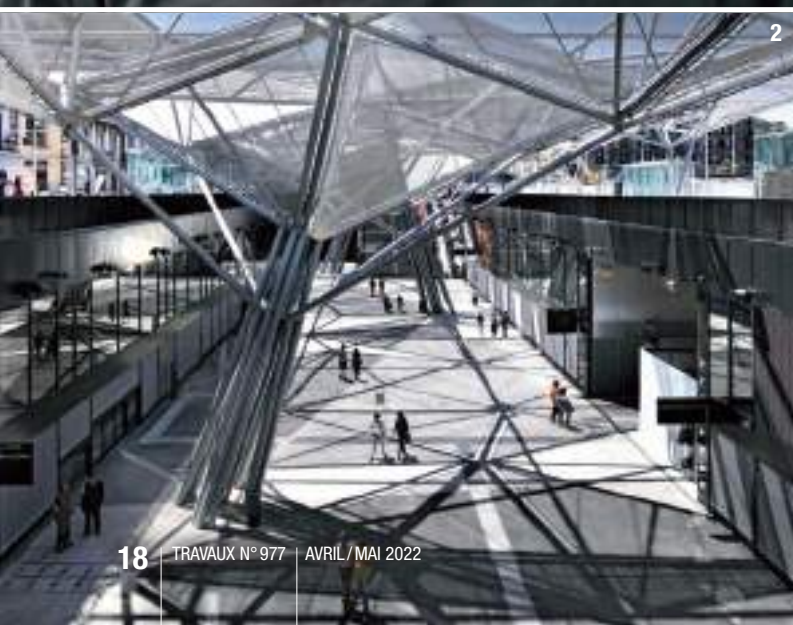


FIGURE 1 © MARC MONTAGNON - FIGURE 2 © PEPPE MAISTO/DOMINIQUE PERRAULT ARCHITECTURE - FIGURE 3 © DR

une vision de support à des "réseaux", technique, mais plutôt dans une vision d'un "espace" qui peut être le réceptacle de programmes urbains.

Pourquoi vos recherches sur les espaces souterrains se spécialisent exclusivement sur le milieu urbain ?

L'objet "ville" a nourri ma formation, par l'étude de la forme construite à diverses échelles. Un doctorat en aménagement de l'espace et urbanisme, un double cursus finalisé par les diplômes d'architecte DPLG et de DEA en "sciences de l'information géographique" ainsi qu'un premier cycle universitaire en mathématique et informatique, m'ont permis d'accéder à des compétences multidisciplinaires orientées vers la compréhension de l'espace urbain et

2- Le corridor reliant la gare centrale de Naples à la Ligne 1 du métro de la place Garibaldi.

3- La canopée des Halles des architectes Patrick Berger et Jacques Anziutti inaugurée en 2016 deux ans avant la fin du réaménagement du quartier.

4 - Deux des ouvrages réalisés sous la direction de Bruno Barroca.

5- La bibliothèque François Mitterrand.

6- La cime des arbres d'un jardin luxuriant surgit du cœur du parvis de la bibliothèque François Mitterrand.

BRUNO BARROCA : PARCOURS

Après un DEUG en mathématique, informatique et applications aux sciences, à l'Université de Franche-Comté (1995-1997), Bruno Barroca suit des études à l'École nationale supérieure d'architecture et de paysage de Lille (1997-1999) puis à École d'architecture de la ville & des territoires Paris-Est à Marne-la-Vallée (1999-2004), dans laquelle la dimension urbaine est très forte, dont il est diplômé architecte DPLG.

Il complète son parcours universitaire par un cursus en sciences de l'information géographique (DEA) à l'Université Paris Est Marne-la-Vallée et un doctorat réalisé à l'École Nationale des Ponts et Chaussées (2002-2006) sur le thème de "la vulnérabilité des villes face aux risques inondations".

Depuis septembre 2007 Bruno Barroca est maître de conférences puis professeur au département génie urbain de l'Université Paris Est Marne-la-Vallée devenue Université Gustave Eiffel. Il est actuellement directeur de l'École doctorale Ville Transports Territoires.

L'Université Gustave Eiffel a choisi de faire émerger, en son sein, un pôle "Ville, environnement et leurs ingénieries". L'école doctorale est un élément fort de la formation des chercheurs dans ce pôle et elle tire parti de cette dynamique scientifique.

Cette école doctorale est originale dans son positionnement car elle est la seule qui affiche la thématique de la ville, des transports et des territoires comme son propos central. Bruno Barroca est par ailleurs rédacteur en chef de la revue bilingue "Risques Urbains / Urban Risks" et chercheur au Lab'Urba.

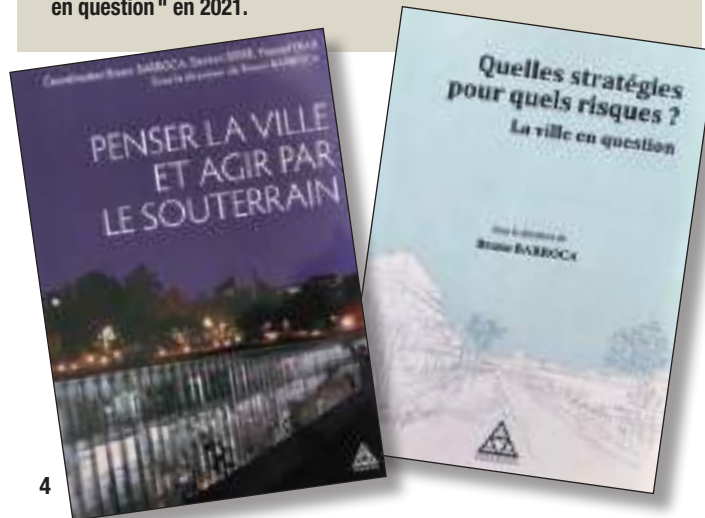
Il a publié de nombreux articles scientifiques et dirigé la publication aux Presses des Ponts des ouvrages "Penser la ville et agir par le souterrain" en 2014 et "Quelles stratégies pour quels risques : la ville en question" en 2021.

de son organisation. Mon activité scientifique actuelle est axée principalement sur le rapport entre territoires urbains et impact climatique avec un domaine d'expertise sur les risques dits naturels, les risques urbains, la gestion des déchets issus de situations exceptionnelles et la résilience urbaine.

Pour être viables, les villes devront prendre en compte plus fortement l'apparition de "nouveaux" risques urbains et intégrer les évolutions climatiques qui transforment notre environnement. À travers l'analyse de la vulnérabilité des espaces urbains et la résilience des systèmes, c'est la tension entre aménagement, ingénierie et territoire qui oriente cette expertise sur la ville. La transformation et l'adaptation des villes aux risques dépassent la notion d'optimum technique. La mise en cause des équilibres urbains par les risques appelle tant une lecture systémique des structures urbaines qu'une lecture géographique des distributions sociales et spatiales d'aujourd'hui et de demain. C'est à cette double démarche que répond ma recherche qui s'articule entre des actions académiques, par des méthodes scientifiques étudiant la vulnérabilité et la résilience synchronique des systèmes urbains, de prospective construisant des méthodes et modèles par un exercice d'échange et de confrontation avec des acteurs et des territoires pour y stimuler une réflexion sur l'avenir, et impliquées, auprès des services de l'état, des collectivités locales, des urbanistes, des architectes...

Quel est votre point de vue sur la conception des gares du Grand Paris Express ?

Le Grand Paris Express est pensé essentiellement comme un système technique assurant la mobilité des >



© DOMINIQUE PERRAULT ARCHITECTURE

© MARC MONTAGNON



7 © IRCAM

personnes mais le développement souterrain autour des gares n'entre pas dans la réflexion actuelle. Il n'y a pas de planification d'un développement souterrain autour des gares, ce qui n'empêche pas des opérations qui se développent ponctuellement mais sans cohérence d'ensemble.

Concernant l'espace souterrain, il faut le comprendre dans sa profondeur. Se situer à quelques mètres sous la surface offre des conditions d'accès, des dispositifs de sécurité, des possibilités de faire entrer de la lumière naturelle, ... qui sont différentes d'un espace profond. La gare Saint-Maur - Créteil de la Ligne 15, par exemple, dont les quais se situent à -52 mètres par rapport au niveau du sol sera le bâtiment le plus haut - ou l'un des plus hauts - de Saint-Maur.

Dans les gares du Grand Paris Express il y a généralement une grande profondeur et des volumes construits importants qui n'ont que rarement été pensés pour des programmes urbains. Les conditions sont atypiques, ce sont des



8 © MARC MONTAGNON

espaces borgnes mais très accessibles. J'ai participé en 2018 à une émission intitulée "Les souterrains : des espaces à investir" diffusée sur Europe 1. Cela se déroulait, dans un studio absolument clos, sans aucune ouverture sur l'extérieur. Nous nous sommes posé la question : "Peut-on vivre en souterrain ?". Mais si ce studio avait été à 20, 30 ou 50 mètres sous le sol, il aurait eu les mêmes qualités. Il existe de nombreux programmes - cinémas, salles de

spectacles, stockage - requérant des qualités thermiques et acoustiques qui pourraient tout aussi bien être aménagés en souterrain.

Existe-t-il des réalisations en France où l'espace souterrain tient une place importante ?

Le Centre Pompidou est un projet architectural et urbain très intéressant qui intègre l'Ircam (Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique).

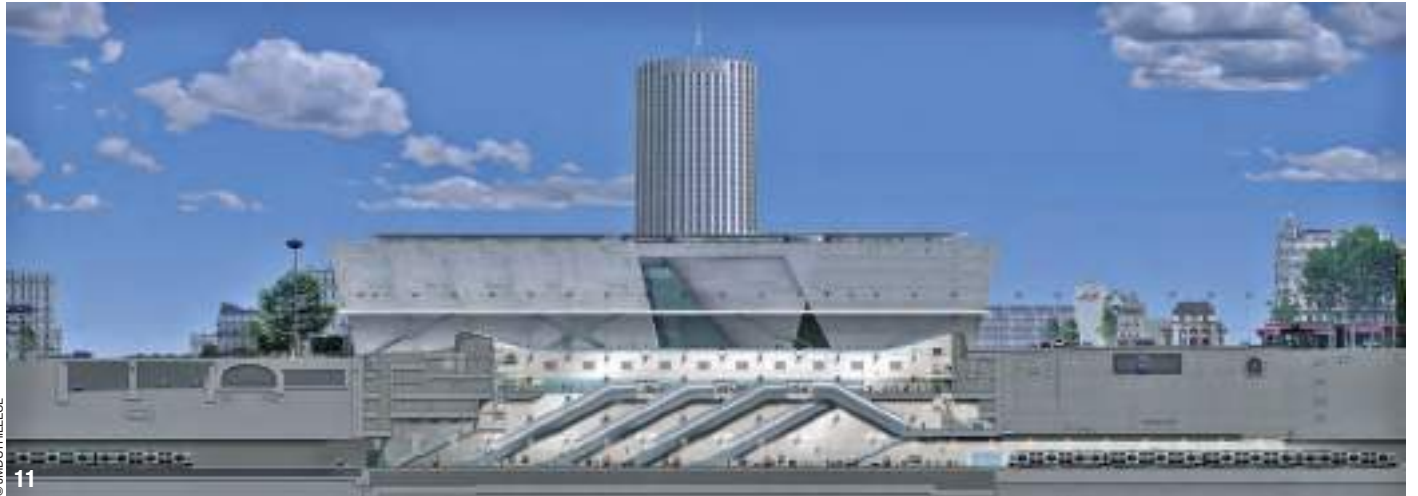
L'Ircam est aujourd'hui l'un des plus grands centres de recherche publique au monde se consacrant à la création musicale et à la recherche scientifique. Son bâtiment est construit entièrement en souterrain ; ce choix architectural fort a permis d'installer en surface la fontaine Niki de Saint-Phalle et Jean Tinguely de la place Igor-Stravinsky. Ainsi placé, ce bâtiment libère un espace urbain qui donne lieu à la construction de la place et protège l'Ircam de nom-



9 © DR



10 © MARC MONTAGNON



© JINDUTHILLEUL
11

breuses perturbations sonores. La qualité du projet de Renzo Piano et Richard Rogers réalisé en 1978 est multiple : ce parti-pris audacieux d'un bâtiment en souterrain pour l'Ircam a permis de libérer la ville et d'améliorer la qualité urbaine du quartier.

Un autre exemple, parmi les plus beaux que je connaisse, est la création du Grand Louvre. L'aménagement en souterrain réalisé en lien avec la construction de la Pyramide de Ieoh Ming Pei a permis de mettre en communication des bâtiments jusque-là éparpillés en y ajoutant un programme vaste avec la création d'amphithéâtres, de sorties de métro, d'un parking pour les visiteurs, d'un centre commercial ainsi que la mise à jour et valorisation des vestiges de l'enceinte de Charles V.

L'aménagement du Domaine du Louvre et des Tuileries en ce qui s'appelle aujourd'hui le Grand Louvre en fait un ensemble culturel original à caractère muséologique complètement intégré dans son environnement avec une imbrication forte des espaces souter-

rains et aériens. La pyramide sert d'entrée au musée et permet d'éclairer un immense hall souterrain (hall Napoléon), espace central donnant accès à différentes parties du bâtiment. Le projet architectural a permis une imbrication extrêmement forte des espaces mais

aussi des programmes entre la ville, le musée, des amphithéâtres, commerces, restaurants, métro, parking ... qui fonctionnent grâce aux connexions souterraines.

À l'inverse, avec le recul, il est frappant de constater à quel point la dimension

souterraine du forum des Halles dans le projet des années 60 n'a pas été une réussite. Peut-être que ce projet n'a pas valorisé suffisamment la mise en communication du monde souterrain et de la surface.

Lorsque j'ai découvert ce projet, la place basse n'apparaissait que comme un vide qui trouait l'infrastructure sur trois niveaux. Ce problème a été corrigé avec la récente

réhabilitation. L'installation d'une centralité dans le patio par la "canopée" de Patrick Berger et Jacques Anziutti permet désormais de créer des relations entre l'espace souterrain et la ville.

Cette restructuration profonde du quartier axée sur les parcours et les flux et ouvrant de nouvelles sorties, transforme fondamentalement les caractéristiques spatiales de l'ouvrage et le rapport du public au lieu. Il n'en demeure pas

moins que le projet présenté lors du concours initial d'appel d'offre par l'agence MVRDV, projet non retenu, me plaisait particulièrement. Ce projet en forme de cône ouvert descendant jusqu'aux quais du RER aurait apporté

▷

À PROPOS DE LA REVUE RISQUES URBAINS/URBAN RISKS

La revue Risques urbains/Urban Risks pose les grands cadres de réflexion d'analyse des risques liés à un type particulier de menace ou de vulnérabilité tout en s'enrichissant d'autres expériences nécessaires à la compréhension de la complexité du fonctionnement urbain.

Cette multidisciplinarité permet aux auteurs de présenter des articles sous l'angle des dysfonctionnements dus à la fragilité et aux interdépendances des systèmes techniques, des réponses et des impacts humains, matériels, sociaux ou financiers, de l'exposition à des aléas naturels, climatiques, industriels, terroristes, ou sous l'angle des concepts de vulnérabilité, de résilience et d'efficience, de modélisation, des méthodes, d'approches spatiales et temporelles, des outils d'évaluation, des données et des représentations.

© MARC MONTAGNON

12



© MARC MONTAGNON

13



du confort aux usagers et mis en valeur cette gare qui est la plus grande souterraine au monde.

Des réalisations significatives d'aménagement de l'espace souterrain existent-elles également à l'étranger ?

À Montréal, le développement de ce qui s'appelle la "ville intérieure" se définit comme l'espace que l'on pratique, en tant que piéton, sans aller à l'extérieur. Ce réseau souterrain intégrant plusieurs stations de métro couvre 32 kilomètres de tunnels.

Les tunnels et galeries permettent de relier de l'intérieur plusieurs édifices à des bureaux, des complexes résidentiels, des centres commerciaux, des universités, des résidences de luxe et des hôtels. Les tunnels contiennent aussi une large gamme de restaurants et de boutiques allant du très chic au bon marché. Le Montréal accessible par la "ville intérieure" contiendrait d'ailleurs près de 12% de tous les commerces du centre-ville.

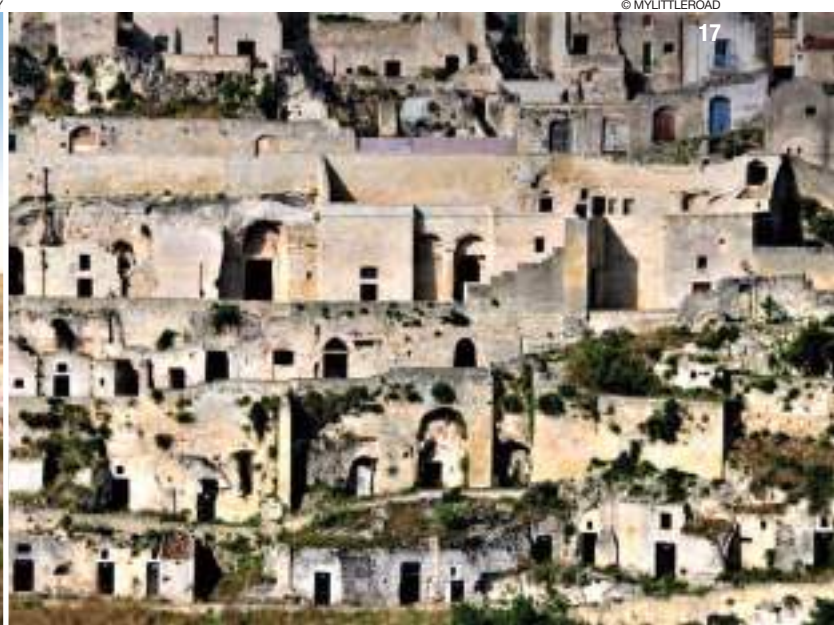
Il est possible de rejoindre son bureau, s'installer à un restaurant, faire ses courses, aller dans un cinéma, à la patinoire ou dans une salle de sports, en souterrain sans circuler à l'extérieur, mais on n'y est pas pour autant en permanence en souterrain. Toutes les activités - bureaux, centres commerciaux, immeubles d'habitation, musées ... sont connectées par un réseau intérieur auquel on accède en métro et où la place du souterrain est très forte. De nombreux espaces sont étonnants du fait que l'on ne sait plus s'ils se trouvent ou non en souterrain, s'il s'agit d'espaces publics ou privés. La ville ne sépare plus le souterrain de l'aérien et le piéton a ainsi la capacité de se déplacer dans les trois dimensions.



Les raisons climatiques ont certainement joué dans ce choix mais elles ne sont sans doute pas déterminantes. La ville intérieure présente un intérêt par rapport au climat qui peut être très rigoureux l'hiver lorsque l'extérieur est très difficilement praticable mais elle est tout aussi appréciable l'été pendant les périodes de canicule que peut connaître Montréal.

Cette diversité des modes de pratique offre une grande capacité d'adaptation: à l'extérieur lorsqu'il fait beau, à l'intérieur lorsque l'extérieur n'est plus très accueillant. La ville intérieure est accessible par des parkings et en transports en commun puisque tous ces espaces sont connectés au métro qui, lui-même, est d'ailleurs entièrement en souterrain. De multiples formes d'utilisation de la ville sont ainsi disponibles.

La ville de Matera, dans l'extrême sud de l'Italie, qui fut la capitale de la culture en 2019, offre un autre exemple de ce qu'il est possible d'aménager dans un climat aride, très chaud l'été, avec des espaces souterrains qui offrent l'opportunité de préserver des zones de fraîcheur pour s'isoler des températures élevées de la surface. Le souterrain y est très bien utilisé, notamment dans la gestion de l'eau, à une époque où il n'y avait pas de dispositifs techniques urbains associés à des technologies comme nous en avons désormais l'habitude. C'est une ville atypique. Sur la paroi d'un profond ravin, érodé au cours du temps par le ruisseau du Gravina, la vieille ville fut construite dans la roche en formant un ensemble de "Sassi", c'est-à-dire des habitations troglodytes. Considérée comme l'une des plus vieilles cités habitées au monde, Matera est en effet célèbre pour ses habitats troglodytiques parmi lesquels des espaces d'habitations, de conservation,



de gestion de l'eau, des églises. L'habitat troglodytique est, depuis la préhistoire, une architecture, rudimentaire ou somptueuse, présente dans différentes traditions consistant à aménager des habitats souterrains ou creusés dans le rocher à flanc de montagne.

Matera, très ancienne, tout comme Montréal beaucoup plus actuelle, constituent des exemples d'adaptation aux enjeux climatiques qui nous attendent. Si l'on prend en compte ce qui émane du GIEC⁽¹⁾, le dernier rapport de 2019 indique que nous allons être de plus en plus fréquemment soumis aux épisodes climatiques extrêmes de type caniculaire, sécheresse, froid, pluie. Dans cette perspective d'un climat devenant hostile, l'espace souterrain pourrait avoir un rôle essentiel à notre survie. C'est ce que connaissait Matera il y a plusieurs siècles où la survie des habitants passait par l'utilisation de constructions souterraines.

Si l'on se projette dans un monde où les épisodes climatiques seront de plus en plus violents, il est certain que les espaces souterrains auront un rôle déterminant à jouer pour assurer le stockage d'éléments essentiels tels que l'eau et nous permettre de nous protéger de la canicule ou du très grand froid.

Il ne faut pas oublier que c'est l'espace souterrain en soi qui protège.

Cette question de la contribution de l'espace souterrain à la ville durable est d'ailleurs un sujet de recherche dans le projet national "Ville 10D - Ville d'idées"⁽²⁾, dirigé par Monique Labbé, architecte DPLG. Ce projet vise à développer une recherche appliquée sur la contribution du sous-sol au développement urbain durable. Il cherche à faire émerger les conditions d'un nouveau type de planification de l'amé-

LAB'URBA EN BREF

Le Lab'Urba se définit principalement par son inscription dans l'École d'Urbanisme de Paris issue de la fusion des deux principaux instituts d'urbanisme français.

Le périmètre du Lab'Urba associe également des enseignants-chercheurs partageant ses valeurs et travaillant sur les questions urbaines, notamment au sein du département de géographie de l'Université Paris Est Créteil (UPEC), du département Génie Urbain de l'Université Gustave Eiffel (anciennement Université Paris-Est Marne-la-Vallée) et de l'École des ingénieurs de la Ville de Paris (EIVP).

Ces instituts et départements trouvent leur raison d'être dans une forte association entre une formation qui suit les évolutions de ses mondes professionnels de référence, en France et dans le monde, et contribue à cette évolution par la production de connaissances, la mise en œuvre de ces connaissances dans des activités d'expertise et un rôle d'animation dans le débat public sur les choix sociaux qui concernent la production, la gestion et l'usage des villes.

14- La fontaine de cuivre de la place Montréal Trust dans la ville souterraine de Montréal.

15- La ville souterraine de Montréal comprend 32 kilomètres de tunnels et galeries.

16- La ville de Matera, dans l'extrême sud de l'Italie, capitale de la culture en 2019.

17- Matera est célèbre pour ses habitats troglodytiques.

18- L'université féminine d'Ewha à Séoul, en Corée du Sud.

19- À Ewha, le campus enterré naît au contact de la ville.

nagement des villes par une meilleure prise en compte des interactions positives entre la surface et le sous-sol. Il a notamment pour ambition d'améliorer la connaissance sur la ressource du sous-sol et de montrer qu'il existe une alternative crédible au seul aménagement de la surface.

Quelles sont les difficultés auxquelles est confronté le développement des espaces souterrains ?

Il ne faut pas se cacher non plus des difficultés que posent les réalisations en souterrain. L'espace souterrain présente beaucoup d'incertitudes : la connaissance des matériaux dont il est constitué n'est pas toujours bien certaine, les connaissances techniques en expertise de sols nécessaires à une réalisation en souterrain ne sont pas forcément maîtrisées par les architectes, une construction en souterrain ne met pas

en valeur de la même façon qu'un bâtiment de surface le travail de conception architecturale.

La conception d'un projet dans l'espace souterrain constitue malgré tout, à mon sens, un moment fabuleux par rapport à la mise en œuvre des compétences d'un architecte. L'architecture ne se limite pas à créer "l'image" d'un bâtiment mais la qualité architecturale s'apprécie dans l'organisation des espaces, dans la lisibilité et la force des liens et interactions entre les programmes et espaces, dans la gestion des flux, de la lumière.

Anoblir les espaces souterrains suppose de considérer un bâtiment comme faisant partie du sol. Des architectes insufflent ce changement en travaillant sur la profondeur et en érigeant le sous-sol et le sol au rang de matériau d'architecture. La matière est là, c'est l'excavation qui va créer l'espace du projet.

Ce qui est particulier dans l'architecture en souterrain, c'est son invisibilité qui permet de s'affranchir de la perception extérieure du bâtiment. À l'inverse de nombreux projets non-souterrains qui mettent en valeur un "décor d'architecture" : les façades et le matériau dont elles sont composées, la ligne générale de l'ouvrage, etc. Les projets souterrains restent discrets.

À Séoul, en Corée du Sud, à l'occasion de la construction du nouveau campus de l'université féminine d'Ewha, Dominique Perrault a mis à profit les 70 000 m² du programme pour composer un paysage raccrochant les bâtiments existants dans une topographie unificatrice. À la multiplication de pavillons sur le site, qui auraient eu pour conséquence la réduction des espaces publics, il a préféré creuser le site et y enterrer le campus en créant ▷

© DOMINIQUE PERRAULT ARCHITECTURE

18



© DOMINIQUE PERRAULT ARCHITECTURE

19



un paysage en mouvement naissant au contact de la ville de Shinchon et s'élevant progressivement vers le point haut du campus. À Séoul, l'architecture fonde le paysage.

Dans une perspective différente, la Bibliothèque François Mitterrand (ex Bibliothèque Nationale de France), dont Dominique Perrault est également l'architecte, témoigne, par l'enfouissement partiel de son programme, de la véritable vertu urbaine de l'occupation du sous-sol.

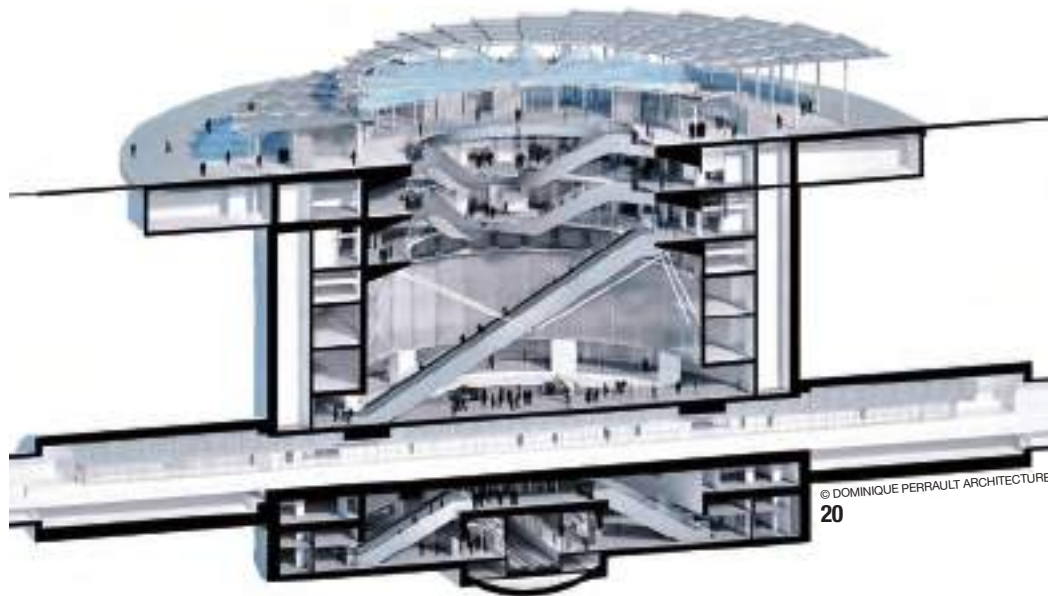
En allant chercher jusqu'à 6 niveaux de sous-sols, le projet libère une grande esplanade publique et aménage un grand vide qui prend corps entre les quatre tours. Un jardin profond et luxuriant, dont la cime des arbres surgit du cœur du parvis, se reflète sur les grandes façades vitrées des niveaux enterrés.

Dans ce cas précis, Dominique Perrault indique que si l'architecture souterraine peut apporter une réponse de qualité au programme, cette démarche n'est possible qu'en présence d'un maître d'ouvrage éclairé sur les questions urbaines. Il faut que l'intérêt général d'une architecture souterraine s'accorde bien aux spécificités de la commande publique.

Comment les espaces souterrains peuvent-ils contribuer à limiter les risques que l'on nous prédit pour l'avenir ?

Malgré l'augmentation de la fréquence et de la gravité des catastrophes naturelles qui frappent les territoires, il est possible d'en prévenir les dommages et d'en atténuer les effets.

Les espaces souterrains ont ainsi un vrai rôle dans l'adaptation de la ville aux risques climatiques. Ils constituent des espaces qui offrent des qualités



différentes des espaces de surface. Si on arrive à les développer, on aura des espaces aériens, des espaces au niveau du sol et des espaces souterrains dont l'un d'eux sera, en fonction des contraintes, plus à même d'être accueillant.

Les espaces souterrains seront des lieux naturellement plus aptes à remplir certaines fonctions que les espaces de surface ou aériens. Il y aura peut-être des moments où ce sera l'inverse. Mais, dans les moments critiques, les espaces souterrains seront des ressources permettant de faire face à différents aléas climatiques

En raison de la grande dépendance à laquelle nous serons confrontés à l'avenir en matière d'énergie, il n'est pas certain que les systèmes de climatisation, par exemple, des tours de grande hauteur, puissent continuer à fonctionner, ce qui les rendra temporairement inhabitables. Dans ces

20 et 21 - La gare Villejuif – Institut Gustave Roussy du Grand Paris Express : enterée mais ouverte sur la ville.

22- Sous le parvis de Paris La Défense, la "traverse" imaginée par l'agence Baukunst.

modes de fonctionnement pour augmenter nos refuges, nos capacités à nous adapter temporairement à des contraintes variées, nos facultés à rebondir après des chocs.

Alors que la pensée urbaine "durable" s'ancre dans le fantasme de la hauteur, cette pensée ignore encore trop régulièrement les espaces et les ressources souterrains même si l'histoire et les exemples comme Matera en montrent l'intérêt. □

moments, les ouvrages souterrains pourront constituer un refuge appréciable, même si, de leur côté, ils sont sensibles à d'autres types de risques tels que l'inondation. Il n'y a pas une unique solution, ni une supériorité d'un type d'espace sur un autre, mais il existe des caractéristiques spécifiques aux espaces souterrains. Nous devrions développer la diversité des espaces urbains, des liens, des

1- Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a été créé en 1988 en vue de fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade.

2- 31 organismes sont partenaires du projet national "Ville 10D - Ville d'idées" (Différentes Dimensions pour un Développement urbain Durable et Désirable Décliné Dans une Dynamique Dessus-Dessous : bureaux d'ingénierie, organismes de recherche, maîtres d'ouvrage, entreprises, associations).

© DOMINIQUE PERRAULT ARCHITECTURE



© BAUKUNST



PAR NUMÉRO : 15€ AU LIEU DE 25€



*Offre valable jusqu'au 31/12/22

BON DE COMMANDE ■ REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

À renvoyer à : Com et Com - Service Abonnements 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

JE COMMANDE LES NUMÉROS SUIVANTS (cochez les cases de votre choix en indiquant le nombre d'exemplaires) :

- | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| <input type="checkbox"/> 962 x | <input type="checkbox"/> 967 x | <input type="checkbox"/> 972 x |
| <input type="checkbox"/> 963 x | <input type="checkbox"/> 968 x | <input type="checkbox"/> 973 x |
| <input type="checkbox"/> 964 x | <input type="checkbox"/> 969 x | <input type="checkbox"/> 974 x |
| <input type="checkbox"/> 965 x | <input type="checkbox"/> 970 x | <input type="checkbox"/> 975 x |
| <input type="checkbox"/> 966 x | <input type="checkbox"/> 971 x | <input type="checkbox"/> 976 x |

Soit un montant total de : _____ numéros x 15 € = _____ €

(Pour une commande de plus de 20 numéros le prix passe de 15 € à 13 € l'unité)
*Offre valable jusqu'au 31/12/22 et hors frais postaux (exemple pour un numéro : 5,50€ d'envoi France, 10,00€ d'envoi Europe et 12,50€ d'envoi étranger hors Europe). Conformément à la Loi « Informatique et Libertés » de 06/01/78, le droit d'accès et de rectification des données concernant les abonnés peut s'exercer auprès du service abonnements. Ces données peuvent être communiquées à des organismes tiers. Si vous ne souhaitez pas, veuillez cocher cette case :

JE VOUS INDIQUE MES COORDONNÉES :

Nom _____ Prénom _____
 Entreprise _____ Fonction _____
 Adresse _____
 Code postal [] [] [] [] [] Ville _____
 Tél. : _____ Fax : _____
 Email : _____ Merci de ne pas communiquer mon adresse mail
 Je joins mon règlement d'un montant de _____ € TTC par Chèque à l'ordre de COM'1 EVIDENCE

ATTENTION : tous les règlements doivent être libellés exclusivement à l'ordre de COM'1 EVIDENCE

- Je réglerai à réception de la facture
 Je souhaite recevoir une facture acquittée.

Date, signature et cachet de l'entreprise obligatoire



1
© ARUP

CENTRE D'ESSAIS AU FEU (CERIB) TESTER, CALCULER ET SIMULER LE FEU POUR MIEUX LE PRÉVENIR

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

LE FEU, SA PRÉVENTION, SES EFFETS SUR LES OUVRAGES, SA GESTION À L'ISSUE D'UN INCENDIE, TELLES SONT LES COMPÉTENCES QUE MET EN ŒUVRE LE CENTRE D'ESSAIS AU FEU DU CENTRE D'ÉTUDES ET DE RECHERCHE DE L'INDUSTRIE DU BÉTON (CERIB) DONT IL EST LE PROLONGEMENT ACTIF DANS UN DOMAINE OÙ LA PRÉVENTION ET L'ANTICIPATION DES RISQUES CONSTITUENT DES ATOUTS MAJEURS POUR GÉRER CE QUI DEMEURE L'UN DES PROBLÈMES AUQUEL DOIVENT FAIRE FACE TOUTES LES STRUCTURES CONSTRUITES, QU'ELLES SOIENT EN BÉTON, EN ACIER, EN BOIS OU DANS TOUT AUTRE MATÉRIAU, TOUT PARTICULIÈREMENT S'AGISSANT D'OUVRAGES SOUTERRAINS. CHRISTOPHE TESSIER, DIRECTEUR DU CENTRE D'ESSAIS AU FEU, FAIT LE POINT SUR LES ORIGINES DE CET ÉTABLISSEMENT, SON ORGANISATION, SES MOYENS ET SES ACTIONS PRÉSENTES ET À VENIR.

« L'activité feu du Cerib est née il y a 20 ans sous l'impulsion de Fabienne Robert, indique Christophe Tessier. À l'époque, elle ne comptait que deux personnes disposant de moyens d'essais à l'échelle du

matériau. C'est en 2005 qu'est apparu le projet de construire un équipement d'essai un peu particulier, unique en son genre : le four Prométhée, de grande dimension, avec une capacité de chargement et de pilotage excep-

1- Projet
"Code Red"
de la société
Arup.

tionnelles pour réaliser des essais de structures, premier équipement du Centre d'Essais au Feu. »
Ce four a été mis en service en 2008. Sa première accréditation par le Cofrac (Comité Français d'ACCréditation) est

survenue en 2010 et son agrément en tant que laboratoire agréé par le ministère de l'Intérieur en 2011. L'activité employait 8 personnes en 2012. Dix ans plus tard, les effectifs sont passés à 30 collaborateurs sous la direction de Christophe Tessier.

Le Centre d'Essais au Feu est l'un des trois laboratoires agréés en résistance au feu en France avec le CSTB et Efectis, une spin-off de l'activité d'essais du CTICM (Centre Technique Industriel de la Construction Métallique).

D'autres fours et équipements ont été adjoints au four Prométhée afin de développer les moyens d'évaluation au sein du Cerib.

Le savoir-faire du Centre se développe autour de quatre types d'activités : en matière d'essais, essais de résistance au feu et essais in situ, en matière d'in-

2- Christian Tessier, directeur du Centre d'Essais au Feu du Cerib.

3- Le four Prométhée, avec gros brûleurs, équipement majeur et unique en Europe du Centre d'Essais au Feu.

4- Il y a un peu plus de 20 ans (mars 1999), l'incendie dans le tunnel du Mont-Blanc a conduit à changer en profondeur l'approche de la sécurité dans les ouvrages souterrains.



© MARC MONTAGNON 2

CHRISTOPHE TESSIER : PARCOURS

Christophe Tessier est ingénieur de l'ENSAIS de Strasbourg (1997), aujourd'hui INSA, dans la spécialité "génie climatique et énergétique".

Entre 1999 et 2011, il passe les premières années de sa vie professionnelle au sein de PME et TPE, dont 2 start-up, toutes spécialisées dans le feu et la protection incendie : directeur R&D de EXTHA entre 1999 et 2005, responsable du département feu de Microcem, en 2006 et 2007, directeur du développement de KandCo entre 2008 et 2011.

En 2011, il fonde I-KR, entreprise d'accompagnement et de conseil en développement de produits et de systèmes de protection incendie qu'il quitte en 2012.

En 2012, il prend la responsabilité du Centre d'Essais au Feu du Cerib, dont il contribue à assurer le développement avant d'en devenir directeur en 2015.

génierie, calcul de structure et calcul de développement du feu.

En résistance au feu, les moyens de preuve sont définis dans l'arrêté du 22 mars 2004 modifié : que doit-on mettre en place par rapport à une exigence réglementaire ? « *L'essai constitue l'un de ses moyens, celui auquel on a recours quand on n'a pas le choix...* »

LES ESSAIS

Un essai conventionnel est réalisé pour un élément de construction selon une norme d'essai. Il débouche sur un résultat qui permet de délivrer un classement. Celui-ci prend la forme d'un procès-verbal de classement ou d'un rapport de classement européen.

Les essais sont réalisés sur matériaux, produits, éléments de construction ou ouvrages. En fonction des projets, des besoins identifiés, plusieurs types d'essais peuvent être menés :

- Essais de résistance au feu ;
- Essais d'orientation à échelle intermédiaire ;
- Essais de propagation verticale du feu en façade (essai LEPIR 2) ;
- Essais de caractérisation thermomécanique des matériaux.

Les essais réalisés selon les normes françaises et internationales concernent tous types d'éléments constitués de tous les types de matériaux. L'éventail est large : ventilateurs, clapets dans le domaine de l'aéraulique, fonctionnalité électrique pour les équipements incluant des câbles ou de la fibre optique, compartimentage avec des portes, des cloisons, des calfeutrements, éléments de structure en béton, en acier, en bois..., éléments de protection passive de structure (peintures, enduits projetés, panneaux...). ▷



3 © CERIB



4 © PARIS-MATCH



5

© GÉRARD ROLLANDO

« Le principe de l'essai de résistance au feu est simple, indique Christophe Tessier : il consiste à retirer l'une des parois du four et à la remplacer par l'élément de structure à tester, qu'il soit vertical ou horizontal (cloison ou plancher, poteau ou poutre, par exemple).

S'agissant des ouvrages souterrains, les essais consistent à observer le comportement au feu des structures en béton, notamment pour des situations de feu extrême, comme dans les tunnels routiers, par exemple, avec des courbes de feux sévères de type HCM (hydrocarbure majoré) ou RWS (Rijks-WaterStaat). Pour ce type d'ouvrage, la courbe HCM a été créée en France en 2000 après l'incendie du tunnel du Mont-Blanc de 1999. C'est une courbe en créneau à 1300°C pendant deux heures. Pour les structures de tunnel,

nous vérifions le comportement des bétons dans ce type de conditions très sévères, notamment pour confirmer l'épaisseur sacrificielle prise en compte dans les calculs. »

L'objectif est de caractériser la propension à l'écaillage des parois en béton armé sous sollicitation HCM pour valider une épaisseur sacrificielle de béton conforme au dimensionnement. Le principe est une validation multi-étapes d'une composition de béton optimale, en accord avec le dimensionnement de l'ouvrage.

Ce type d'essais, le Centre d'Essais au Feu en réalise en permanence sur des ouvrages en construction, par exemple en France ces dernières années : la nouvelle dalle sous chaussée du tunnel du Mont-Blanc dont la dernière tranche est en cours, la tranchée couverte de Saint-Julien-Montdenis, le contournement

Ouest de Strasbourg, le boulevard urbain Sud (BUS) et la rocade L2 de Marseille, la jonction A86/A14, la déviation de la RN19, la tranchée couverte de Marange, les socles de la tour Alto et de la tour Trinity à Paris-La Défense. « Dans ce cas précis, poursuit Christophe Tessier, la construction de cette tour nécessitait de couvrir une voie routière passant à proximité du CNIT. Il fallait donc créer un "tunnel routier"

5- Essai de désenfumage dans le tunnel de Boissy – Saint-Léger 2.

6 et 7- Test de feu dans le cadre du projet européen Épernon Fire Test.

justifié sous feu HCM en matière de résistance au feu. »

Dans le domaine des métros, la contribution du Centre d'Essais au Feu s'est avérée déterminante dans le cadre de la construction de plusieurs lots du Grand Paris Express : l'ensemble des lots de la Ligne 15 Noisy-Champs – Pont de Sèvres qui, avec 75 km et 36 stations, constitue l'élément central du projet, les lots 16-1, 16-2 et 16-3 de la Ligne 16 Saint-Denis Pleyel – Noisy-Champs (10 gares), la Ligne 18-1 qui reliera l'aéroport d'Orly à Massy Palaiseau (11,8 km de tunnel et 3 gares souterraines).

Le point commun entre les Lignes 16-1, 16-2, 16-3 et 18-1 est qu'elles font appel à des voussoirs en béton renforcé de fibres métalliques (BRFM). Il s'agit d'une première en France à grande échelle dans les tunnels.



6

© CERIB



7

© CERIB

« Pour accompagner le déploiement de cette innovation, poursuit Christophe Tessier, plusieurs pôles de compétences du Cerib ont été mobilisés. Pour l'évaluation de la conception des voussoirs, les différents laboratoires ont pu intervenir sur la formulation des bétons, leur caractérisation, notamment à la traction par flexion, sur éprouvettes prismatiques et sur voussoirs à échelle 1, avec une forte mobilisation lors des épreuves d'études des bétons et des convenances à froid et en situation d'incendie. Les essais "feu" ont ainsi été un point primordial, étape ultime de validation du lancement de la préfabrication. Ces essais sur voussoirs chargés mécaniquement sont exigeants et ont demandé une préparation spécifique en vue de garantir

la représentativité des résultats. Dans le cas du Grand Paris Express, ils répondent à l'arrêté du 22 novembre 2005 relatif à la sécurité dans les tunnels des systèmes de transports publics guidés urbains de personnes. Dans le cas du

8- Le siège du Cerib à Epernon, en Eure et Loir, conçu par l'architecte Dominique Maunoury.

9- EnerGé, bâtiment démonstrateur à énergie positive conçu par l'architecte Yves Sémichon.

béton fibré, qui ne comporte pas d'armatures, l'enjeu était de vérifier le comportement au feu du "revêtement" et le maintien de la capacité portante du tunnel pour une exigence de stabilité au feu de 2 heures.

Pour ce type d'ouvrage, le Centre réalise les essais au feu, en l'occurrence de type ISO pour le Grand Paris Express, les essais de flexion à froid, les essais de poussée de patins (dits "essais TBM" pour reproduire les efforts engendrés par la poussée des patins du tunnelier sur les voussoirs) ainsi que les essais d'arrachement des douilles d'ancrage et les essais de cisaillement entre voussoirs. »

Grâce à ses experts aux compétences pluridisciplinaires - matériaux, process, certification, formulation, durabilité,

thermique, bas carbone, nouveaux bétons, structure, incendie... - le Cerib et le Centre d'Essais au Feu engagent des travaux de recherche appliquée au besoin des entreprises. De plus, la possibilité de réaliser des tests jusqu'à "échelle 1" leur confère un avantage qui permet d'appréhender et de déployer des projets innovants à échelle réelle.

Il est de ce fait le seul organisme en France capable de réaliser la totalité des essais pour ce type d'ouvrage. Cela correspond à sa volonté en interne mais cela répond également au souhait des entreprises et des industriels de disposer en France d'un établissement pouvant les accompagner dans la réalisation de tous types de projets en lien avec les transitions environnementale, ▷

© MARC MONTAGNON



8

© CERIB



9

LE CERIB EN BREF

Le Cerib (Centre d'Études et de Recherche de l'Industrie du Béton) est un Centre Technique Industriel (CTI) basé à Epernon, en Eure-et-Loir. Sa création remonte au 5 janvier 1967, conjointement par le ministre chargé de l'Industrie et par le ministre chargé de l'économie et des finances, à la demande de la Fédération de l'Industrie du Béton (FIB).

Inauguré en juin 1971, le siège social du Cerib, dû à l'architecte Dominique Maunoury (1931-2001), est une véritable démonstration des possibilités esthétiques du béton préfabriqué. L'édifice principal d'Epernon est à lui seul représentatif. On y lit les possibilités diverses de moulage du béton dans les portiques, l'auvent de la couverture, les allèges, les sous-faces de la galerie extérieure, le cloisonnement du passage reliant au rez-de-chaussée les services à la technologie. On y découvre les différents types de finition des panneaux depuis le béton blanc grésé, le béton poli, sablé ou émaillé.

Le Cerib a pour mission de faire progresser et de déployer les connaissances scientifiques sur les matériaux, les produits, les ouvrages et les procédés de fabrication afin de répondre aux besoins des industriels et de l'ensemble des acteurs concernés, et aux enjeux nationaux et internationaux d'aujourd'hui et de demain.

Le 20 octobre 2010, le Cerib a inauguré EnerGé, bâtiment démonstrateur à énergie positive (Bepos), conçu par l'architecte Yves Sémichon et le four Prométhée, équipement majeur et unique en Europe du Centre d'Essais au Feu.

La vocation de ces dispositifs de pointe est d'anticiper les évolutions futures sur le plan de l'environnement, la santé, la sécurité et la durabilité.

Un nouvel équipement, le banc d'essais Lepir 2 (Local Expérimental Pour Incendie Réel à 2 niveaux), permettant d'évaluer le comportement au feu des solutions constructives de façade, a été mis en service en juillet 2014 au Cerib. Capable de caractériser et tester tous les systèmes constructifs du marché vis-à-vis du risque de propagation du feu de façade, cette nouvelle installation répond à la mission d'intérêt public du CERIB au service de la construction.

En 2015, le Cerib a développé et installé une nouvelle plate-forme de 400 m² destinée à tester les équipements aérauliques, permettant d'étudier la résistance au feu de conduits, volets et clapets coupe-feu, baffles, registres de très grandes dimensions.

En 2016, le Centre d'Essais au Feu s'est doté d'un nouvel équipement dénommé "Four Atlas" permettant de tester des corps d'épreuves verticaux et horizontaux non chargés et non porteurs en conditions réelles de feu, aux dimensions de 4 m de large sur 3 m de haut et 1,30 m de profondeur.

Avec 180 collaborateurs et trois implantations (Épernon, Lyon, Rennes), le Cerib exerce son activité dans toute la France, entre essais et évaluations des produits et matériaux, études et recherches, normalisation et certification, appui technique, transfert de connaissances, et dispose d'un centre de formation.

Le Cerib, dirigé par Gilles Bernardeau, son directeur général, est présidé depuis le 23 juillet 2021 par Bertrand Bedel.

énergétique et numérique et de participer aux innovations et aux grands projets d'infrastructure : développement de bétons bas carbone, bétons fibrés, bétons légers, bétons dépolluants, bétons colorés, bétons à ultra-hautes performances, valorisation des matières premières secondaires...

L'INGÉNIERIE DE LA SÉCURITÉ INCENDIE : DEUX AXES DE TRAVAIL

L'Ingénierie de la Sécurité Incendie (ISI) - c'est-à-dire les calculs - repose à la fois sur le calcul de structure et sur celui du feu. L'ISI s'exerce en France selon principalement 2 composantes : l'ingénierie de la résistance au feu et celle du désenfumage.

En résistance au feu, on peut ainsi étudier par exemple la stabilité au feu des ouvrages en vue d'en optimiser la protection ou le dimensionnement en fonction des scénarii d'incendie retenus en cohérence avec l'exploitation des locaux. On peut ainsi réaliser les études de dimensionnement des éléments de structure pour les PSLV (Parcs de Stationnement Largement Ventilés) avec des scénarios d'incendie réel de véhicules, vérifier le mode de ruine pour les ICPE (Installations Classées Pour l'Environnement). On peut aussi citer les études d'ingénierie spécifiques pour les installations nucléaires (INB, INBS...), celles pour les mezzanines d'ICPE ainsi que plus largement toutes les études d'ingénierie de la stabilité au feu (métal, bois, béton, mixte...).

« Quand on fait des essais sur four, précise à ce sujet Christophe Tessier, on



10 © ALLIANCE

considère en général que l'on a un feu normalisé. Dans cette situation, l'approche est dite "conventionnelle". Dans la réalité, les choses sont différentes. Dans certaines conditions, il est préférable non pas de considérer l'incendie comme conventionnel mais spécifique parce que l'on est en présence d'un bâtiment particulier, avec des risques particuliers, une géométrie engendrant des sollicitations aux structures complexes, la présence de combustible en

10- Au sein du groupement Alliance, l'usine Implenia de production propre de voussoirs pour les besoins du Grand Paris Express, a une capacité de fabrication de 105 voussoirs par jour grâce à l'emploi d'un carrousel CBE muni de 6 anneaux moules.

11- Essai de flexion sur les voussoirs en béton renforcé de fibres métalliques (BRFM) pour le Grand Paris Express.

12- Essai de poussée des patins des tunneliers sur les voussoirs à destination du Grand Paris Express.



11 © CERIB



12 © CERIB



13

© CERIB



14

© CERIB

faible quantité, bref, il est nécessaire de faire des hypothèses de calcul de feu en regardant l'incidence sur les structures dans cette situation précise. Cette démarche permet d'optimiser la protection passive, d'optimiser la structure en situation d'incendie. En parallèle de cela, est établi un cahier des charges d'exploitation propre aux hypothèses prises en compte. Ce même genre de démarche avec prise en compte de "feux réels" peut être pratiqué en ingénierie du désenfumage, en veillant à prévoir l'évacuation des personnes, l'intervention des secours... »

Dans certains cas, des essais sur site sont réalisés en désenfumage pour répondre, par exemple, à une demande de la commission de sécurité afin de

13 ou 14- Voussoir post-essai au feu du Grand Paris Express.

15- Essai au feu dans le cadre du projet européen "Épernon Fire Test".

16- Le banc d'essais Lepir 2 (Local Expérimental Pour Incendie Réel à 2 niveaux), permettant d'évaluer le comportement au feu des solutions constructives de façade.

vérifier dans la pratique le bon fonctionnement du désenfumage. Cela peut être le cas pour les multiplex où les volumes sont importants, et pour les tunnels, en particulier lors de leur mise en service (RN19 par exemple) ou leur rénovation (travaux récents dans les tunnels de l'A86 autour de Paris) qui ont nécessité une remise à niveau avec des essais de fumée chaude.

ESSAIS "IN SITU" : CONFIRMER LES CALCULS EN SITUATION RÉELLE

Cela entre dans le cadre des essais dits "in situ" qui comprennent des essais de simulation d'incendie, des essais de désenfumage et des exercices de sécurité avec simulation d'un accident,

en présence de fumée avec scénario de désenfumage... Les essais in situ représentent un moyen de choix pour valider à la fois les caractéristiques et la mise en œuvre des installations. Ils participent efficacement à la démonstration du niveau de sécurité des ouvrages. Les acteurs de la sécurité doivent être préparés à faire face à tout événement et la tenue régulière d'exercices de sécurité est un excellent moyen de maintenir leurs capacités à agir efficacement.

Pour les exercices incendie, la génération de fumée et de chaleur apporte un degré de réalisme élevé, permettant de placer les participants dans des conditions très proches de celles auxquelles ils pourraient être amenés à faire face. ▷



15

© CERIB



16

© CERIB



17 © SGF/ GÉRARD ROLLAND

La réalisation de chaque exercice de sécurité implique la définition du scénario qui sera joué, ainsi que l'analyse de l'ensemble des résultats obtenus (conditions d'exercice, interviews des participants, organisation, mise en place, ...). Le recours à une génération maîtrisée de fumée et de chaleur permet aux observateurs de visualiser directement les écoulements représentatifs de la situation d'incendie simulée. Les techniques de production de fumées employées doivent être adaptées au type d'ouvrage et à la stratégie de désenfumage (quantité de fumée produite, chaleur libérée, température de la fumée, degré de salissures, ...) Une métrologie thermo-aéraulique

spécifique associée aux essais permet d'obtenir des résultats quantifiés, pour une évaluation objective des performances obtenues.

La réalisation des essais s'accompagne d'une expertise des résultats obtenus afin de conclure sur l'efficacité du système de ventilation testé.

Des essais dits "spéciaux" sont également réalisés à Épemon sur des plateformes jusqu'à 400 m² comme pour la société ARUP ou encore dans le cadre du projet européen Épemon Fire Tests⁽¹⁾.

« Parmi les essais les plus récents *in situ*, précise Christophe Tessier, il faut citer ceux de la déviation de la RN19 à Boissy – Saint Léger dans le Val-de-Marne, ainsi que dans les tunnels de

Thiais, sur l'autoroute A86, également dans le Val-de-Marne.

Dans ces deux ouvrages, les travaux ont concerné plusieurs équipements directement liés à la sécurité : renforcement de la ventilation en tunnel, renforcement de la résistance au feu du tunnel (assurant la pérennité de l'ouvrage), équipement des nouvelles issues de secours, mise en place d'une alimentation de secours du tunnel. »

R&D : EN INTERNE ET EN EXTERNE

Une équipe spécifique pilote les projets de R&D menés soit pour les besoins propres du Cerib et du Centre d'Essais au Feu, soit pour ses partenaires

et ses clients. « Par exemple, précise Christophe Tessier, nous co-encadrons un doctorant de l'entreprise Legendre qui développe des systèmes de poutres hydrides béton/métal. La partie "feu" est assurée à Épemon où nous l'accompagnons pour les essais et les calculs thermo-mécaniques en situation d'incendie. Nous encadrons ainsi cinq doctorants dans plusieurs entreprises avec différents partenaires académiques tels que Politecnico di Milano, les universités de Liège et de Bordeaux, l'INSA de Rennes... »

« Pour piloter une action de recherche, il est nécessaire de faire appel à une équipe spécifique. Les travaux de cette équipe, nous les mettons à la disposition

17- Les voussoirs en béton renforcé de fibres métalliques utilisés sur plusieurs lots du Grand Paris Express : une première en France à grande échelle dans les tunnels.

18- Le Centre d'Essais au Feu est présent au Canada avec le groupement Renouveau Lafontaine (Eurovia, Pomerleau, Dodin Campeyron Bernard) pour la réfection majeure du pont-tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine.



18 © DR

de nos clients faisant ainsi du "all-inclusive" à destination des entreprises. Nous nous efforçons de travailler avec les plus pertinents, les plus innovants dans les domaines concernés, en recherchant les partenaires académiques, les étudiants, en rédigeant le programme, en montant le partenariat financier. »

L'EXPORT : UNE VOLONTÉ DÉJÀ CONCRÉTISÉE

Les interventions du Centre d'Essais au Feu ne se limitent pas à la France. C'est ainsi qu'il intervient en Grande Bretagne sur le lot de la ligne à grande vitesse HS2 Londres-Birmingham (High Speed 2) réalisée par le groupement Eiffage-Kier : 80 kilomètres de la phase 1 de la LGV HS2. Le projet comprend la réalisation des lots C2 et C3 de la future ligne à grande vitesse. Ce tronçon comprend 15 viaducs, 5 kilomètres de tranchées couvertes,

19- Le Centre d'Essais au Feu intervient en Grande Bretagne sur le lot de la Ligne HS2 Londres-Birmingham réalisée par le groupement Eiffage-Kier. Il accompagne également le groupement Skanska Costain Strabag sur le lot des derniers 26,4 kilomètres du trajet du HS2.

22 kilomètres de rétablissements routiers, 67 ouvrages de franchissement et 30 millions de mètres cubes d'excavation.

Le Cerib accompagne également le groupement Skanska Costain Strabag sur le lot des derniers 26,4 kilomètres

du trajet du HS2 jusqu'à son terminus à Euston.

Le projet HS2 lancé par le gouvernement britannique a pour objectif de créer un nouveau réseau reliant à grande vitesse Londres, les Midlands et le Nord du pays, desservant 8 des 10 plus grandes

agglomérations de Grande Bretagne parmi lesquelles les villes de Londres, Birmingham, Manchester et Leeds.

Le Centre d'Essais au Feu est aussi présent au Canada avec le groupement Renouveau Lafontaine (Eurovia (Vinci), Pomerleau, Dodin Campenon Bernard). Ce consortium a été désigné par le ministère des transports du Québec pour la réfection majeure du pont-tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine, le plus long tunnel immergé au Canada et de ses approches via les autoroutes 20 et 25. Pendant la durée des travaux, le groupement d'entreprises sera responsable de l'exploitation, de l'entretien et de la maintenance des différents sites et axes de circulation.

Le pont-tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine est un ensemble formé d'un tunnel routier et d'un pont routier qui relie Longueuil (arrondissement Le Vieux-Longueuil) à Montréal (arrondissement Mercier-Hochelaga-Maisonneuve) en passant sous le fleuve Saint-Laurent et sur l'île Charron. Il dessert les régions administratives de Montréal et de la Montérégie. Il s'agit du seul tunnel routier qui relie Montréal à sa banlieue. Le tunnel, ouvert en 1967, est la plus longue structure sous-marine au Canada. La réhabilitation vise à améliorer sa sécurité, optimiser le trafic et promouvoir l'autopartage et les transports publics.

D'autres projets sont en préparation sur des chantiers à Toronto et aux États-Unis. Ils participent à la volonté du Cerib de se développer de façon plus significative encore à l'international.

À l'échelle du Cerib, pour les ouvrages souterrains, tous les moyens sont présents pour répondre aux besoins des entreprises : la partie matériaux qui inclut la durabilité et l'approche performancielle, la partie essais à froid, la partie justification au feu.

Sur des ouvrages à enjeu, comme la liaison ferroviaire Lyon-Turin (TELT), le Centre d'Essais au Feu est intervenu sur la première tranchée couverte de Saint-Julien-Montdenis - galerie artificielle d'accès au tunnel de base - qui constitue l'entrée du tunnel côté France. Les lots suivants de travaux viennent d'être attribués. Il va de soi qu'il est prêt à en assurer au moins la partie "feu", tout comme il espère le faire pour la Ligne n°3 du métro de Toulouse. □

KAIROS : PROLONGER LA DURÉE DE VIE DES OUVRAGES

Bien qu'il ne s'agisse pas d'un programme spécifiquement pour les travaux souterrains, il est intéressant de présenter le Kairos car il constitue une offre globale de services s'appuyant sur un outil d'aide à la décision pour évaluer la durée de vie résiduelle des ouvrages et de leurs composants, et affiner une stratégie de gestion proactive, dont la sécurité incendie n'est évidemment pas absente au niveau du diagnostic post-incendie et concerne donc le Centre d'Essais au Feu.

Avec cet outil, le Cerib permet ainsi aux gestionnaires de prolonger la durée de vie, d'anticiper et d'optimiser les opérations de remise en état. Les maîtres d'ouvrage ont aujourd'hui bien pris conscience qu'il est essentiel d'anticiper les opérations de réparation pour gagner en économie mais aussi pour préserver sur le long terme l'image du bâtiment ou de l'infrastructure.

Au-delà des ouvrages d'art très stratégiques, tels que les ponts, l'approche de Kairos ambitionne de s'appliquer à tous les types d'ouvrage. Citons notamment les balcons, pour lesquels le Cerib a œuvré sur site pour observer les désordres (prélèvement par carottage, détection des armatures) puis dans ses laboratoires pour déterminer la résistance du béton et mesurer la profondeur de carbonatation, et in fine pour apporter des conclusions opérationnelles sur l'évolution de la situation.

Le Cerib travaille aussi sur le diagnostic d'ouvrages post-incendie pour observer sur site les désordres, estimer en laboratoire des profils de température puis tirer des conclusions opérationnelles quant à la résistance résiduelle et les possibilités de réparation ou encore sur la modélisation et l'approche performancielle des bétons destinés à stocker les déchets radioactifs.





1
© YVES CHANOIT

LIGNE 15 SUD DU GRAND PARIS EXPRESS - L'OUVRAGE ANNEXE OAP10

AUTEURS : YVES LEFLOCH, RESPONSABLE MOE TRAVAUX OA, INGEROP - THOMAS BERBET, INGÉNIEUR GÉOTECHNICIEN MOE, GEOS - IBRAHIM ASRI, RESPONSABLE DE SITE GROUPEMENT, SOLETANCHE BACHY FRANCE - VICTOIRE HUBERT, INGÉNIEURE TRAVAUX GROUPEMENT, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS - ANTHONY GAUTIER, COORDINATEUR ÉTUDE TRAVAUX GROUPEMENT, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

L'OUVRAGE ANNEXE OAP10 DE LA FUTURE LIGNE 15 SUD DU GRAND PARIS EXPRESS, PLUS COMMUNÉMENT APPELÉ OUVRAGE RÉSISTANCE, NÉCESSITE LA MISE EN ŒUVRE DE TRÈS NOMBREUSES TECHNIQUES DE TRAVAUX. IL S'INSÈRE DANS UN ENVIRONNEMENT CONTRAINT, ENTRE BORD DE SEINE ET VOIRIE, NÉCESSITANT UN PHASAGE ADAPTÉ. IL RELIE LA SURFACE AU TUNNEL DE LA LIGNE 15 SUD SITUÉ À PRÈS DE 45 m DE PROFONDEUR.

CONTEXTE GÉNÉRAL

L'ouvrage annexe OAP10 se situe le long du quai Stalingrad, à l'intersection de la place de la Résistance, sur la commune d'Issy-les-Moulineaux (92). Cet ouvrage est constitutif du lot T3A de la Ligne 15 Sud du Grand Paris Express (figure 2).

L'ouvrage assure, en phase de service, les fonctionnalités suivantes :

- Accès pompiers au tunnel de la Ligne 15 ;
- Ventilation/désenfumage et poste de redressement double de ce dernier ;
- Et enfin épuisement : fosse de relevage des eaux d'infiltration du puits,

de la structure faiblement enterrée et des eaux de pluie des grilles en surface.

L'ouvrage se compose :

- D'un puits circulaire de 9,40 m de diamètre intérieur, terrassé à plus de 47 m de profondeur. Ce puits, réalisé en paroi moulée de 60 m de profondeur et de 1 m d'épaisseur, est implanté au plus proche, à 2 m de la magistrale du quai Stalingrad existant ;
- D'une structure de subsurface et de surface abritant les locaux techniques et l'usine de ventilation du tunnel, de dimensions intérieures en plan de 90 m de long par 15 m

1- Creusement rameau ventilation.

1- Tunnel driving for ventilation connecting gallery.

- De deux rameaux assurant la liaison entre le puits et le tunnel dont le tracé passe sous le lit de la Seine au droit de l'OAP10 :

- Un rameau de ventilation/désenfumage d'environ 33 m de long et de 6 m de diamètre intérieur,
- Un rameau d'accès pompiers d'environ 17 m de long et de 3,2 m de diamètre intérieur.

Ces différentes structures sont réalisées le long d'une emprise étroite limitée au nord par le petit bras de la Seine, à l'est par le pont de Billancourt, et au sud par les pistes cyclables et voiries de la route départementale RD7 comportant de nombreux réseaux enterrés.

Ces contraintes imposent de réaliser les ouvrages du projet au droit de la structure de quai existante constituée d'un rideau de palplanches appuyé, via des

LOCALISATION DE L'OUVRAGE OAP10 (lot T3A L15 Sud)



tirants passifs, à des massifs d'ancrage sur pieux dont l'enlèvement est rendu nécessaire pour les besoins du projet. Afin de mettre à profit l'environnement du projet, la conception s'est orientée vers la réutilisation du rideau de quai existant comme élément constitutif du soutènement provisoire des ouvrages du projet. Ainsi, la fouille des locaux techniques est soutenue par :

→ Un nouveau rideau mixte (combi-wall) le long de la RD7 et deux nouveaux rideaux en retour en palplanche aux extrémités Est et Ouest de la fouille. Ces rideaux ont été conçus tirantés afin de ne pas transférer d'efforts trop importants au rideau de quai existant ;

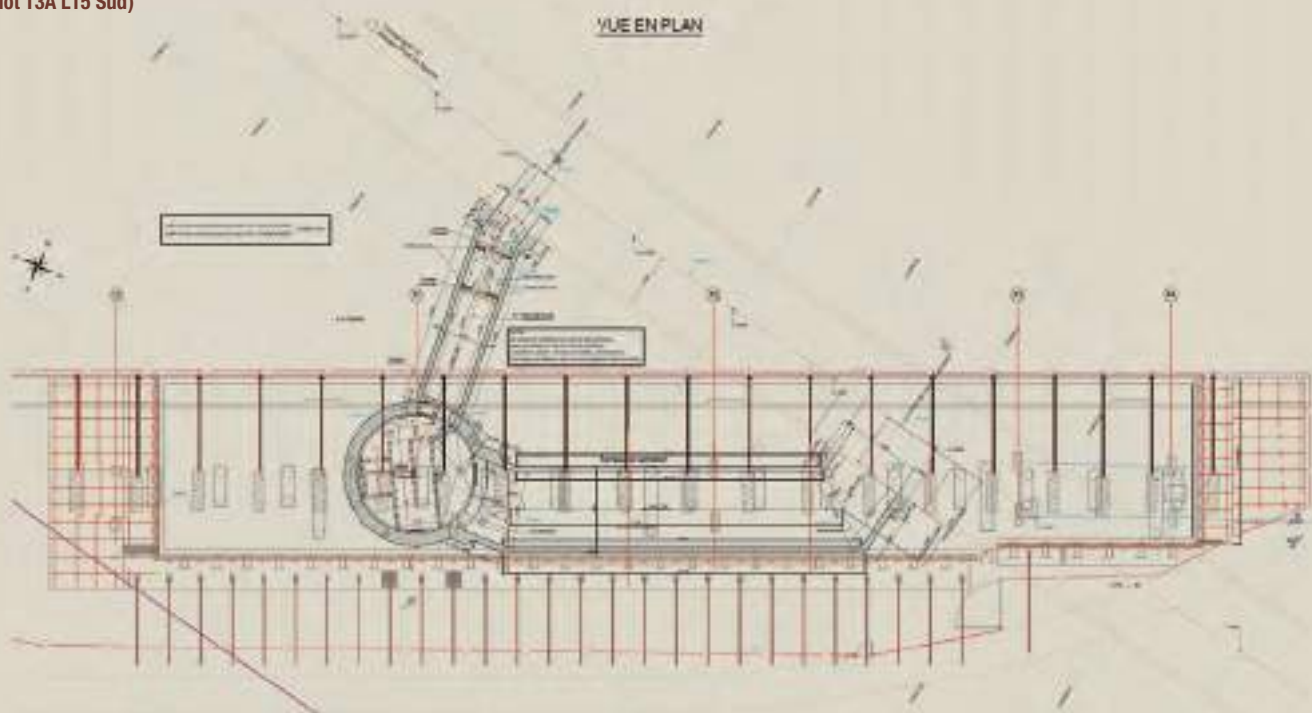
2- Localisation de l'ouvrage OAP10 (lot T3A L15 Sud).

3- Vue en plan de l'ouvrage OAP10 (lot T3A L15 Sud).

2- Location of OAP10 structure (work section T3A L15 South).

3- Plan view of OAP10 structure (work section T3A L15 South).

VUE EN PLAN DE L'OUVRAGE OAP10 (lot T3A L15 Sud)



4- Contexte géologique du tronçon T3a de la Ligne 15 Sud, d'après profil en long géologique du marché.

5- Schématisation des conditions de craie identifiées par carottages inclinés au droit des rameaux.

4- Geological context of section T3a of Line 15 South, according to the contract's longitudinal geological profile.

5- Schematic representation of chalk conditions identified by inclined core drilling at the level of the connecting galleries.

→ Le rideau de quai existant fonctionnant comme un batardeau (à l'envers de son fonctionnement initial) appuyé aux rideaux précédemment décrits via un système butonnant.

Les spécificités du site et la capacité des structures existantes ont conduit à la réalisation de nombreuses fondations profondes (micropieux, pieux et barrettes) pour :

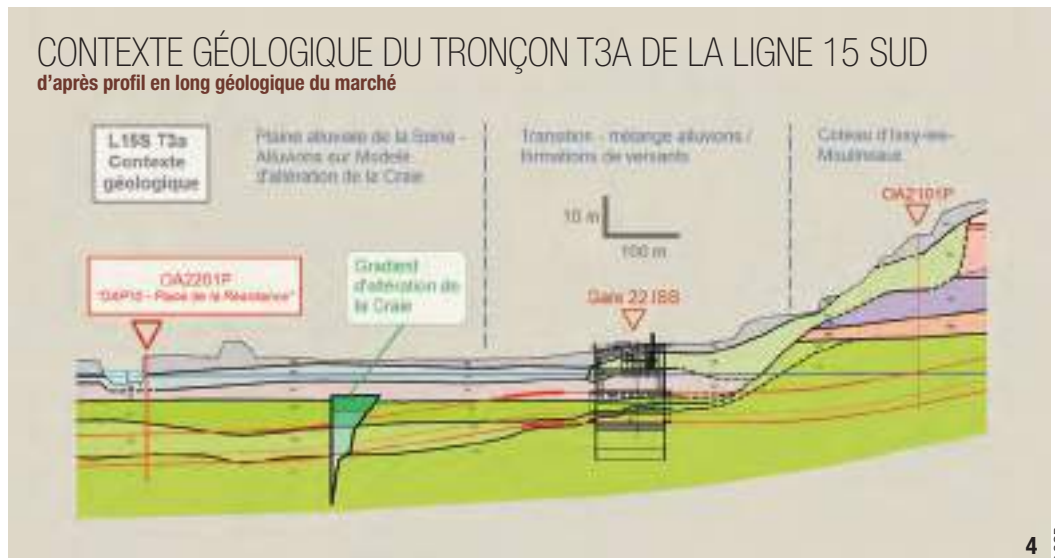
- Limiter les surcharges en phase travaux appliquées sur la bande bord à quai ;
- Ancrer les structures définitives du projet dans le substratum crayeux et ainsi résister, en phase service, aux poussées latérales dissymétriques et aux sous-pressions.

Enfin, la profondeur à laquelle se situe le tunnel au droit de l'OAP10 a nécessité la réalisation des parois moulées du puits à 60 m de profondeur. La position en plan du tunnel (sous le lit de la Seine) a conduit à la réalisation de rameaux longs bien que positionnés dans un horizon géologique très favorable (figure 3).

GÉOLOGIE ET AVOISINANTS

À l'image de l'ensemble du tronçon Ouest de la Ligne 15 Sud, l'ouvrage annexe OAP10 est implanté dans la boucle de la Seine, entre Boulogne-Billancourt et Issy-les-Moulineaux.

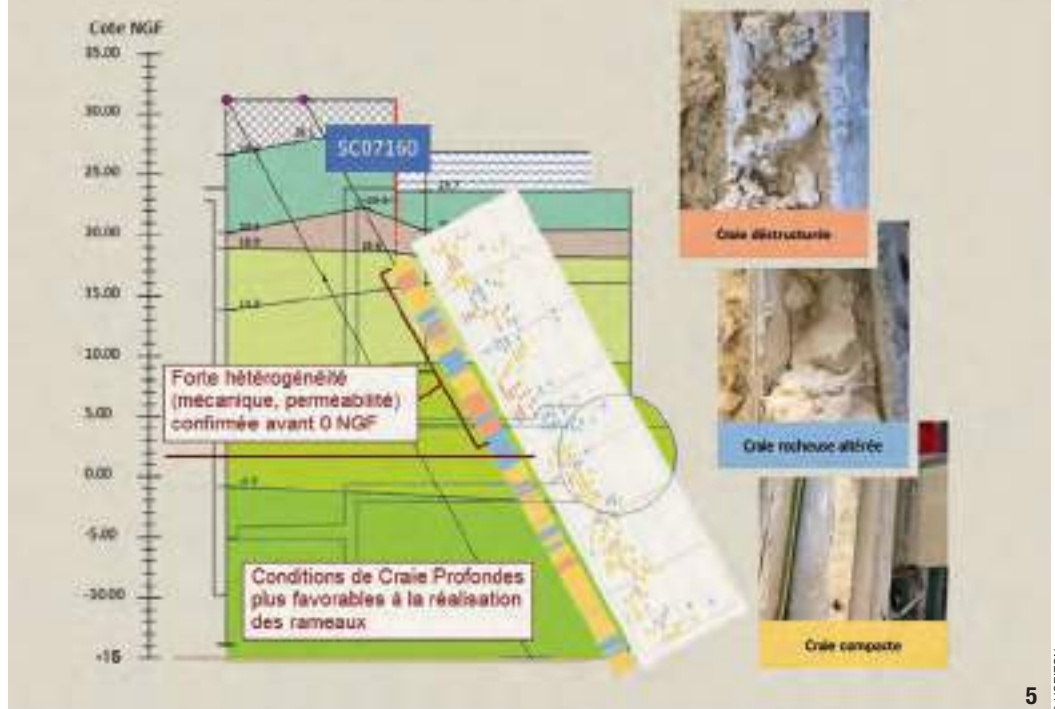
Sous une épaisseur latéralement variable d'alluvions, les parties souterraines profondes de l'OAP10 traversent donc le modelé d'altération de la craie



4 © SGP

SCHÉMATISATION DES CONDITIONS DE CRAIE IDENTIFIÉES PAR CAROTTAGES INCLINÉS AU DROIT DES RAMEAUX

Coupe longitudinale Rameau & identification des conditions de Craie en profondeur



5 © HORIZON

campanienne faisant intervenir un gradient de compacité/compétence du matériau avec la profondeur (figure 4). Les craies superficielles, largement affectées par les dernières glaciations et par le creusement dû à la Seine, expriment une intense altération faisant apparaître un mélange de blocs et graviers de craie souvent joints par une matrice molle à l'origine de l'appellation courante "craie pâteuse".

Ces matériaux, présents sur plusieurs mètres sous les remblais et les alluvions de la Seine, imposent à l'ouvrage leurs caractéristiques médiocres de résis-

tance, particulièrement contraignantes pour les locaux techniques peu profonds et positionnés en bordure de quai. Avec la profondeur, ces craies "molles" passent progressivement à des faciès d'altération faisant essentiellement intervenir la fracturation du massif. Dense en surface, là où la craie fut affectée par des phénomènes de gélifraction pendant le quaternaire, cette fracturation diminue progressivement avec la profondeur pour atteindre le faciès "sain" de la craie, qui présente d'excellentes caractéristiques de résistance, et dont la perméabilité sera principalement

dictée par sa fracturation résiduelle. En pratique, l'OAP10 se situe à proximité de l'anticlinal de Meudon. Différentes familles de fracturation dans ces craies sont observables, dont plusieurs composantes sub-verticales nées des accommodations de contraintes accumulées dans le matériau à l'époque de ce plissement. Cette réalité s'ajoute à la notion globale de "gradient d'altération vertical" pour complexifier la géotechnique locale avec une certaine variabilité latérale de ces conditions de craie, dues au passage de réseaux de cisaillement verticaux (figure 5).

6- Rideau mixte le long de la RD7.
7- Vue 3D des soutènements temporaires du local technique de l'OAP10.

6- Composite screen along RD7 road.

7- 3D view of temporary retaining structures of the OAP10 plant room.

Ainsi, au regard du contexte, les ramaux ont été positionnés dans la craie saine, après un traitement de terrain par injection d'étanchéification.

Par ailleurs, la conception a réutilisé le rideau de palplanches existant, qui est tiranté au sein de massifs d'ancrage dans l'emprise du projet, ce qui présente une variabilité latérale importante, passant de terrains mous alluvions modernes/remblai à la rencontre d'obstacles anthropiques (réseaux abandonnés, anciens pieux, éléments de béton ou de maçonnerie à faible profondeur, etc.). Les travaux de surface (palplanches, parois moulées, barrettes, injections, tirants, etc.) ont dû s'adapter à ces hétérogénéités.

TRAVAUX DE PALPLANCHES, TIRANTS ET JONCTIONS ENTRE RIDEAUX

Ces travaux ont été réalisés dans l'objectif de constituer le soutènement de la future fouille des locaux techniques de l'OAP10.



6
© HORIZON

RIDEAU MIXTE, RIDEAUX EN RETOUR AUX EXTRÉMITÉS EST ET OUEST DU SOUTÈNEMENT SONT QUANT À EUX, COMPOSÉS DE 21 PALPLANCHES AZ-700 FICHÉES ELLES AUSSI À 20 M DE PROFONDEUR.

Le rideau mixte est composé de 33 doubles profilés HZ1080 de 20 m de profondeur et de 34 palplanches doubles intercalaires AZ-800 fichées dans les craies altérées.

Les rideaux en retour aux extrémités Est et Ouest du soutènement sont, quant à eux, composés de 21 palplanches AZ-700 fichées elles aussi à 20 m de profondeur.

Ces éléments ont été mis en place, via une grue 130 t, essentiellement par vibrofonçage au moyen d'un PTC 60HV

pour les éléments du rideau mixte et d'un PTC32HV pour les palplanches (figure 6).

Lorsque cela s'est avéré nécessaire, un complément a été fait au marteau Delmag D19-32 pour atteindre la cote requise.

Enfin, la mise en place de quelques palplanches intercalaires a nécessité la mobilisation d'une foreuse de pieux de type Starsol F3500 (forages de 1,2 m de diamètre) pour déstructurer des obstacles anthropiques rencontrés au battage et ainsi atteindre la cote requise.

Durant ces travaux, une communication étroite a été établie avec les riverains. Ainsi, des rideaux acoustiques gonflables de 4 m de hauteur et 3 m de large ont été mis en place le long de l'atelier de palplanches pour atténuer les nuisances sonores.

Le chantier ayant eu recours au battage, cette mesure d'atténuation n'a cependant pas eu l'effet escompté. En complément, les marteaux ont été calfeutrés avec des bâches acoustiques. Enfin, la plage horaire des travaux de battage a été réduite entre 9h et 19h pour un chantier travaillant, quant à lui, en deux postes de 8h. Une fois l'essentiel des soutènements mis en place, un traitement spécifique au niveau des jonctions avec le rideau de quai existant a été réalisé.

Pour ce faire, il a fallu :

- Mettre en place un cadre de butonnage temporaire appuyant localement le rideau de quai existant sur les rideaux nouvellement mis en œuvre ;
- Poser une lierne métallique à l'ouest et réaliser un complément de poutre de couronnement et de dalle à l'est ;
- Excaver jusqu'à la sous-face de la lierne existante liaissant les modules de palplanches du quai existant deux à deux. Cette lierne, placée côté terre du rideau de quai existant, empêchait de mettre en place les derniers modules de palplanches des rideaux en retour jusqu'au contact avec le rideau de quai existant ;
- Déposer localement un tronçon de cette lierne pour, in fine, remblayer la zone et ainsi pouvoir placer les derniers modules de palplanche requis ;
- Enfin, exécuter des inclusions de mélange de sol et de coulis de ciment à chaque jonction pour prévenir le risque de débouillage des terrains superficiels au terrassement.

VUE 3D DES SOUTÈNEMENTS TEMPORAIRES DU LOCAL TECHNIQUE DE L'OAP10



7
© HORIZON

TIRANTS

Des tirants ont été mis en œuvre pour appuyer les nouveaux rideaux de soutènement provisoire et ainsi limiter la transmission d'efforts au rideau de quai existant.

Six essais préalables et deux essais de conformité ont été réalisés pour valider le dimensionnement et les méthodes d'exécution des tirants.

Un total de 41 tirants de 9 à 12T15 et de 29,5 m à 41,5 m de longueur forée a été mis en œuvre sur chantier. Leurs longueurs de scellement étaient comprises entre 16 et 25 m avec un ancrage essentiellement dans les craies altérées. Leur inclinaison par rapport à l'horizontale variait entre 30° et 50°. Afin d'améliorer la capacité des scellements, ces derniers ont systématiquement fait l'objet d'une injection répétitive et sélective. Bien que de fonction provisoire, ces tirants ont reçu une protection contre la corrosion de type permanente.

Les tirants ont été forés en diamètre 185 mm pour pouvoir y sceller des tubes à manchettes métalliques de diamètre extérieur 101 mm.

La plupart des tirants ont été réalisés au travers de réservations dans la poutre de couronnement qui coiffe le rideau de soutènement. D'autres l'ont été à travers une dalle en béton armé via des réservations et à travers une lierne métallique adossée au rideau latéral des palplanches Ouest.

L'une des difficultés de réalisation des tirants est le contexte urbain. En effet, le site se trouve à un carrefour de réseaux sensibles (GRT gaz, Sevesc, HTA, fibre...). Le forage des tirants au-dessus de la conduite GRT gaz a nécessité la mise en place de fourreaux métalliques au-dessus de cette dernière, faisant office de tube de réservation permettant de forer sans risque d'intercepter le réseau.

Les travaux ont été menés à l'aide d'une foreuse munie d'une tête Hi'Drill® pour faciliter la traversée d'obstacles. De même, cette technique permet d'équiper les tubes à manchettes métalliques servant à réaliser l'injection répétitive et sélective du tirant dans la zone de scellement à l'abri du tubage de forage. Une fois le tube à manchettes métalliques équipé dans le terrain, l'injection se fait à l'aide d'un obturateur double depuis le pied de forage jusqu'à la côte supérieure de scellement du tirant.

Une fois les tubes à manchettes métalliques équipés et scellés, les câbles des tirants ont été insérés dans les



8 DELAPORTE POUR SGP

tubes métalliques à l'aide d'un dévidoir hydraulique commandé par un chariot élévateur.

Les tirants sont mis en tension à l'aide d'un vérin de type VP 260. La tension appliquée aux tirants 9T15 est de 1544 kN.

Les efforts de rupture des tirants 9T15 et 12T15 sont respectivement de 2511 et 3348 kN. Tous les blocs d'ancrage sont filetés (système retensionnable), permettant ainsi un recalage en cas de perte de tension importante (figure 7). Des essais de contrôle sont prévus

8- Photo du site lors des travaux de barrettes et de paroi moulée.

9- Installation de forage et d'injection de sol depuis le tunnel.

8- Photo of the site during barrette and diaphragm wall works.

9- Installation for drilling and soil grouting from the tunnel.



9 © HORIZON

et des cales dynamométriques avec acquisition automatique sont mises en place pour surveiller la tension des tirants pendant la durée de construction de l'ouvrage.

TRAVAUX DE PAROIS MOULÉES, BARRETTES ET PIEUX FORÉS

PAROIS MOULÉES DU PUIT

La paroi moulée du puits fait 1 m d'épaisseur et 60 m de profondeur. Chaque panneau est équipé de cages d'armatures. Les cages des panneaux situés au droit des futures ouvertures des rameaux sont localement équipées d'armatures en fibre de verre.

Le puits est situé à 2 m du rideau de quai existant en son point le plus proche. De plus, compte tenu de son diamètre et de l'espacement entre tirants du rideau de quai existant, le puits interceptait certains de ces tirants.

La conception s'est ainsi attachée à élaborer un système de reprise en sous-cœvre des tirants interceptés par le puits via la mise en place d'un cadre liaisonnant le rideau de quai existant au rideau mixte précédemment décrit. D'autre part, la méthode d'exécution de la paroi moulée a été conçue pour limiter autant que faire se peut les effets de la poussée du béton frais sur le rideau existant. Les actions suivantes ont à ce titre été mises en œuvre :

- Plan de panneautage adapté : réalisation de panneaux unitaires au droit du rideau de palplanches ;
- Formulation d'un béton léger de densité 1,5 mis en œuvre sur les 8 premiers mètres de paroi moulée correspondant à la partie recépée ;
- Mise en place d'une méthode observationnelle avec système d'auscultation des palplanches : extensomètres, inclinomètres, cibles. Certains instruments ont nécessité l'intervention de plongeurs.

Le bétonnage des panneaux les plus proches du rideau de quai existant a fait l'objet d'un suivi particulier. Un logigramme mis au point avant le début des travaux de paroi moulée précisait les seuils de pilotage de ces travaux et les actions à mettre en place en cas d'atteinte des seuils. L'ordre de bétonnage des panneaux est ainsi allé du plus éloigné vers le plus proche du rideau existant.

Le suivi de réalisation des panneaux de paroi moulée a montré un léger effet de l'excavation et du bétonnage sur le rideau de quai existant. Sans surprise, ce sont les panneaux au plus proche du rideau existant qui ont eu un effet sur ce dernier ; des déformées maximales allant jusqu'à 1,5 cm ont été observées, toutefois bien inférieures aux seuils fixés préalablement.

Les travaux de perforation des panneaux de paroi moulée ont été réalisés à l'aide d'une Hydrofraise électrique. Compte tenu du poids de cet outillage et de la capacité du rideau de quai existant, la plateforme a été renforcée préalablement à la mobilisation de cet atelier. Une dalle d'un mètre d'épaisseur portée par un maillage de micropieux a ainsi été mise en œuvre dans la zone d'évolution de la machine. Il en a été de même au droit des installations de paroi moulée.

L'utilisation de l'Hydrofraise électrique a permis de réduire les nuisances sonores vis-à-vis des riverains et des compagnons (réduction jusqu'à 5 dB) et a engendré une diminution de l'empreinte carbone (gain estimé de 152 t

10a & 10b- Rameaux Ventilation et BSPP /secours.

10a & 10b- Ventilation and firefighting/ emergency responder connecting galleries.

équivalent CO₂) par rapport à une Hydrofraise thermique.

Du fait de l'utilisation d'une Hydrofraise, les joints entre panneaux du puits ont été réalisés en remordus.

Enfin, afin de mettre le puits hors d'eau, 11 drains (2 drains équipés en PVC faisant office de piézomètres et des drains à sable) et 2 puits de

pompage de diamètre 350 mm et de 60 m de profondeur ont été réalisés à l'aide d'une foreuse Soilmec SM-16GTS.

BARRETTES ET PIEUX DE FONDATION

De part et d'autre du puits en paroi moulée, 30 barrettes de fondation de 2,8 m de longueur et 0,8 m de largeur ont été réalisées. Ces barrettes ont été forées jusqu'à 23 m de profondeur pour atteindre l'horizon des craies. Une fois la fouille du local technique terrassée, ces barrettes, après recépage, seront connectées au radier de la boîte.

Lors des phases de purge préparatoires aux travaux de paroi moulée et barrette, des vestiges d'un ancien émissaire en béton armé et d'un ancien rideau en palplanches ont été mis au jour. Ceci a conduit à revoir le schéma de fondation de l'ouvrage, notamment en déplaçant certaines barrettes, en en faisant pivoter d'autres, et enfin en ajoutant des pieux de fondation de diamètre 1 m. Les pieux ont été réalisés en méthode traditionnelle forés sous boue.

La phase de réalisation des pieux précédant celle de réalisation des barrettes, il a été possible de préparer les travaux de barrettes pour faire face à cet environnement. Alors que ces travaux devaient être réalisés à la benne hydraulique de type KS, la présence de possibles obstacles anthropiques métalliques a conduit le groupement à sélectionner un tout nouvel outillage développé par Soletanche Bachy : la benne Twinsoil®.

Cette benne est munie de moteurs tournants actionnant des tambours équipés de dents qui permettent de rogner les terrains durs ou les obstacles. Cet outil a été efficace et a permis de découvrir des obstacles anthropiques au moment de la réalisation des barrettes.

La réalisation des barrettes et des parois moulées a eu lieu en parallèle, nécessitant de transporter et stocker les armatures par barge le long du quai Stalingrad (figure 8).

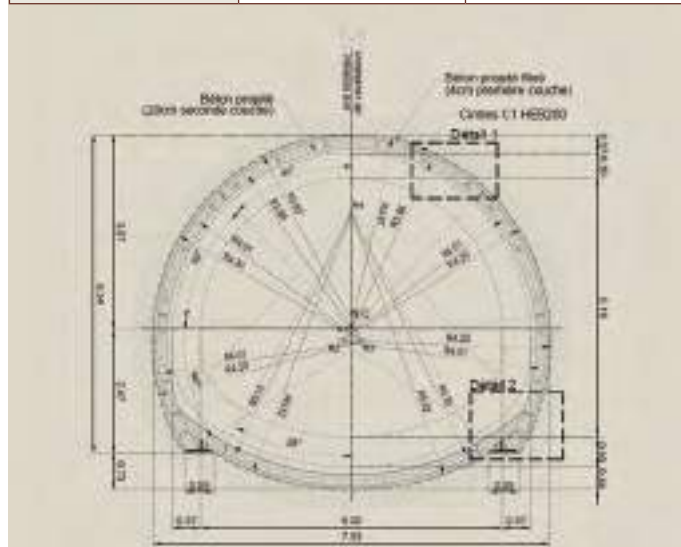
TRAVAUX DE TRAITEMENT DE TERRAIN ET DE CREUSEMENT TRADITIONNEL

TRAITEMENT DE TERRAIN

Les traitements de terrain effectués sur le projet ont pour objectif :

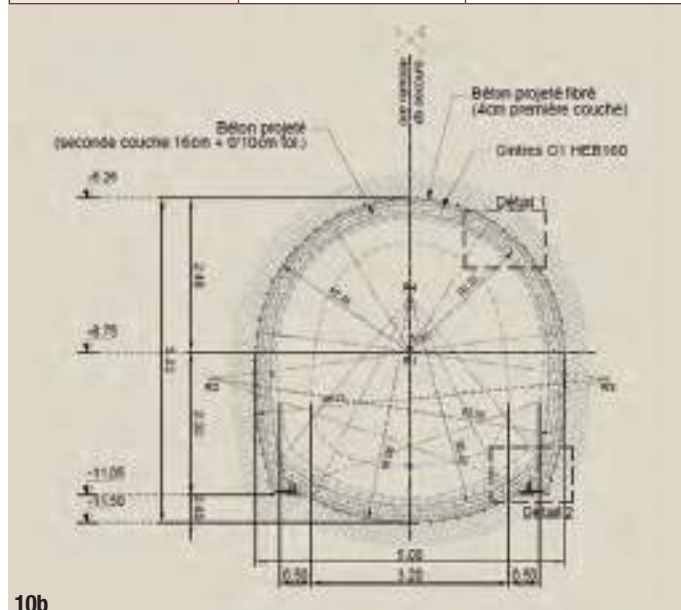
- De maîtriser les venues d'eau lors du creusement des rameaux. Ces travaux ont été exécutés depuis le quai et, pour la partie non accessible, depuis la terre ferme, depuis le tunnel principal ;

Rameau de ventilation		
Section	Courante	Élargie
Longueur	32,6 m	
Hauteur	6,5 m	7,8 m
Largeur	7,7 m	8,7 m
Section front	45 m ²	62 m ²



10a

Rameau de secours		
Section	Courante	Élargie
Longueur	16,9 m	
Hauteur	4,7 m	5,4 m
Largeur	4,5 m	5,4 m
Section front	22 m ²	30 m ²



10b

© SWS

→ De maîtriser les venues d'eau lors du terrassement de la fouille du local technique. Ces travaux, en cours à la date de rédaction de cet article, sont faits depuis la terre ferme.

Étant donné les terrains en place aux profondeurs concernées par les traitements de terrain (craies de degré d'altération et de fracturation variables) et leurs perméabilités relevées lors des campagnes de reconnaissance de sol, ces traitements ont été effectués au moyen d'injections de coulis de ciment au tube à manchettes.

Au droit des rameaux :

L'objectif de ce traitement était d'abaisser la perméabilité en grand du massif injecté à 10^{-6} m/s ou moins et d'obtenir des pressions limites dans les terrains injectés supérieures à 1,5 MPa.

La technique de l'injection au tube à manchettes consiste à injecter un coulis sous pression dans un terrain, de manière répétitive et sélective, dans l'objectif d'en réduire la perméabilité. En fonction de la nature du terrain à injecter, cette réduction de perméabilité s'opère de différentes manières :

- Si les terrains sont "ouverts" : en les imprégnant et donc en réduisant leur porosité ;
- S'ils sont fracturés/fissurés : en remplissant les principales fractures/fissures ;
- S'ils sont de caractéristiques mécaniques moyennes : en les claquant, ce qui conduit à réticuler le massif de feuillets de coulis, et éventuellement à le recompresser.

Compte tenu de la forte charge d'eau au droit du futur creusement et de la sensibilité de l'ouvrage, les épaisseurs d'injection ont été calées à 4,5 m. Les rameaux ont été injectés à cœur.

Le retour d'expérience des travaux d'injection du rameau OAP12 (voir *Travaux n°969*), a permis de sélectionner :

- L'espacement entre forage : environ 2 m ;
- Le type d'injection : au tube à manchettes pour couvrir les variations d'altération des craies ;
- Le type de coulis à injecter : coulis bentonite-ciment fluidifié.

Lorsque cela était possible, ces forages et injections ont été faits depuis la plateforme de travail.

Toutefois, compte tenu de la configuration du site, un complément de traitement de terrain a dû être fait depuis le tunnel pour finaliser le traitement le long du rameau d'accès secours. Ces travaux ont donc nécessité une intervention depuis le tunnel, alors que la logistique pour le creusement de ce



11
© HORIZON

dernier continuait de fonctionner en même temps (figure 9).

Compte tenu des fortes charges d'eau appliquées au niveau du tunnel, les forages ont été conçus pour permettre un forage sous sas et un équipement du tube à manchettes à l'abri du tubage. Enfin, compte tenu de la proximité entre les premières manchettes injectées et les anneaux de tunnel, une instrumentation a été mise en place pour suivre les déformées du tunnel lors des phases d'injection.

11- Cadre de renfort au droit du rameau secours.

12- Premier tir de boulons pour le rameau BSPP.

11- Reinforcing frame at the level of the emergency connecting gallery.

12- First bolt shooting for the firefighting connecting gallery.

De plus, les consignes d'injection et le passage de réalisation de ces dernières ont été conçus pour minimiser l'impact sur les anneaux de tunnel :

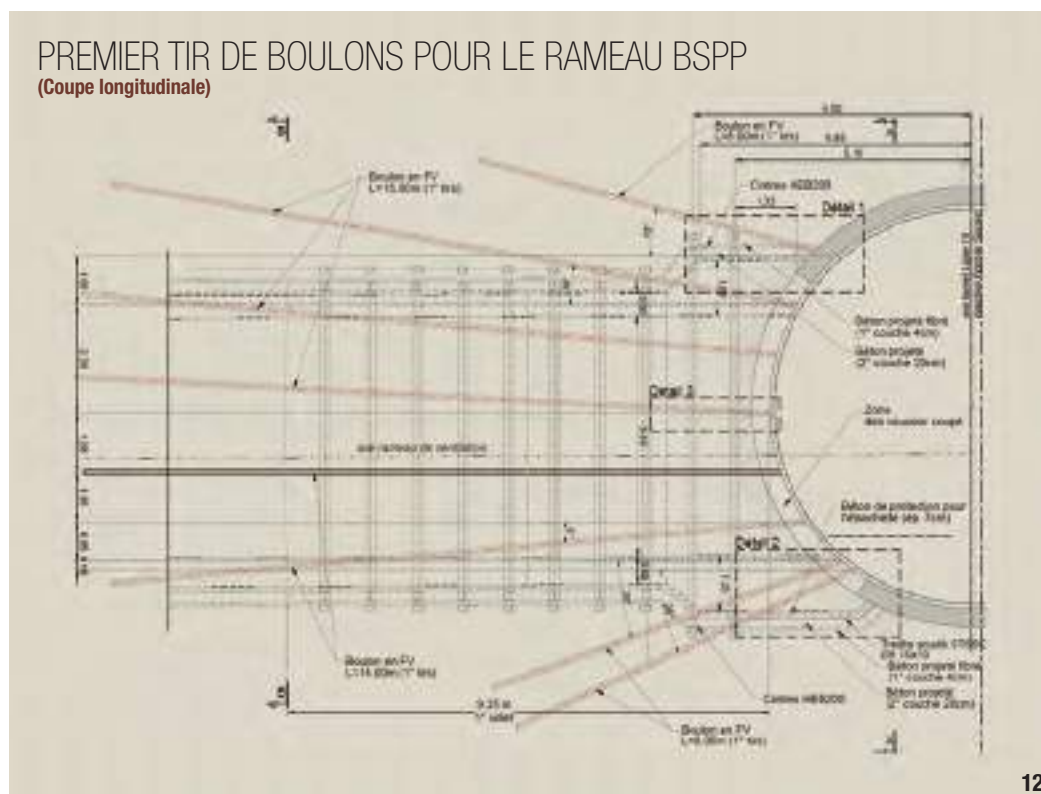
- Injection des manchettes proches des voussoirs sous pression et débit d'injection réduits ;
- Injection des forages à cœur du rameau ensuite ;
- Injection des forages de l'auréole autour du rameau en dernier.

Les mesures d'auscultation n'ont pas montré d'effet indésirable des travaux de forage et d'injection sur les anneaux de tunnel. Les débits d'eau lors du creusement des rameaux confirment l'atteinte des objectifs de maîtrise de la perméabilité du massif injecté (moins de 10^{-6} m/s).

Fond injecté du local technique

Le fond injecté consiste à réaliser un bouchon de 3 m d'épaisseur positionné à l'équilibre hydrostatique permettant à la fois de maîtriser les débits d'exhaure lors du terrassement de la fouille du local technique et d'assurer l'équilibre aux sous-pressions tant que le radier permanent n'est pas en place.

Compte tenu de la géométrie de l'ouvrage et du niveau de nappe, ce bouchon se trouve positionné au niveau des craies altérées proches de l'interface avec les alluvions anciennes. L'espacement entre forages a été calé à 1,8 m.



12
© SWS

Les injections ont été faites aux tubes à manchettes avec un coulis bentonitiquement fluidifié.

De nombreux ajustements ont été menés sur le positionnement des forages pour limiter les éventuels effets masques induits par la présence de nombreuses fondations profondes traversant le futur fond injecté.

Comme pour les injections des rameaux, les pompes d'injection sont pilotées en débit et pression par le système SPICE®. Ce système de régulation permet, en temps réel, d'ajuster le débit et la pression d'injection aux mesures faites à la pompe. Il permet ainsi d'éviter les pics de pression lors de l'injection, offrant une plus grande maîtrise de la pression d'injection.

À la date de rédaction de cet article, les travaux d'injection débutent tout juste. Au total, 519 forages ont été réalisés pour un linéaire total foré de 10 140 m. La quantité de coulis à mettre en œuvre est estimée de l'ordre de 1 500 m³.

Creusement traditionnel

L'ouvrage est constitué de deux rameaux reliant le puits au tunnel principal : un rameau de ventilation et un rameau de secours (BSPP).

L'excavation des deux rameaux a été réalisée en méthode traditionnelle depuis le tunnel avec un accès par l'ouvrage annexe OAP12 situé à 800 m en amont dans le tunnel (voir la figure 10 pour les caractéristiques des deux rameaux). Avant de démarrer le creusement des rameaux, un cadre métallique de renfort est mis en place dans le tunnel au droit des ouvertures (figure 11).

Un premier tir de boulons de front est réalisé avant ouverture à travers des carottages dans les voussoirs.

Les boulons sont inclinés et azimutés. Ils sont situés au front et autour de celui-ci et permettent de garantir la stabilité du front et de consolider la zone autour de l'excavation (figure 12). Une fois les boulons réalisés et avant le démarrage des travaux d'excavation, les voussoirs du tunnel au droit des ouvertures sont découpés.

Les découpes périphériques sont réalisées à l'aide de la méthode du sciage au câble. Une fois les voussoirs découpés, ceux-ci sont démolis à l'aide d'une pelle et d'un BRH.

Le creusement du rameau secours a été réalisé en méthode traditionnelle avec un pas d'avancement de 1 m. L'excavation d'un pas est réalisée à

l'aide d'une pelle mécanique sur chenille équipée d'une fraise ou d'un BRH en fonction du terrain rencontré.

Une fois la passe excavée, le soutènement est mis en place. Il est constitué de cintres HEB 160 et de béton projeté fibré.

Des boulons de front en fibres de verre sont également mis en place à l'avancement pour assurer le maintien du front. Il s'agit de boulons bilames de 8 à 15 m renouvelés 2 fois.

Le soutènement du rameau ventilation est constitué de cintres HEB 200 tous les mètres et de béton projeté fibré. Des boulons de front en fibre de verre de longueur entre 8 et 15 m sont également mis en œuvre avec 3 renouvellements (figure 1).

Le principal défi de ces travaux réside dans la réalisation de ces deux rameaux en parallèle avec un accès par le tunnel sur 800 m et par l'ouvrage annexe OAP12 : rameau de 45 m de longueur et puits de 40 de profondeur et de 9 m de diamètre intérieur.

Une logistique particulière a donc été mise œuvre pour l'acheminement du béton projeté et le marpage des déblais, afin de garantir la circulation en tunnel, la rotation dans le rameau et limiter l'encombrement dans les puits :

→ Des auto-bétonnières de 4 m³ de capacité, avec conduite dans les deux sens, pour le transport du béton projeté ;

→ Des chargeurs type Dumper de capacité de 3 m³ pour le marpage entre les rameaux et le puits OAP12.

À la date de rédaction de cet article, les travaux de creusement du rameau secours sont achevés. Ceux du rameau ventilation sont en passe de l'être. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

PALPLANCHE ET COMBIWALL : 785 t d'acier, 54 paires de palplanches AZ800 et AZ700 et 33 double profilés métalliques HZ 1080

TIRANTS : 41 tirants précontraints 9T15 à 12T15 soit 1 400 m

MICROPIEUX : 419 micropieux de 25 m de type III soit 10 475 m

PIEUX FORÉS ET BARRETTES : 8 pieux forés boue d'environ 22,5 m soit 180 m environ, et 30 barrettes de 22,7 m, épaisseur 0,8 m, 1 918 m² de surface excavée, 159 t d'armatures

PAROI MOULÉE : 2 358 m² de paroi moulée épaisseur 1 m à 60 m de profondeur, 215 t d'armatures.

INJECTION COULIS DE CIMENT TAM RAMEAUX ET FOND INJECTÉ : 23 656 m de forages rameaux et fond injecté, 498,84 m³ de coulis d'injection rameaux

CINTRES : 34 cintres HEB200 sur le rameau ventilation et 17 cintres HEB150 sur le rameau BSPP pour un total 75 t

BÉTON PROJETÉ : 2 400 m²

BOULONS EN FIBRE DE VERRE : 3 200 m

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Société du Grand Paris

ENTREPRISES GÉNIE CIVIL : Groupement Horizon composé de : Bouygues Travaux Publics Régions France (mandataire), Soletanche Bachy France, Bessac, Soletanche Bachy Tunnels

MAÎTRE D'ŒUVRE : Groupement Setec tpi (mandataire) - Ingerop (co-traitant) - Geos (sous-traitant géotechnique) - Agence Duthilleul (architecte PDS et Passerelle) - Brunet Saunier Architecture (architecte ISS)

AMO : Groupement Artemis (Artelia - Arcadis - BG)

ABSTRACT

LINE 15 SOUTH OF THE 'GRAND PARIS EXPRESS' PROJECT - ACCESSORY STRUCTURE OAP10

YVES LE'FLOCH, INGEROP - THOMAS BERBET, GEOS - IBRAHIM ASRI, SOLETANCHE BACHY FRANCE - VICTOIRE HUBERT, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS - ANTHONY GAUTIER, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

Accessory structure OAP10 is executed as part of the T3A project for Line 15 South of the Grand Paris Express. *It consists of plant rooms and the tunnel ventilation facility installed in subsurface and surface boxes, a deep connecting shaft between the surface and the main tunnel of the line, and two shaft/tunnel connecting galleries. The structure is inserted in a very restricted land area located between the Seine and road systems. Therefore, part of the existing quay structures was re-used for temporary retaining purposes and part of the ground treatment for the connecting galleries was executed from the tunnel during the tunnel driving phase. A very large number of techniques were employed: composite screens, sheet piling, prestressed tie rods, struts, micropiles, piles, barrettes, diaphragm walls, soil grouting and conventional tunnel driving.* □

LÍNEA 15 SUR DEL GRAND PARIS EXPRESS - LA OBRA ANEXA OAP10

YVES LE'FLOCH, INGEROP - THOMAS BERBET, GEOS - IBRAHIM ASRI, SOLETANCHE BACHY FRANCE - VICTOIRE HUBERT, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS - ANTHONY GAUTIER, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

Realizada en el marco del proyecto T3A de la Línea 15 Sur del Grand Paris Express, *la obra anexa OAP10 se compone de locales técnicos y de la central de ventilación del túnel, instalados en cámaras de subsuperficie y de superficie, de un pozo profundo que une la superficie y el túnel principal de la línea y de dos ramas que conectan el pozo al túnel. La construcción se inscribe en un espacio muy restringido, entre el Sena y la red viaria, lo que ha obligado a reutilizar una parte de las estructuras del andén existente como sostenimiento provisional y realizar una parte de los tratamientos del terreno para las ramas desde el túnel, durante su fase de perforación. Se han aplicado un gran número de técnicas de obra: pantallas mixtas, tablestacas, tirantes pretensados, butones, micropilotes, pilotes, pilotes flotantes, pantallas de hormigón, inyecciones de suelo y perforación tradicional.* □



BTP BANQUE

GRUPE CREDIT COOPERATIF

C'est le métier
qui parle

LA BANQUE PROFESSIONNELLE DU BTP

www.btp-banque.fr



1
© CAP'GÉO TOPOGRAPHE

RÉHABILITATION DES TUNNELS FERROVIAIRES DE LIART (08)

AUTEUR : PIERRE MANIEZ, INGÉNIEUR TRAVAUX, DEMATHIEU BARD CONSTRUCTION

ENTOURANT LE VILLAGE DE LIART DANS LES ARDENNES FRANÇAISES, LA LIGNE 222 000 EST UN AXE MAJEUR DU TRAFIC DE FRET ENTRE LE NORD ET LE SUD DE L'EUROPE DANS LE MAILLAGE SNCF RÉSEAU. ETABLIS À L'ÂGE D'OR FERROVIAIRE AU DÉBUT DU XX^e SIÈCLE, LES OUVRAGES QUI JALONNENT LA LIGNE ONT TRAVERSÉ LES ÂGES ET LES CONFLITS MONDIAUX EN SUBISSANT DIFFÉRENTES CAMPAGNES D'ENTRETIEN. À L'ÉTÉ 2020, DEMATHIEU BARD CONSTRUCTION A MENÉ LA DERNIÈRE D'ENTRE ELLES, L'UNE DES PLUS IMPORTANTES.

Les tunnels ferroviaires de Liart se trouvent sur la ligne à double voie électrifiée entre Liart et Tournes à l'ouest de Charleville-Mézières. Les ouvrages se trouvent respectivement du PK 29+981 au PK 30+146 et du PK 27+988 au PK 28+288, soit des longueurs d'ouvrage de 165 m et

1- Vue aérienne de la tête ouest - Tunnel de Martinsart.

1- Aerial view of the western portal - Martinsart Tunnel.

300 m. Les deux tunnels se situent sur le ban communal de la commune de Liart et sont distants de 1,7 km. Le tunnel de Liart se trouve à proximité immédiate de la Gare de Liart. Le tunnel dit de Martinsart se trouve dans une forêt à la sortie du village (figure 1).

La géométrie des tunnels est semblable. Les sections internes des ouvrages sont équivalentes et présentent une voûte plein cintre de 4,15 m de rayon reposant sur des piédroits courbes dégageant une ouverture de 8,30 m et une hauteur sous clé de 7 m par rapport au plan de roulement. ▷



2

© PIERRE MANIEZ

Le tunnel de Liart présente une courbe constante à gauche d'un rayon de 300 m et une légère rampe de 3,5 mm/m. À l'inverse, le tunnel de Martinsart présente une courbure à droite d'un rayon de 483 m et une pente de 3,4 mm/m. La couverture maximale sur le tunnel de Liart est de 19 m et elle est de 9 m sur le tunnel de Martinsart, ce qui en fait des ouvrages peu profonds mais exposés à la nappe phréatique et à d'importantes veines d'eau.

L'ouvrage de Liart a également subi, en parallèle des travaux objets de cet article, des aménagements indirects concernant le drainage superficiel des eaux pluviales en couverture. Plusieurs aménagements ont été faits dans un marché indépendant de celui réalisé par Demathieu Bard Construction. Les travaux exécutés durant l'été 2020 avaient pour objectif principal de stopper ou de canaliser les entrées d'eau issues des radiers et des voûtes abîmés par le temps. Ces venues d'eau généraient d'importants désordres notamment sur les voies, qui demandaient à être bourrées régulièrement, mais ce, dans la limite des possibilités offertes par la géométrie de la voûte et du gabarit ferroviaire à conserver dans les ouvrages. L'objectif secondaire de ces travaux était de passer les ouvrages à un gabarit ferroviaire supérieur : le gabarit AFG, dit "d'autoroute ferroviaire".

Le tunnel de Martinsart a fait l'objet d'une reconstruction complète de son radier. Cette régénération s'est faite à une altimétrie inférieure pour y intégrer le nouveau gabarit ferroviaire. Une multitude d'autres travaux ont été réalisés en parallèle, dont la création de six niches refuges, d'un dispositif de drainage complet, la régénération des porteurs caténaux, des travaux d'éclairage ainsi que des travaux de voies. Le tunnel de Liart a, lui, fait l'objet



3

© PIERRE MANIEZ



4

© PIERRE MANIEZ

de travaux moins lourds, mais sur une longueur plus importante ; régénération locale du parement maçonné, rescindement de la voûte pour augmentation du gabarit ferroviaire, création de dispositifs de drainage, pose de bandes drainantes, traitement de la plateforme et travaux de voies.

Ces travaux se sont déroulés durant trois phases principales, avec des coupures de circulation ferroviaire différentes. Ils ont commencé par une interruption temporaire de circulation en journée, durant trois semaines au mois de juin 2020. S'en est suivie une interruption totale du trafic sur huit

2- Forage des ancrages dans le tunnel de Martinsart.

3- Trancheuse à roue en base de piédroit.

4- Pose des modules préfabriqués.

2- Drilling anchorages in Martinsart Tunnel.

3- Wheel trencher at the base of the side wall.

4- Placing precast modules.

semaines au cœur de l'été. Et pour finir, à nouveau une interruption de circulation en journée durant trois semaines au mois de septembre 2020. Pendant la phase la plus intense des travaux, lors de la reconstruction du radier du tunnel de Martinsart, les travaux se sont organisés en trois postes de huit heures avec des cadences de production soutenues.

La régénération du radier du tunnel de Martinsart a été l'opération la plus massive. Celle-ci touchant à la structure même de l'ouvrage, un dispositif d'instrumentation a été installé afin de suivre périodiquement les mouvements

Dans le sens transversal, des éléments préfabriqués en béton ont, dans un premier temps, été placés en base de piédroits dans des tranchées ouvertes dans le radier historique. Un butonnage a été installé entre ces éléments et la partie centrale du radier encore en place, afin de recréer une stabilité de voûte sur le tronçon considéré. Les modules ont été préfabriqués en amont du chantier par Demathieu Bard Construction ; 264 pièces ont été produites au total. Cette tâche, débutée au centre du tunnel, a été avancée en symétrie en direction des têtes de l'ouvrage (figure 4).

Après avoir été suffisamment avancée, c'est-à-dire après s'être éloigné d'au moins 10 m du premier plot, la pose des modules a été suivie par la reconstruction du radier central. Cette tâche a également commencé au centre de l'ouvrage et a été avancée en symétrie en direction des têtes de l'ouvrage. Une fois la phase de démarrage achevée, une journée "type" s'entendait par la démolition de nuit de : 4 tranchées latérales de 10 m et 2 plots centraux de 10 m de longueur ; puis, par une phase de jour avec la pose de 4x10 m de modules et par la construction de 2x10 m de radier coulé en place (figures 5 et 6). Ce schéma soutenu a été tenu durant environ 10 jours pour assurer la reconstruction complète du radier (figure 7). La continuité des armatures a été main-



8
© PIERRE MANIEZ

tenue entre les différents plots de radier et l'étanchéité a été assurée entre les plots par des joints type Waterstop intégrés en fond de coffrage (figure 8). La continuité de l'étanchéité entre modules préfabriqués a été assurée par la mise en place de joints hydrogonflants. Une règle métallique spécifique présentant le même profil que le radier central et prenant appuis sur les modules latéraux a été conçue afin de faciliter la réalisation du profil convexe du radier. Cette règle a également été utilisée afin de régler le fond de forme lors du terrassement.

La réalisation de six niches refuges supplémentaires en tunnel a été l'autre axe majeur touchant à la structure même de l'ouvrage. La construction de ces nouvelles infrastructures vise à mettre aux normes le tunnel avec la réglementation qui exige la présence d'une niche tous les 25 m de chaque côté d'un tunnel. Les six niches complémentaires symétriques ont donc été réalisées.

8- Arrêt de bétonnage d'un plot de radier.
9- Fraisage d'une niche en tunnel.

8- Termination of concreting of an invert section.
9- Milling a tunnel recess.



9

© PIERRE MANIEZ



La première étape a nécessité la démolition de la voûte au moyen d'une pelle R924 Compact Tunnel et l'utilisation d'une fraise hydraulique (figure 8). Les niches ont ensuite été réalisées en utilisant un béton autoplaçant, en remplacement du béton projeté habituellement utilisé sur ce type de construction. Le bétonnage a été réalisé en une seule levée avec utilisation d'un négatif spécialement étudié et la création d'une cheminée de coulage en partie supérieure. Le rendu est ainsi propre et lisse (figures 10 et 11).

Les abords du tunnel de Martinsart ont fait l'objet de travaux de terrassement afin de créer les pentes et rampes nécessaires au raccordement avec la nouvelle altimétrie du radier. Ces travaux ont été complétés par l'ajout d'un dispositif de drainage de la plateforme ferroviaire. ▶

10- Coffrage d'une niche en tunnel.

11- Niche en tunnel terminée.

12- Abords du tunnel terminés.

10- Formwork of a tunnel recess.

11- Completed tunnel recess.

12- Completed tunnel approaches.



12
© PIERRE MANIEZ

Enfin, les supports caténaire en tunnel ont été remplacés et de nouveaux poteaux caténaire ont remplacé les anciens aux abords directs des têtes de l'ouvrage (figure 12).

Le tunnel de Liart a, au même moment, subi des travaux légèrement différents. Le radier étant moins dégradé que celui de Martinsart, il ne nécessitait donc pas une régénération complète. En outre, le gabarit ferroviaire du tunnel était initialement plus important que celui de Martinsart, ce qui a permis d'éviter une reconstruction globale du radier. Des travaux ont été entrepris notamment sur les parements des piédroits dégradés et ont compris un reprofilage de la géométrie de la voûte pour assurer le passage au gabarit ferroviaire AFG. Le tunnel a, dans un premier temps, fait l'objet d'une numérisation en trois dimensions ainsi que d'un levé topographique des voies. Une étude poussée a été réalisée à partir de ces relevés afin de calculer les zones de la voûte nécessitant un rescindement, c'est-à-dire un rabotage. Les zones ont été ensuite implantées sur la voûte du tunnel en se référant aux rails existants, seul repère en place permettant une implantation en voûte facilitée pour le chantier (figure 13). L'épaisseur de rescindement en jeu était un facteur important car, au-delà de 6 cm de rescindement, des voussoirs en béton armé devaient être créés afin de compenser l'amincissement de la voûte maçonnée. Ces zones impactées par la nécessité de créer des voussoirs ont, dans un premier temps, fait l'objet d'un renforcement par la pose de tirants d'ancrage doublés d'une lierne métallique de répartition. L'emplacement des futurs voussoirs a ensuite été démoli à la fraise hydraulique montée sur une



13

© PIERRE MANIEZ

pelle de démolition. Un ferrailage a été posé et un béton projeté a été appliqué par couches successives afin de créer le voussoir, sans engager le gabarit ferroviaire sur cette zone. Un phasage particulier a été nécessaire afin de ne pas déstabiliser une longueur trop importante de la voûte. Les tronçons de voussoir ont été construits par longueur maximale de 1 m, en quinconce (figure 14).

Depuis de nombreuses années, le parement des piédroits a été fortement altéré par les infiltrations d'eau.

Des zones complètes de plusieurs dizaines de mètres nécessitaient une reprise pour assurer la pérennité de l'ouvrage. Sur le même principe que pour la réalisation des voussoirs, mais sans renforcement par pose d'ancrage, les parements ont été rabotés et recréés via du béton projeté par voie humide (figure 15).

Le radier a été légèrement repris par zones ponctuelles. Un nettoyage fin de la surface a été réalisé pour, en premier lieu, analyser les lacunes présentes

13- Implantation chantier des zones à rescinder.

14- Voussoirs en béton projeté.

15- Reprise des parements dégradés.

13- Layout of the worksite for areas to be demolished.

14- Shotcrete segments.

15- Retouching damaged claddings.



14

© NICOLAS GROSS



15

© NICOLAS GROSS

16- Dispositifs de drainage dans le tunnel de Liart.

17- Vidéo du chantier, à scanner.

16- Drainage systems in Liart Tunnel.

17- Worksite video, for scanning.

sur le radier historique. Ces zones ont ensuite été traitées par purges et substitutions de matériaux. Ces opérations ont également été menées dans l'objectif de reprendre les défauts de pente du radier, afin d'éviter de créer des zones de rétention d'eau. Des caniveaux latéraux, réalisés sur mesure, ont été posés en base des piédroits afin de récolter les eaux de ruissellement des parements. Les principales veines d'eau débouchant sur la voûte ont été canalisées par l'intermédiaire de bandes de drainage en EPDM bridées contre le parement. Le principal objectif de ce système étant d'éviter que les eaux s'écoulent directement



16
© NICOLAS GROSS

sur la plateforme ferroviaire, et viennent créer des stalactites en hiver pouvant générer des troubles sur les caténaires et sur les trains en circulation. Un caniveau central est venu compléter le dispositif dans l'objectif de récolter et de drainer les eaux s'écoulant sur la plateforme ferroviaire (figure 16). L'ensemble des travaux a été réalisé avec une forte contrainte temporelle, sous une coupure de circulation intégrale de 8 semaines, chose rare dans les opérations menées par SNCF Réseau, mais inhérentes aux contraintes imposées par ces ouvrages souterrains à présent modernisés.

Pour en savoir plus, une vidéo du chantier est visionnable en scannant le QR code en figure 17. □



17
© TVI CONCEPT POUR DEMATHIEU BARD ET SNCF RÉSEAU

PRINCIPALES QUANTITÉS

- 1 300 m de piste d'accès
- 150 tirants d'ancrage auto-foreur
- 1 730 m de voie déposée et reposée, soit 2 900 traverses, 210 t de rail et 10 000 t de ballast
- 472 t d'élément préfabriqué, 380 m³ de béton, et 70 t d'armature pour régénération du radier du tunnel de Martinsart
- 1 900 m de caniveau béton posé
- 129 m² de béton projeté dans le tunnel de Liart

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : SNCF Réseau
MAÎTRE D'ŒUVRE : SNCF Réseau
MANDATAIRE ET ENTREPRISE GÉNÉRALE : Demathieu Bard Construction
SOUS-TRAITANT – BUREAU D'ÉTUDES : Bureau Esffo
SOUS-TRAITANT – TIRANTS D'ANCRAGE : TP Geo
SOUS-TRAITANT – TRAVAUX DE VOIES : Fourchard et Renard
SOUS-TRAITANT – TRAVAUX DE TERRASSEMENT ET VRD : Eiffage Route
SOUS-TRAITANT – TRAVAUX D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE : Eiffage Énergie
SOUS-TRAITANT – TRAVAUX DE CATÉNAIRE : Catelia
SOUS-TRAITANT – INSTRUMENTATION : Cementys
SOUS-TRAITANT – DÉSAMIANTAGE : Dagibat

ABSTRACT

RENOVATION OF LIART RAIL TUNNELS

PIERRE MANIEZ, DEMATHIEU BARD CONSTRUCTION

The Liart and Martinsart rail tunnels are located west of Charleville-Mézières, in the Ardennes department of France. The two tunnels, dating from 1904, were partially destroyed during the First World War. Following electrification of the line in 1952, the tunnels, a few hundred metres apart, underwent various maintenance campaigns, without ever affecting the historical structure, which is now worn by time. In the summer of 2020, a vast renovation campaign carried out by SNCF Réseau was entrusted to the contractor Demathieu Bard Construction to renovate the inverts, masonry roofs and catenary systems, but also to create new lay-by recesses and drainage systems, and of course to renovate the two lanes passing through the two tunnels. □

REHABILITACIÓN DE LOS TÚNELES FERROVIARIOS DE LIART (08)

PIERRE MANIEZ, DEMATHIEU BARD CONSTRUCTION

Los túneles ferroviarios de Liart y Martinsart están situados al oeste de Charleville-Mézières, en el departamento francés de las Ardenas. Los dos túneles, que datan de 1904, resultaron parcialmente destruidos durante la Primera Guerra Mundial. Tras una electrificación de la línea en 1952, los túneles, distantes de varios cientos de metros, fueron objeto de distintas campañas de mantenimiento, pero éstas nunca trataron la estructura histórica, actualmente deteriorada por el paso del tiempo. Durante el verano de 2020, una amplia campaña de rehabilitación impulsada por SNCF Réseau y encargada a la empresa Demathieu Bard Construction ha permitido renovar las soleras, las bóvedas de mampostería y las catenarias, así como crear nuevos nichos de refugio, dispositivos de drenaje y, lógicamente, regenerar las dos vías que discurren por ambos túneles. □

Victoria 維多利亞

Rheo 瑞亞



T2主幹路及茶果嶺隧道
YWUNK ROAD T2 AND CHA KWO LING TUNNEL



TRUNK ROAD T2 ET CHA KWO LING TUNNEL À HONG KONG

AUTEURS : ANTOINE SCHWOB, DEPUTY PROJECT DIRECTOR, BOUYGUES TP - SEBASTIEN CHEN, ENGINEERING MANAGER, BOUYGUES TP - ESTELLE CAGNAT, METHODS MANAGER, BOUYGUES TP - KHALIL BEJJANI, TUNNEL DESIGN MANAGER, BOUYGUES TP

OUVRAGE MAJEUR DE LA FUTURE ROUTE 6 DU TERRITOIRE DE HONG KONG, LE TUNNEL SOUS-MARIN *TRUNK ROAD T2* EST ACTUELLEMENT L'UN DES PRINCIPAUX PROJETS D'INFRASTRUCTURE EN CONSTRUCTION À HONG KONG. DEUX TUNNELIERS À PRESSION DE BOUE D'UN DIAMÈTRE DE 14 m, ÉQUIPÉS DE TÊTES ACCESSIBLES, ÉVOLUENT SIMULTANÉMENT À UNE PROFONDEUR AVOISINANT LES 50 m SOUS LE NIVEAU DE LA MER À TRAVERS UNE GÉOLOGIE COMPLEXE. LE PROJET COMPREND ÉGALEMENT UNE SECTION DE TUNNEL CREUSÉE À L'EXPLOSIF AINSI QUE DE NOMBREUX OUVRAGES ANNEXES. AFIN DE POUVOIR TENIR UN PROGRAMME PARTICULIÈREMENT EXIGEANT, LES ÉQUIPES DE CE PROJET À HAUT RISQUE ONT DÛ DÉPLOYER DE NOMBREUSES INNOVATIONS.



LE CONTEXTE

La construction de la future Route 6 du territoire de Hong Kong bat actuellement son plein. Ce nouvel axe stratégique vise à réduire l'actuelle congestion du trafic routier au sud de la péninsule de Kowloon en reliant, d'ouest en est, les quartiers de Yau Ma Tei et de Tseung Kwan Ho. Le tout, essentiellement en souterrain (figure 2).

- 1- Le lancement des tunneliers.
- 2- La route 6.

- 1- TBM launching.
- 2- Highway 6.

La section centrale de cette future Route 6 constitue le projet *Trunk Road T2 and Cha Kwo Ling Tunnel* (figure 3). Ce marché de conception-construction a été attribué en novembre 2019 à Bouygues Travaux Publics pour le compte de CEDD (Département de Génie Civil et de Développement du Gouvernement de Hong Kong). Il comprend un tunnel bitube autoroutier long

de 3,5 km, dont la majeure partie est creusée sous la mer à l'aide de deux tunneliers à pression de boue. À l'ouest, sur le site du mythique ancien aéroport de Kai Tak, c'est une tranchée couverte qui constitue la première partie du projet. À l'est, dans le quartier de Cha Kwo Ling, une section de 400 m est construite de manière traditionnelle (creusement mécanique et à l'explosif). ▷



3

© BYTP

3- Le projet Trunk Road T2.
4- Construction du bâtiment de ventilation Ouest et de la rampe d'accès.

3- The Trunk Road T2 project.
4- Construction of the western ventilation building and the access ramp.

Les deux tubes comportent chacun deux voies de circulation et sont reliés tous les 100 m par des inter-tubes afin d'assurer l'évacuation des passagers en cas d'incendie lors de la phase d'opération. Le projet comprend également la conception et la construction des deux bâtiments de ventilation (figures 4 et 5) ainsi que de tous les systèmes électromécaniques permettant le fonctionnement de l'ouvrage. Outre le tunnel, le marché intègre également un grand nombre d'infrastructures pour le développement du quartier de Kai Tak, actuellement en pleine mutation (passerelle piétonne, réseau souterrain de refroidissement, tunnels de réseaux, nouvelles routes...).

Depuis le début de l'année 2020, dans un contexte mondial perturbé par la crise sanitaire, les équipes de Bouygues Travaux Publics doivent faire face à un planning très exigeant en adaptant et en perfectionnant constamment les solutions innovantes qui avaient fait le succès technique et opérationnel du projet de tunnel sous-marin de Tuen Mun - Chek Lap Kok livré fin 2020 à quelques dizaines de kilomètres de là (Référence : *Travaux* n° 925 - "TMCLK - Les Tunnels sous-marins" et "TMCLK - Les défis de la rampe nord").



4

© BYTP



© BYTP
5

LE Puits de Lancement

Le premier ouvrage critique du projet est le puits de lancement à partir duquel les deux tunneliers démarrent leurs trajectoires. Afin d'améliorer le planning et la constructibilité du projet, Bouygues Travaux Publics a proposé de modifier l'emplacement du puits de lancement ainsi que sa forme. Le puits a été déplacé d'environ 40 m vers l'ouest afin de réduire les travaux de soutène-

5- Bâtiment de ventilation et portail Ouest.
6- Excavation du puits de lancement.

5- Ventilation building and West portal.
6- Excavation of the launching shaft.

ment et d'excavation. La forme du puits a également été optimisée, passant d'une forme rectangulaire butonnée transversalement à un puits circulaire bilobé de 65 m de long, 45 m de large, et 38 m de profondeur, combiné à une partie traditionnelle de 25 m de long (figure 6).

Fortes de leurs expériences acquises sur le projet de *Tuen Mun - Chek Lap Kok*, où un puits trilobé pionnier ainsi

qu'une tranchée couverte pentadécagonale (15 cellules) avaient été construits avec succès, les équipes de Bouygues Travaux Publics ont adapté le concept pour faire face aux contraintes spécifiques du puits de lancement du projet *Trunk Road T2*.

Un réalignement du projet a permis de rendre les trajectoires des tunneliers compatibles avec la nouvelle position et forme du puits.

La rigidité apportée par les effets d'arches latérales a permis de réduire les déformations de parois et ainsi de limiter les impacts sur le bâtiment PWCL (Public Works Central Laboratory), laboratoire gouvernemental contenant des équipements de mesure hautement sensibles au tassement et aux vibrations. Ce bâtiment est situé à moins de 5 m du puits ! La forme bilobée combinée à des travaux d'injection a permis de contrôler les tassements du sol et de maintenir une opération ininterrompue du PWCL pendant les travaux.

Une autre contrainte forte du puits est sa connexion à l'ouest à une tranchée couverte existante, construite avant le début des travaux de *Trunk Road T2*, formant la liaison routière permanente. ▶



© BYTP
6

Une étude fine des efforts longitudinaux retransmis à cette structure a permis de trouver une géométrie optimisée et robuste de la partie Ouest du puits. Un des défis principaux des puits multicellulaires consiste en la définition des panneaux de connexion entre cellules, les "Y-Panels" (Référence : Travaux n° 950 - "TMCLK - "Y-Panels" pour tranchée couverte multicellulaire"). Malgré les contraintes supplémentaires liées à la proximité du bâtiment PWCL ainsi qu'à la connexion à la tranchée couverte existante, les équipes techniques ont optimisé la géométrie et le calcul des 4 panneaux de connexion afin de réduire leur butonnage à deux paires de poutres en béton armé, permettant des travées verticales libres de 15 m et 18 m. En phase de construction, l'absence de butons métalliques a permis une excavation du puits accélérée, d'une part, et de bénéficier d'un large volume disponible pour l'assemblage et le lancement des tunneliers, d'autre part (figures 7 et 8).

À l'intérieur du puits de lancement, la structure permanente a également fait l'objet d'optimisations poussées. Afin d'éviter de lourds travaux de fondations sur le chemin critique du projet, la boîte permanente située à l'intérieur du puits a été conçue de manière "semi-flottante". À l'ouest du puits, la zone de connexion avec la tranchée existante est fondée à l'aide de parois moulées permanentes et de barrettes en milieu de travée. En revanche, la structure située à l'intérieur de la zone bilobée a été conçue de manière "flottante". La connexion entre ces deux systèmes (fondé et flottant) se fait à l'aide d'un clouage différé (après le remblaiement du puits) afin de limiter les efforts liés au tassement différentiel initial des structures.

La conception du puits de lancement a donc permis une optimisation du chemin critique du projet tout en répondant aux contraintes environnantes fortes de la zone.

LE TUNNEL SOUS-MARIN

Afin de réaliser le creusement des deux tunnels sous-marins dans le temps imparti (un peu moins de douze mois dans le programme contractuel), les équipes de Bouygues Travaux Publics ont dû mobiliser deux tunneliers à pression de boue de 14 m de diamètre (figure 9). Les deux machines évoluent en parallèle à des profondeurs atteignant les 50 m sous le niveau de la mer. La géologie rencontrée le long de l'alignement est très perturbée et pré-



7

© BYTP



8

© BYTP

7- Le puits de lancement et la station de traitement des boues.

8- Assemblage des tunneliers en fond de puits.

7- Launching shaft and sludge treatment plant.

8- TBM assembly at bottom of shaft.

9- TBM dimensions.



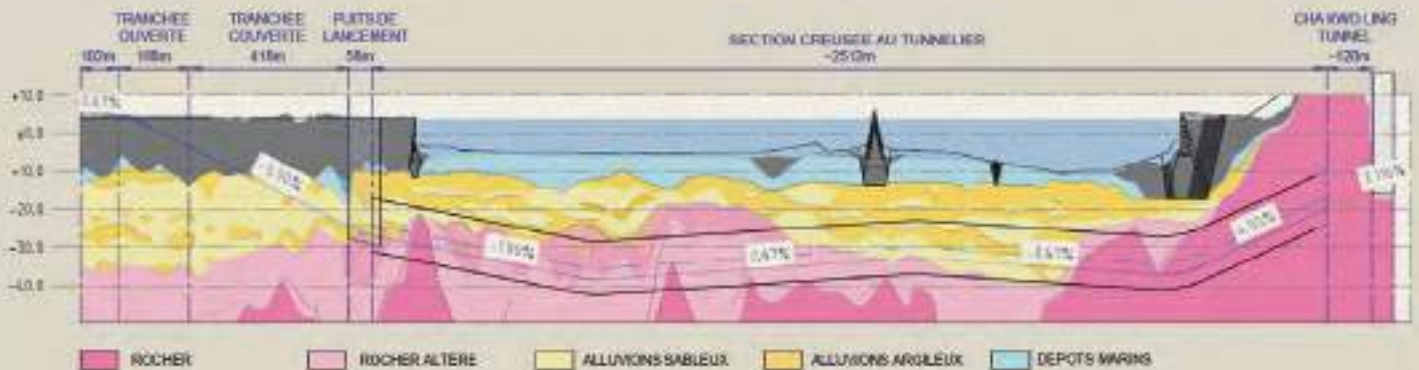
9

© BYTP

sente une grande variabilité liée notamment à la présence de grandes failles rocheuses le long de l'alignement. De nombreux sols coexistent et les tunneliers doivent passer rapidement d'un environnement alluvionnaire avec des nuances sableuses et argileuses à des zones rocheuses particulièrement critiques pour l'avancement des machines (figure 10).

Pour ce projet, les deux tunneliers qui avaient réalisé le creusement du tunnel de Tuen Mun - Chek Lap Kok ont été réutilisés après une remise à neuf quasi complète. Boucliers et motorisations ont été soigneusement inspectés, réparés et adaptés, pour partie en Allemagne, dans les usines du fabricant Herrenknecht. Mais un changement majeur

LA SECTION GÉOLOGIQUE DU PROJET



10

© BYTP

a été déployé sur les deux machines afin de les adapter au contexte spécifique du projet *Trunk Road T2* : l'installation de toutes nouvelles têtes de coupe dites "accessibles". Cette technologie permet le changement de toutes les molettes et de la plupart des outils de coupe au sein du volume fermé que constitue la tête accessible, véritable caisson hermétique maintenu à pression atmosphérique, quelles que soient les conditions de pression dans la chambre d'abattage. Les molettes au front sont regroupées par paires à l'avant de cylindres pouvant se rétracter pour être changés à l'intérieur de la tête de coupe. Lorsqu'un cylindre est

10- La section géologique du projet.
11- La tête accessible.

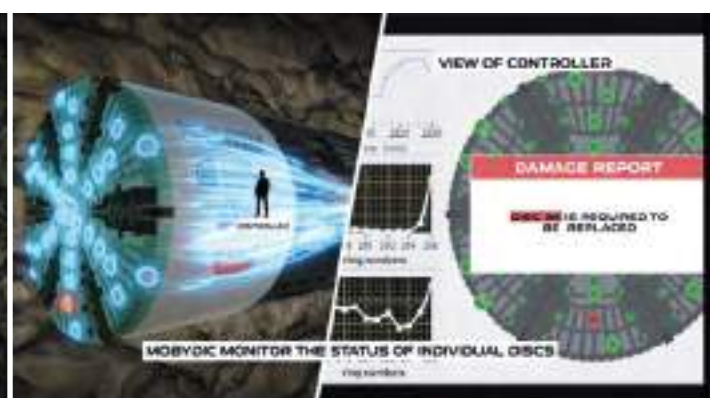
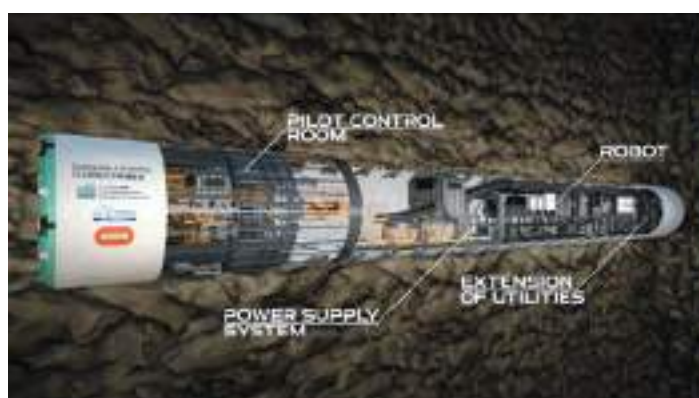
10- Geological section of the project.
11- Accessible head.

rétracté, une porte hermétique vient fermer l'espace laissé vacant afin de maintenir l'isolation du système. Cette technologie permet de s'affranchir des activités hyperbares pour la maintenance quotidienne de la tête de coupe ce qui représente un avantage certain

en termes de sécurité de l'opération (figure 11). En revanche, l'encombrement lié au système de cylindres et de portes associées limite le nombre de molettes et leur espacement ce qui représente un frein à la performance d'excavation, notamment dans un environnement rocheux.

Par ailleurs, il est à noter qu'avec l'utilisation d'une tête accessible, l'inspection visuelle de l'ensemble des molettes est impossible lors des opérations de maintenance. Il est donc crucial de disposer d'un système d'instrumentation efficace et performant afin de connaître, à chaque instant, l'état d'usure de chacune des molettes. Le système Mobydic,

développé par Bouygues Travaux Publics, a été adapté à ce nouveau type de tête accessible. Il permet de cibler les opérations de maintenance sur les molettes les plus usées, d'une part, et d'obtenir une cartographie détaillée du terrain rencontré afin d'avoir une vision très précise de l'environnement dans lequel les tunneliers évoluent, d'autre part. Après un pré-assemblage en Chine à l'été 2021, les deux tunneliers, *Victoria* et *Rhèa*, ont été montés au fond du puits de lancement à l'aide d'un portique pouvant lever des éléments atteignant un poids de 530 t. Ils ont démarré le creusement au début de l'année 2022 (figure 1).



© BYTP

11

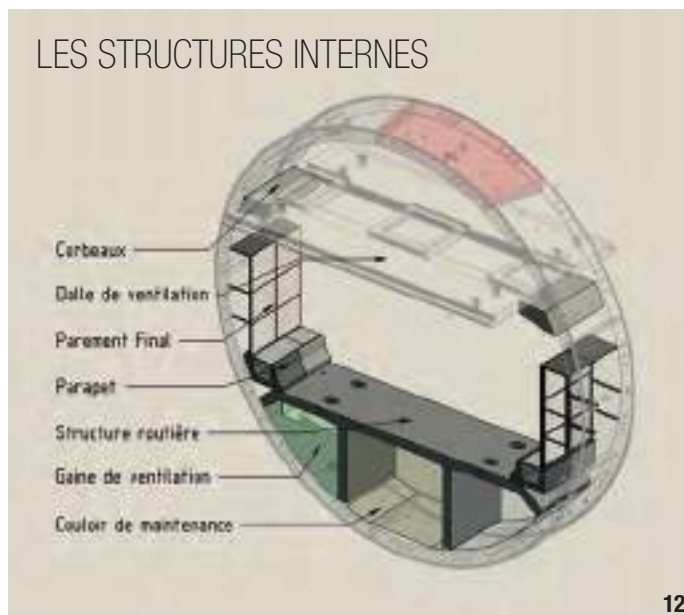
LES STRUCTURES INTERNES ET LES INTER-TUBES

Immédiatement à l'arrière des tunneliers, ce sont les activités de construction des structures internes qui se succèdent à un rythme effréné. Pour accélérer leur réalisation, la préfabrication des structures associée à la conception d'outils de pose adaptés a été privilégiée. C'est le concept de DfMA (Design for Manufacture and Assembly). La structure routière est constituée d'un tablier supportant la chaussée et les trottoirs qui repose sur deux voiles d'appui permettant de compartimenter la zone située sous la route créant ainsi un couloir de maintenance et son conduit de ventilation (figure 12). Ces galeries, préfabriquées par élément de 2,2 m de longueur, pèsent environ 25 t et sont installées derrière le tunnelier par un portique dédié (l'ISIG) qui permet de maintenir la logistique du tunnelier grâce à un pont escamotable et une rampe reliant le niveau du tablier des galeries en aval au niveau bas de l'anneau en amont.

À l'arrière de l'ISIG sont réalisés les inter-tubes reliant les tunnels principaux. Ces rameaux sont réalisés à l'aide d'un micro-tunnelier pousse-tubes, technique similaire à celle utilisée avec succès sur le chantier de *Tuen Mun - Chek Lap Kok*. Des adaptations sur les équipements ont été réalisées pour le projet visant à améliorer le cycle global de l'activité dont la difficulté réside dans le maintien de l'étanchéité pendant et après l'excavation. Avant le creusement, un tympan en béton armé est réalisé autour de la future ouverture dans les voussoirs des tunnels principaux afin de les renforcer avant d'appliquer les efforts du bâti de poussée du micro-tunnelier.

Vient ensuite la réalisation des corbeaux supportant la dalle de ventilation. Ceux-ci sont coulés en place à l'aide de coffrages métalliques recyclés et déplacés à l'aide d'un portique motorisé facilitant leur mobilisation ainsi que l'approvisionnement en ferrailage. Le bouchardage de la surface de contact ainsi que le percement des ancrages du corbeau se font depuis le tunnelier grâce à un robot spécialement conçu pour le projet (figure 13).

Les dalles de ventilation qui sont des éléments préfabriqués précontraints de 10 t sont alors installées grâce à un portique fonctionnant comme un lanceur de pont. Il roule sur les corbeaux à l'avant et s'appuie sur les dalles déjà posées à l'arrière. Cet outil localisé au-dessus des corbeaux permet de libérer



12

© BYTP

l'accès au niveau de la route pour la logistique des autres activités situées plus en amont dans le tunnel.

Enfin, les parapets préfabriqués sont installés de part et d'autre de la chaussée et calés contre la structure du tunnel avec un remplissage en béton maigre. Viennent ensuite les plaques de protection au feu, les supports de câbles ainsi que le parement final.

En adoptant une solution "DfMA" complète, la construction des structures internes et des inter-tubes du projet *Trunk Road T2* forme un exemple poussé de la stratégie d'industrialisation des opérations de tunnel que met en œuvre Bouygues Travaux Publics sur ses projets.

12- Les structures internes.

13- L'atelier de préparation des corbeaux.

12- Internal structures.

13- Bracket preparation workshop.

L'ensemble des structures internes ainsi que les inter-tubes du projet ont été modélisés dans la maquette numérique de manière paramétrique afin de pouvoir ajuster leur position automatiquement en fonction de celle

du tunnel construit tout en respectant les contraintes géométriques du projet (largeur de la chaussée, section de ventilation, etc.).

L'implantation de chacun de ces éléments sur chantier peut alors être réalisée en suivant un alignement généré automatiquement depuis la maquette (figure 14).

Les avancées du BIM sur le projet *Trunk Road T2* s'étendent au-delà de la modélisation géométrique et s'appliquent également à l'intégration de données (matériaux, quantités, formulaires d'inspection, manuels d'utilisation, etc.) dans le but de soumettre un modèle BIM complet aux autorités qui assureront la maintenance de l'ouvrage en phase d'opération.

Cette montée en compétence BIM de Bouygues Travaux Publics a permis à sa filiale hongkongaise d'obtenir la certification ISO 19650, nouveau standard BIM international attestant de la volonté d'être leader en matière de construction numérique.

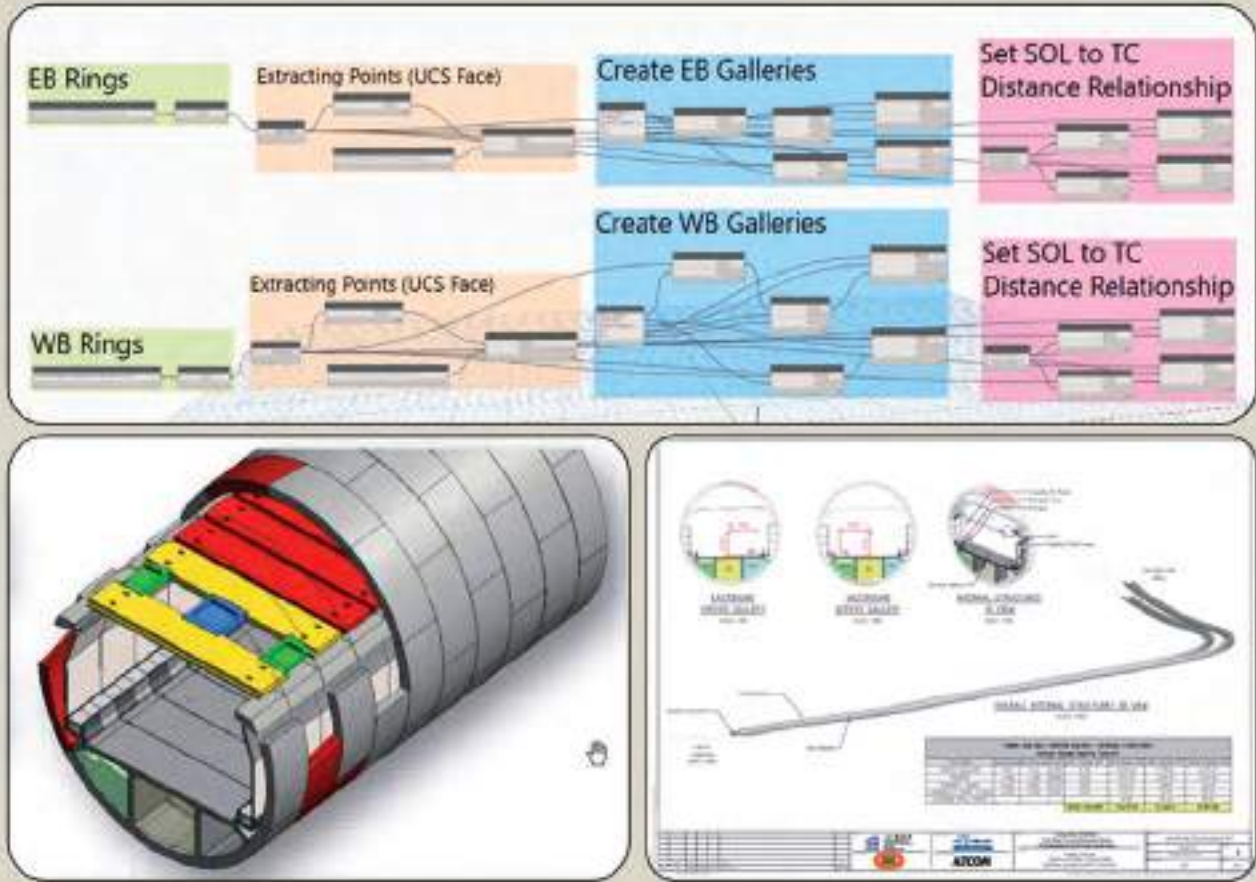
CHA KWO LING TUNNEL

Dix-huit mois avant le lancement des tunneliers, c'est à l'autre extrémité du projet que le creusement du tunnel a véritablement débuté sur la section construite de manière traditionnelle dans le rocher, le Cha Kwo Ling Tunnel. D'une longueur de moins de 400 m, la construction de ce tronçon présente de nombreuses difficultés techniques mais aussi des contraintes liées à la proximité des résidents du village de Cha Kwo Ling et aux interfaces avec le chantier voisin.



13

© BYTP



© BYTP 14

Cette section devait initialement s'étendre de l'échangeur de Lam Tin jusqu'au quai de Cha Kwo Ling où un puits circulaire devait former l'interface avec la section creusée au tunnelier. Du fait de la proximité du village, la moitié Ouest du Cha Kwo Ling tunnel se situait alors dans une zone où l'utilisation d'explosif était proscrite, rendant l'excavation particulièrement longue et compliquée, ce qui aurait finalement causé des nuisances importantes en

14- BIM et automatisation de la construction.
15- Le Cha Kwo Ling Tunnel.

14- BIM and construction automation.
15- Cha Kwo Ling Tunnel.

termes de bruit et de vibrations pour les villageois. Dès la phase d'appel d'offre, les équipes de Bouygues Travaux Publics ont proposé de supprimer le puits et d'étendre la section creusée avec les tunneliers afin de limiter au minimum la zone d'excavation mécanique (figure 15). Les tunneliers déboucheront à terme en caverne, dans le Cha Kwo Ling Tunnel, à l'emplacement où le diamètre du

tunnelier ne permet plus respecter les contraintes de largeur de route (liées à la création d'une branche de sortie pour la rampe montante et à des contraintes de visibilité en courbe pour la rampe descendante). Cette extension de la section forée au tunnelier aura permis de limiter à 80 m la section d'excavation mécanique pour un tube (figure 16) et de s'en affranchir totalement pour l'autre.

Le bruit et les vibrations générées par les tunneliers sous le village de Cha Kwo Ling représenteront ainsi des nuisances limitées à une période bien plus courte que celle qu'aurait généré l'excavation mécanique sur la même section. C'est donc à travers une optimisation du projet et des choix techniques impliquant une étude détaillée d'options d'alignement, de programme et d'équipements, que l'impact du projet sur les communautés avoisinantes a pu être limité au minimum. L'autre difficulté majeure de cette section du projet réside dans l'exiguïté du site.



© BYTP 15



16

© BYTP

C'est en fait depuis une petite parcelle de terrain située au cœur du gigantesque chantier de l'échangeur de Lam Tin, en cours de construction par un autre contracteur, que se situe le portail Est du projet (figure 17). Une coordination sans faille doit intervenir quotidiennement entre les deux projets afin de résoudre des problèmes d'accès, de levage ou encore d'évacuation des sites de l'un ou l'autre des projets lors des tirs à l'explosif. Au-delà de ces difficultés d'interface, les activités de creusement et de génie civil des deux tunnels doivent cohabiter avec l'excavation dans un rocher particulièrement

résistant du niveau de sous-sol du bâtiment de ventilation Est, ainsi que la construction de l'ensemble de sa structure (figure 18).

LES E&M ET INNOVATIONS

Les installations électriques et mécaniques font également partie intégrante du projet, tant en phase de conception que d'installation, ce qui permet une parfaite intégration des systèmes avec la structure, générant des optimisations significatives.

Le système de ventilation du tunnel, dimensionné pour un scénario feu de 30 MW, est un système semi-trans-

16- Excavation mécanique du Cha Kwo Ling Tunnel.

17- Le portail Est au cœur de l'échangeur de Lam Tin.

16- Mechanical excavation of Cha Kwo Ling Tunnel.

17- East portal in the midst of the Lam Tin interchange.

verse, géré par les deux bâtiments de ventilation connectés à chacun des portails. Le bâtiment de ventilation Ouest, qui est situé dans la zone de redéveloppement urbain de Kai Tak, inclut un système de purification d'air afin de limiter les émissions dues au trafic routier dans le tunnel.

L'éclairage en tunnel à Hong Kong est encore largement opéré par des lampes au sodium. Mais, pour ce projet, les équipes de Bouygues Travaux Publics ont proposé une installation LED qui réduira significativement la consommation électrique et l'impact carbone. Initialement, les principaux équipements



17

© BYTP



© BYTP

18

18- Portail et bâtiment de ventilation Est.

18- East portal and ventilation building.

électromécaniques devaient être installés dans des inter-tubes dédiés, accessibles uniquement en fermant des voies de trafic du tunnel. Bouygues Travaux Publics a proposé, dès le démarrage du chantier, d'améliorer le projet en relocalisant les équipements dans une galerie de service sous la voie, accessible 24h sur 24 sans impact sur la circulation dans le tunnel. Cette proposition a également permis de limiter le nombre d'inter-tubes. Elle a rapidement été soutenue et adoptée par le client pour ses avantages tant en phase de construction que d'opération.

PRINCIPALES QUANTITÉS

MONTANT DU CONTRAT DE CONCEPTION-CONSTRUCTION : 10,9 milliards de HK\$

LONGUEUR DU TUNNEL : 3,5 km

DIAMÈTRE DE LA TÊTE DE COUPE DES TUNNELIERS : 14 m

DIAMÈTRE INTÉRIEUR DES TUNNELS : 12,5 m

NOMBRE D'INTER-TUBES : 33 u

LONGUEUR DE CHAQUE INTER-TUBE : 13 m

PRINCIPAUX INTERVENANTS

CLIENT : CEDD (Civil Engineering and Development Department)

MAÎTRE D'ŒUVRE : HMJV (Hyder – Meinhardt Joint-Venture)

ENTREPRISE GÉNÉRALE : Bouygues Travaux Publics

BUREAU D'ÉTUDES EN CHARGE DE LA CONCEPTION : Aecom

CONTRÔLEUR INDÉPENDANT : Atkins – Snc Lavalin

SOUS-TRAITANT EN CHARGE DES PAROIS MOULÉES : Vsl-Intrafor

SOUS-TRAITANT EN CHARGE DES ÉQUIPEMENTS ÉLECTROMÉCANIQUES : Byme

FABRICANT DES TUNNELIERS : Herrenknecht

Une solution de construction modulaire pour les équipements électromécaniques est également en cours de discussion avec le client, afin de faire face manque de main d'œuvre qualifiée à Hong Kong, de minimiser les impacts de la construction sur la zone urbaine du chantier et d'assurer une meilleure qualité du produit fini.

Par ailleurs, les équipes de Bouygues Travaux Publics ont développé une proposition complète d'innovations technologiques visant à améliorer la phase d'opération. Elle comprend un système d'instrumentation des équipements, suivant les principes de l'IoT (Internet of Things), basé sur des capteurs intelligents connectés et des algorithmes de maintenance prédictive directement accessibles pour l'opérateur dans le cloud. L'investissement initial permettra de réduire considérablement les coûts de maintenance, de consommation et d'émission en phase d'opération. □

ABSTRACT

TRUNK ROAD T2 AND CHA KWO LING TUNNEL IN HONG KONG

ANTOINE SCHWOB, BOUYGUES TP - SEBASTIEN CHEN, BOUYGUES TP - ESTELLE CAGNAT, BOUYGUES TP - KHALIL BEJJANI, BOUYGUES TP

On the Trunk Road T2 project in Hong Kong, two tunnel boring machines of diameter 14 metres move forward under the sea at a depth of 50 metres below sea level. They are fitted with accessible cutter heads making it possible to avoid risky hyperbaric operations. They started excavation from a bilobed launching shaft 40 metres deep. After 2.5 km of excavation work in complex geological conditions, they will emerge in the Cha Kwo Ling Tunnel, a section built in the rock under a village. Behind the TBMs, for construction of the internal structures and intertubes, precasting together with bespoke installation equipment was the preferred option, in a strategy of work industrialisation. The future operation of the tunnel will benefit from the latest digital technologies designed to optimise maintenance and thus reduce the associated carbon footprint. □

TRUNK ROAD T2 Y CHA KWO LING TUNNEL EN HONG KONG

ANTOINE SCHWOB, BOUYGUES TP - SEBASTIEN CHEN, BOUYGUES TP - ESTELLE CAGNAT, BOUYGUES TP - KHALIL BEJJANI, BOUYGUES TP

Sur le projet Trunk Road T2 à Hong Kong, En el proyecto Trunk Road T2 de Hong Kong, dos tuneladoras de 14 m de diámetro avanzan bajo el mar, a 50 m de profundidad. Están provistas de cabezales de corte accesibles que permiten llevar a cabo operaciones de riesgo bajo presión. Iniciaron la perforación desde un pozo de lanzamiento bitubo de 40 m de profundidad. Tras perforar 2,5 km en una geología compleja, desembocarán en el Cha Kwo Ling Tunnel, sección construida en la roca, debajo de un municipio. Finalizado el trabajo de las tuneladoras, para la construcción de las estructuras internas y los inter-tubos, se ha apostado por la prefabricación, asociada a equipos de instalación especialmente diseñados, lo que refuerza la estrategia de industrialización de las actividades. La futura operativa del túnel disfrutará de las más avanzadas tecnologías digitales para optimizar el mantenimiento y reducir así la huella de carbono asociada. □



1
© CONSTRUCTION DEMATHIEU & BARD (CDB) INC.

LE POSTE DE VENTILATION MÉCANIQUE FULLUM DU MÉTRO DE MONTRÉAL

AUTEUR : MATHIEU DELANOË, DIRECTEUR DE PROJET, CONSTRUCTION DEMATHIEU & BARD INC.

LA CONSTRUCTION DU MÉTRO DE MONTRÉAL REMONTE AU DÉBUT DES ANNÉES 1960 EN VUE DES JEUX OLYMPIQUES DE 1976. DANS LE CADRE D'UN PROGRAMME DE REMISE À NIVEAU DES INFRASTRUCTURES DU MÉTRO, CONSTRUCTION DEMATHIEU & BARD (CDB) INC., FILIALE NORD-AMÉRICAINE DU GROUPE DEMATHIEU BARD, EST EN CHARGE DE LA CONSTRUCTION DU POSTE DE VENTILATION MÉCANIQUE FULLUM. SES MISSIONS INCLUENT LA MAÎTRISE D'ŒUVRE ET L'EXÉCUTION DE L'ENSEMBLE DES LOTS DU PROJET : GÉNIE CIVIL, ÉLECTRICITÉ, MÉCANIQUE & ARCHITECTURE. LA CONCEPTION ET LA GESTION DU PROJET RESTENT SOUS LA RESPONSABILITÉ DE LA DIRECTION TECHNIQUE DE LA SOCIÉTÉ DES TRANSPORTS DE MONTRÉAL (STM).

HISTOIRE DU MÉTRO DE MONTRÉAL

En avril 1952, le premier projet de construction du métro de Montréal est adjugé pour la construction des lignes orange, verte et jaune. S'ensuivent divers projets d'extension jusqu'à l'inauguration des dernières stations de

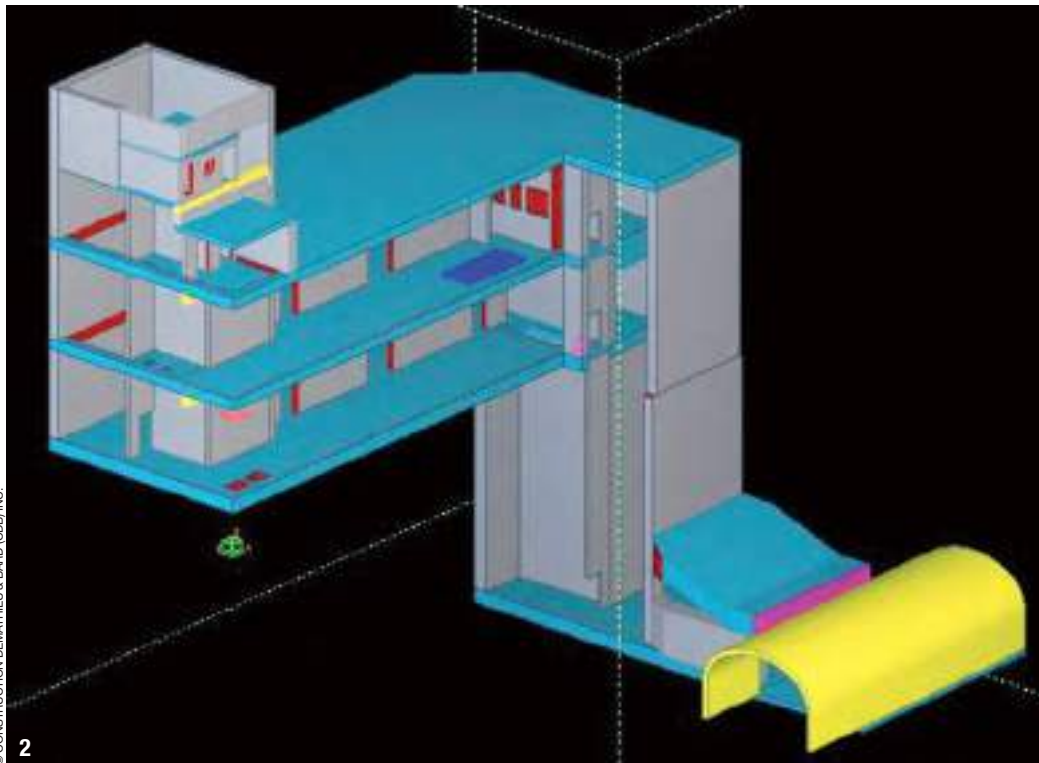
métro de la ligne orange en 2007, amenant au réseau actuel. En parallèle, dès 2014, la STM donne le coup d'envoi de la phase 1 de son programme visant à maintenir la fiabilité des équipements fixes du métro, dans lequel s'inscrivent les projets de remplacement des Postes de Ventilation Mécanique (PVM).

1- Vue
d'ensemble
du projet.

1- Overall
view of the
project.

CONCEPT DU PROJET

Un poste de ventilation mécanique est un ouvrage situé entre deux stations de métro et équipé de deux ventilateurs permettant l'extraction de l'air chaud du réseau du métro ou l'insufflation d'air frais par l'entremise d'un édicule. Il répond à trois besoins essentiels :



2

- Réguler la température ambiante dans le réseau du métro par l'extraction de l'air chaud ;
- Renouveler l'air du réseau pour les travailleurs chargés des travaux quotidiens d'entretien de nuit qui utilisent des véhicules à moteur diesel en raison de la coupure de l'alimentation électrique ;
- Ventiler le réseau du métro en cas d'urgence par un contrôle des mou-

vements de fumée afin d'assurer une évacuation sécuritaire de la clientèle vers la station de métro la plus proche ainsi qu'un accès dégagé pour les premiers intervenants.

À l'instar du réseau existant de la STM, l'ensemble des équipements du poste de ventilation sont par ailleurs doublés afin d'assurer une sécurité renforcée en cas de sinistre. Ainsi, deux ventila-

teurs sont installés, reliés à deux lignes électriques moyenne tension totalement dissociées l'une de l'autre.

CONTRAINTES DU SITE

Le projet Fullum est situé le long de la ligne verte du métro entre les stations Papineau et Frontenac dans l'arrondissement Ville-Marie, cœur historique de Montréal. Enclavé dans un quartier résidentiel dense, le chantier est

- soumis à des contraintes majeures :
- Emprise de chantier limitée ;
- Maintien des circulations routière, cycliste et piétonne ;
- Maintien en activité d'un parc de jeux pour enfants mitoyen au projet ;
- Interruption des travaux en période estivale (mi-juin à fin août) ;
- Travaux dits "broyants" interdits de nuit et fin de semaine ;
- Activité de nuit pour les travaux dans le tunnel du métro, avec plage horaire de deux heures et demie par nuit.

Ce contexte est également pris en compte dans la conception du bâtiment en vue de son exploitation. L'architecture du bâtiment est ainsi déterminée afin d'intégrer le poste dans le quartier. Des dispositifs de silencieux acoustiques sont également conçus afin d'assurer la quiétude des résidents situés à proximité du poste de ventilation (figure 1).

DESCRIPTION GÉNÉRALE DU PROJET

Le marché attribué à Construction Demathieu & Bard (CDB) Inc., d'un montant de 19 millions de dollars canadiens, comporte l'ensemble des lots liés à la construction du poste de ventilation en vue de sa mise en service :

- Les soutènements temporaires, l'excavation et le raccordement au tunnel du métro situé à une profondeur de 31 m ;
- La construction du bâtiment ;

2- Vue 3D du bâtiment.
 3- Mise en place des pieux Ø 500 mm.
 4- Excavation, boisage et réalisation de la deuxième rangée de tirants de la paroi berlinoise.

2- 3D view of the building.
 3- Placing piles of dia. 500 mm in position.
 4- Excavation, timbering and execution of the second row of tie anchors of the Berlin-type retaining wall.



3



4

- L'installation des équipements mécaniques et électriques ;
- Le raccordement aux réseaux existants ;
- La réalisation des travaux d'architecture ;
- Le réaménagement du site.

Le poste de ventilation est divisé en 3 sections. Le puits de raccordement, qui fait office de point de jonction entre le bâtiment et le tunnel du métro, est situé à l'extrémité Sud-Est du projet. L'édicule de sortie, partie visible du poste en phase définitive, situé à l'ouest. Intercalé entre ces deux parties se trouve le bâtiment principal dont le radier se situe à une profondeur d'environ 15 m, et qui abrite les équipements mécaniques et électriques (figure 2).

SOUTÈNEMENTS TEMPORAIRES ET EXCAVATION

La Ville de Montréal se trouve sur un socle rocheux surmonté de dépôts de sols meubles. La première étape du projet consiste à forer des pieux de 500 mm de diamètre jusqu'à 1 m sous le niveau du rocher, situé 16 m sous le terrain naturel. La phase d'excavation, jumelée à la réalisation de parois berlinoises en bois avec deux rangées de tirants, est ensuite menée jusqu'à atteindre le niveau du rocher. Un total de 11 passes d'une hauteur moyenne de 1,5 m est nécessaire pour atteindre le rocher (figures 3 et 4).

Depuis ce niveau, un renforcement additionnel par deux rangées d'ancrages au rocher est mis en œuvre. Un pré-clivage de la zone à excaver pour le raccordement au tunnel du métro est réalisé préalablement à la continuité des activités d'excavation qui se font par passes successives, d'une hauteur moyenne de 1,5 m, à ciel ouvert puis en sous-œuvre, à l'aide de deux méthodes distinctes :

- Par dynamitage pour la première phase d'excavation, avec renfort du rocher par la mise en place de boulons de consolidation et d'un treillis soudé avec béton projeté avec fibre d'acier sur une épaisseur de 50 mm pour une résistance 42 MPa à 28 jours. Cette méthode reste conventionnelle dans la région de Montréal compte tenu du contexte géotechnique et suit les étapes suivantes :
 - Nettoyage du rocher et marquage de la ronde ;
 - Forage de la ronde : il est possible de forer tous les trous d'une volée à l'avance. Dans ce cas, il



5- Paroi rocheuse avant mise en place des boulons de consolidation du rocher et du béton projeté.

6- Installation des panneaux de protection en vue du dynamitage.

5- Rock wall before placing the rock consolidation bolts and shotcrete.

6- Installation of protective panels for dynamiting.

est important de vérifier les trous de rive entre chaque tir avant de les charger. Ces derniers doivent être reforés au besoin ;

- Chargement et sautage : la ronde est constituée de plusieurs tirs ;
- Marinage : Excavation et évacuation des déblais.

En raison des contraintes de vibration et d'espace, chaque volée est divisée en trois sautages, soit un tir en bouchon et deux tirs de dégagement. Dans le cas où les limites de vibration sont dépassées, il est

possible de subdiviser les volées ou de réduire leur profondeur, voire les deux.

Le premier sautage d'une volée est un tir en "bouchon" (*cut*). Le but du tir en bouchon est de fracturer et soulever un espace dans le roc pour "pousser" le reste du tir à cet endroit. Le tir en bouchon est celui qui produit le plus de vibrations car il est confiné. Il est donc préférable de limiter sa dimension et de le faire le plus loin possible des éléments à protéger.

Une fois le tir en bouchon effectué, les autres tirs (tir de dégagement ou *slash*) visent à fracturer et déplacer le roc vers la zone libérée par le tir en bouchon. Il suffit de dégager la face mitoyenne entre les tirs afin de libérer l'espace pour le déplacement du rocher (figures 5 et 6).

- À l'éclateur pour les quatre derniers mètres jusqu'au point de raccordement avec le tunnel du métro. La partie excavée en sous-œuvre est également renforcée par l'installation de boulons de consoli-



7- Levage de l'équipement d'excavation de la section en sous-œuvre.
 8- Travaux d'excavation à l'éclateur de roc de la section en sous-œuvre.
 9- Mise en place des explosifs pour dynamitage à proximité de la faille argileuse.

7- Lifting the excavation equipment for the underpinning section.

8- Excavation work by rock splitter for the underpinning section.

9- Placing explosives in position for dynamiting near the clay fault.



© CONSTRUCTION DEMATHIEU & BARD (CDB) INC.



© CONSTRUCTION DEMATHIEU & BARD (CDB) INC.

dation et d'un treillis soudé avec béton projeté avec fibre d'acier sur une épaisseur de 50 mm pour une résistance 42 MPa à 28 jours (figures 7 et 8).

Un total de 276 boulons de renforcement est mis en place suivant ces différentes configurations :

- B-1 - Ø 28,6 mm x 4,0 m - 200 unités - soutien des parois latérales ;
- B-2 - Ø 28,6 mm x 5,0 m - 8 unités - soutien de la couronne du puits ;
- B-3 - Ø 28,6 mm x 5,0 m - 8 unités - soutien du portail de la voûte ;
- B-4 - Ø 28,6 mm x 4,0 m - 60 unités - soutien du plafond de la voûte ;
- A - Ø 25,4 mm x 4,0 m - 60 unités - soulons de renforcement de voûte du tunnel du métro.

Le béton existant du tunnel du métro, sur une épaisseur de 500 mm, est maintenu en place jusqu'à la réalisation de l'ouvrage permanent. Cette dernière section est finalement retirée par blocs par la méthode du sciage au câble.

UN CONTEXTE GÉOTECHNIQUE DÉLICAT

Les travaux d'excavation mettent en exergue des différences notoires avec les études géotechniques de la phase avant-projet :

→ Un niveau de rocher constaté en moyenne 500 mm sous le niveau théorique. Ce changement a nécessité la réalisation d'un rang supplémentaire d'ancrages de bas de pieux en périphérie du puits de raccordement au tunnel du métro ;

→ Des venues d'eau avec un débit constaté de 50 l/mn contre 15 l/mn estimé. Ce constat a engendré des difficultés dans la mise en œuvre du complexe d'imperméabilisation et nécessité des dispositions additionnelles significatives ;

→ La présence d'une faille argileuse dans le rocher (figure 9).



© CONSTRUCTION DEMATHIEU & BARD (CDB) INC.

RACCORDEMENT AU TUNNEL DU MÉTRO

Un des enjeux majeurs du projet porte sur le raccordement au tunnel existant et ainsi au métro en service. En parallèle des activités d'excavation susmentionnées et préalablement à la phase de l'excavation en taube, des travaux de renforcement sont ainsi réalisés au niveau de la voûte du tunnel du métro. Ces travaux sont exécutés de nuit depuis des plateformes mises à disposition par la STM dans des plages horaires limitées (deux heures et demie par nuit). Une campagne d'injection de coulis est également réalisée afin de combler les vides existants entre la voûte du métro et le rocher.

GÉNIE CIVIL

L'étanchéité de l'ouvrage est assurée par la mise en place d'une membrane étanche ayant pour caractéristique de réagir au contact du béton. Sur les faces verticales, cette membrane est posée contre la paroi berlinoise et protégée contre le poinçonnement par l'entremise d'un tapis de caoutchouc. Sur les faces horizontales, la membrane est posée sur un béton de propreté, directement coulé contre le rocher. Les surfaces horizontales sont ensuite protégées par une chape en béton avec treillis soudé, avant réalisation du radier. Le bâtiment est décomposé en trois secteurs :

→ Le puits de raccordement au tunnel du métro. Fondé à 31 m de profondeur, cette partie de l'ouvrage permet la connexion finale du poste de ventilation au tunnel du métro. Un radier d'une épaisseur de 750 mm sert de fondation à ce secteur, surplombé de murs sur une hauteur de 15 m pour rejoindre le niveau "SS3". Le radier, les murs et la voûte sont liés mécaniquement à la structure du tunnel du métro par des ancres. L'ouverture finale du tunnel fait 7,20 m par 2,70 m de hauteur, radier, murs et voûte exclus. Une lame d'étanchéité est installée sur la périphérie de l'ouverture afin de renforcer l'étanchéité du poste à la jonction des deux ouvrages ;

→ Le bâtiment principal, fondé sur la partie supérieure du rocher, située à une profondeur de 15 m, au-dessus de laquelle se superposent les deux niveaux, "SS3 et SS2", lesquels abritent la majorité des équipements mécaniques et électriques. Chaque niveau, d'une hauteur libre de 5,56 m, est constitué de murs périphériques réalisés avec des coffrages une face et de murs intérieurs pour le cloisonnement des différents locaux (figures 10 et 11) ;

→ L'édicule de sortie, située à l'extrémité Ouest du poste de ventilation, permet la remontée du bâtiment jusqu'au niveau de la rue principale et des bâtiments mitoyens. Cette section, de 12,90 m par 7,70 m constitue l'unique visuel du projet dans sa configuration finale.

L'ensemble des armatures structurelles fournies et installées sont en acier galvanisé à chaud selon les normes canadiennes en vigueur.

ÉLECTRICITÉ

L'alimentation électrique du poste provient du réseau d'électricité moyenne tension existant cheminant entre stations, relié directement au réseau d'Hydro-Québec (équivalent d'EDF en France).

Le poste constituant un nouveau point de jonction, l'ensemble des câbles existants entre les stations Papineau et Frontenac est remplacé, à raison de trois câbles par voie. Ces câbles sont raccordés à deux Postes Secondaires de Distribution (PSD), soit une unité par voie, qui permettent la conversion de l'électricité en basse tension (600 V et 247 V). Cette électricité convertie permet ensuite l'alimentation électrique de l'ensemble des équipements du poste de ventilation grâce au tirage de câbles au travers du réseau de conduits enfouis dans le béton de l'ouvrage.

MÉCANIQUE

L'objet principal de la construction du poste de ventilation porte sur la fourniture, l'installation et la mise en service du système de ventilation principal. Ce système, dont les objectifs sont décrits ci-dessus, comporte deux ventilateurs, soit un par étage et fournis par la STM, ainsi que des dispositifs de silencieux permettant de limiter les nuisances sonores des usagers du métro ainsi que d'assurer la quiétude des riverains situés à proximité du poste.



10 © CONSTRUCTION DEMATHIEU & BARD (CDB) INC.

Un système de portes à enroulement, contrôlées par le démarrage des ventilateurs, permet, lorsque ces derniers ne fonctionnent pas, d'empêcher tout échange d'air entre le réseau du métro et l'extérieur (figure 11).

Un système de ventilation secondaire est également conçu afin de maintenir

les locaux mécaniques et électriques du poste suffisamment ventilés pour éviter toute surchauffe des équipements et assurer la sécurité des agents amenés à intervenir dans le poste en phase d'exploitation.

Enfin, un réseau de plomberie permet le drainage et le pompage des eaux

10- Mise en place des armatures, des conduits enfouis et coffrage du radier SS3.

11- Levage et mise en place des coffrages de murs SS2.

12- Ventilateur V1 incluant la cloche d'entrée, les raccords flexibles acoustiques, le conduit de ventilation et les panneaux de commande.

10- Putting in place rebars, buried conduits and formwork for the SS3 invert.

11- Lifting and putting in place formwork for SS2 walls.

12- Ventilator V1 including the inlet chamber, flexible acoustic couplings, the ventilation conduit and control panels.

de ruissellement provenant du toit uniquement recouvert d'un grillage métallique. Malgré d'importantes venues d'eau s'écoulant depuis le mort-terrain jusqu'au rocher, la conception du poste de ventilation Fullum ne prévoit pas de drainage ni de pompage des eaux extérieures à l'ouvrage.



11 © CONSTRUCTION DEMATHIEU & BARD (CDB) INC.



12 © CONSTRUCTION DEMATHIEU & BARD (CDB) INC.



13

© CONSTRUCTION DEMATHIEU & BARD (CDB) INC.



14

© CONSTRUCTION DEMATHIEU & BARD (CDB) INC.

13- Vue de l'édicule final et du réaménagement paysager avant la réception provisoire.

14- Édicule final vu depuis le côté Sud-Ouest.

13- View of the final entrance and landscaping renovation before provisional acceptance.

14- Final entrance viewed from the southwest side.

ARCHITECTURE & AMÉNAGEMENT PAYSAGER

Compte tenu de la localisation du site, l'immersion du poste dans son environnement a représenté un enjeu majeur, de la conception à l'exécution. Les différents matériaux incorporés à l'ouvrage et visibles depuis l'extérieur ont ainsi fait l'objet de validations des services d'architecture de la STM et de la Ville de Montréal. La conception prévoyait, entre autres, un mélange de brique et de métal pour correspondre

DATES CLÉS

DATE D'OUVERTURE DES OFFRES : 12 avril 2018

OCTROI DU CONTRAT : 12 juin 2018

DATE DE MOBILISATION : 28 septembre 2018

FIN EXCAVATION PHASE 1 : 3 mai 2019

FIN EXCAVATION PHASE 2 (RACCORDEMENT) : 6 janvier 2020

FIN DES TRAVAUX DE GÉNIE CIVIL : 31 mars 2021

RÉCEPTION PROVISOIRE : 22 juin 2021

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : STM (Société des Transports de Montréal)

INGÉNIERIE/SUIVI PROJET :

GPMAM (Grands Programmes de Maintien des Actifs Métro)

MAÎTRISE D'ŒUVRE/ENTREPRENEUR GÉNÉRAL :

Construction Demathieu & Bard (CDB) Inc.

PRINCIPAUX SOUS-TRAITANTS & FOURNISSEURS :

- Acier Agf (armatures)
- Petrifond Fondation Cie Ltée (soutènements temporaires)
- Groupe Lefebvre Inc. (étanchéité)
- Béton Provincial (béton)
- Groupe Enixum (électricité & télécommunications)
- Ondel & Siemens Canada Ltée (contrôle & gestion du bâtiment)
- J.P. Lessard (ventilation)
- Plomberie Noël Fredette Inc. (plomberie)
- Acier Direct (métaux ouvrés)

avec le design et l'architecture montréalaise.

Depuis la dalle de couverture de la partie principale du poste un remblai léger de blocs polystyrène est mis en œuvre sur une hauteur de 3 m puis surmonté d'une couche de terre végétale de 1 m d'épaisseur. La zone est finalement engazonnée et laissée libre aux habitants du quartier, petits et grands (figures 13 et 14). □

PRINCIPALES QUANTITÉS

PIEUX Ø 508 mm : 950 m

DÉBLAIS : 40 000 m³

ROCHER : 2 700 m³

PAROI BERLINOISE : 1 600 m²

BÉTON PROJETÉ : 550 m²

ANCRAGES DE CONSOLIDATION : 3 482 m

ÉTANCHÉITÉ : 1 850 m²

BÉTON : 3 500 m³

ARMATURES : 270 t

REMBLAI LÉGER : 1 200 m³

CÂBLES ÉLECTRIQUES

12 kV : 6 000 m

ABSTRACT

FULLUM MECHANICAL VENTILATION STATION OF MONTREAL METRO

MATHIEU DELANOË, CONSTRUCTION DEMATHIEU & BARD INC.

The construction of the Montreal metro dates back to the early 1960s, as part of the preparations for the 1976 Olympic Games. As part of a programme for upgrading of the metro's infrastructure, Construction Demathieu & Bard (CDB) Inc., the North American subsidiary of the Demathieu Bard group, is in charge of construction of the Fullum Mechanical Ventilation Station. Its tasks include project management and execution of all work sections for the project: civil engineering, electricity, mechanical engineering & architecture. Project design and management remain under the responsibility of the Engineering Department of Société des Transports de Montréal (STM). □

LA UNIDAD DE VENTILACIÓN MECÁNICA FULLUM DEL METRO DE MONTREAL

MATHIEU DELANOË, CONSTRUCTION DEMATHIEU & BARD INC.

La construcción del metro de Montreal se remonta a comienzos de los años 1960, en previsión de los Juegos Olímpicos de 1976. En el marco de un programa de rehabilitación de las infraestructuras del metro, Construction Demathieu & Bard (CDB) Inc., filial norteamericana del grupo Demathieu Bard, se encarga de la construcción de la unidad de ventilación mecánica Fullum. Entre sus misiones figuran la dirección de la obra y la ejecución del conjunto de los lotes del proyecto: ingeniería civil, electricidad, mecánica y arquitectura. El diseño y la gestión del proyecto permanecen bajo la responsabilidad de la dirección técnica de la Sociedad de Transporte de Montreal (STM). □



1

© STUDIO DRM PRODUCTION ALEXANDRE NOTTIN

TUNNEL DE LA NERTHE À MARSEILLE

AUTEURS : THOMAS KAYSER, INGÉNIEUR TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY FRANCE - PIERRE POGGI, INGÉNIEUR ÉTUDES TUNNELS, SNCF RÉSEAU - FRANCESCO CHILLE, RESPONSABLE DIVISION TUNNELS GÉOTECHNIQUE, SNCF RÉSEAU

L'OPÉRATION DE RÉGÉNÉRATION DU TUNNEL FERROVIAIRE DE LA NERTHE, RÉALISÉE EN 2020 PAR LE GROUPEMENT SOLETANCHE BACHY FRANCE/FREYSSINET/ETF, S'INSCRIT DANS UN PROGRAMME GLOBAL DE TRAVAUX VISANT À RENFORCER LES ZONES LES PLUS SENSIBLES OU LES PLUS DÉGRADÉES DU TUNNEL. CES TRAVAUX REPRÉSENTENT UN LINÉAIRE DE 384 m.

DESCRIPTION

Le tunnel de la Nerthe est situé sur la ligne Paris à Marseille (figure 2), entre la gare de Pas-des-Lanciers et celle de l'Estaque. Il traverse les communes des Pennes-Mirabeau et de Marseille. Il s'agit d'un ouvrage exploité en double voie électrifiée. Les principales caractéristiques du tunnel sont :

- Longueur : 4638 m.
- Géométrie : La section est constituée par une voûte elliptique à grand axe vertical reposant sur des piédroits courbes.

→ Revêtement : À la construction, l'ouvrage n'était pas revêtu sur 869 m répartis en 10 tronçons. Ailleurs, le revêtement était constitué de maçonnerie de briques en voûte, et de maçonnerie de moellons assisés ou de maçonnerie de briques en piédroit (figure 3).

→ Radier : Un radier supposé maçonné existe dans les parties où la voûte et les piédroits sont revêtus depuis la construction.

→ Drainage : L'évacuation des eaux se fait par un aqueduc central.

1- Réalisation d'un forage pour ancrage.

1- Execution of anchorage drilling.

→ Géologie : Le tunnel traverse des marnes à niveaux gypseux et le calcaire du Crétacé des PM 0 à 1930, puis des terrains marno-calcaires dolomitiques du Jurassique, des PM 1930 à 4638.

ÉTAT DU TUNNEL ET PROGRAMMATION TRAVAUX

Les avaries principales relevées sur le revêtement du tunnel de La Nerthe concernent les maçonneries de briques, ainsi que les zones non revêtues.

Les maçonneries de briques présentent des sons creux, des écaillages parfois profonds associés à des fissures biaises, des irrégularités géométriques, et de l'exfoliation. Ces désordres, principalement liés au vieillissement des matériaux, sont accélérés par la pré-



© SNCF
2

sence d'eau et évoluent de manière assez lente, mais régulière. L'écaillage peut aussi être accentué par la présence d'argiles gonflantes dans le proche encaissant. D'autres part, les zones non revêtues présentent, elles aussi, leur lot d'avaries, avec notamment des diaclases, de la desquamation, des déconsolidations progressives au niveau des failles biaises, ainsi que l'existence de cavités d'origine karstique au droit desquelles des dièdres rocheux sont susceptibles de se détacher.

2- Positionnement du tunnel.
3- Coupes théorique d'origine des revêtements en maçonnerie du tunnel.

2- Tunnel location.
3- Original theoretical cross sections of tunnel masonry linings.

Les expertises réalisées et la caractérisation des pathologies affectant le tunnel ont permis à SNCF Réseau de définir la nature des travaux de confortement à prévoir. Dès lors, un programme de régénération en plusieurs phases a été établi pour traiter les zones de maçonnerie de brique, ainsi que les zones non revêtues impactées :

- "La Nerthe A" : travaux réalisés en 2011 sur un linéaire de 239 m ;
- "La Nerthe B" : travaux réalisés en 2016 et 2017 sur un linéaire de 727 m ;

- "La Nerthe C" tranche 1 : travaux réalisés en 2020 sur un linéaire de 384 m ;
- "La Nerthe C" tranche 2 : travaux réalisés en 2021, 2022 et 2023 (en cours) sur un linéaire de 703 m.

Au-delà de cette planification, la fin des opérations de confortement est prévue sur une troisième décennie (2027 à 2036).

CONCEPTION DES TRAVAUX

Dans le détail, 4 typologies de travaux ont donc été définies en fonction des configurations rencontrées. Ces 4 typologies sont décrites ci-dessous :

TRAVAUX TYPE A

Le traitement type A (figure 4) concerne le chemisage en surépaisseur des zones dont le revêtement est constitué entièrement de briques. Ces zones seront confortées sur tout le développé par une coque en béton projeté RIG (Résistance Initiale Garantie) armée d'un treillis soudé de 10 cm d'épaisseur.

Les enduits d'étanchéité existants en voûte seront préalablement abattus ou fraisés afin d'assurer une accroche pour la future coque.

TRAVAUX TYPE B

Le deuxième type de traitement (figure 5) concerne les zones de briques sur tout le développé où la coque nécessitera d'être engravée faute de marges suffisantes.

Le chemisage sera associé à des ancrages de soutènement et des ancrages d'armatures, ainsi qu'à un confinement préalable en béton projeté RIG de la clé de voûte.

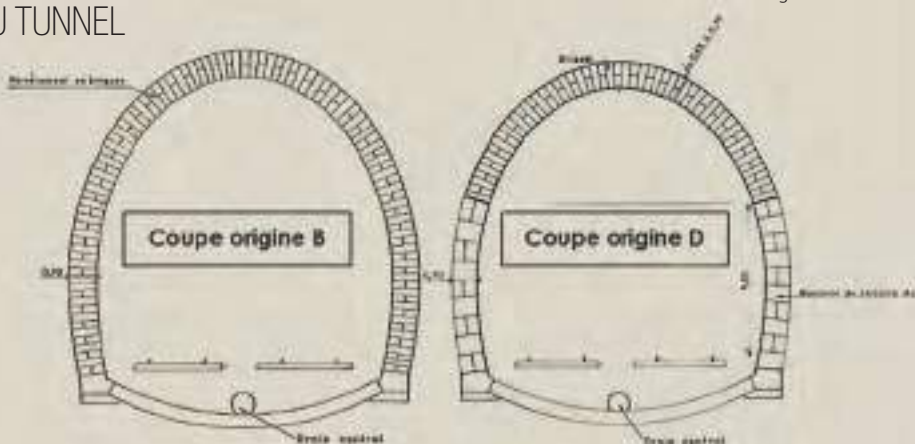
Le rescindement se fera par plots alternés de 1,50 m de large, à raison d'1 plot sur 4. En principe, la profondeur de rescindement sera de 14 cm maximum pour les plots de type B.

La couche finale sera réalisée de la même manière que pour le traitement en surépaisseur, c'est-à-dire sur l'ensemble du développé.

TRAVAUX TYPE C

Le troisième type de traitement (figure 6) concerne l'ensemble des zones de maçonneries de briques situées en voûte, avec des piédroits en moellons. Il consiste en un chemisage en béton projeté RIG armé d'un treillis soudé, en surépaisseur en voûte (ép. maximale = 20 cm en génératrice 0) et engravé au niveau de son assise sur la maçonnerie de moellons constituant les piédroits.

COUPES THÉORIQUE D'ORIGINE DES REVÊTEMENTS EN MAÇONNERIE DU TUNNEL



© SNCF
3

4- Coupe de coque type A.
5- Coupe de coque type B.

4- Shell cross section, type A.
5- Shell cross section, type B.

Les enduits d'étanchéité existants en voûte seront préalablement abattus ou fraisés afin d'assurer une accroche pour la future coque.

Le chemisage sera associé à des ancrages de soutènement et des ancrages d'armatures, ainsi qu'à un confinement préalable en BP RIG de la clé de voûte.

Les rescindements des reins de l'ouvrage seront réalisés par plots de 1,50 m de largeur, alternés à raison de 1 plot sur 4.

TRAVAUX TYPE D

Le quatrième type de traitement (figure 7) concerne les zones non revêtues. Elles seront chemisées sur tout le développé par une coque en béton projeté RIG fibré de 8 cm sur pointe (10 cm d'épaisseur moyenne).

CONTRAINTES D'EXÉCUTION
HORAIRES DE TRAVAIL

La SNCF a décidé de ne pas fermer le tunnel durant les travaux. De ce fait, les travaux sont réalisés de nuit, sous interception des circulations et coupure caténaire de 0h15 à 4h30 (5 nuits par semaine). Il est à noter que les travaux étant répartis sur l'ensemble des 4,6 km du tunnel, le train-travaux doit se découper en plusieurs ateliers.

Les missions de préparation des trains-travaux au niveau de la base-arrière sont réalisées de jour.

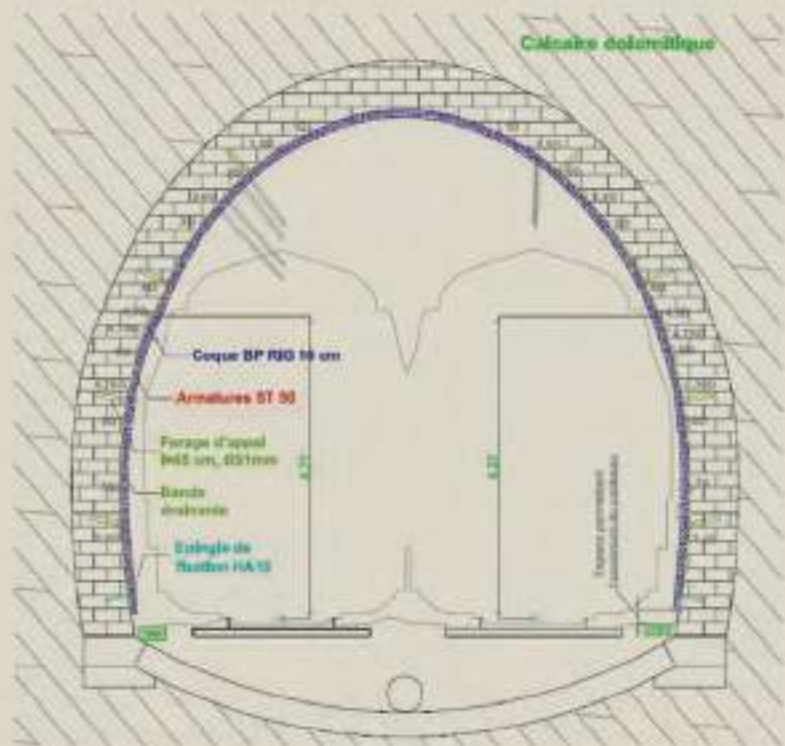
TRAVAUX EN MILIEU CONFINÉ

L'activité d'un chantier génère des polluants. Pour la santé des personnes travaillant sur le chantier, il faut donc s'assurer de conserver une bonne qualité de l'air dans le tunnel.

GAZ TOXIQUE

Afin de limiter au maximum la pollution, l'entreprise a privilégié l'utilisation d'engins et matériels électriques ou équipés de système "Start&stop". Chaque poste de travail est équipé d'une balise de détection de gaz afin de vérifier que la concentration en gaz reste conforme aux exigences réglementaires.

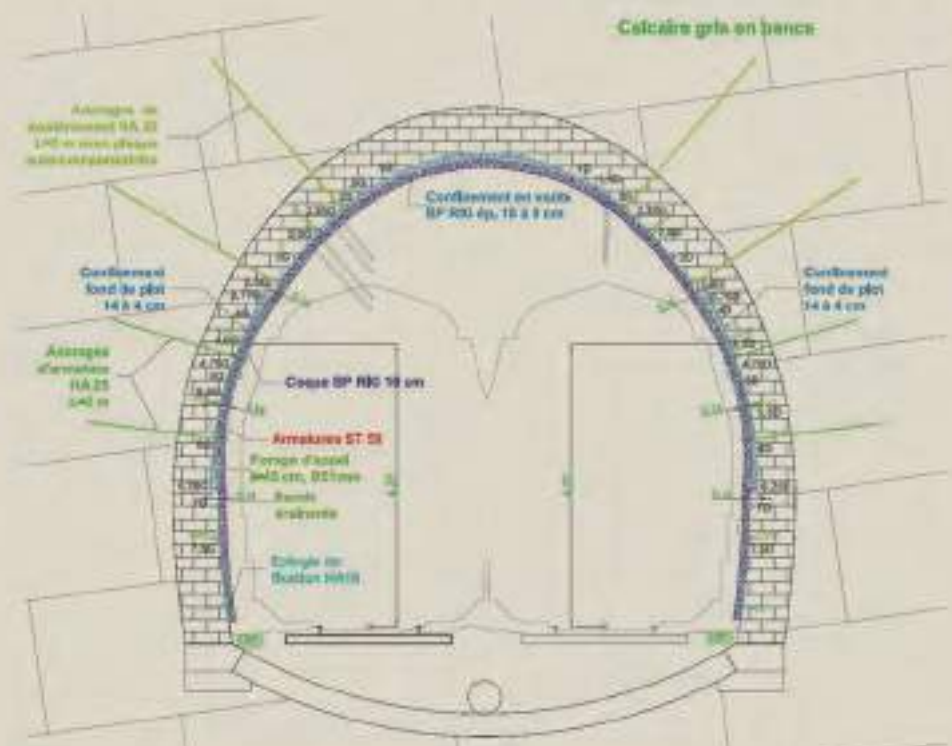
COUPE DE COQUE **TYPE A**



4

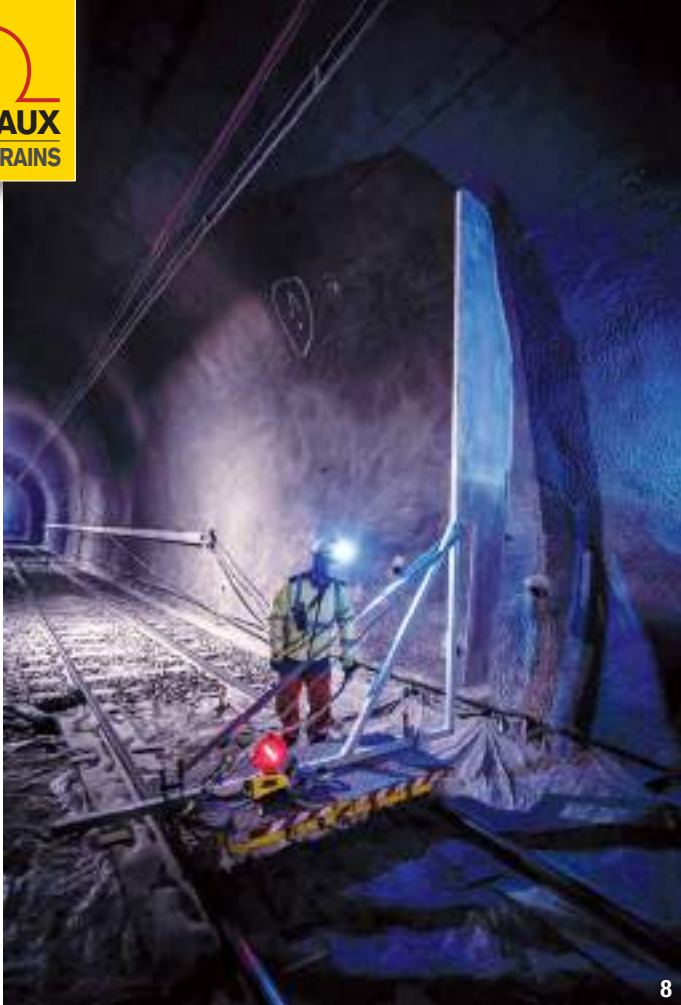
© SNCF

COUPE DE COQUE **TYPE B**



5

© SNCF



8

© STUDIO DRM PRODUCTION ALEXANDRE NOTTIN



9

© STUDIO DRM PRODUCTION ALEXANDRE NOTTIN

À noter que des masques auto-sauveurs, permettant d'évacuer, sont mis à disposition de l'ensemble des intervenants.

ORGANISATION DES TRAVAUX LE TRAIN TRAVAUX

Les travaux sont réalisés à partir d'un train travaux sur lequel tout le matériel de chantier est embarqué (engins de décapage, de forage, machines à projeter, échafaudages, containers, groupes électrogènes, ...).

L'élaboration du planning a montré que, par moment, il était nécessaire d'avoir 5 ateliers sur train-travaux travaillant simultanément dans le tunnel.

Pour certains travaux, des engins rail-route, type pelle ou nacelle, ont été utilisés. Ces engins sont bien plus mobiles et permettent donc de passer de zone en zone plus facilement.

LOGISTIQUE BASE ARRIÈRE

Le train travaux est engagé à partir de la gare de Pas-des-Lanciers où se situe la base de travaux. Elle est située à 1,5 km de la tête Nord du tunnel.

La base travaux permet l'approvisionnement des matériaux et l'évacuation des produits de démolition et des pertes de béton projeté.

DESRIPTIF DES PRINCIPALES TÂCHES RÉALISÉES TRAVAUX PRÉPARATOIRES

Avant le démarrage du chantier, une protection de plate-forme a été instal-

lée, afin de maintenir la propreté du ballast, sous forme d'un feutre géotextile sur toute la largeur de la plate-forme, y compris les carneaux de câbles latéraux.

Les chemins de câbles de sécurisation, des câbles de fibre optique, des luminaires, des plaques signalétiques, des boîtes de dérivation, des coffrets de prises électriques et des générateurs dédiés aux pompiers, ont aussi été protégés quand ils ne gênaient pas la réalisation des travaux.

Dans les autres zones travaux, où le chemisage en béton était amené à recouvrir également les piédroits, il était nécessaire de déposer préalablement tous les équipements présents sur le parement et de les reposer provisoirement.

Les caténaires ont également fait l'objet de protections particulières durant les travaux. Celles-ci étaient de deux types : permanentes et provisoires (mises en place et déposées à chaque intervention).

DÉCAPAGE

Un décapage du parement a été réalisé sur toutes les surfaces à recouvrir directement en béton projeté, afin de permettre l'adhérence du béton au parement.

Le décapage (figure 9) a été réalisé par projection de masse fondue de verre de silicate d'aluminium.

Les retombées ont ensuite été ramassées manuellement, afin d'être évacuées du tunnel.

8- Contrôle de gabarit. 9- Décapage.

8- Clearance check. 9- Descaling.

ANCRAGES

Dans certaines zones, le chemisage par coque a été associé à des ancrages des soutènements et des armatures.

Ces ancrages n'ont été réalisés que dans les zones où des rescindements sont nécessaires, afin de conforter les parements en briques avant réalisation des rescindements.

Les ancrages de soutènement sont constitués de barres filetées, diamètre 25 mm, scellées sur toute leur longueur (3 m). Chaque barre est boulonnée à son extrémité libre à une plaque auto compensatrice.

Les ancrages d'armature sont constitués de barres HA25 de longueur 2 m scellées sur toute leur longueur. Les barres seront effacées dans les trous de forage de la valeur des rescindements à réaliser.

Les forages de diamètre 51 mm ont été réalisés avec des robots de galerie embarqués sur le train travaux (figure 1) ou une pelle rail-route.

RESCINDEMENT PAR PLOT

Dans les zones où la coque ne pouvait s'inscrire en surépaisseur vis-à-vis

du gabarit de circulation des trains, ou lorsque la coque était positionnée au-dessus des piédroits en moellons, la maçonnerie a été rescindée en rein sur 14 cm de profondeur.

Afin de maîtriser les risques d'effondrement du parement du tunnel, les travaux de rescindement ont été réalisés par plot, après les ancrages de soutènement et la mise en œuvre d'une couche de BP RIG de 5 cm au niveau de la calotte de voûte.

Pour des raisons de sécurité, les opérations de rescindement ou de sciage ne pouvaient être entreprises simultanément sur les 2 voies en face à face.

Les travaux de rescindement ont été réalisés par plots alternés de 1,5 m, à raison d'1 plot sur 4.

L'abattage des maçonneries (figure 10) a été réalisé grâce à un robot de démolition télécommandé disposé sur le train travaux.

Après démolition, un confinement en béton projeté a été réalisé, afin de stabiliser le fond de fouille et de combler les hors-profils.

Tout plot de rescindement débuté lors d'un poste de travail devait impérativement être terminé avant la fin dudit poste.

BÉTON PROJETÉ RIG

(Résistance Initiale Garantie)

Il s'agissait de réaliser, en continu, un revêtement en béton projeté de 10 cm d'épaisseur armé de treillis soudé ou fibré dans les zones type D sur tout le développé du parement, jusqu'au-des-



10

© STUDIO DRM PRODUCTION ALEXANDRE NOTTIN

sus des caniveaux à câbles latéraux en dégageant une hauteur suffisante pour permettre leur ouverture. La SNCF impose l'utilisation d'un béton projeté voie sèche figurant sur la liste d'aptitude des bétons RIG SNCF Réseau prêts à l'emploi pour la maintenance des tunnels ferroviaires en exploitation. Il s'agit d'un béton à résistance initiale garantie de

10- Démolition d'un plot.

11- Béton projeté en piédroit.

10- Demolition of a section.

11- Shotcrete on side wall.

PRINCIPALES QUANTITÉS

PROTECTION DE PLATEFORME : 4 900 m²
DÉCAPAGE : 6 170 m²
FORAGE D'ANCRAGES : 2 133 m (800 ancrages)
SCIAGE POUR PLOT DE RESCINDEMENT : 450 m
RESCINDEMENT + CONFINEMENT : 560 m²
POSE DE TREILLIS SOUDÉ : 4 420 m²
BÉTON PROJETÉ RIG : 6 170 m²



11

© STUDIO DRM PRODUCTION ALEXANDRE NOTTIN

classe C 30/37 XA1 selon la norme NF EN 206-CN. Ce béton permet de garantir que le béton atteint un minimum de résistance lors des premières circula-

tions commerciales dans le tunnel. Les travaux de projection ont été réalisés depuis les voies pour les piédroits (figure 11) et depuis le train travaux pour les reins et voûte. □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

GROUPEMENT D'ENTREPRISES :

- Entreprise Mandataire : Soletanche Bachy France
- Co-traitant : Freyssinet
- Co-traitant : Etf

MAÎTRE D'OUVRAGE :

SNCF Réseau - DGII - DZI SE - Agence PACA MOAOP

MAÎTRE D'ŒUVRE GÉNÉRAL :

SNCF Réseau - DGII - DZI SE - Agence PACA MOAOP

MAÎTRE D'ŒUVRE ÉTUDES :

SNCF Réseau - DZI SE - PRI MR OA et DGII OA TuG1

MAÎTRE D'ŒUVRE TRAVAUX : INFRAPOLE PACA URT

CSPS : Présents SA - Agence Paca Languedoc

ABSTRACT

LA NERTHE TUNNEL IN MARSEILLE

THOMAS KAYSER, SOLETANCHE BACHY FRANCE - PIERRE POGGI, SNCF RÉSEAU - FRANCESCO CHILLE, SNCF RÉSEAU

The renovation project for the La Nerthe rail tunnel, carried out in 2020 by a consortium formed by Soletanche Bachy France, Freyssinet and Etf, forms part of an overall works programme designed to strengthen the most sensitive or damaged areas of the tunnel. The works were performed over a length of 384 metres. Numerous techniques were employed: descaling, anchoring, sawing for demolition, demolition work, "RIG" shotcrete (initial strength guaranteed). The works are performed from a work train on which all the site equipment is loaded. □

TÚNEL DE LA NERTHE EN MARSELLA

THOMAS KAYSER, SOLETANCHE BACHY FRANCE - PIERRE POGGI, SNCF RÉSEAU - FRANCESCO CHILLE, SNCF RÉSEAU

La operación de regeneración del túnel ferroviario de La Nerthe, realizada en 2020 por el consorcio Soletanche Bachy France / Freyssinet / Etf, se inscribe en un programa global de obras que pretende reforzar las zonas más sensibles o más deterioradas del túnel a lo largo de 384 m. Se han utilizado numerosas técnicas: decapado, anclajes, aserrado para rectificaciones, rectificaciones, hormigón proyectado RIG (Resistencia Inicial Garantizada). Las obras se llevan a cabo desde un tren de trabajo que transporta todo el material de obra. □

ESTIMATION ET SUIVI DES DÉFORMATIONS INDUITES PAR LA CONSTRUCTION DES OUVRAGES ET TUNNELS

AUTEURS : YI ZHANG, DIRECTEUR DES ÉTUDES TECHNIQUES, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - PASCAL HAMET, DIRECTEUR DE PROJET, EIFFAGE GÉNIE CIVIL

L'ESTIMATION ET LE SUIVI DES DÉFORMATIONS INDUITES PAR LES TRAVAUX SOUTERRAINS EN ZONES URBAINES EST UN ENJEU ESSENTIEL POUR LA RÉUSSITE DU PROJET. LE TERRASSEMENT DES OUVRAGES ET LE CREUSEMENT DES TUNNELS ENGENDRENT INÉVITABLEMENT DES MOUVEMENTS DU TERRAIN, DUS AU RELÂCHEMENT DES CONTRAINTES DANS LES SOLS. DIFFÉRENTES MÉTHODES SONT UTILISÉES POUR PRÉDIRE LES DÉFORMATIONS ET SUIVRE LES MOUVEMENTS PENDANT LA CONSTRUCTION DU LOT L16-1, LE PLUS GRAND MARCHÉ DE GÉNIE CIVIL ATTRIBUÉ JUSQU'À PRÉSENT DANS LE CADRE DU PROJET GRAND PARIS EXPRESS (GPE).



© ZHANG Y.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET

Le lot 1 de la Ligne 16 (figure 2) du projet GPE est un lot de travaux de génie civil avec une partie d'équipements. Il comprend la réalisation de :

- 5 gares : Saint-Denis-Pleyel (SDP), Stade-de-France (SDF), La-Courneuve-Six-Routes (LCO), Le-Bourget-

- RER (LBG), Le-Blanc-Mesnil (LBM) ;
- 20 ouvrages annexes ou spéciaux ;
- 20 km des tunnels réalisés par 6 tunneliers à confinement de terre (EPB) ;
- Voies, Caténaires, Équipements en ligne (VCE) : 30 km de voie ferrée, 50 000 traverses béton, 160 km d'équipements divers.

1- Auscultation sur la gare SDP et le Faisceau ferroviaire du Landy.

1- Monitoring on the SDP station and the Landy rail sidings.

CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET MÉTHODE GÉNÉRALE DE RÉALISATION

La densification des zones urbaines implique la réalisation d'ouvrages souterrains comme les lignes du métro. La maîtrise des mouvements engendrés par leur construction est un sujet



4a

© PHOTO THÉQUE EIFFAGE GÉNIE CIVIL



4b

© PHOTO THÉQUE EIFFAGE GÉNIE CIVIL



4c

© PHOTO THÉQUE EIFFAGE GÉNIE CIVIL

4a- Méthode à ciel ouvert (LCO).
4b- Méthode en taupe (LBG).
4c- Méthode hybride (3303P).

4a- Opencast method (LCO).
4b- Top-down method (LBG).
4c- Hybrid method (3303P).

En ce qui concerne les ouvrages réalisés à ciel ouvert, les soutènements provisoires sont mis en place au fur et à mesure lors du terrassement jusqu'au radier, qui est coulé en premier. Les dalles intermédiaires sont réalisées en remontant avant le retrait des liernes et butons (figure 4).

5- Méthodes analytiques (Tadlaoui et al., 2021) : (a) Bowles (b) Hamza (c) Hsieh et Ou.

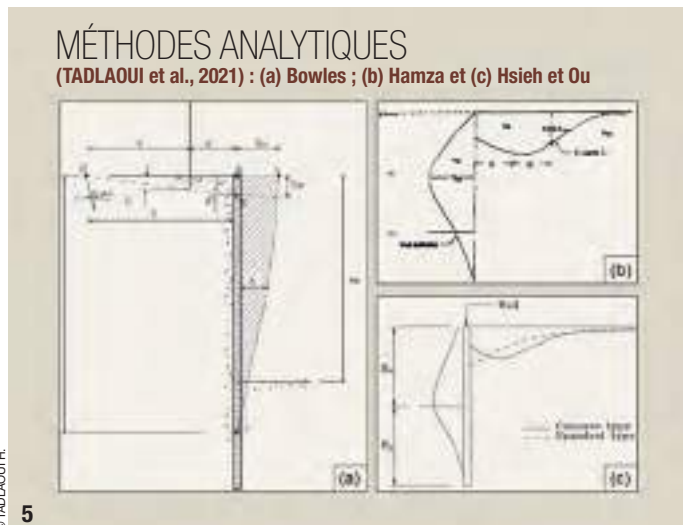
6a- Cuvette globale de tassement au PK 10+200.

6b- Solution analytique pour les déplacements (Attewell et al., 1986).

5- Analysis methods (Tadlaoui et al., 2021): (a) Bowles, (b) Hamza, (c) Hsieh and Ou.

6a- Overall subsidence basin at PK 10+200.

6b- Analysis solution for displacements (Attewell et al., 1986).



MODÈLES ANALYTIQUES

Traditionnellement, l'analyse géotechnique est réalisée à l'aide de modèles analytiques et empiriques, avec des coefficients de sécurité basés souvent sur le retour d'expérience. Leur avantage est la facilité d'utilisation

pour estimer l'ordre de grandeur des déformations.

DÉFORMATIONS INDUITES PAR LE TERRASSEMENT DES PUIITS

Dans le projet L16-1, les argiles gonflantes sont absentes, on s'intéresse donc au déplacement horizontal de l'écran, majoritairement en parois moulées, et au déplacement vertical du sol situé derrière l'écran induit par le terrassement des puits.

Les méthodes analytiques existantes pour les sols meubles comme Bowles (Bowles, 1988), Hamza (Hamza, 1999), et Hsieh et Ou (Hsieh et Ou, 1988) (figure 5) sont analysées pour leur adaptation au contexte géologique de la région parisienne, plus particulièrement du lot L16-1 :

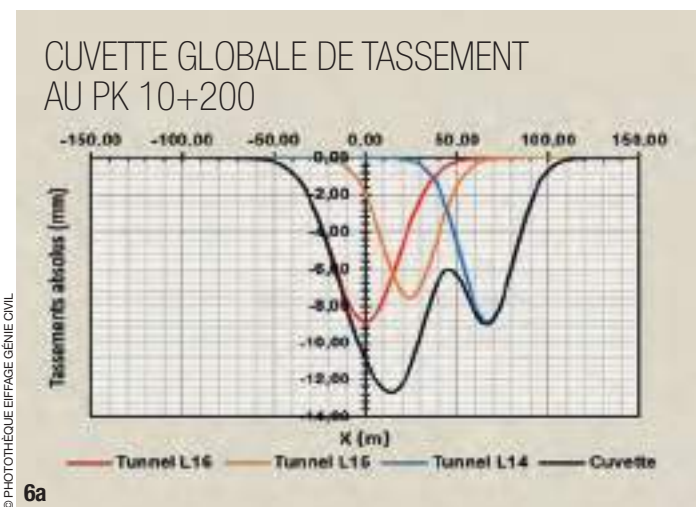
→ La méthode de Bowles est basée sur l'estimation des mouvements latéraux de l'écran. À partir de ces déformations, la perte de volume

due au mouvement latéral de la paroi est calculée. Le tassement maximal engendré par la paroi est lié à la perte de volume et à la zone d'influence. Cette méthode prend comme principale hypothèse que le tassement maximal se produit au niveau de l'écran de soutènement.

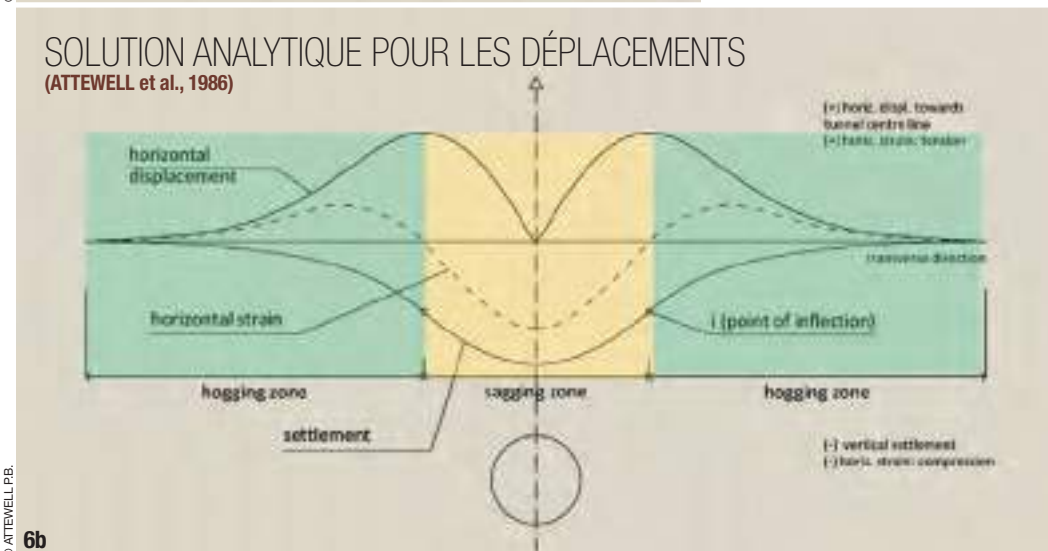
→ La méthode de Hamza introduit deux courbes de tassements : la "courbe S", où le tassement maximal se produit au droit de l'écran, typique d'une déformée en console de l'écran de soutènement, et la "courbe S1", où le tassement maximal se produit à une certaine distance de l'écran, typique des écrans butonnés en tête. En plus du type de déformée latérale de l'écran, cette méthode est basée sur deux paramètres empiriques, les coefficients de volume R_v et de tassement R_s , dont les valeurs de base retenues sont respectivement 0,75 et 1,40. Compte tenu de leur système de soutènement dans nos cas, la "courbe S1" est plus adaptée.

→ La méthode de Hsieh et Ou distingue également deux courbes de tassements : la courbe type "spandrel", observée notamment dans le cas de déformée des parois de type console, et la courbe type "concave", qui se produit notamment lorsque les déplacements latéraux en tête des parois sont bloqués par des butons ou une dalle. Le coefficient de calage F varie entre 0,5 et 0,7. Compte tenu du système de soutènement, la formulation "concave" est mieux adaptée aux ouvrages analysés (figure 5).

Les analyses ont été effectuées sur trois ouvrages 3303P, 3302P et 0220P. L'adaptation de ces méthodes analytiques est basée pour les déformations mesurées des parois moulées et les modèles numériques. Un modèle numérique est d'abord réalisé pour chaque ouvrage, calibré sur la base des déformations mesurées. Une analyse des tassements en surface est ensuite menée. Les cuvettes de tassements obtenues à l'aide des modèles numériques calibrés sont comparées aux cuvettes obtenues à l'aide des méthodes analytiques. Parmi les trois méthodes analysées, la méthode de Bowles se révèle inappropriée, compte tenu du phasage de réalisation des ouvrages et de la déformée observée des parois moulées. En revanche, les méthodes de Hamza et de Hsieh et Ou ont donné des résultats de tassements satisfaisants en ajustant leur formulation.



6a



6b

Afin de reproduire les tassements calculés avec les modèles numériques calibrés, les coefficients de volume et de tassement dans la méthode de Hamza doivent respectivement être recalés dans les intervalles R_v [0,45 ; 0,75] et R_s [1,6 ; 1,95]. De même, le coefficient de calage F dans la méthode de Hsieh et Ou a également dû être adapté dans l'intervalle F [0,5, 0,6] (Tadlaoui et al., 2021).

DÉFORMATIONS INDUITES PAR LE CREUSEMENT DES TUNNELS

La méthode de Peck (Peck, 1969) permet d'évaluer la dimension et la forme de la cuvette de tassements suite à l'excavation TBM par une courbe de Gauss (figure 6). Selon cette méthode, les tassements "s" sont en fonction de la distance "x" par rapport à l'axe du tunnel dans une coupe transversale, et peuvent être décrits par la relation :

$$S_w(x) = S_{max} e^{-\frac{x^2}{2i^2}}$$

Avec S_{max} la valeur maximale de tassements obtenus sur la cuvette, propor-

tionnelle à la perte de volume. Le paramètre "i" représente la distance du point d'inflexion à l'axe du tunnel. Les déplacements horizontaux peuvent être déterminés par la relation :

$$S_h(x) = \frac{x}{z} S_w(x)$$

MODÈLES AUX COEFFICIENTS DE RÉACTION

La méthode du coefficient de réaction permet d'introduire l'interaction sol-structure et de tenir compte de la flexibilité et de la raideur du sol. Elle conduit à résoudre une équation différentielle du quatrième ordre et est couramment utilisée en France (NF P94-282, 2009).

L'hypothèse forte de cette méthode est que la structure peut être modélisée comme une poutre sur appuis dans laquelle le sol est représenté par des ressorts élastoplastiques indépendants. Cette méthode repose sur l'estimation des pressions exercées sur l'écran à l'aide de 4 paramètres : le coefficient des terres au repos K_0 , le coefficient de

réaction k_h , le coefficient de poussée K_a et le coefficient de butée K_p . La détermination du coefficient de réaction k_h est très importante, qui dépend des caractéristiques des sols et des écrans de soutènement.

Dans le projet L16-1, le dimensionnement des parois moulées est effectué avec les modèles aux coefficients de réaction à l'aide des logiciels comme K-REA (figure 7), RIDO, etc.

MODÈLES AUX ÉLÉMENTS FINIS

L'analyse par modèles aux éléments finis (MEF) peut fournir une simulation

précise de l'interaction sol-structure en prenant en compte les phases de construction et les données de chaque phase (charges, nappes, etc.).

La calibration des paramètres géomécaniques se base sur l'interprétation du cahier B, mis à jour selon les résultats de la mission G3. Les couches des sols sont modélisées par des lois de comportement appropriées comme HSM (Hardening Soil Model), qui simulent d'une manière précise leur comportement sous les différentes conditions de chargements.

Dans le projet L16-1, l'estimation des déformations est effectuée majoritairement à l'aide de modèles MEF bidimensionnels (figure 8).

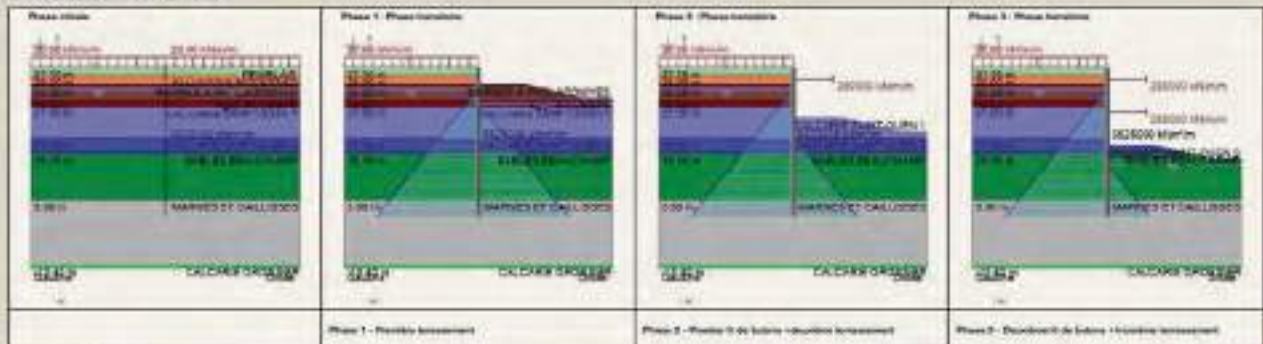
La convergence de l'excavation du tunnel en 2D est traitée par la méthode Convergence-Confinement (Afters GT7R6F1, 2002). Cette méthode s'appuie sur le choix d'un taux de déconfinement, qui est déterminant pour le calcul et prend en compte la nature du terrain, la position et la rigidité du soutènement, la méthode

7- Modèle de calcul K-REA et ses résultats (LCO - coupe 8).

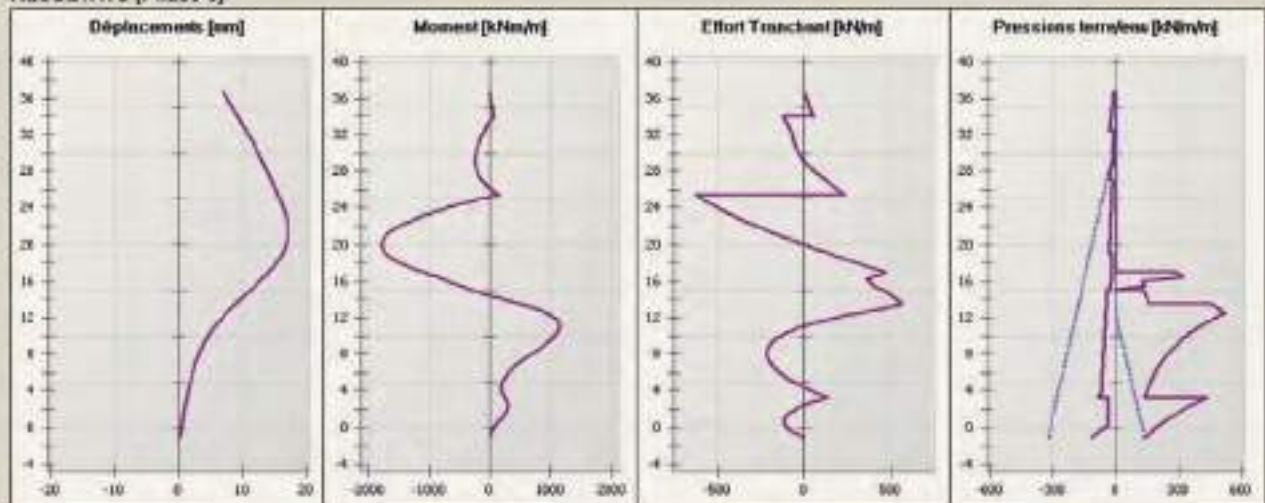
7- K-REA calculation model and results (LCO - section 8).

MODÈLE DE CALCUL K-REA ET SES RÉSULTATS (LCO - COUPE 8)

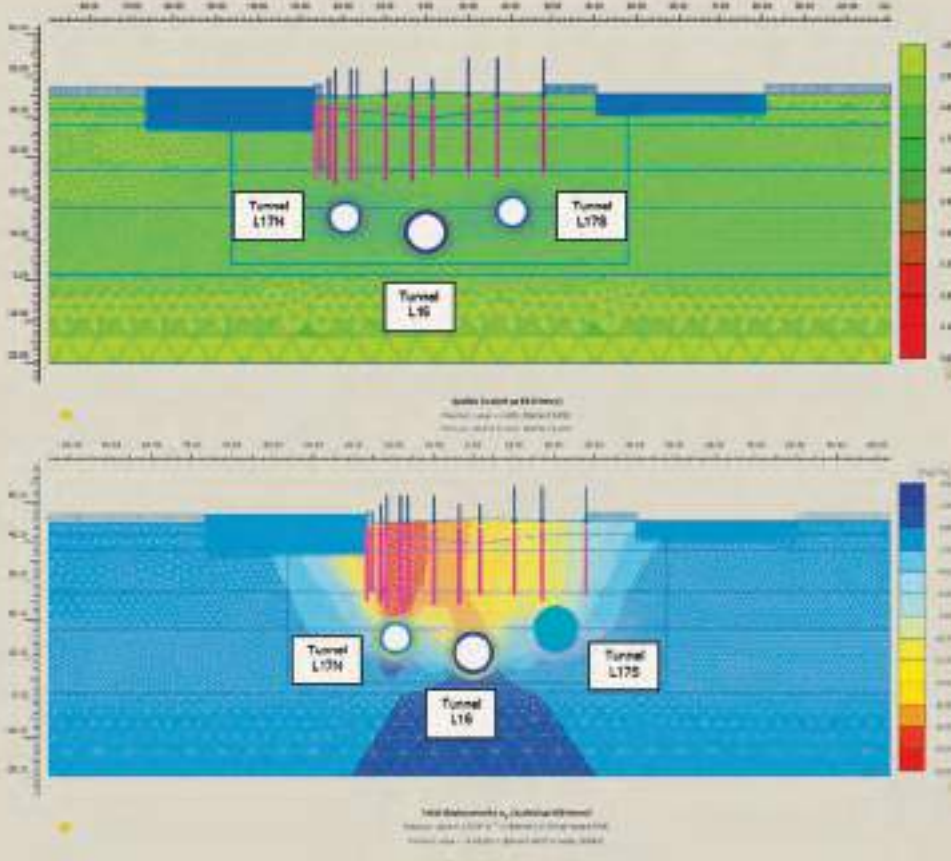
SYNTHESE PHASAGE



RÉSULTATS (Phase 3)



MODÈLES PLAXIS 2D (COUPE 56)



© PHOTO THÉQUE EIFFAGE GÉNIE CIVIL

8a

de réalisation, etc. Il est d'usage de retenir une valeur en sortie de jupe du tunnelier égale à 0,9 pour l'estimation de déformations (Aristaghes et Autuori, 2011).

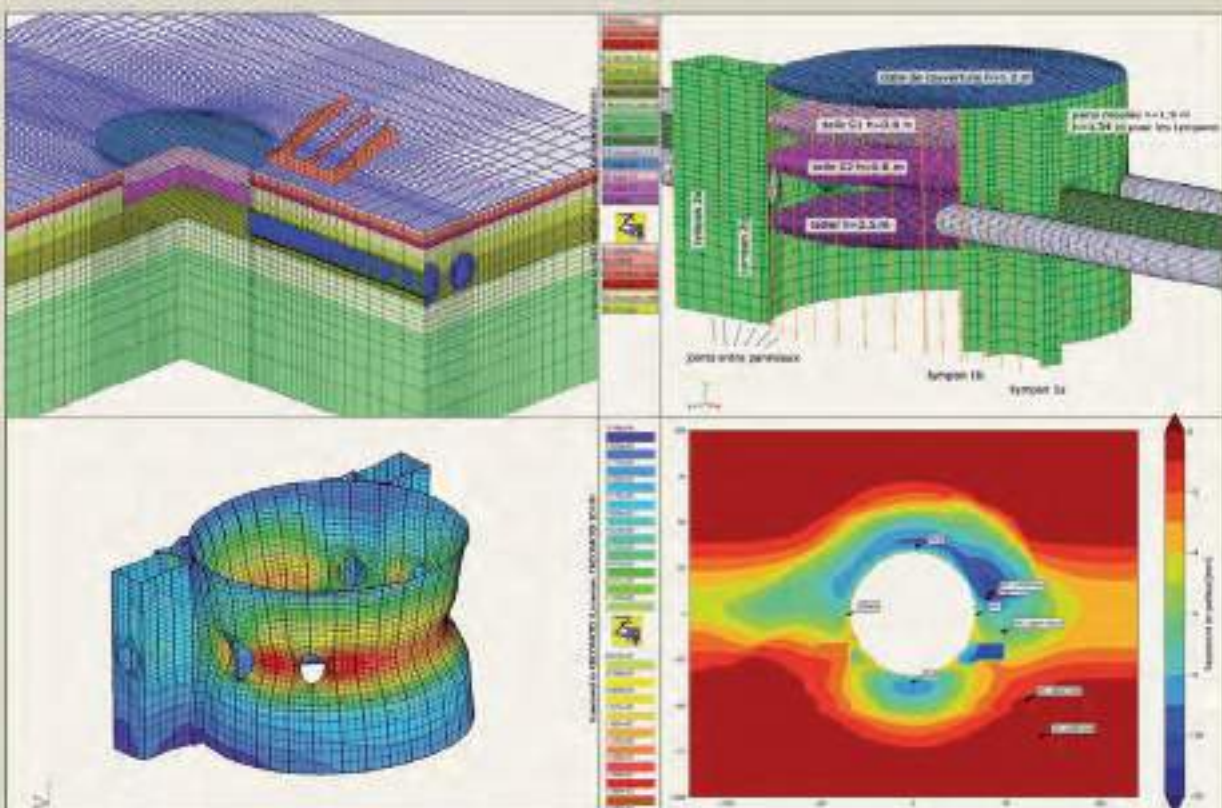
Les retours d'expérience des tunnels réalisés par Eiffage dans des projets L15, L14 Nord (métro) et T6 (tramway) permettent de retenir d'une manière prudente un taux de déconfinement à 0,7 sur le projet L16-1 (Mains et al., 2021).

Les modèles 3D (figure 8) sont également utilisés pour analyser les situations complexes, avec une vraie nécessité de considérer l'effet tridimensionnel. ▷

8a- Modèles Plaxis 2D (coupe 56).
8b- Zsoil 3D (gare LBG).

8a- Plaxis 2D models (section 56).
8b- Zsoil 3D (LBG station).

ZSOIL 3D (GARE LBG)



© PHOTO THÉQUE EIFFAGE GÉNIE CIVIL

8b

9- Modèle de l'approche probabiliste et comparaison avec l'approche déterministe ou semi-probabiliste (Zhang et Commend, 2021).

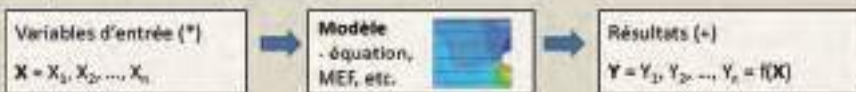
10- Suivi d'auscultation (gare LCO).

9- Model for description of the probabilistic approach and comparison with the deterministic or semi-probabilistic approach (Zhang and Commend, 2021).

10- Detailed analysis monitoring (LCO station).

MODÈLE DESCRIPTION DE L'APPROCHE PROBABILISTE ET COMPARAISON AVEC L'APPROCHE DÉTERMINISTE OU SEMI-PROBABILISTE (ZHANG ET COMMEND, 2021)

Analyse déterministe (ou semi-probabiliste)



[*] par exemple: valeurs prudentes pour la cohésion, l'angle de frottement, les modules élastiques, la hauteur d'eau, les charges, le taux de déconfinement, etc.

[+] par exemple: un facteur de sécurité, la valeur du déplacement en un point donné, le moment de flexion maximum dans un soutènement, etc.

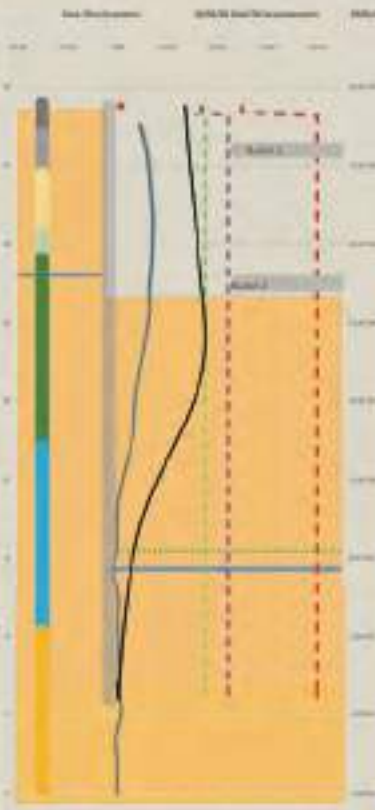
Analyse probabiliste



[*] sous la forme de distributions de probabilités (normale, lognormale, Gumbel, etc.) avec moyenne μ et écart-type σ

SUUI D'AUSCULTATION (GARE LCO)

Pneus	Description	Signal	Déplacement (mm)				Déplacement (mm)				Signal
			Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	
1	Station de mesure	20	17,20	17,20	11,00	10,20	17,20	17,20	11,00	10,20	20,00
2	Point de mesure	20,5	18,50	18,50	11,10	10,30	18,50	18,50	11,10	10,30	20,50
3	Point de mesure	21,0	19,00	19,00	11,20	10,40	19,00	19,00	11,20	10,40	21,00
4	Point de mesure	21,5	19,50	19,50	11,30	10,50	19,50	19,50	11,30	10,50	21,50
5	Point de mesure	22,0	20,00	20,00	11,40	10,60	20,00	20,00	11,40	10,60	22,00
6	Point de mesure	22,5	20,50	20,50	11,50	10,70	20,50	20,50	11,50	10,70	22,50
7	Point de mesure	23,0	21,00	21,00	11,60	10,80	21,00	21,00	11,60	10,80	23,00
8	Point de mesure	23,5	21,50	21,50	11,70	10,90	21,50	21,50	11,70	10,90	23,50
9	Point de mesure	24,0	22,00	22,00	11,80	11,00	22,00	22,00	11,80	11,00	24,00
10	Point de mesure	24,5	22,50	22,50	11,90	11,10	22,50	22,50	11,90	11,10	24,50
11	Point de mesure	25,0	23,00	23,00	12,00	11,20	23,00	23,00	12,00	11,20	25,00
12	Point de mesure	25,5	23,50	23,50	12,10	11,30	23,50	23,50	12,10	11,30	25,50
13	Point de mesure	26,0	24,00	24,00	12,20	11,40	24,00	24,00	12,20	11,40	26,00
14	Point de mesure	26,5	24,50	24,50	12,30	11,50	24,50	24,50	12,30	11,50	26,50
15	Point de mesure	27,0	25,00	25,00	12,40	11,60	25,00	25,00	12,40	11,60	27,00
16	Point de mesure	27,5	25,50	25,50	12,50	11,70	25,50	25,50	12,50	11,70	27,50



Malgré la précision fournie par les modèles MEF, le manque de données, la variabilité spatiale des sols, la sensibilité des résultats par rapport aux données d'entrée sont des sujets difficilement traités par un calcul déterministe, voire semi-probabiliste. Dans ce cas, le calcul probabiliste pourrait être une meilleure solution pour prendre en compte ces incertitudes et permettre d'accéder à une probabilité de défaillance.

L'approche probabiliste avec un modèle aux éléments finis permet d'évaluer les effets combinés des incertitudes (figure 9), elle fournit un moyen de distinguer les conditions où les incertitudes sont particulièrement élevées ou faibles, dans lequel les distributions des paramètres géotechniques, considérés comme des variables probabilistes, sont générées selon les résultats des investigations géotechniques disponibles (Zhang et Commend, 2021).

Cette approche probabiliste devrait être basée sur des données géotechniques précises. Un nombre suffisant de reconnaissances géologiques et hydrogéologiques de qualité, une analyse géotechnique appropriée des propriétés des sols, le bon jugement géotechnique de l'ingénieur, etc. sont des prérequis garantissant une approche probabiliste de qualité.

AUSCULTATION ET SUM

Les résultats des calculs permettent de vérifier si les déformations ou les déplacements sont inférieurs aux seuils contractuels définis au marché.

De plus, ils fixent le scénario de référence et permettent de déterminer les seuils de pilotage pour l'auscultation, à savoir : les seuils de vigilance et d'alerte.

L'auscultation consiste en l'ensemble des mesures et des contrôles, conduits à titre préventif ou à la suite de la

constatation du comportement anormal des ouvrages ou du terrain. L'auscultation doit permettre un suivi des déformations et déplacements avant, pendant et après les travaux. Elle peut être considérée comme une partie intégrée de la méthode observationnelle, qui est un procédé de conception continue. Sur L16-1, un système d'auscultation important a été élaboré et mis en place avant le démarrage des travaux afin de mesurer la respiration naturelle du terrain et des avoisinants liée notamment aux variations de température.

À présent, environ 200 théodolites automatiques, 10 000 prismes sur les avoisinants et voies ferrées, 2300 repères de nivellement de surface, 300 inclinomètres, 50 extensomètres, 50 vibromètres, 30 sismomètres, 200 fissuromètres, etc. sont installés (figure 1).

Ce système d'auscultation permet de surveiller les mouvements des existants et les comportements des ouvrages réalisés.

Les résultats d'auscultation sont transférés vers des serveurs de manière automatique ou manuelle. Ils sont ensuite traités, intégrés dans la base

de données et enfin visualisés à l'aide de l'outil informatique THM. Pendant la phase des travaux, les rapports hebdomadaires d'auscultation sont préparés, ils sont systématiquement analysés (figure 10).

Dans la plupart des cas, l'écart entre les mesures et les scénarii de référence peut être qualitativement expliqué. En cas d'écart important, les retro-analyses sont effectuées pour ajuster certaines hypothèses et adapter les méthodes de construction. En cas de dépassement de ces seuils, les intervenants concernés sont informés par SMS et/ou email.

Les différentes actions et mesures préventives ou correctives sont également prévues.

RÉTRO-ANALYSE

Pour les ouvrages, les retro-analyses sont effectuées lorsqu'apparaissent des écarts importants entre les résultats mesurés et les scénarii de référence issus des calculs MEF 2D/3D. La stratigraphie réellement rencontrée et identifiée par les suivis géotechniques est la piste privilégiée pour ces retro-analyses.

Pour les tunnels, les retro-analyses sont effectuées selon le plan d'avancement du tunnelier ou en cas d'écart fort au scénario de référence.

Le taux de confinement sous la pression de confinement réellement appliquée par le tunnelier est la piste importante et privilégiée (Mains et al., 2021).

Ces retro-analyses permettent de réévaluer les déformations calculées en ciblant les déformations observées et de pouvoir, si nécessaire, adapter les méthodes de construction pour respecter les déformations sur les travaux futurs.

Dans l'approche probabiliste, à l'aide de la méthode observationnelle, les mesures in situ permettent de vérifier les résultats des simulations numériques et d'ajuster certaines hypothèses de calcul. Cette méthode observationnelle permet également d'orienter les choix techniques et les optimisations pour la suite des grands projets, couplée à une analyse inverse à l'aide d'inférence bayésienne (figure 9).

CONCLUSIONS

Le projet L16-1 s'inscrit dans un milieu urbain très dense à forts risques d'endommagement aux avoisinants. Dans cet article, les différentes méthodes d'estimation (solution analytique, modèle numérique, approche probabiliste) des déformations engendrées par les travaux sont présentées, ainsi que leur suivi par l'auscultation.

À l'aide de mesures provenant de l'auscultation, les analyses observationnelles sont systématiquement menées pour identifier l'origine des écarts.

En cas d'écarts importants par rapport à la prévision, les retro-analyses sont également réalisées afin d'ajuster les hypothèses et adapter les méthodes de construction. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

MONTANT INITIAL DU MARCHÉ : 1 840 M€

TERRASSEMENT : 6 000 000 t

BÉTON : 900 000 m³

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE (MOA) : Société du Grand Paris

MAÎTRE D'ŒUVRE (MOE) : Groupement Egis Rail et Tractebel pour infrastructures et groupement Egis Rail et Setec pour systèmes

GROUPEMENT D'ENTREPRISES : Eiffage Génie Civil (Mandataire), Tso et Eiffage Rail

ABSTRACT

ESTIMATION AND MONITORING OF STRAINS INDUCED BY THE CONSTRUCTION OF BRIDGES AND TUNNELS

YI ZHANG, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - PASCAL HAMET, EIFFAGE GÉNIE CIVIL

Various methods are used to estimate the strains induced by the construction of bridges and tunnels as part of the L16-1 project, and for monitoring movements by detailed analysis. Observational analyses and reverse analyses are performed in the event of divergences between the measurement and the reference scenario during the works. By means of this observational method, technical choices are guided and optimised. □

ESTIMACIÓN Y SEGUIMIENTO DE LAS DEFORMACIONES INDUCIDAS POR LA REALIZACIÓN DE CONSTRUCCIONES Y TÚNELES

YI ZHANG, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - PASCAL HAMET, EIFFAGE GÉNIE CIVIL

En la ejecución del proyecto L16-1, se emplean distintos métodos para estimar las deformaciones inducidas al realizar construcciones y túneles, al tiempo que se realiza un seguimiento de los movimientos por auscultación. En caso de desviaciones entre la medición y el escenario de referencia durante las obras, se llevan a cabo análisis observacionales y retroanálisis. Este método de observación permite orientar y optimizar las alternativas técnicas. □



PREMIÈRE MONDIALE : UN OUVRAGE 100% ULTRA BAS CARBONE POUR L'EXTENSION DE LA STATION D'ÉPURATION DE BONNEUIL-EN-FRANCE

AUTEURS : NICOLAS KOLODKINE, RESPONSABLE AGENCE BESSAC ÎLE-DE-FRANCE - GRACE ANGLADE, RESPONSABLE QHSE ADJOINTE BESSAC

POUR RELIER LA STATION D'ÉPURATION DE BONNEUIL-EN-FRANCE AU POINT DE RACCORDEMENT SUR LE COLLECTEUR GARGES-EPINAY, LE GROUPEMENT D'ENTREPRISES BESSAC (MANDATAIRE) / SOLETANCHE BACHY FONDATIONS SPÉCIALES / SETEC RÉALISE UNE PREMIÈRE MONDIALE : LA CONSTRUCTION DE LA TOTALITÉ D'UNE CANALISATION DE REJET DES EAUX TRAITÉES AVEC DES TUYAUX EN BÉTON ULTRA BAS CARBONE SOUS LA MARQUE *EXEGY BY BESSAC*. CE PROJET EN CONCEPTION-RÉALISATION S'INSCRIT DANS LE CADRE DE L'EXTENSION ET DE LA MODERNISATION DE CETTE STATION DE DÉPOLLUTION.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET DE CANALISATION DE TRANSFERT

La station de dépollution de Bonneuil-en-France du SIAH (Syndicat Mixte pour l'Aménagement Hydraulique des vallées du Croult et du Petit Rosne) assure le traitement des eaux usées de 35 communes de l'est du Val d'Oise. Mise en service en 1997, la station de dépollution a une capacité nominale de traitement de 55 500 m³/jour et de 300 000 équivalents-habitants. À ce jour, la station a atteint sa limite de capacité du fait des évolutions

économiques et démographiques des territoires raccordés à celle-ci.

Pour adapter son outil de traitement des eaux usées aux contraintes futures, le SIAH du Croult et Petit Rosne a entrepris l'extension et la modernisation de la station de dépollution de Bonneuil-en-France (figure 1).

Les travaux en cours ont pour objectif la création d'une canalisation de transfert des eaux traitées, depuis l'exutoire de la station de traitement de Bonneuil-en-France (STEP) jusqu'au Centre Technique de Régulation (CTR) géré par la Direction de l'Eau et de l'Assai-

1- Esquisse 3D du projet d'aménagement de la station de dépollution de Bonneuil-en-France - SIAH.

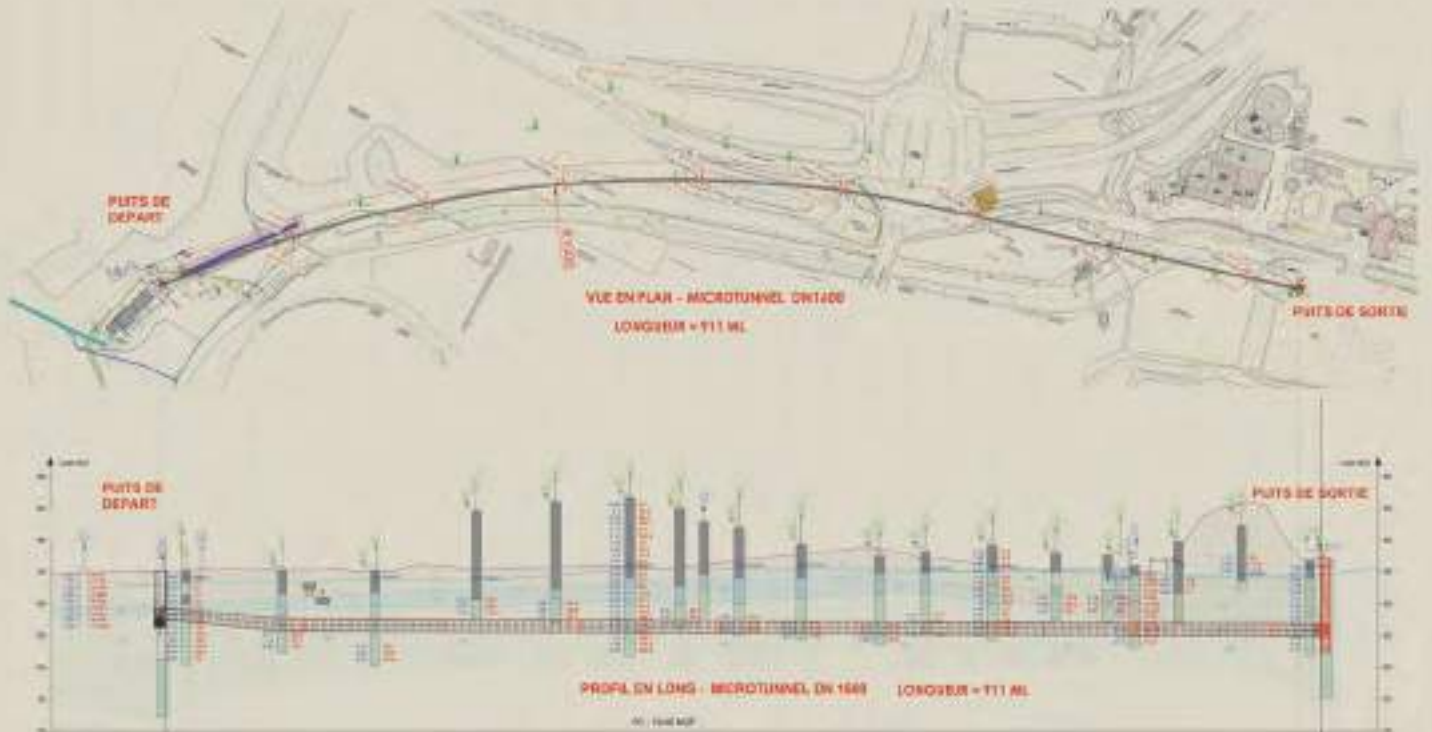
1- 3D sketch of the development plan for the Bonneuil-en-France de-contamination station - SIAH.

nissement (DEA) de Seine-Saint-Denis situé sur la commune de Dugny, à partir duquel un raccordement au collecteur "Garges-Epinay" est possible.

UNE CONCEPTION OPTIMISÉE ET TOURNÉE VERS L'ENVIRONNEMENT

Sur le plan du fonctionnement hydraulique, la canalisation de transfert se caractérise par une conduite en charge de 911 m de long, avec écoulement gravitaire, d'un diamètre intérieur de 1 600 mm en béton armé de 17 cm d'épaisseur.

VUE EN PLAN DU TRACÉ ET PROFIL EN LONG DE LA CANALISATION DE TRANSFERT



2

© PHOTOTHÈQUE BESSAC

Le profil en long de la canalisation comprend de l'amont (depuis le point de départ dans l'emprise de la STEP) vers l'aval (au niveau du CTR) :

- Un puits d'admission de 5,10 m de diamètre et de 12 m de profondeur situé en sortie du rejet de la station d'épuration ;
- Une conduite en DN1600 en béton ;
- Un puits de restitution situé sur le site du CTR de 7,9 m de diamètre et de 8 m de profondeur, équipé d'une remontée accompagnée en DN1000 ;
- Un regard d'accès intermédiaire ;
- Une chambre de raccordement au collecteur Garges-Epinay, faisant également office de chambre de dissipation.

Le profil en long de la canalisation possède un axe descendant depuis le CTR vers la station d'épuration et une pente 20 mm/m sur environ 105 m afin de respecter une couverture suffisante pour le passage sous le collecteur d'eaux usées 150/90, puis une pente régulière et constante de 1 mm/m sur 806 m jusqu'à la station d'épuration. Les points caractéristiques de ce profil en long correspondent aux puits mis en œuvre pour le microtunnelier : puits de travail (PS2) au niveau du CTR, et puits de sortie (PP1), au niveau de la STEP. Le profil en long présente ainsi une forme de siphon.

2- Vue en plan du tracé et profil en long de la canalisation de transfert.
3- Vue intérieure de la canalisation de transfert.

2- Plan view of the layout and longitudinal profile of the transfer pipeline.
3- Inside view of the pipeline.

Le point bas du profil se situe au niveau du radier du puits de sortie du micro-tunnelier (PP1).

Le tracé et le profil en long (figure 2) établis lors de la conception, tiennent compte de la topographie, et de l'état actuel de l'environnement sur le site. En effet, la zone du projet comprend des espaces naturels qui constituent par endroit de véritables noyaux de biodiversité, classés en zone Natura 2000 du fait de leur sensibilité. Comme zone d'intérêt écologique majeure, on

peut citer en particulier le Parc de la Courneuve, qui se caractérise par la biodiversité de son milieu et la présence de nombreuses espèces végétales protégées et d'oiseaux.

La cartographie du site fait également apparaître la présence de plusieurs milieux humides (La Morée et Le Croult) qu'il convient de préserver.

Dans ce contexte environnemental sensible, afin de limiter l'empreinte des travaux sur le milieu naturel, il est donc décidé de construire la canalisation de raccordement à l'aide d'un micro-tunnelier, par une méthode dite "sans tranchée" (figure 3).

Dès la phase de conception du projet :

IMPLANTATION DES Puits DE DÉPART/SORTIE POUR LE MICROTUNNELIER

Pour le puits de départ du microtunnel, il est privilégié une réimplantation des installations dans l'emprise du CTR de Dugny plutôt que dans la zone Natura 2000 du parc de la Courneuve. Cette solution présente un double avantage : la sauvegarde du milieu naturel existant et une meilleure accessibilité aux ouvrages en phase d'exploitation définitive.

Le puits de sortie du microtunnelier est implanté au plus près du point de raccordement amont dans la station de traitement de Bonneuil-en-France. ▷



3

© PHOTOTHÈQUE YVES CHANOT

CALAGE DE LA VUE EN PLAN

Dans un souci d'optimisation du nombre de puits, la solution en cours de réalisation consiste à foncer la canalisation en un seul tir. L'adaptation du tracé avec un rayon de courbure maximal de 1 000 m permet d'éviter la construction de multiples puits de poussée intermédiaire dont certains particulièrement profonds dans des zones de circulation encombrées et d'éviter les principales contraintes physiques identifiées sur la zone du projet (franchissement de la Vieille Mer, rond-point de la V^e République, franchissement de l'ouvrage de La Morée).

ADAPTATION DU PROFIL EN LONG DU TRACÉ

Le profil en long de la solution proposée est calé essentiellement en fonction des contraintes géométriques des ouvrages existants, en respectant une hauteur minimale de couverture qui correspond à 2D (diamètre) sur la partie posée par microtunnelage. Cette règle est en particulier appliquée sur le franchissement en fond de vallée de la Vieille Mer.

Le profil en long de la canalisation de rejet est également recalé en fonction des contraintes pyrotechniques et géotechniques qui ont été identifiées lors des investigations de reconnaissance des sols à proximité de la zone de démarrage du creusement (approfondissement du fait du risque de rencontre d'engins explosifs et de remblais pollués).

La géologie rencontrée sur le profil en long correspond typiquement à celle de la banlieue parisienne. Elle est constituée de terrains sédimentaires.

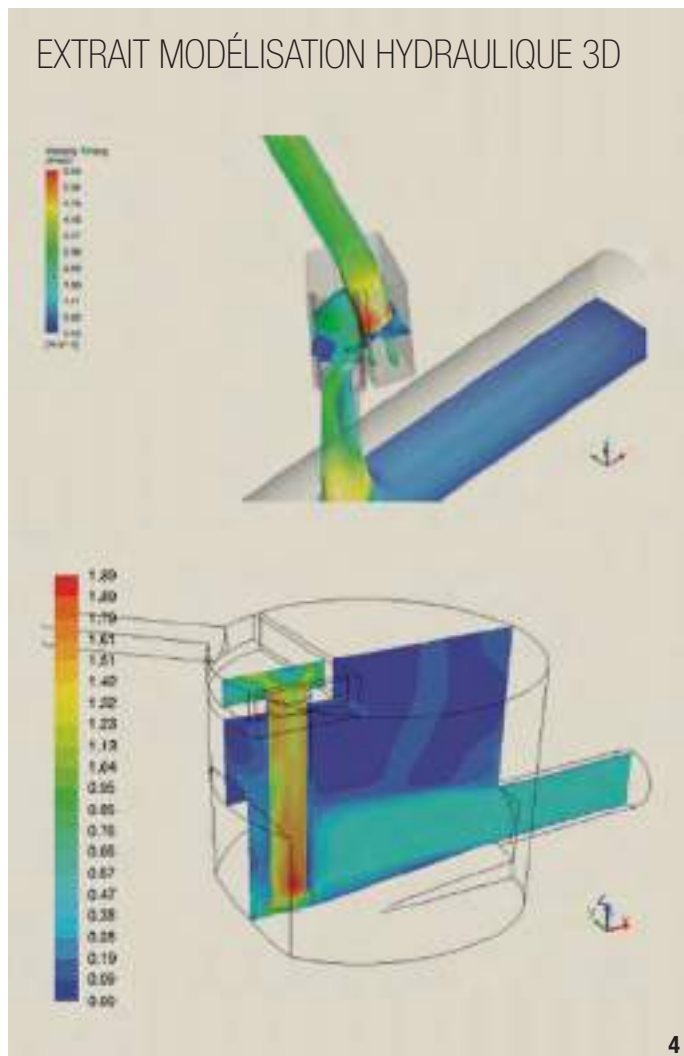
Les principales formations géologiques rencontrées sur le projet sont :

- Des alluvions anciennes et modernes sablo-graveleuses parfois argileuses ;
- Du Marno-Calcaire de Saint-Ouen ;
- Du Sable de Beauchamp.

VALIDATION DU FONCTIONNEMENT DE L'OUVRAGE PAR MODÉLISATION HYDRAULIQUE

Enfin, après le calage du tracé et du profil en long, plusieurs modélisations hydrauliques 3D (figure 4) sont réalisées, au stade de la conception, afin de vérifier la ligne d'eau, les pertes de charge et la vitesse d'écoulement des effluents en fonction des différentes hypothèses de débits envisagées en amont de la canalisation ($Q_{\max} = 7000 \text{ m}^3/\text{h}$) et des niveaux des côtes de Fe aux deux points de raccordements amont et aval.

EXTRAIT MODÉLISATION HYDRAULIQUE 3D



4

© PHOTO THÉRIE BESSAC

Ces calculs permettent de valider l'ensemble des hypothèses retenues et le bon fonctionnement hydraulique de la canalisation.

LES TUYAUX ULTRA BAS CARBONE EXEGY BY BESSAC : UNE INNOVATION POUR RÉPONDRE AUX ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX

Avec le soutien et la participation du SIAH, Bessac, dans le cadre du marché en conception, prend des engagements forts et décide d'utiliser sur ce projet des tuyaux Ultra Bas Carbone EXEGY by Bessac comme revêtement définitif pour l'intégralité de la canalisation de transfert.

- 4- Extrait modélisation hydraulique 3D - Hydratec.
- 5- Stockage des tuyaux Ultra Bas Carbone dans l'usine de Capremib.

- 4- Excerpt of 3D hydraulic model - Hydratec.
- 5- Storage of the ultra-low-carbon pipes in the Capremib plant.



5

© PHOTO THÉRIE YVES CHANOT

HISTOGRAMME DE CLASSIFICATION DES BÉTONS EN FONCTION DE LA COMPOSITION CIMENTAIRE

(Classification environnementale C50/60 selon EN 206/CN)



Il s'agit là d'une première mondiale ! Pour ce faire, Bessac, en lien avec les Services "Ingénierie Matériau" de Vinci Construction France, de Solelanch Bachy et de la Tunnel Factory développe une formule de béton *EXEGY by Bessac* quatre fois moins émissive que celles utilisées généralement pour la préfabrication des tuyaux de fonçage. Cette formule est obtenue par recombinaison d'un ciment de haut fourneau avec emploi d'un ciment de type CEM I (20 %) et de laitier (80 %) dans

6- Histogramme de classification des bétons en fonction de la composition cimentaire.

6- Bar chart of the classification of concretes according to their cement composition.

un processus de fabrication maîtrisé. Autre décision forte : le choix de relocaliser la fabrication en France avec du "Made in France", puisque les tuyaux Ultra Bas Carbone *EXEGY by Bessac* sont préfabriqués dans l'usine de Capremib à côté de Reims (figure 5). Bénéficiant du savoir-faire de Bessac en matière de préfabrication de tuyaux, ce partenariat permet de diminuer les distances de transport des tuyaux et ainsi l'empreinte carbone associée. Pour recevoir l'appellation **Ultra Bas**

TABLEAU A : SPÉCIFICATIONS DU BÉTON ULTRA BAS CARBONE *EXEGY BY BESSAC*

	Normes Tuyaux	Contraintes complémentaires du projet du SIAH (Fascicule 65 / NF EN 206 / CN)
Spécification du béton	-	BPS
D_{MAX} (mm)	-	10
Classes d'expositions	-	XC2 / XA2 (sulfates)
R_c garantie (MPa)	C40/50	C50/60
Absorption d'eau (cf. annexe F NF EN 1916)	≤ 6,0 %	-
Dosage liant (kg/m³)	-	≥ 350 D _{max} 20 mm
E_{ef}/C maxi	≤ 0,45	≤ 0,45
Classe de chlorure	Cl0,4	Cl0,4 (Cl0,65 liant contenant plus de 36 % de laitier de haut fourneau)
Caractéristique SR ou ES / PM du ciment	-	SR ou ES
Niveau de prévention RAG	-	B
Niveau de prévention RSI	-	Cs
Étalement BAP	-	SF2
Viscosité apparente (t500 mm)	-	VS2
Aptitude à l'écoulement (Boîte en L)	-	PL2
Résistance à la ségrégation (Stabilité au tamis)	-	SR1
Maintien Rhéologique (min)	-	30
Résistance pour décoffrage	-	≥ 15 MPa
Spécifications complémentaires (Fascicule 65 / NF EN 206 / CN)		
Classes d'expositions	XA3 (sulfates) / XA2 (acide)	
Dosage liant (kg/m³)	≥ 360 D _{max} 20 mm	
E_{ef}/C maxi	≤ 0,40	

Carbone, la formule doit atteindre le plus haut niveau de réduction d'empreinte carbone dans sa catégorie de résistance à la compression considérée (<140 kg_{éq.CO₂}/m³ pour un C50/60), tout en permettant sa réutilisation sur des projets aux cahiers des charges différents.

Les spécifications du béton Ultra Bas Carbone *EXEGY by Bessac* développées sont rappelées dans le tableau A.

Ces caractéristiques de performance et de robustesse se justifient par des contraintes techniques fortes issues du projet :

- Des sollicitations mécaniques importantes à la mise en œuvre (625T de force de poussée nécessitant un C50/60) ;
- Une productivité à garantir : résistance de plus de 15 MPa nécessaire à jeune âge pour la manutention des tuyaux de 7,2 t dans le cadre de leur préfabrication. L'objectif étant bien d'inscrire la démarche dans un process industriel et non dans un prototype ;
- Une durabilité garantie du béton notamment vis-à-vis des sulfates du terrain et de l'acidité potentielle des effluents ;
- Un béton autoplaçant est choisi pour répondre à la fois à l'objectif de maîtrise des coûts et à l'objectif de qualité finale tout en facilitant la mise en œuvre ;
- Une cohérence environnementale est recherchée dans le processus de fabrication : traitement thermique limité et matériaux de proximité.

Les solutions existantes sur le marché avec l'emploi de ciments déjà composés ne permettent pas la formulation d'un béton aux propriétés adaptées pour les tuyaux de fonçage tout en allant aussi loin dans la réduction de l'impact CO₂. Ainsi, la formule *EXEGY by Bessac* conçue contient moins de 100 kg/m³ de ciment. L'aptitude à l'emploi du béton est ensuite validée par des essais de durabilité notamment pour justifier ses propriétés de transfert (diffusion des chlorures inférieure à 10⁻¹² m²s⁻¹) et sa résistance vis-à-vis des acides (essai de lixiviation à pH 4,5).

La formule *EXEGY by Bessac* mise en œuvre atteint largement sa place dans la catégorie des bétons Ultra Bas Carbone puisqu'elle se place à seulement 84 kg_{éq.CO₂}/m³ hors transport [Note : 117 kg_{éq.CO₂}/m³ transport inclus], soit bien en-dessous des 140 kg_{éq.CO₂}/m³ constituant le palier pour un classement d'un C50/60 en béton Ultra Bas Carbone (figure 6).

PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES

L'analyse du bilan carbone pour le projet de canalisation de transfert ainsi conçu et réalisé montre des résultats très positifs et performants par rapport à une solution plus classique et conservatrice.

Ce constat découle principalement des choix innovants et ambitieux faits par Bessac :

- L'utilisation d'un béton *EXEGY* by Bessac dont l'empreinte carbone est réduite par 4 sur 100 % du linéaire de la canalisation de transfert ;
- La réduction drastique du nombre de puits intermédiaires et l'optimisation des fondations par pieux sécants ;
- La réalisation de la canalisation en seul tir de 911 m en DN1600.

ZOOM SUR LES TRAVAUX EN COURS

DISPOSITIONS TECHNIQUES ET TRAVAUX PRÉPARATOIRES

Au niveau de la zone de démarrage, les travaux suivants sont réalisés :

- Vérification et auscultation du pont routier de la Vieille Mer à l'entrée du CTR ;
- Purge des anciennes fosses de stockage enterrées au niveau de l'implantation du puits de départ ;
- Dévoisement des réseaux existants pour permettre les travaux de fondations du puits par pieux sécants.

Les techniques mises en œuvre doivent s'adapter aux conditions du site mais aussi à l'encombrement très réduit : emprise à gabarit réduit, présence de réseaux et d'ouvrages sensibles.

SOUTÈNEMENT DES PUIITS EN PIEUX SÉCANTS

La réalisation des deux puits impose la prise en compte des sujets suivants :

- La limitation des fortes venues d'eau à l'excavation ;
- La reprise des efforts de poussée en phase provisoire (limitation des déplacements notamment) ;
- La retenue des terres pendant l'excavation.

Dans ces conditions, les puits sont construits au moyen de pieux sécants constituant un soutènement étanche qui permet de terrasser puis d'excaver à l'abri de la nappe. À cet effet, leur fiche hydraulique et mécanique est adaptée en conséquence dans les horizons étanches.

Les pieux sécants des deux puits descendus respectivement à 15 et 20 m de



© PHOTO THÉRIE YVES CHANODT

profondeur sont réalisés par Soletanche Bachy Fondations Spéciales à l'aide du procédé Starsol® de creusement à la tarière de troisième génération.

Plusieurs puits de décompression sont réalisés avant le démarrage du terrassement des puits afin d'assurer la bonne stabilité du fond de fouille et de limiter le risque de gradient ascendant sous la fiche des pieux du puits.

UNE ORGANISATION MILLIMÉTRÉE DE CREUSEMENT AU MICROTUNNELIER

Baptisé le 31 janvier 2022 par les équipes de Bessac, le microtunnelier "Nicole" a démarré le creusement de la canalisation de transfert depuis le site du CTR à Dugny (figure 7).

Après avoir traversé sans encombre la paroi de pieux sécants équipée de fibres de verre, le microtunnelier creuse dans les sables fins à l'aide d'une roue de coupe mixte équipée de couteaux et de molettes périphériques.

7- Installation du microtunnelier - fond de puits.

7- Installation of the microtunnelier - bottom of shaft.

Les matériaux remontés à la surface sont ensuite traités et séparés à l'aide d'une station de traitement adaptée. Le microtunnelier et la canalisation avancent sous la poussée appliquée par le bâti de poussée installé dans le puits de travail. Les efforts transitent dans les éléments de canalisation posés au fur et à mesure de la progression du microtunnelier.

Les éléments de canalisation ont une longueur utile de 3,00 m. Lorsque les vérins hydrauliques de la station de poussée sont en fin de course, ils sont rétractés puis un nouveau tuyau est mis en place dans le bâti.

Pendant toute sa construction, la canalisation est en mouvement dans le terrain et subit des efforts de frottement contre le terrain.

Afin de limiter les efforts de frottement, donc la poussée exercée par la station de poussée principale, une boue de lubrification est injectée dans l'espace annulaire du forage au moyen de buses placées à l'arrière du microtunnelier et au travers des tuyaux de forage. En outre, compte tenu de la longueur du tronçon à creuser, il est prévu d'équiper la canalisation de 8 stations intermédiaires.

Véritable enclave, le site de lancement du microtunnelier s'étend sur une parcelle réduite et de forme irrégulière d'environ 500 m². La logistique est un réel défi du quotidien pour assurer la production continue du microtunnelier. Les livraisons de tuyaux et le va-et-vient des camions d'évacuation de déblais doivent être millimétrés compte tenu des faibles zones de stockage disponibles en surface et du circuit imposé de rotation des camions dans le site du CTR.

Les contraintes liées au site ont nécessité de trouver des solutions innovantes, tant dans la conception fonctionnelle et structurelle du puits de départ que dans la logistique du chantier (figure 8). Ce projet constitue un vrai défi technique car le site de démarrage est très exigu et fortement contraint.

Pendant la phase de creusement du microtunnel, l'installation de chantier coté CTR est divisée en quatre principales zones :

CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DU MICROTUNNELIER

- Microtunnelier à pression de boue
- Diamètre de creusement : 2,01 m
- Tuyaux en béton armé : longueur 3 m / ép. 17 cm
- Nombre de stations intermédiaires : 8
- Poussée max. admissible sur les tuyaux : 6 250 kN
- Pression de confinement max. : 1,2 bars
- Rayon de courbure mini. : R = 1 000 m



© PHOTO THÉQUE YVES CHANOT

8

- Une zone de stockage et d'approvisionnement des tuyaux : Leur manutention se fait à l'aide d'une grue de 35 t positionnée en bordure du puits PS2 ;
- Une zone en bord de puits où est installée la cabine de pilotage avec une visibilité sur le fond du puits de départ afin que le pilote puisse avoir une vision directe

8- Vue d'ensemble installation de chantier de microtunnelier - CTR.

8- General view of microtunneller site facilities - CTR.

- sur l'ensemble des opérations de fonçage ;
- Une zone dédiée au traitement des déblais et à la production du fluide de marinage. Cette zone est notamment composée d'un venturi, d'une pompe de marinage, d'une unité de traitement des déblais (centrifugeuse et dessableur) et d'une fosse de stockage des déblais ;

- Le fond de puits dédié aux opérations de fonçage des tuyaux. Un tour d'escalier temporaire est mis en place afin d'accéder en toute sécurité au fond du puits. Le fond du puits est composé d'un bâti de poussée et de tous les réseaux nécessaires pour le marinage hydraulique et les injections de lubrification. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

- LONGUEUR DE LA CANALISATION : 911 m**
- QUANTITÉ DE DÉBLAIS : 7 000 t**
- EMPRISE INSTALLATION DE CHANTIER EN SURFACE : 500 m²**
- NOMBRE DE TUYAUX UBC : 305**

PRINCIPAUX INTERVENANTS

- MAÎTRE D'OUVRAGE : Siah**
- ASSISTANT MAÎTRE D'OUVRAGE : Artelia**
- MAÎTRE D'ŒUVRE INTÉGRÉ : Setec**
- ENTREPRISE : Groupement d'entreprises Bessac (mandataire) / Setec / Soletanche Bachy Fondations Spéciales**

ABSTRACT

WORLD FIRST: A 100% ULTRA-LOW-CARBON STRUCTURE FOR EXTENSION OF THE BONNEUIL-EN-FRANCE SEWAGE PLANT

NICOLAS KOLODKINE, BESSAC ÎLE-DE-FRANCE - GRACE ANGLADE, BESSAC

A micro-tunnel of inside diameter 1.60 metres and 911 metres long between the towns of Dugny and Bonneuil-en-France, in the Paris region, links the outlet of the sewage plant at Bonneuil-en-France and the "Garges-Epinay" main rainwater drain at Dugny. Precisely designed installations and compact equipment made it possible to locate a microtunneller worksite in the midst of the regional technical centre ("CTR"), in a very cramped urban environment, alongside the La Courmeuve forestry farm in a Natura 2000 zone. The article describes the measures adopted for the design and execution of this record-breaking, innovative project using the microtunneller boring technique and laying ultra-low-carbon concrete pipes of the "EXEGY by Bessac" brand. □

PRIMICIA MUNDIAL: UNA OBRA 100% ULTRA BAJA EN CARBONO PARA LA AMPLIACIÓN DE LA PLANTA DEPURADORA DE BONNEUIL-EN-FRANCE

NICOLAS KOLODKINE, BESSAC ÎLE-DE-FRANCE - GRACE ANGLADE, BESSAC

El microtúnel que discurre entre los municipios de Dugny (93) y Bonneuil-en-France (95), de 1,60 m de diámetro interior y 911 m de longitud, conecta la salida de la planta depuradora de Bonneuil-en-France y el colector de aguas pluviales Garges-Epinay, en Dugny. Unas instalaciones milimetradas y el uso de material compacto han permitido implantar una estación de microtunneladora en el corazón del centro técnico regional (CTR), en un entorno urbano muy exiguo, junto al parque forestal de La Courmeuve, en un espacio de la red Natura 2000. El artículo presenta las alternativas elegidas para el diseño y la realización de esta obra récord e innovadora utilizando la técnica de la perforación por microtunneladora y el tendido de tubos de hormigón ultra bajos en carbono de la marca EXEGY by Bessac. □

1- Voussoirs
fibrés sur
TSP Ouvrage
3401 L16-1
La Courneuve.

1- Fibre-
reinforced
segments on
rubber-tyred
train structure
3401 L16-1,
La Courneuve.

© EIFFAGE GÉNIE CIVIL



INNOVATION SUR LA LIGNE 16-1 DU GRAND PARIS EXPRESS : UN PARTENARIAT RÉUSSI

AUTEURS : JEAN-LUC BISCHOFF, DIRECTEUR OPÉRATIONNEL VOUSOIRS, EIFFAGE - PASCAL HAMET, DIRECTEUR DU PROJET L16-1, EIFFAGE - BRUNO HAMELIN, EXPERT INFRASTRUCTURES, EGIS-TRACTEBEL

EN FRANCE, AU DÉMARRAGE DE L16-1, DÉBUT 2018, LES RÉFÉRENCES DE VOUSOIRS 100 % EN BÉTON RENFORCÉ PAR FIBRES MÉTALLIQUES (BRFM) SONT PEU NOMBREUSES. EN EUROPE, SI L'ON EXCLUT L'ESPAGNE (VOUSOIRS HYBRIDES) ET LE ROYAUME UNI (PETITS DIAMÈTRES ET DE NOMBREUX VOUSOIRS PAR ANNEAU), IL N'Y A PAS DE TRADITION DE VOUSOIRS 100 % FIBRÉS. AU NIVEAU MONDIAL, SURTOUT DEPUIS LA PUBLICATION DU MODEL CODE 2010, LE TON EST DONNÉ AUX USA, AU CANADA ET EN AUSTRALIE. LE MÉTRO DE DOHA MARQUE, QUANT À LUI, UN VÉRITABLE TOURNANT DANS LE DOMAINE EN 2014, EN DÉMONTRANT DANS UN MILIEU PARTICULIÈREMENT AGRESSIF QUE LA SOLUTION 100 % FIBRÉE RÉPOND AUX EXIGENCES DE DURABILITÉ.

DESCRIPTION DU PROJET

En France, au démarrage de la Ligne 16-1, début 2018, les références de voussoirs 100 % en Béton Renforcé par Fibres Métalliques (BRFM) sont peu nombreuses (tableau A).

La Ligne 16-1 du Grand Paris Express comprend 19,3 km de tunnels réalisés avec 6 tunneliers en 3 diamètres différents et 200 000 m³ de béton de voussoirs.

Démarrage de la fabrication des voussoirs en BRFM en décembre 2019. Démarrage de la pose des voussoirs BRFM par Eiffage Génie Civil en juillet 2020.

Les 7+0 voussoirs/anneau, qui sont posés par les équipes des 4 TBM de la Ligne 16-1 ont les dimensions suivantes : diamètre 8700 mm intérieur, 9500 mm extérieur, développé du voussoir 4000 mm, épaisseur 40 mm, clé identique aux voussoirs courants. Dans le CCTP de ce lot il est prévu un



© EIFFAGE GÉNIE CIVIL

**2- L'ouvrage
3401 L16-1
La Courneuve.**

**2- Structure
3401 L16-1,
La Courneuve.**

renfort traditionnel (cages métalliques sans mise en place de fibres).

Le 20 mai 2018, soit trois mois après l'attribution de la Ligne 16-1, comme la Société du Grand Paris avait engagé une démarche de béton fibré à l'échelle du Grand Paris Express dans un souci

de recherche d'économie, d'optimisation et d'innovation, Eiffage Génie Civil a proposé de mettre en œuvre une solution de voussoirs 100 % fibrés.

La validation de la formule a été obtenue en décembre 2019 (figure 2).

ÉTAPES DE LA RÉUSSITE UN PARTENARIAT BASÉ SUR LA TRANSPARENCE

Une campagne d'essais de béton fibré structural commence à l'été 2018.

Dès lors, un plan de travail et un calendrier sont mis en place avec la Société du Grand Paris, le maître d'œuvre Egis-Tractebel et Eiffage Génie Civil, auxquels sont associés les fournisseurs et sous-traitants. Les mots clés sont rigueur, transparence, engagement, pour mettre en place avec succès une solution fibrée (figure 3).

La partie dimensionnement est confiée au Biep, bureau d'études interne d'Eiffage Génie Civil avec l'appui des équipes du Professeur Alberto Meda de l'Université de Rome Tor Vergata. Les essais sont orchestrés par le chantier avec l'appui de la Direction Innovation Recherche Matériaux d'Eiffage Génie Civil et du Cerib.

Le rôle du MOE était de rédiger le cahier de charge de ce projet d'innovation, de participer à la conception et de viser les documents produits par Eiffage (note d'hypothèses, notes de calcul, plan d'assurance qualité...). ▷

TABLEAU A : TABLEAU DES RÉFÉRENCES DE VOUSOIRS 100 % BRFM EN FRANCE

Pays	Projet	Quantité	Nature	Dosage (kg/m ³)	Type d'utilisation
France 2002	Tunnel de Blagis	38 anneaux	100% fibrés	30	Linéaire de 50 m de test
France 2013	Tunnel INELFE	100 anneaux posés	100% fibrés	40	Linéaire de 100 m de test
France 2013	Tunnel Tramway Nice L2	NC	100% fibrés	40	Provisoire (traversée de gare)
France 2018	Méto L14N Paris	70 anneaux provisoires + 7 définitifs	100% fibrés	40	Provisoire (traversée de gare) + définitif (voies de remisage)

3- Processus détaillé de la campagne de validation.
4- Essai de flexion sur voussoir 100% fibré.

3- Detailed test campaign process.
4- Bending test on 100% fibre-reinforced segment.

De son côté, le maître d'ouvrage, Société du Grand Paris, s'est adjoint les services des organismes du Cetu et de l'Ifsttar pour des missions de second regard, sécurisant ainsi la démarche. En termes de résultats, suivant le Model Code 2010, un FRC 4D est demandé, sachant que les valeurs caractéristiques minimales à atteindre sont :

- $f_{rk} = 4,4 \text{ MPa}$;
- $f_{rk} = 5,7 \text{ MPa}$.

Le bulletin fib 83 basé sur le code modèle 2010 fib (2010) est utilisé pour déterminer et classer les valeurs caractéristiques des résistances résiduelles (f_{lk} , f_{rk} et f_{3k}) de FRC.

Sur les 3 diamètres de voussoirs à réaliser sur la Ligne 16-1 (diamètres intérieurs : 6,70 m, 7,75 m et 8,70 m) seuls les plus gros diamètres seront considérés par cette étude (8,70 m). 4 tunneliers sur 6 sont concernés. Le bulletin fib 83 (2017) fixe en règle générale les cas de charges qui peuvent survenir au cours de la vie d'un voussoir.

Ces cas de charges, si l'on se veut parfaitement exhaustif, sont au nombre de 10. Le bulletin fib 83 prend en compte 4 cas de charges qui reprennent différentes étapes de la vie d'un voussoir lors de la fabrication, du transport et de la mise en place dans le tunnel : Démoulage, Stockage, Manutentions, Transport.

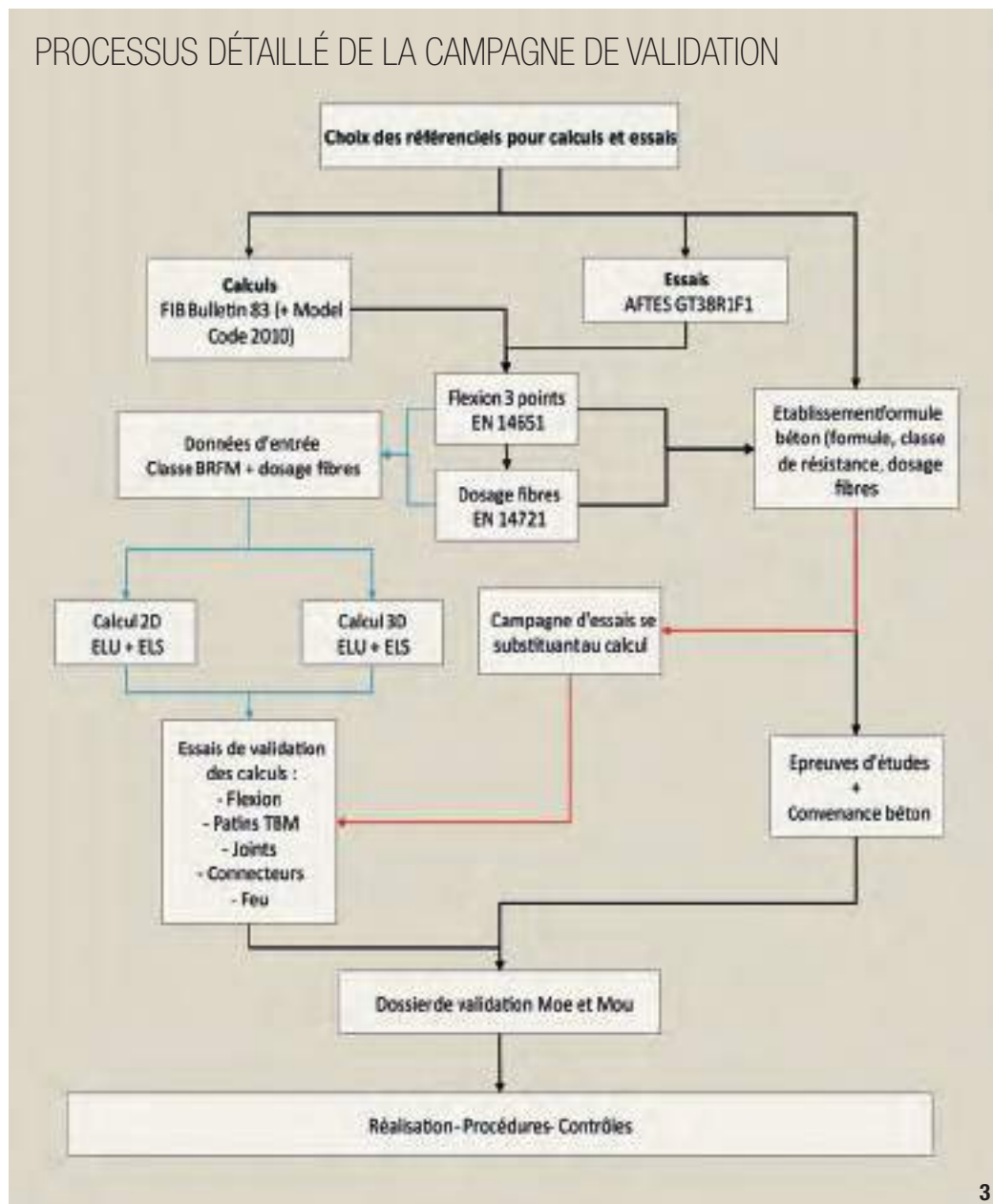
Ainsi que 2 cas de charges relatifs à des étapes de vie des voussoirs dans le tunnel : Poussée des Vérins, Géologie.

UNE CAMPAGNE D'ESSAIS MUSCLÉE
Essais de caractérisation

Afin de vérifier l'adéquation des fibres à la matrice béton, les fibres seront mises en concurrence et testées par Eiffage Génie Civil au Laboratoire Matériaux du Cerib à Épernon (28).

Pour la mise en place de la formule, courbe granulométrique, sable, rapport G/S, qualité du ciment, rapport

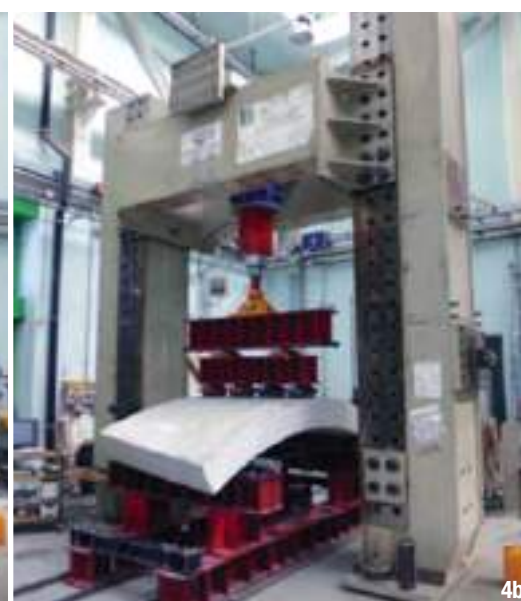
PROCESSUS DÉTAILLÉ DE LA CAMPAGNE DE VALIDATION



3 © DR



4a



4b

© EIFFAGE GÉNIE CIVIL

© EIFFAGE GÉNIE CIVIL



5

© EIFFAGE GÉNIE CIVIL

eau/ciment (Eeff/C), sont des paramètres importants.

On part avec 5 fibres et 3 formulations de base différentes pour sécuriser à terme une solution gagnante.

Ces 3 formulations sont elles-mêmes déclinées en différentes formules secondaires avec variation du dosage des matériaux et testées avec les 5 types de fibres.

Eiffage Génie Civil s'engage donc, sur un an et demi, dans une phase de tests colossale, au démarrage de l'opération. Nombre total d'essais de poutres = 1 000 u.

À l'issue de cette première phase de caractérisation et de consultation, les fibres Bekaert Dramix 3D 80/60 BGP sont retenues pour les formulations présentées.

Une fois cette phase achevée, il reste à réaliser les essais échelle 1, les essais au feu et les épreuves d'études et de convenance.

Épreuves d'études

Les épreuves d'études permettent de valider de manière formelle les études de caractérisation, selon un processus qui reprend les termes d'une épreuve d'étude de béton conventionnel, que l'on complète par des termes propres au BRFM, repris depuis le bulletin fib 83 et les Recommandations de l'Aftes de 2013, en concertation avec la MOE Egis-Tractebel et validés par celle-ci.

Essais échelle 1

L'Université de Tor Vergata de Rome et le Professeur Alberto Meda sont désignés comme conseil d'Eiffage Génie Civil et laboratoire pour les essais échelle 1.

5- Stock tampon de voussoirs Ouvrage 220P L16-1 Aulnay-sous-Bois.

5- Buffer stock of segments for structure 220P L16-1, Aulnay-sous-Bois.

Nombre de voussoirs testés à l'échelle 1 = 10 en phase étude.

Pour ces essais à l'échelle 1, 2 voussoirs au moins par série sont nécessaires : un pour vérifier la tenue à la poussée des vérins hydrauliques et l'autre pour vérifier la résistance à la rupture des voussoirs (figures 1 et 4).

Essais au feu

Les essais au feu eux seront menés au Cerib à Épernon (28).

Température de 0 à 1 000 degrés Celsius.

Exposition de 2 heures selon Norme NF EN 1363-1.

20 mn pour atteindre la température d'exposition normée de 800°C.

Nombre de voussoirs testés au feu = 3 (dosage fibres PP : 0 kg/m³ ; 0,9 kg/m³ ; 1,2 kg/m³).

Un dosage de 0,9 kg de fibres micro synthétiques Sika Sikafibres L = 12 mm Di = 34 microns sera finalement validé pour passer le test.

Épreuves de convenance

Les épreuves de Convenance ont pour objectif de valider le processus de mise en fabrication du béton en vue de validation de la formule en BRFM.

En vue de cette validation, le MOE Egis-Tractebel a inclus dans les épreuves de convenance les essais au feu, les essais à l'échelle 1 (Flexion, Poussée

des vérins), ainsi que des essais d'arrachement de connecteurs et des essais d'arrachement de système PAC (Caténaires, Supportage).

Conformément aux recommandations Aftes, un essai de détermination du coefficient d'orientation des fibres, K, avait également été demandé et réalisé. Compte tenu du caractère propre à la France de cet essai, qui ne trouve pas d'équivalent sur le plan mondial dans un processus de validation et de contrôle, et des difficultés d'interprétation de l'essai, ce dernier a été finalement retiré du processus de validation (voir encadré "Retour d'expérience détermination - Coefficient d'orientation K").

En complément de l'essai de détermination du coefficient K, une étude par analyse d'image de surfaces sciées sur les prismes extraits des voussoirs testés a été réalisée, de façon à caractériser une situation de référence de la distribution et de l'orientation des fibres, pour estimer l'homogénéité de la dispersion des fibres au sein des éprouvettes prismatiques sciées dans un voussoir (figure 5).

Cette étude a été menée par le laboratoire Matériaux du Cerib.

Les prismes extraits des voussoirs dédiés aux essais de détermination du coefficient K ont été photographiés sur leurs quatre faces.

Pour chaque prisme, un comptage des fibres sur trois faces a été réalisé, selon trois directions.

Cette étude a permis de constater une orientation selon les effets de paroi, ainsi qu'une orientation selon la direction de coulage du béton.

RETOUR D'EXPÉRIENCE - DÉTERMINATION COEFFICIENT D'ORIENTATION K

- 148 prismes, prélevés sur 2 voussoirs soumis à un essai de traction par flexion EN 14651.
- Difficulté d'analyse :
 - Référentiel BFUP base de l'essai,
 - Comportement BFUP ≠ BRFM,
 - Représentativité des prismes 150*150*600 mm.
- Artefacts créés à la découpe (notamment, biaise au centre).
- Peu de REX dans la littérature mondiale.
- Coûts essais et délais de mise en œuvre trop importants pour un suivi en contrôle de production.



© EIFFAGE GÉNIE CIVIL



© EIFFAGE GÉNIE CIVIL

De plus une corrélation a pu être faite entre le nombre de fibres dans la section entaillée et les résistances à la traction.

En Plan de Contrôle, un carottage des voussoirs testés en flexion et poussée des vérins a été systématiquement réalisé afin de déterminer la teneur en fibres selon des zones définies.

Au total, la campagne, comprenant essais de caractérisation, épreuves d'études et épreuves de convenance, incluant les essais à l'échelle 1 et essais au feu, aura duré 18 mois et sera terminée en décembre 2019 pour un coût global de 1,2 millions d'euros.

la résistance à la traction des fibres est effectué dans l'usine de préfabrication et dans les laboratoires de Bekaert, donnant lieu à un rapport mensuel.

L'ÉQUIPEMENT DE L'USINE DE PRÉFABRICATION

6 mois après l'attribution du marché, après avoir exploré des solutions en propre, Eiffage Génie Civil fait le choix de préfabriquer les voussoirs sur les sites Bonna Sabla de Conflans-Sainte-Honorine (78) et Bruz (35), aussi bien pour les voussoirs conventionnels en béton armé que ceux en BRFM.

6- Doseur.

7- Pose d'un joint ancré mixte dans le moule.

8- Tunnel TBM 6 L16-1 Aulnay-sous-Bois.

6- Batcher.

7- Placing a composite anchored joint in the mould.

8- Tunnel TBM 6 L16-1 Aulnay-sous-Bois.

L'expérience industrielle de voussoirs fibrés n'existait que de manière embryonnaire en usine.

Eiffage Génie Civil a beaucoup insisté sur l'importance de l'introduction et de la distribution des fibres, ainsi que la garantie de leur dosage dans la matrice béton. Des solutions ont donc été apportées pour ces différents points. Une alimentation efficace et contrôlée des fibres dans le doseur a été prévue à cet effet. Un buffer a donc été mis en place en amont, permettant une pré-alimentation en une seule manipulation de 8 big-bags en début de journée (environ 9 t de fibres).

UN STRICT CONTRÔLE DE QUALITÉ

À l'issue de tous les essais réalisés au préalable, une fibre Bekaert 3D RC 80/60 BM, encollée, est définitivement choisie.

L'accent est mis sur la résistance à la traction de la fibre. Pour améliorer les valeurs fr3 des performances à réaliser, une résistance de 1800 N/mm² sera décidée. L'accent est mis sur un contrôle de qualité dans tout le processus de fabrication.

Une première exigence est la source du fil machine employé pour fabriquer les fibres. Un contrôle à réception du fil machine est établi suivant le contrôle ISO de l'usine.

Un deuxième contrôle est exigé sur le produit semi-élaboré avec les valeurs de résistance à la traction obtenues.

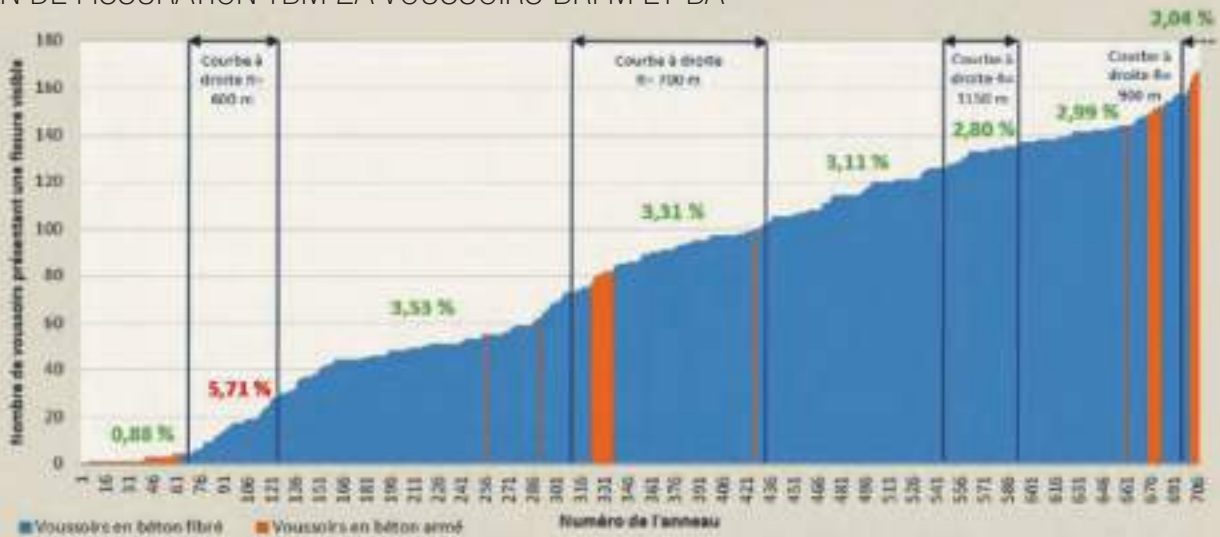
Enfin, un échantillonnage de fibres est relevé au hasard à l'usine de préfabrication. Un double contrôle du respect des tolérances de la géométrie et de



8

© EIFFAGE GÉNIE CIVIL

BILAN DE FISSURATION TBM 2A VOUSOIRS BRFM ET BA



© EIFFAGE GÉNIE CIVIL

9

Ce dispositif a été complété par un système de triple pesée de la quantité de fibres introduite dans le malaxeur (buffer, doseur, tapis de réception des fibres, tapis d'alimentation du malaxeur) (figures 6 et 7).

Une presse fut acquise pour faire les essais de résistance à la traction par flexion selon la norme EN 14 651 requise permettant un contrôle qualité sur site du FRC 4D.

UN IMPACT ÉCOLOGIQUE SIGNIFICATIF

Le béton fibré est deux fois moins consommateur en ressources pour les mêmes performances que le béton "classique". Ainsi pour un tunnel de 10 km, la consommation d'acier permet d'économiser 5 000 t d'acier et donc des économies importantes de coûts et d'émissions.

L'utilisation de moins de ressources permet en conséquence de réduire les émissions de CO₂, tant dans les cimenteries que dans les aciéries : 9 000 t équivalent CO₂ sont économisées en moyenne pour 10 km de tunnel, par rapport au béton armé.

Ce qui se traduit dans le détail :

→ Par le gain en ratio de fibres par rapport au ratio d'armatures, qui entraîne un gain d'émission de CO₂ au transport ;

→ Par le gain en chargement mieux optimisé pour les fibres : 24,2 t de chargement pour la livraison des fibres permettant de réaliser près de 185 voussoirs, en comparaison de 60 voussoirs équivalents par camion = 17,85 t pour la livraison des armatures BA ;



10

© EIFFAGE GÉNIE CIVIL

9- Bilan de fissuration TBM 2A Voussoirs BRFM et BA.

10- Tunnel TBM 2A L16-1 La Courneuve.

9- Crack formation review, TBM 2A, MFRC and R/C segments.

10- Tunnel TBM 2A L16-1, La Courneuve.

→ Par le faible diamètre des fibres qui permet de limiter davantage les rejets toxiques de l'industrie sidérurgique primaire, du fait de bobines primaires qui ne dépassent pas 1 mm de diamètre de fil. La technologie du tréfilage est quant à elle peu émissive.

Le déploiement du béton fibré sur les marchés du Grand Paris Express participe directement à l'atteinte des objectifs environnementaux de la Société du Grand Paris : réduire de 25 % les émissions de gaz à effet de serre sur la phase de construction du Grand Paris Express.

UN ASPECT ÉCONOMIQUE INTÉRESSANT

Au niveau économique, le gain peut être estimé au minimum à l'écart de ratio entre BA (85 kg/m³) et BRFM (40 kg/m³), corrigé par l'écart relatif entre le prix des fibres et le prix des campagnes d'épreuves de caractérisation, d'études, de convenance et de contrôle de la production (figure 8). Compte tenu d'une technologie dans la réalisation des cages d'armatures très optimisée en France, et le fait que les contrats pour les cages d'armatures intègrent en sous-traitance l'assemblage, le gain en personnel est transparent. Le gain en surface de hall pour assemblage est malheureusement annulé par le besoin de surfaces de stockage clos et couvert des fibres.

Quand les processus de dosage, d'introduction des fibres dans le malaxeur, de contrôle de la qualité de la fibre métallique durant les différentes phases de la vie de la fibre sont maîtrisés, la production de voussoirs en 100 % BRFM permet de s'affranchir du processus qualité contraignant d'assemblage des cages d'armatures par soudure de très haute qualité des voussoirs conventionnels en béton armé.

UN MEILLEUR CONTRÔLE DE LA FISSURATION

Pour ce qui est de la durabilité, 100 ans étaient exigés comme pour les voussoirs en béton armé. L'étanchéité avec des structures relativement étanches constituent un grand enjeu des ouvrages de tunnel. En outre, ces ouvrages de tunnel doivent résister au feu de 2h. ▷

Cependant des contrôles comparatifs sur les voussoirs posés ont démontré que les voussoirs fibrés avaient un meilleur comportement vis-à-vis de la fissuration.

Effectivement comme on observe seulement des microfissures ($\leq 0,2$ mm) et que les voussoirs travaillent en compression quand l'anneau est formé, elles se referment automatiquement. Lorsque les fissures sont peu ouvertes, c'est-à-dire avec des ouvertures de fissure n'excédant pas 0,5 mm, les fibres sont beaucoup plus efficaces que les armatures du béton armé pour agir sur cette fissuration. Ce constat s'explique simplement par le fait que le diamètre des fibres est mécaniquement mieux adapté à ces ouvertures de fissures que celui des armatures de béton armé. En effet, les bétons de fibres métalliques sont, pour la majorité, mécaniquement efficaces jusqu'à des ouvertures de fissure n'excédant pas 2 mm environ. Les ouvertures de fissures qui sont comprises entre 1 et 2 mm correspondent d'ailleurs, pour la grande majorité des cas, au comportement ultime des structures en béton de fibres métalliques.

À noter également l'excellent comportement à la corrosion des voussoirs fibrés, lié au faible diamètre des fibres et à leur répartition.

Le chantier de L16-1 a aussi permis des retours d'expérience quant à la fissuration des voussoirs en béton armé et en BRFM, au moment de la pose des anneaux.

Ainsi, après un premier test de pose dans le tunnel de débranchement vers le centre d'exploitation et maintenance d'Aulnay-sous-Bois, le 9 juillet 2020, un suivi détaillé des fissures a été effectué, d'abord pour les voussoirs en BA, puis pour les voussoirs en BRFM (figure 9).

RETOUR D'EXPÉRIENCE - VOUSSOIRS 100 % BRFM

- **Expérience concluante : 100 % des 12 km de tunnel en 100 % BRFM préfabriqués, 75 % posés.**
- **Transition facilitée BA vers BRFM.**
- **Maintien de tous les acquis de productivité du voussoir BA en termes de :**
 - Nombre de voussoirs/anneau,
 - Longueur du voussoir,
 - Puissance des machines (efforts de patin).
 - Joints mixtes ancrés.
- **Même niveau de fissuration en pourcentage que le BA :**
 - Taille des fissures comparable,
 - Fissures se referment.
- **Il en résulte une meilleure tenue à la corrosion (taille des fibres / ϕ armature) et donc une plus grande pérennité du revêtement fibré.**
- **Gain environnemental (moins consommation de matière première, fabrication des fibres moins polluante que celle des armatures, gain du transport des fibres = 300 % / l'armature).**

PRINCIPALES QUANTITÉS

- **5 gares : SDP (Saint-Denis-Pleyel), SDF (Stade de France), LCO (La-Courneuve), LBG (Le-Bourget) et LBM (Le-Blanc-Mesnil)**
- **21 ouvrages annexes dont 4 entonnements**
- **19,3 km de tunnels avec 6 tunneliers en 3 diamètres différents**
- **6 000 000 t de déblais**
- **800 000 m³ de béton d'ouvrages**
- **200 000 m³ de béton de voussoirs**
- **6 000 000 heures de travail**
- **2 250 personnes mobilisées**
- **69 mois de délai**

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Société du Grand Paris
MAÎTRE D'ŒUVRE : Egis-Tractebel
GROUPEMENT D'ENTREPRISES : Eiffage (Eiffage Génie Civil Mandataire) - Tso (Système)

L'objectif était de comparer le taux de fissuration entre les anneaux en BA ou BRFM.

En synthèse, un voussoir en BRFM ne fissure pas plus qu'un voussoir en béton armé. Les chiffres montrent en fait que le taux de fissuration en BRFM est plus faible qu'en BA, avec comme corollaire une dimension de fissure moins importante, les fissures se refermant plus facilement aussi, pour un bénéfice/risque nettement plus avantageux vis-à-vis de la corrosion.

Ainsi, un voussoir en BRFM assure une plus grande pérennité qu'un voussoir en béton armé.

CONCLUSION

La réalisation de cette production de voussoirs structurels en béton 100 % fibré comme revêtement définitif représente donc une première en France, si ce n'est en Europe.

Trois objectifs principaux étaient poursuivis : performance, durabilité et écologie (voir encadré "Retour d'expérience - Voussoirs 100 % BRFM").

Trois exigences primordiales ont été respectées : orientation, distribution et dosage des fibres dans la matrice béton, démontrant qu'un coefficient d'orientation égal à 1 est une hypothèse raisonnable pour cette application.

Nous avons largement évoqué les raisons de la performance de cette opération, en insistant sur une campagne d'essais rassurante, menée dans un esprit de synergie et d'engagement entre la Société du Grand Paris, Egis-Tractebel et Eiffage Génie Civil.

Le projet du Lot 1 de la Ligne 16 s'inscrit, quant à lui, dans les références d'anneaux de grands diamètres 100 % fibrés à titre de revêtement définitif pour une ligne de métro, par essence transportant des passagers (figure 10). □

ABSTRACT

INNOVATION ON LINE 16-1 OF THE 'GRAND PARIS EXPRESS': A SUCCESSFUL PARTNERSHIP

JEAN-LUC BISCHOFF, EIFFAGE - PASCAL HAMET, EIFFAGE - BRUNO HAMELIN, EGIS-TRACTEBEL

How to test the use of metal fibre segments over a length of 12 km of the new Line 16-1 of the 'Grand Paris Express' metro project, when the specifications stipulate a reinforced concrete solution and when French experience regarding metal fibre segments has so far been confined to sacrificial segments or tests on small lengths? This article relates the main stages of what now constitutes the first French and European experience (in the post-Brexit context) on this scale in passenger transport infrastructure (railway/metro). It is also a world first for the use of composite anchored joints on 100% fibre-reinforced segments, for the showcase 'Grand Paris Express' project. □

INNOVACIÓN EN LA LÍNEA 16-1 DEL GRAND PARIS EXPRESS: UNA ASOCIACIÓN EXITOSA

JEAN-LUC BISCHOFF, EIFFAGE - PASCAL HAMET, EIFFAGE - BRUNO HAMELIN, EGIS-TRACTEBEL

¿Cómo validar el uso de dovelas de fibras metálicas a lo largo de 12 km en la nueva Línea 16-1 del Grand Paris Express, cuando el pliego de condiciones preveía una solución de hormigón armado y la experiencia en Francia en materia de dovelas de fibras metálicas se limitaba hasta entonces a dovelas de protección o a pruebas en cortas longitudes? Este artículo recuerda las principales etapas de lo que actualmente constituye la primera referencia francesa y europea (contexto post-Brexit) de esta envergadura en infraestructuras de transporte de pasajeros (ferroviario/metro), así como una primera referencia mundial en el ámbito de las juntas ancladas mixtas sobre dovelas 100% de fibras, que tienen como aparador el proyecto Grand Paris Express. □

Digitalisation des activités
Travail collaboratif
Partage des données



**Bienvenue
dans un monde
qui se construit autrement.**

L'univers de la construction se transforme. SMABTP adapte ses solutions d'assurance pour mieux vous accompagner. Avançons ensemble.

Notre métier : assurer le vôtre.

www.groupe-sma.fr

SMABTP - Société mutuelle d'assurance du bâtiment et des travaux publics.
Société d'assurance mutuelle à cotisations variables, entreprise régie par le Code des assurances.
RCS PARIS 375 084 764 - 8 rue Louis Armand - CS 71201 - 75738 PARIS CEDEX 13



SMABTP
BÂTIR L'AVENIR AVEC ASSURANCE

**1^{er} assureur
de la construction**



Build on us

Construire sur du solide

Tunnel de la Nerthe, France.

Travaux de confortement dans un tunnel situé sur la ligne Paris - Marseille : réalisation de travaux de forage, d'ancrage et d'une coque en béton projeté de 10 cm d'épaisseur.

Intervenant partout dans le monde pour le compte de clients publics ou privés, Soletanche Bachy s'attache à proposer les meilleures solutions techniques et contractuelles.

Elle apporte aussi bien des compétences polyvalentes d'ensemblier dans le cadre de grands projets d'infrastructures, que celles de spécialiste maîtrisant l'ensemble des procédés de géotechnique, de fondations spéciales, de travaux souterrains, d'amélioration et de dépollution des sols.

www.soletanche-bachy.com



SOLETANCHE BACHY