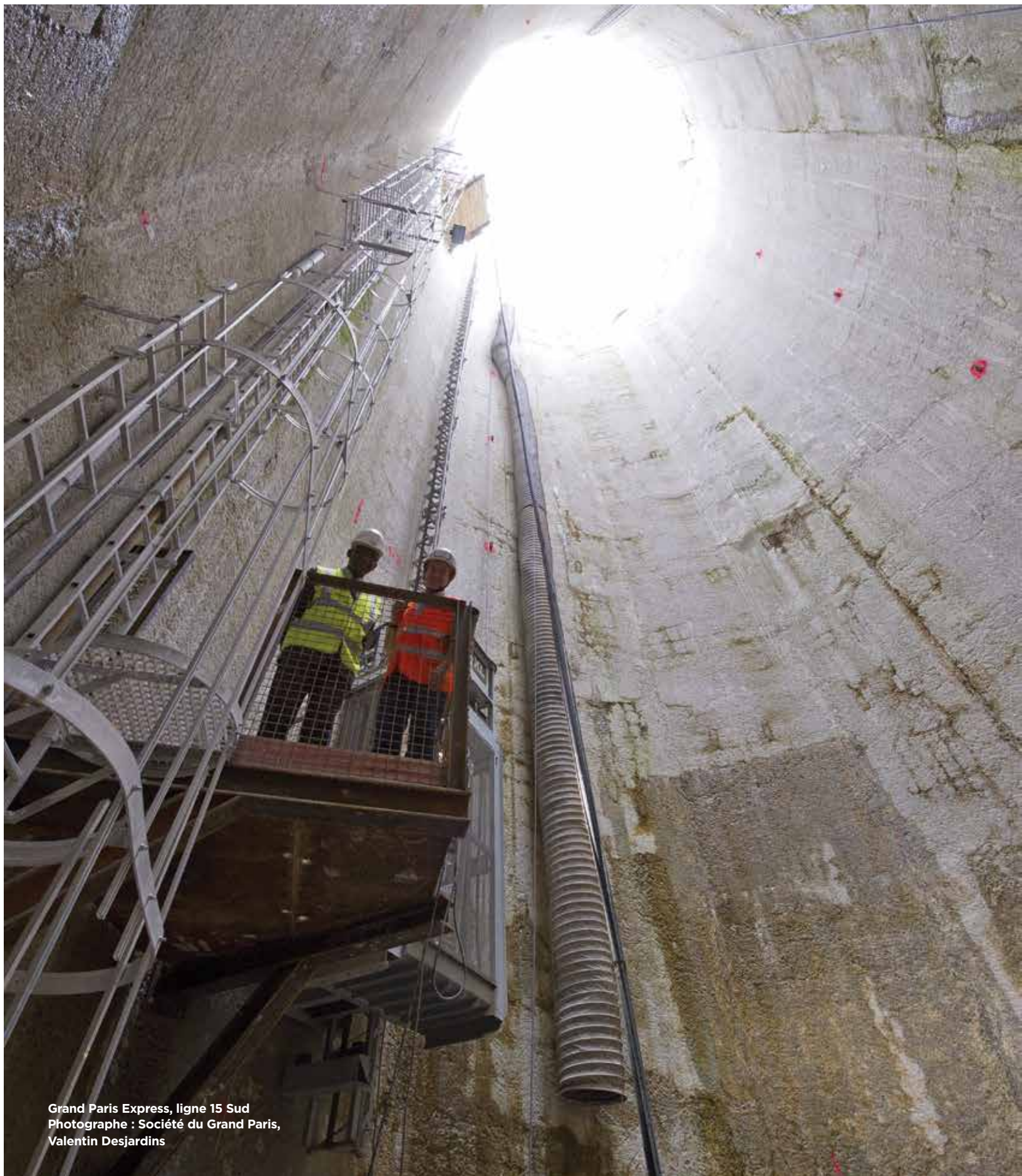


CONSTRUCTION MODERNE

OUVRAGES D'ART
SEPTEMBRE
2018

N° 157





Grand Paris Express, ligne 15 Sud
Photographe : Société du Grand Paris,
Valentin Desjardins

P. 2 | **LA DÉFENSE**
UNE NOUVELLE GARE BÂTIE
DANS LES PROFONDEURS DU CNIT

P. 8 | **LYON - TURIN**
TUNNEL DE RECONNAISSANCE
EN CONTEXTE DIFFICILE



P. 12 | **LA RÉUNION - MARSEILLE - AJACCIO**
LE BÉTON AU SECOURS
DE LA BIODIVERSITÉ MARINE



P. 18 | **CREIL**
PASSERELLE NELSON MANDELA :
UN TABLIER ULTRAMINCE

P. 20 | **GRAND PARIS EXPRESS**
LIGNE 15 SUD,
LE TEMPS DU GÉNIE CIVIL

P. 26 | **MARSEILLE - MONACO**
UNE DIGUE DE CAISSONS
GÉANTS EN BÉTON

P. 32 | **STREET ART ET GÉNIE CIVIL :**
UN PAS DE PLUS VERS
LA CRÉATIVITÉ



ÉDITO

Les travaux lancés dans le cadre du Grand Paris Express et l'attribution des JO 2024 à la ville de Paris génèrent et vont générer un niveau d'activités important dans les années à venir. Les constructeurs ont là une opportunité extraordinaire de concilier les exigences techniques, environnementales, économiques et sociétales. S'ils sont essentiellement souterrains, ces travaux concerneront aussi la création de nouveaux ouvrages tels que les gares. Il y a donc une formidable occasion pour le matériau béton de pouvoir répondre à toutes les exigences en optimisant la qualité des bétons et la pérennité des ouvrages dans un contexte général de complexification des projets. Et pour cela, il est important que les CCTP « béton » prennent en considération les évolutions normatives et réglementaires.

Dans ce contexte, il faut signaler l'excellente initiative de l'Association Française de Génie Civil (AFGC) qui a engagé des travaux visant à produire des recommandations pour les maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre pour rédiger les CCTP des ouvrages de Génie Civil en béton (ponts, ouvrages souterrains, tranchées couvertes, ouvrages en site maritime ou fluvial...). Cette démarche, qui a associé plus de 50 experts représentant l'ensemble de la profession, vise à expliquer les choix fondamentaux et à faciliter la rédaction des marches de travaux en mettant l'accent sur l'ensemble des éléments à fournir par le prescripteur, en explicitant la cohérence et les finalités des diverses normes et fascicules en vigueur et en permettant de prendre en compte les dernières évolutions des bétons. Disponibles sous format numérique sur le site de l'AFGC (<http://www.afgc.asso.fr/>). Elles ont vocation à être régulièrement complétées et mises à jour en fonction des évolutions du corpus normatif et réglementaire.

PATRICK GUIRAUD
DIRECTEUR GÉNIE CIVIL CIMBÉTON

CONSTRUCTION MODERNE

Créée en 1885, la revue *Construction Moderne* est éditée par l'association Cimbéton, centre d'information sur le ciment et ses applications - 7, place de la Défense 92974 Paris-la-Défense Cedex - Télécharger *Construction Moderne* sur www.infociments.fr
Présidente : Bénédicte de Bonnechose • **Directeur de la publication** : François Redron • **Directeur de la rédaction** : Patrick Guiraud • **Rédacteur en chef** : Norbert Laurent • **Rédacteur en chef adjoint** : Clothilde Laute • **Rédaction et réalisation** : Two & Two • **Conception graphique** : Zed Agency • **Directrice artistique** : Sylvie Conchon • Pour tout renseignement concernant la rédaction, tél. : 01 55 23 01 00 • **Abonnements** : par fax au 01 55 23 01 10 ou par e-mail à centrinfo@cimbeton.net

Couverture : passerelle Nelson Mandela à Creil - **Architecte** : Jean-François Blassel (SPAN), architecte - **Photographe** : Michel Denancé.

OFFRE SPÉCIALE

pour les maîtres d'ouvrage et les maîtres d'œuvre,
1 an d'abonnement GRATUIT.

Envoyez vos coordonnées à centrinfo@cimbeton.net

LA DÉFENSE

UNE NOUVELLE GARE BÂTIE DANS LES PROFONDEURS DU CNIT

Implantée à 35 mètres de profondeur à l'aplomb du CNIT à la Défense, la future gare du RER E fait l'objet d'un chantier entièrement souterrain avec des contraintes particulièrement complexes.

TEXTE : OLIVIER BAUMANN – REPORTAGE PHOTOS : OLIVIER BAUMANN ; ALINE BOROS ; © SETEC/EGIS/DUTHILLEUL/AREP/VINCENT DONNOT

La mobilité est au cœur des projets du Grand Paris. Outre le Grand Paris Express (GPE), ce réseau de 4 lignes de métro automatique de 200 km autour de Paris, plusieurs prolongations de lignes de métro et de RER sont programmées. C'est le cas de la ligne E du RER, dite « Eole », dont l'extension à l'ouest de Paris comptera trois nouvelles gares. Celle qui représente sans doute le plus grand défi technique est la future gare CNIT-La Défense. Car comme son nom l'indique, elle sera située sous... le CNIT, cette célèbre voûte triangulaire en coque de béton ultramine !

Un choix d'implantation qui n'était pas forcément évident *a priori* mais qui s'est imposé car il offrait le « meilleur compromis entre contraintes techniques et mise en connexion avec les autres lignes de transport de la Défense (ligne 1 du métro, Transilien, tram...) », explique Louis Canolle, directeur adjoint du projet pour le groupement de maîtrise d'œuvre. Une fois le site choisi, restait à positionner précisément la gare.

« Il fallait que le projet n'entraîne aucune sujétion technique sur la voûte du CNIT et qu'il soit le plus éloigné possible de ses fondations », précise Louis Canolle.

Logiquement, il a donc été décidé que la gare serait positionnée à l'équidistance des trois culées de la voûte du CNIT, tout en restant à bonne distance des tirants horizontaux qui les relient et qui assurent la stabilité de la coque. L'implantation verticale devait quant à elle respecter trois contraintes, dont l'une géologique : « La gare devait s'inscrire sous le niveau bas des parkings du CNIT, être à la bonne profondeur pour faciliter les correspondances avec les autres lignes de transport, et elle devait enfin être positionnée au-dessus des sables argileux de Cuise, peu favorables à l'ancrage de structures », poursuit Louis Canolle.

Au final, il a été décidé que la gare serait enterrée à 35 m sous le rez-de-chaussée du CNIT, dans le massif calcaire favorable de la Défense. Sa partie centrale de 110 m de long (pour une longueur de quai de 225 m),

Chiffres clés

Volume béton : 200 000 m³

Quantité d'armatures : 10 600 tonnes

33 m de large et 15 m de haut se trouve sous les constructions abritées par la voûte du CNIT, structurellement totalement indépendantes de celle-ci. Cet ensemble s'étage sur 5 à 11 niveaux et comprend notamment un centre commercial, un hôtel de luxe et quatre niveaux de parkings.

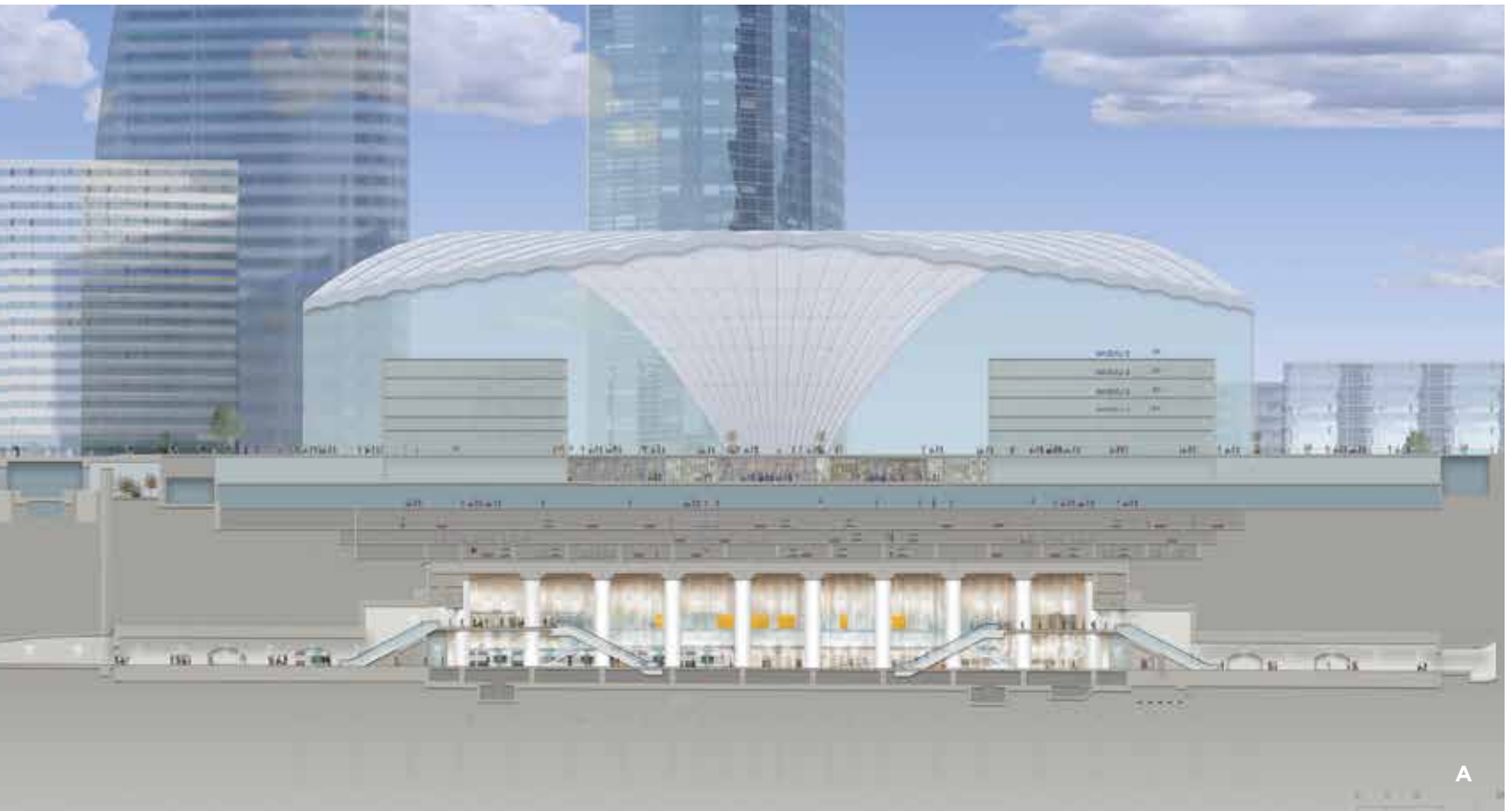
75 000 tonnes à reprendre en sous-œuvre

Il s'agissait donc de construire la gare en reprenant la totalité des quelque 75 000 tonnes de charges des bâtiments existants, sans qu'ils ne soient déstabilisés, et en gardant le CNIT en exploitation ! « La seule méthode qui permettait de garantir le contrôle des déformations était la reprise en sous-œuvre des structures de l'ensemble bâti », explique Guillaume Le Réveillé, directeur du projet pour le groupement constructeur piloté par Vinci Construction France.

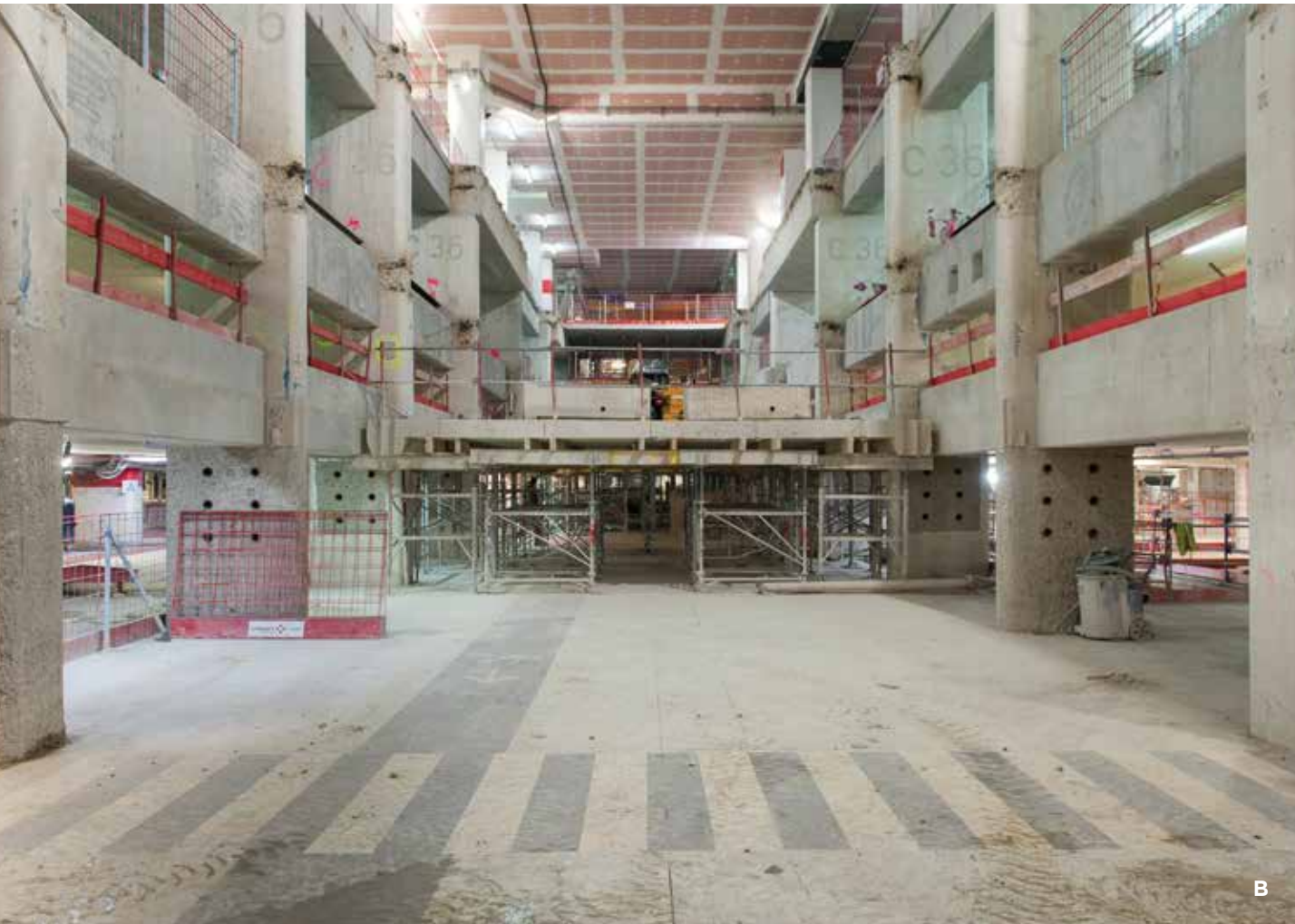
Les mouvements de 24 poteaux contrôlés simultanément

Pour reprendre simultanément les descentes de charges des 119 poteaux structurels existants,

Maître d'ouvrage : SNCF Réseau – **Maître d'œuvre** : Setec TPI (mandataire), Egis et Agence Duthilleul (architecte) – **Entreprises travaux** : groupement e-déf, Eole-La Défense : VINCI Construction France (mandataire), VINCI Construction Grands Projets, Dodin Campenon Bernard, Solétanche Bachy France, Botte Fondations, Spie Batignolles Génie Civil et Spie Batignolles Fondations – **Montant des travaux de la prolongation du RER E** : 3,8 Mds € – **Période de travaux** : avril 2016 - mai 2021 – **Mise en service de la ligne** : 2024.



A



B

A __
 La gare Eole est bâtie sous les bâtiments et parkings abrités par le CNIT.

B __
 Pour permettre l'accès au chantier, une « faille » de 90 m de long, 10 m de large et 20 m de profondeur a été découpée dans les dalles des parkings existants.

Du microbéton autoplaçant au béton projeté

Toutes les structures en béton de la gare sous le CNIT sont conçues et bâties pour une durée d'utilisation d'un siècle. Le laboratoire béton de VINCI Construction France a doté d'une formulation unique chaque partie de l'ouvrage. Parmi elles, la dalle de couverture sera coulée avec un béton de classe de résistance C 35/45 permettant de limiter les risques de fissurations. « Comme l'ouvrage est très épais – de 2,5 m à 2,75 m au droit des retombées de poutres –, il fallait limiter les gradients thermiques lors du bétonnage, décrit Marc Roussilhes. Pour ce faire, nous sommes partis d'un ciment à base de clinker auquel nous avons ajouté du laitier moulu et des cendres volantes, ce qui permet de limiter la chaleur d'exothermie. »

L'un des bétons les plus techniques est peut-être celui qui constitue les massifs précontraints de reprise en sous-œuvre des poteaux. « Vu la densité d'armatures très importante dans ces massifs (plus de 200 kg/m³), nous avons formulé un microbéton, c'est-à-dire un béton dont la granulométrie faible permet de s'assurer que l'enrobage est maximal. Très résistant (classe de résistance C 60/70), il est de plus autoplaçant, car les coffrages fermés dans lesquels il est coulé ne permettent pas le passage des aiguilles vibrantes. »

Par ailleurs, le projet donne la part belle au béton projeté par voie humide, utilisé en grand volume pour réaliser le soutènement temporaire des parois longitudinales et latérales de la gare à l'avancement du terrassement. « Les épaisseurs de béton projeté atteindront 80 cm, ce qui n'est pas courant », commente Marc Roussilhes.

...

un dispositif exceptionnel a été mis en place. Il consiste à transférer les efforts, qui étaient jusqu'ici repris par les semelles de fondation de chaque poteau, vers une structure d'appui provisoire. Pour ce faire, chaque poteau est moisé (c'est-à-dire « pris en tenaille ») par deux corsets de béton armé bridés par des barres de précontrainte. Ces massifs précontraints sont appuyés sur quatre groupes de micro-pieux, ancrés dans le sol sur une longueur de 12 à 15 m, par l'intermédiaire de charpentes métalliques. Une fois ce dispositif temporaire de reprise de charges des poteaux mis en place, la base du poteau peut être désolidarisée de la semelle de fondation par sciage. Les déplacements millimétriques liés au relâchement des tensions lors du transfert de charges sur les appuis temporaires sont contrôlés par un ensemble de vérins hydrauliques asservis. « Les vérins compensent les déplacements verticaux au dixième de millimètre liés au petit décalage existant entre les descentes

de charges calculées théoriquement et celles que l'on observe en pratique », décrit Marc Roussilhes, directeur de production pour le groupement d'entreprises. L'ampleur du système d'asservissement est sans équivalent : « Nous avons développé une centrale qui permet de contrôler la totalité des vérins de 24 poteaux simultanément », précise Marc Roussilhes.

« Ainsi, si une zone éloignée d'un poteau en cours de sciage subit des tassements plus élevés que prévu, le système d'asservissement permet de corriger ces déformations instantanément. »

L'ensemble est totalement sécurisé : des capteurs et des alarmes veillent à l'intégrité des circuits hydrauliques et la géométrie des ouvrages est vérifiée en continu. « En cas de perte de pression dans les vérins ou en cas de déplacement inopiné, une alerte est déclenchée et le système compense instantanément la défaillance. »

Construction de 61 piliers...

Une fois l'ensemble des poteaux repris en sous-œuvre, l'étape suivante consiste à réaliser les 61 piliers en béton armé de grand diamètre (3 m) qui soutiendront la dalle supérieure de la gare.

Pour ce faire, 61 « puits marocains » (des excavations verticales cylindriques blindées) de 4 m de diamètre et de 20 m de profondeur sont préalablement creusés. C'est à l'intérieur de ceux-ci que les piliers en béton seront ensuite coulés, depuis le fond vers le haut, dans des coffrages circulaires. L'embase des piliers est évasée, « en patte d'éléphant », afin de mieux répartir les contraintes s'appliquant sur le substratum calcaire.

... puis de la dalle supérieure de la gare

Lorsque les 61 piliers sont construits, la dalle supérieure de la gare est coulée. Ses dimensions, impressionnantes – 100 m de long, 60 m de large et 2,5 m d'épaisseur – en font un ouvrage très massif de 15 000 m³ de béton. « Il n'était pas envisageable de couler un tel volume de béton en une seule fois vu les contraintes d'accès des camions toupies », précise Marc Roussilhes. La dalle sera donc coulée en trente plots de 500 m³. « Le nombre de bétonnages a été défini à l'optimum des contraintes d'approvisionnement et de la volonté de limiter les reprises de bétonnage, qui augmentent les effets liés au retrait du béton », commente Marc Roussilhes. Une fois terminée, la dalle est vérinée sur les têtes des piliers définitifs de la gare, pour limiter et contrôler tous les mouvements millimétriques issus des transferts de charges de la phase suivante.

Car, puisque la dalle de couverture de la gare, qui constitue aussi le plancher du niveau bas des parkings existants, est maintenant achevée, les 119 poteaux existants, dont les charges avaient été transférées sur des appuis temporaires, sont mis en connexion avec elle. Le système de descente de charges est alors le suivant : les 119 poteaux existants sont soutenus par la nouvelle dalle supérieure de la gare, qui transfère ces efforts dans les 61 nouveaux piliers.



C ____
Les 119 poteaux existants sont repris en sous-œuvre afin de pouvoir construire la gare souterraine.

D ____
Le système de reprise en sous-œuvre consiste à transférer provisoirement les charges des poteaux vers des massifs de micropieux.

Un défi logistique

À la grande complexité du phasage de construction de la gare, s'ajoute celle de la logistique, qui représente un défi hors normes, en particulier dans le contexte très dense du quartier de la Défense. Entièrement souterrain, le chantier est ainsi alimenté depuis une dizaine de points d'accès, totalement invisibles depuis la surface, et doit respecter les conditions très strictes de circulation à la Défense, qui touchent à la fois les horaires et les gabarits. « Pour mieux contrôler les flux de nos camions, nous avons créé trois plates-formes logistiques à proximité de la Défense. Nos fournisseurs y livrent les matériaux avec leurs engins classiques, et nous nous chargeons de la logistique du dernier kilomètre avec des véhicules adaptés », illustre Guillaume Le Réveillé. Des camions toupies sont ainsi modifiés pour s'accommoder de la faible hauteur sous plafond des voies de dessertes du chantier. « Pour un même volume transporté (8 m³), nous avons réussi à gagner 30 à 40 cm de hauteur en modifiant l'angle d'inclinaison de la toupie », précise Marc Roussilhes.

Autre défi : pour permettre l'accès des hommes, des matériels et des matériaux au chantier, situé dans une zone confinée (2,20 m de hauteur sous plafond) au niveau - 4 des parkings existants, il a fallu créer une « faille ». Soit une entaille de 90 m de long, 10 m de large et 20 m de profondeur découpée dans les dalles existantes sur toute la hauteur des quatre niveaux de parkings. « Ce "canyon", qui servira d'accès à la gare en phase définitive, est équipé d'un pont roulant de 20 tonnes, par lequel sont descendus les engins et les matériaux, ainsi que d'une benne à déblais, qui permet d'évacuer les 150 000 m³ de terre excavée lors du terrassement en taupe de la gare », commente Guillaume Le Réveillé.

Le béton, mis en œuvre par pompage, est quant à lui approvisionné à 80 % à partir d'une centrale à béton spécialement installée pour le chantier en bord de Seine à Nanterre, doublée d'une centrale de secours sur le même site. L'installation est alimentée par barge directement depuis la Seine.

...

Terrassement en taupe

Cet équilibre structurel établi, le terrassement en taupe du vaste volume intérieur de la gare (150 000 m³) peut commencer. Les voiles latéraux et longitudinaux de la « boîte à chaussures » constituée par la gare sont alors réalisés à l'avancement du terrassement. Ils sont majoritairement consolidés en phase provisoire par de fortes épaisseurs de béton projeté puis cloutés. Une fois que les excavations ont atteint le fond de la gare, le radier est coulé. La « boîte », totalement terrassée, est désormais étanche, et le pompage d'eau continu destiné à rabattre la nappe phréatique peut être arrêté. Les dernières étapes sont celles de la construction, du bas vers le haut, du Génie Civil de la gare : les quais, les

escaliers et les accès piétons, ainsi que les mezzanines. Les extensions situées de part et d'autre de la reprise en sous-œuvre, destinées à accueillir les extrémités des quais de la gare, sont quant à elles construites dans des galeries excavées en souterrain en méthode traditionnelle.

Alors que les travaux de reprise en sous-œuvre battent leur plein, le coulage de la dalle de couverture de la gare devrait démarrer au printemps 2019. La livraison de l'ensemble de la gare est quant à elle prévue pour mai 2021.

Outre la gare sous le CNIT, le prolongement à l'ouest du RER E comprend la création de deux autres nouvelles gares : Nanterre La Folie et Porte Maillot. Si la première, établie sur une

emprise ferroviaire de fret en partie désaffectée, est aérienne, la seconde est souterraine. Implantée à 29 m sous la surface, à proximité immédiate de la station de la ligne 1 du métro, des lignes A et C du RER, ainsi que du parking du Palais des Congrès, sa construction, menée par un groupement piloté par Bouygues Travaux Publics, doit composer avec un environnement souterrain très dense. D'une longueur de 225 m, elle est en partie réalisée à ciel ouvert, en partie en souterrain.

Ces trois gares seront reliées au terminus actuel Haussmann-Saint-Lazare par l'intermédiaire d'un nouveau tunnel de 8 km. La majeure partie de cet ouvrage est réalisée sur 6,1 km au moyen d'un tunnelier à confinement de 9,6 m de diamètre (groupement Bouygues Travaux publics). Pour la traversée de la Défense, l'ouvrage monotube se divise en deux plus « petits » tubes – réalisés en méthodes traditionnelles par le groupement e-déf, Eole-La Défense –, un changement de conception qui permettra de limiter les interférences avec les ouvrages existants. ■

Un chantier réalisé « sous cloche »

Pour ne pas pénaliser l'activité commerciale du CNIT, ni perturber les riverains, le chantier est totalement isolé de son environnement par un « sarcophage » acoustique. Tapissant toutes les interfaces (plafonds et murs) entre la zone de chantier et les bâtiments du CNIT, cette enceinte, également coupe-feu, est constituée d'un complexe sandwich, intégrant une mousse isolante entre deux plaques de plâtre.

Les vibrations générées par les bruits solidiens sont quant à elles limitées grâce à un système de détection et de suivi rigoureux. « Lorsque les vibrations que nous générons dépassent des seuils définis par la maîtrise d'œuvre en lien avec l'exploitant du CNIT, nous devons adapter notre méthode de réalisation des travaux », explique Marc Roussilhes. Aux BRH (brise-roche hydrauliques) se substituent alors des engins de sciage, de croquage ou d'hydrodémolition, moins générateurs de vibrations.



E ____
 C'est par la « faille » que seront évacués les 150 000 m³ de terre excavée lors du terrassement en taube de la gare.

F ____
 Les massifs précontraints de reprise en sous-œuvre sont constitués d'un micro-béton autoplaçant très résistant.

LYON - TURIN

TUNNEL DE RECONNAISSANCE EN CONTEXTE DIFFICILE

Un tunnelier se fraye un chemin dans des sous-sols alpins perturbés. Leur hétérogénéité nécessite des reconnaissances pour définir les méthodes de creusement du tunnel de base de 57,5 km.

TEXTE : MICHEL BARBERON – REPORTAGE PHOTOS : TELT

À 700 m sous le massif alpin, sept jours sur sept, 24 heures sur 24, « Federica » grignote peu à peu la roche à une vitesse moyenne d'excavation de 13 m/jour. « Federica », c'est le tunnelier en charge des reconnaissances au niveau de Saint-Martin-la-Porte en vallée de Maurienne (Savoie). Mené à partir d'une descenderie de 2 400 m de long préalablement creusée, ce chantier baptisé « SMP4 » avance en direction de la descenderie suivante de La Praz qui devrait être atteinte en 2020, soit 8 737 m de tunnel à creuser. Déjà impressionnant en lui-même, ce chantier en préfigure un autre, hors normes : le tunnel de base de 57,5 km de long scindé en deux tubes parallèles à voie unique. Dans le projet de nouvelle liaison Lyon – Turin, ce tunnel représente l'ouvrage principal de la section transfrontalière entre Saint-Jean-de-Maurienne et Susa/Bussoleno dans le Piémont.

Entreprises dans l'axe et au diamètre du futur tube sud, ces reconnaissances en grandeur réelle visent à collecter le maximum de

données dans un secteur à la géologie particulièrement délicate. Ceci pour déterminer les méthodes et moyens les mieux adaptés pour excaver le « vrai » tunnel réparti en un tronçon de 12,5 km côté italien et un de 45 km côté français. Sur ce dernier, entre 2002 et 2010, trois galeries d'accès au futur tunnel transfrontalier ont déjà été réalisées : Saint-Martin-la-Porte donc, Villarodin-Bourget/Modane et La Praz. À celles-ci s'ajoute une quatrième, La Maddalena à Chiomonte en Italie. Ces descenderies serviront à mener sur plusieurs fronts le creusement du tunnel de base et, après sa mise en exploitation envisagée à l'horizon 2030, elles assureront la ventilation, permettront l'entretien, et l'accès aux services de secours en cas de nécessité.

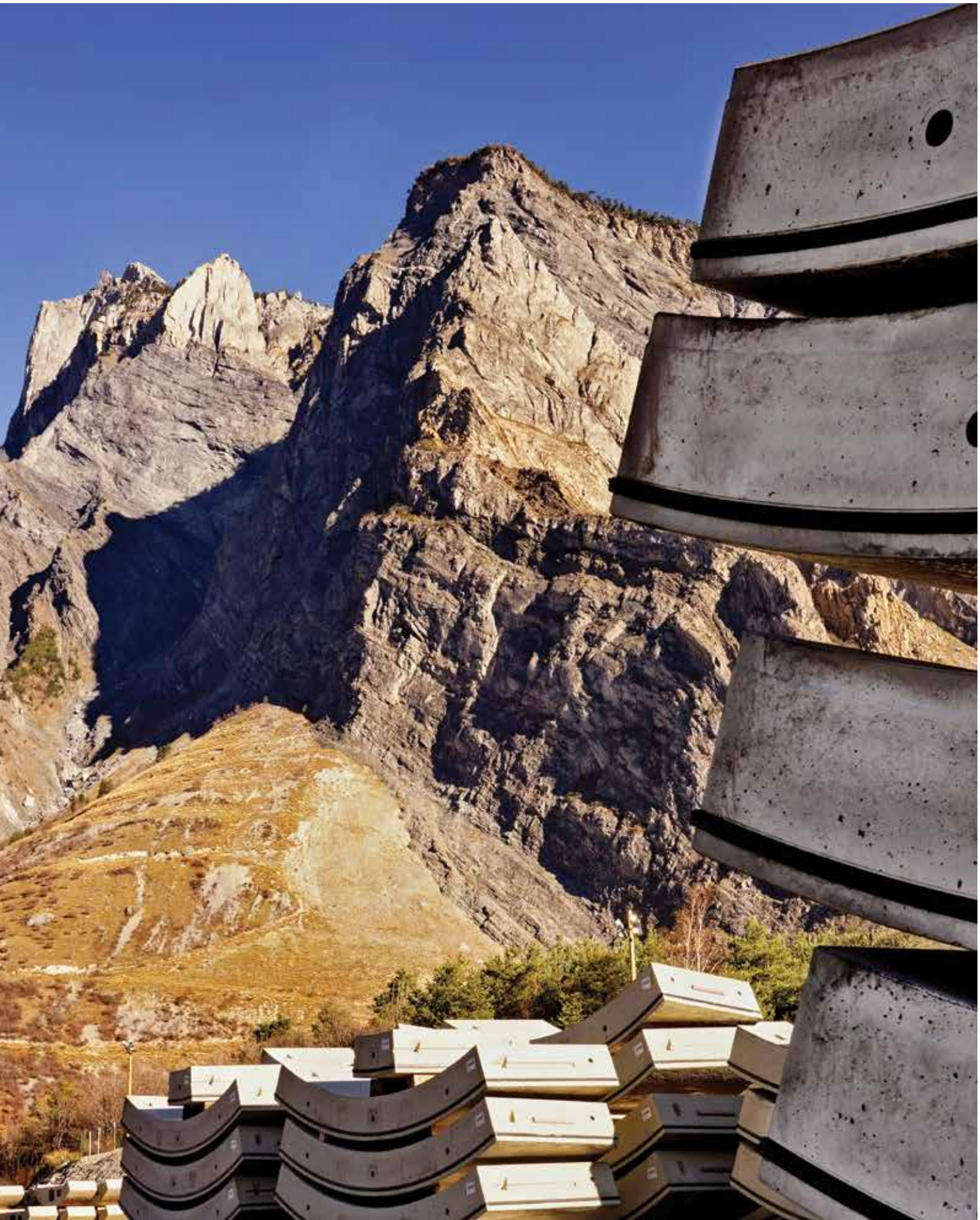
900 000 m³ de matériaux à extraire

Conçu et fabriqué par la société NFM Technologies dans son usine du Creusot (Saône-et-Loire), « Federica », tunnelier de type simple bouclier en mode ouvert, pèse quelque 2 400 t, mesure 135 m de long avec son train

suiveur, délivre une puissance de 5 mégawatts et sa progression moyenne atteint 10 cm par minute. Il est doté d'une tête de coupe d'un diamètre de 11,26 m comportant 76 molettes conçues pour roche dure qu'il brise avant évacuation des morceaux par l'arrière. Il avance grâce à 22 paires de vérins prenant appui sur le dernier anneau de béton posé. À l'avant, deux foreuses permettent d'effectuer des sondages à travers la jupe de la machine. Des sondages destructifs et des sondages carottés pour en extraire des échantillons qui révèlent la cartographie précise de la géologie. Le volume total de l'excavation sur les 8,7 km a été évalué à près de 900 000 m³ de matériaux, en partie valorisables en remblais, qui sont évacués par convoyeur jusqu'à un dépôt. Monté « à blanc » dans l'usine pour sa réception organisée le 14 janvier 2016 par le maître d'ouvrage TELT (Tunnel Euralpin Lyon Turin) et le groupement d'entreprises, le tunnelier a ensuite été démonté et ses énormes pièces acheminées de février à juillet 2016 par une centaine de convois, dont 34 exceptionnels, jusqu'à Saint-Martin-la-Porte, distante d'un peu plus de 400 km du Creusot. Transporté au fond de la descenderie au niveau du tunnel de base, l'ensemble a alors été reconstitué dans une imposante chambre de montage longue de 45 m, haute de 24 m et large de 23 m. « Federica » a été inauguré le 21 juillet 2016. Le creusement débute en octobre. Le 23 décembre, après seulement 308 m exca-

Le 24 février 2015, lors d'un sommet franco-italien, les deux pays signent l'accord d'engagement définitif des travaux. Le 26 janvier 2017, le Sénat vote l'approbation de l'accord.

Maître d'ouvrage : Tunnel Euralpin Lyon Turin (TELT) – **Maîtres d'œuvre :** Egis (France), Alpina (Italie) – **Groupement d'entreprises de Génie Civil :** Spie Batignolles TPCI (mandataire) ; Eiffage Génie Civil (gérant) ; Ghella SpA ; CMC di Ravenna ; Cogeis SpA ; Sotrabas – **Coût :** 390 M€ HT, financé à 50 % par l'Union européenne, 25 % par la France, 25 % par l'Italie.



Lyon – Turin ferroviaire, un projet colossal à 26 Mds €

La liaison ferroviaire transalpine mixte voyageurs/fret Lyon – Turin fait partie de la liste des 14 projets prioritaires de transport retenus dès 1994 par l'Union européenne dans le cadre de la réalisation d'un réseau transeuropéen de transport (RTE-T). Le coût total du projet est estimé par la Cour des comptes à 26 Mds €. La liaison se décompose en trois parties. Les accès français entre l'agglomération lyonnaise et Saint-Jean-de-Maurienne (Savoie), la section transfrontalière franco-italienne de 65 km entre Saint-Jean-de-Maurienne et Bussoleno en Piémont, comprenant le tunnel de base de 57,5 km. Enfin, les accès italiens entre le val de Susse et l'agglomération turinoise en Italie. À terme, c'est-à-dire pour une mise en service espérée vers 2030, la liaison devrait permettre d'acheminer 5 millions de voyageurs par an qui bénéficieront de temps de parcours considérablement réduits. Un trajet Lyon – Turin se fera en un peu moins de 2 heures, contre plus de 4 heures actuellement. Un Paris – Milan en un peu plus de 4 heures contre près de 7 heures... En ce qui concerne le fret, le tunnel de base permettra de s'affranchir des contraintes techniques liées aux fortes pentes de la ligne existante et de favoriser le report modal. À l'horizon 2035, plus de 40 % des échanges de marchandises dans la zone pourront ainsi être assurés par le mode ferroviaire, contre 8,8 % en 2015. Soit un report vers le rail de quelque 700 000 poids lourds...

•••

vés et 200 anneaux posés, la progression est très ralentie, puis complètement stoppée. La cause ? Un phénomène de surexcavation : il extrait jusqu'à quinze fois plus de matériaux que prévu ! Un surplus de très mauvaise qualité qui « embourbe » la machine et l'empêche d'avancer. Capable de creuser sans problème dans une roche dure et homogène, le tunnelier progresse en effet très difficilement dans un terrain hétérogène. Et là, il vient d'atteindre une faille, détectée lors des sondages préalables, constituée d'un conglomérat très friable de charbon et d'eau.

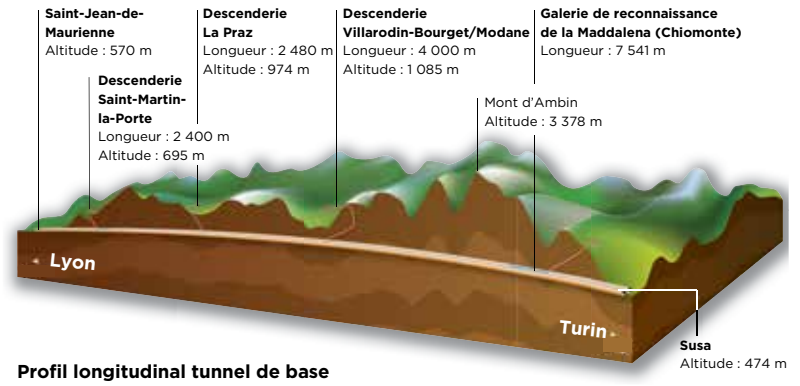
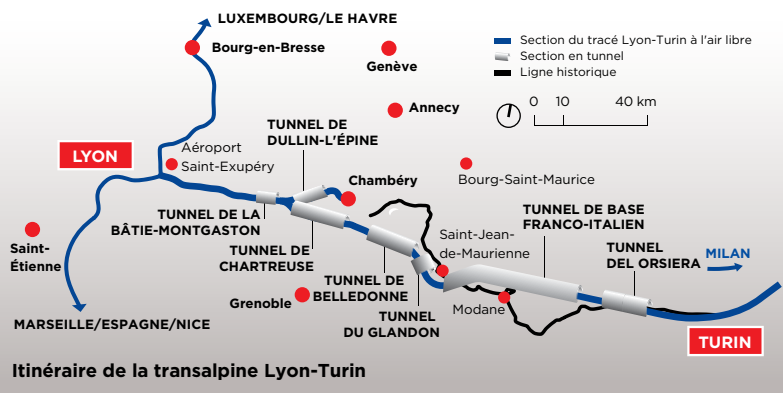
Les ingénieurs se doutaient que de tels aléas géologiques pouvaient être rencontrés, mais pas de si grandes dimensions. Cette veine houillère atteint 15 m de longueur. Le remède prescrit par les experts est double. Un apport de mousses expansives et de résines (30 tonnes !) pour homogénéiser et consolider la roche. « *Les résines injectées font liant, agissent comme une sorte de béton entre les parties déstructurées pour redonner au matériau une cohérence, une certaine dureté et permettre au tunnelier de pénétrer* », explique un responsable des travaux. La seconde solution mise en

œuvre consiste à refermer la tête de coupe par des tôles soudées afin de réduire l'afflux de matériaux à l'intérieur qui gêneraient la rotation de la roue. En prenant le maximum de mesures de sécurité pour préserver les ouvriers et la machine, le tunnelier repart le 28 février 2017, très lentement d'abord puisque deux mois et demi seront nécessaires pour franchir ces 15 m ! La reprise se fera progressivement à partir d'avril à un rythme normal de 10 à 15 m par jour, soit la pose quotidienne de 7 à 8 anneaux, marquée par quelques pointes à 19 m. Par précaution, pendant l'arrêt de la machine, la zone de faille a été consolidée par mise en place de cintres lourds destinés à soutenir les voussoirs et à éviter toute déformation des anneaux liée aux convergences du sol, un espace de 15 cm ayant été laissé volontairement entre ce dernier et la section utile du tunnel. Le revêtement de cette section délicate a par ailleurs entraîné la pose de voussoirs plus résistants. Le retour d'expérience sur les difficultés de cet accident géologique et les solutions mises en œuvre se sont avérés payants. En août 2017, « Federica » a rencontré le même type de terrain. Mais cette fois, il ne s'est pas arrêté.

300 000 m³ de béton pour 8,7 km de tunnel

Entre les descenderies de Saint-Martin-la-Porte et de La Praz, les 8 737 m du tunnel équivalent à 5 824 anneaux. Un anneau étant constitué de 7 voussoirs universels, d'une clé et d'un voussoir de radier, le total représente 52 416 voussoirs, chacun d'eux nécessitant en moyenne de couler 3 m³ de béton. Ils sont fabriqués à la chaîne dans une ancienne scierie transformée pour la circonstance en usine de production. Elle se situe à 3 km du chantier, une faible distance réduisant les acheminements des voussoirs qui sont transportés par semi-remorques jusqu'à des dépôts où ils sont déchargés à l'aide de ponts roulants. Le processus industriel automatisé avec 45 moules qui se déplacent de poste en poste à l'aide d'un carrousel permet une production quotidienne de 90 voussoirs. Le groupement d'entreprises a confié la fourniture des bétons à SATM Grands Travaux (Société Auxiliaire de Transport et de Matériel, filiale du groupe Vicat). Deux centrales à béton ont été installées sur la commune de Saint-Martin-la-Porte. La première est opérationnelle depuis mai 2015 à l'entrée de la descenderie sur le site des Saussaz pour la production des bétons conventionnels (125 000 m³). Sur le site des Cillettes, la seconde centrale produit les bétons de voussoirs (165 000 m³) de deux types : BPS C45/55 XA2 XC4 pour la plupart des voussoirs et BPS C80/95 XA2 XC4 pour ceux de radiers.

Première en France, le remplissage du vide annulaire se fait par l'injection d'un bicomposant qui assure le maintien de l'anneau dans l'axe et le confine afin de limiter les déplacements ou son ovalisation. Il permet également une répartition homogène des efforts du terrain autour de l'anneau. Ce bicomposant est un mélange de deux composants A et B. Le premier (A) est un superfluide dosé avec un agent retardant : ciment + bentonite + eau + retardant + éventuelles cendres volantes. Le second (B) est un accélérateur ajouté au composant A, immédiatement avant l'injection dans le vide annulaire par la jupe et (ou) les voussoirs. ■



A —
 Sur un linéaire de 8 737 m de longueur à creuser, le tunnel atteint déjà plus de 4 000 m.

B —
 Fabriqués à la chaîne, chaque voussoir nécessite en moyenne 3 m³ de béton. Leur nombre total atteindra 52 416.

C —
 Travaillant 24 h/24, 7 j/7, le tunnelier « Federica » creuse et construit le tunnel à une cadence moyenne quotidienne de 13 m.



LA RÉUNION - MARSEILLE - AJACCIO

LE BÉTON AU SECOURS DE LA BIODIVERSITÉ MARINE

Favoriser le repeuplement des fonds marins : le nouveau défi lancé au béton, qui par sa grande plasticité, sa durabilité et sa résistance s'adapte aux contraintes physiques et de biodiversité.

TEXTE : SYLVIE ROMAN – REPORTAGE PHOTOS : ÉTIENNE CLAMAGIRAND ARCHITEUTHIS ; JULIEN DALLE SEABOOST ; FLORIAN LAUNETTE ; XtreeE

Pour favoriser la reprise de la vie marine face au dépeuplement des ressources halieutiques, les récifs artificiels se développent peu à peu dans le monde. La France n'est pas en reste, et plusieurs entreprises développent des solutions innovantes où le béton trouve toute la place qui lui revient...

« La grande souplesse et les possibilités d'emplois et de formes qu'offre le béton, sa durabilité et sa résistance représentent pour moi une réponse des plus prometteuses », défend Étienne Clamagirand, architecte marseillais, chercheur et développeur de solutions marines au sein de Architeuthis.

À la Réunion, des récifs alvéolés pour la route du Littoral

Si l'on retient de cet ouvrage d'art les figures élancées de ses piles s'égrainant le long d'un relief accidenté, la route du Littoral recèle un secret : des récifs artificiels formés de 120 casiers préfabriqués en béton pour repeupler les fonds marins.

Une année d'étude et de mise au point a été nécessaire pour répondre aux contraintes locales hors normes, notamment une probabilité de « vague centennale » et des cyclones. Les casiers sont ainsi conçus pour résister à des pressions de plus de 10 tonnes par mètre carré, correspondant à l'impact d'une vague de 13 m de haut. Les casiers Panal® pèsent 630 kg et ils ont été produits

dans l'usine de MPB (filiale de Bonna Sabla) à Lunel en CCV (Composite Ciment Verre) : « un matériau composé de produits inertes et totalement adapté aux milieux naturels », explique Éric Lobbé, ingénieur en charge du programme chez MPB.

La première difficulté a été de réaliser les moules nécessaires à la fabrication des éléments en béton, qui sont tout sauf réguliers, et de pouvoir démouler parfaitement.

« Les modules de 1,5 m de haut et 1 m de large sont alvéolés en nids d'abeilles, mais leur forme est très complexe et non linéaire, avec 1 200 faces », détaille Étienne Clamagirand. En effet, le Panal® est constitué d'alvéoles hexagonales toutes différentes, tant en surface qu'en forme : certaines sont aplaties, d'autres sont petites et légèrement arrondies, et pour compliquer la tâche des concepteurs du moule, l'architecte a dessiné un casier avec des profondeurs diverses (de 15 à 40 cm), pour une épaisseur de béton très fine, moins de 2 cm.

La forme finale du casier a été validée suite à plusieurs essais dans l'océan Indien, à proximité immédiate de l'emplacement des futures piles du viaduc, avant de lancer la production en série. Ces essais et validations portaient sur la colonisation du module en béton, mais bien évidemment aussi sur sa résistance face aux fortes houles de la Réunion, et sa durabilité. Insérés dans des cadres en acier inox, les 120 casiers

ont été fixés sur les piles, avant qu'elles ne soient ensuite acheminées par la barge *Zourite* et positionnées en mer.

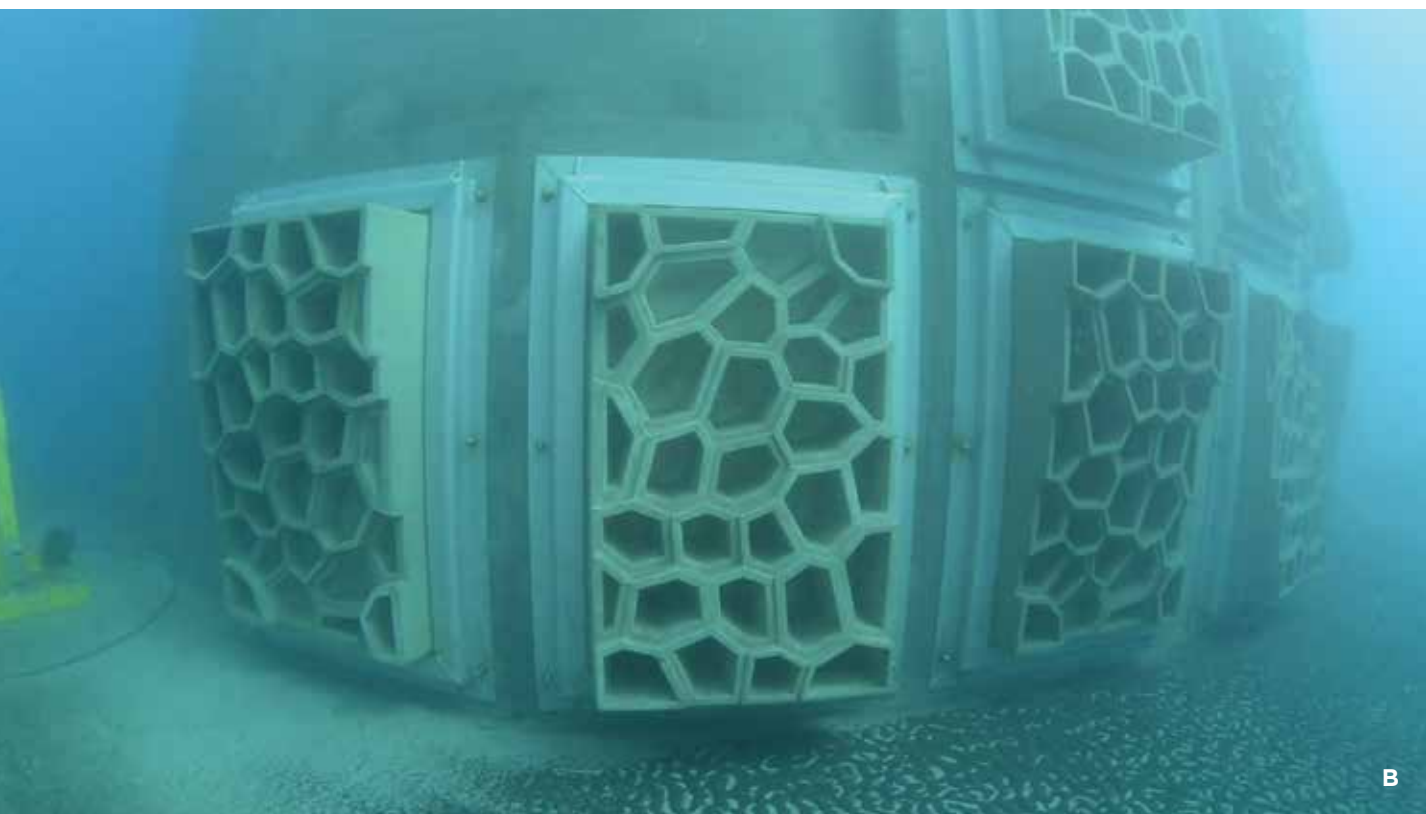
Dans les Calanques, des récifs expérimentaux en béton

La zone maritime du Parc National des Calanques a été confrontée dans le passé à un certain niveau de pollution, avec pour conséquence une dégradation de la faune et de la flore marines. C'était notamment le cas dans la calanque de Cortiou, au large de l'exutoire de la station d'épuration de Marseille. Mais malgré une qualité des eaux de rejet s'améliorant (grâce à des travaux sur la station d'épuration), les fonds marins restent très pauvres. Aussi, pour pallier cette situation, le projet REXCOR (restauration expérimentale des petits fonds côtiers de la calanque de Cortiou) fait le pari d'un repeuplement grâce à l'installation de récifs artificiels sur quatre sites d'immersion – des villages – éloignés de 300 à 400 m les uns des autres, et immergés entre 10 et 25 m de profondeur. Cette opération expérimentale et scientifique, soutenue par le Parc National des Calanques et cofinancée par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, se déroule sous la maîtrise d'ouvrage de CDC Biodiversité (groupe Caisse des dépôts), avec pour concepteur et constructeur Seaboost (groupe Egis) et Architeuthis. Le projet REXCOR comprend trois types de modules, mis à l'eau au cours de l'hiver 2017-2018.

•••



A



B

A __
 Marseille, calanque de Cortiou, un village, par moins 25 m. Constitués de différents types de récifs, des Rague et Fractal®, les villages répondent aux besoins de plusieurs espèces de poissons.

B __
 À la Réunion, les casiers Panal® réalisés en CCV, insérés dans des cadres en acier inoxydable et scellés sur les piles du viaduc de la route du Littoral.

Avis d'expert

Alain Guillen, directeur général de XtreeE

Impression de béton 3D, technologie de pointe et expérimentale pour les récifs

Le programme de récifs artificiels dans la zone marine du Parc National des Calanques permet d'expérimenter l'impression 3D de modules en béton de 1,5 tonne, technique développée par XtreeE en partenariat avec Seaboost, concepteur de la modélisation.

Quelle est la valeur ajoutée de la technologie 3D dans la réalisation d'un module ?

La technologie 3D développée par XtreeE a permis de créer une complexité architecturale « poreuse », particulière, qui reproduit très fidèlement un habitat naturel de la Méditerranée : le coralligène. Des formes avec des volumes si complexes qu'elles seraient impossibles à produire avec des techniques classiques.

Pour ce projet précis, à 30 m de profondeur, avec des contraintes de durabilité et de résistance intenses, l'impression 3D n'implique-t-elle pas des qualités particulières du béton ?

Nous ne développons pas le béton, nous n'effectuons pas de recherches sur la formulation, mais nous travaillons avec des producteurs de façon à obtenir les propriétés particulières attendues*. Nous intervenons sur la numérisation, la robotisation des tâches, la reproductibilité. Nous travaillons sur la chaîne numérique complète, du dessin à la maquette jusqu'au parcours du robot, qui commande la tête d'impression. Notre système prend en charge l'ensemble des opérations de la chaîne d'impression. Depuis le malaxeur automatisé, le béton arrive par pompage directement vers la tête d'impression. La qualité du béton est donc primordiale, bien sûr !

Pour le récif, l'une des contraintes venait de la finesse des parois de béton, environ 2 cm, et des formes très tortueuses, alvéolées, qui reproduisent fidèlement des récifs. L'autre contrainte de taille, c'est la durabilité du béton dans l'eau de mer, à 30 ans, et sa résistance. L'utilisation de ce type de technologie est une première, et nous savons à présent qu'elle est industrialisable.

L'un des avantages mis en avant est la reproductibilité des objets imprimés, puisqu'il n'y a pas de moule, et la facilité de changer des paramètres à la demande...

En fait, dès lors que tous les calculs sont validés, les qualités du béton, aussi, on peut rectifier certains paramètres, par exemple le volume, les dimensions, et tout est recalculé automatiquement. On pourrait par exemple imaginer un récif carré, ou rond, ou deux fois plus grand ! Tout serait calculé et imprimé... Ce programme expérimental permet de valider notre savoir-faire, pour une industrialisation à plus grande échelle.

* Le béton utilisé pour le récif des Calanques est un béton à hautes performances développé par Lafarge Holcim.

...

330 tonnes de béton au service des poissons

Le Fractal® HD (Heavy Duty) est développé par Architeuthis depuis plusieurs années : « Il s'agit d'une dalle de béton non armé, pour éviter tout risque de corrosion des armatures », précise l'architecte Étienne Clamagirand, « et réalisée avec une formulation très spécifique en CCV fabriquée par l'entreprise MPB à Lunel ». La dalle hexagonale de 12 cm d'épaisseur présente des côtés de 1 m, pour une masse de 400 kg. Un système de tirants permet de solidariser les plaques entre elles, selon des figures géométriques multiples. Ainsi, dans le parc des Calanques, « 10 modules Fractal® HD ont été assemblés, pour former une sorte de fleur de lotus de 2,5 m de hauteur et pesant 10 tonnes », explique l'architecte, puis solidarisés dans l'usine à une plaque en béton pour en assurer la stabilité ». C'est d'ailleurs l'un des défis auxquels a été confronté le groupement d'entreprises : la mise en place des différents modules, leur grutage et leur positionnement le plus précis possible sur les fonds marins par l'entreprise Foselev Marine, avec l'énorme contrainte des intempéries et de la houle, assez présente sur cette partie de côte.

Béton biogène

Le Rague est « développé au travers d'une approche biomimétique et s'inspire d'écosystèmes rocheux naturels méditerranéens. Il offre de multiples anfractuosités de tailles et de volumes différents », précise Matthieu Lapinsky, biologiste marin chez Seaboost. Il est constitué d'un ensemble de dalles posées les unes sur les autres, en béton non armé et de forme circulaire mais non homogène, de 2,5 m de haut et 13 tonnes ! Ces dalles, d'un diamètre de 3 m et une vingtaine de centimètres d'épaisseur, ont été réalisées avec un béton « biogène » (classe de résistance C70/80) développé par Seaboost et Lafarge Holcim dans le cadre d'un partenariat. « Il s'agit d'un béton bicouche mis en œuvre en un seul coulage, et offrant une parfaite résistance, grâce à une couche dense structurelle, et une autre, poreuse et structurelle mais



C



D

C ____
Dalles Rague en béton bicouche de Seaboost, sur le quai, avant leur mise à l'eau dans la calanque de Cortiou.

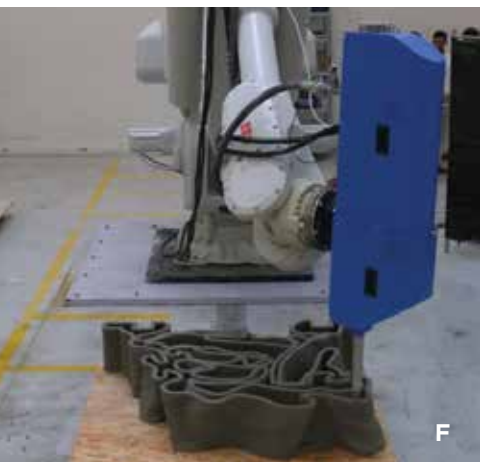


E

D ____
À la Réunion, le Panal®, « casier » alvéolé en CCV, conçu pour résister à une pression de plus de 10 tonnes par mètre carré.

E ____
Le récif biomimétique imprimé en 3D, par XtreeE et Seaboost, à 25 m de profondeur, dans la calanque de Cortiou.

F ____
L'imprimante en action : la tête d'impression déverse peu à peu le béton, selon la numérisation des plans (Seaboost et XtreeE).



F



G

G ____
Détail des différentes couches imprimées en 3D.

Avis d'expert

Alexandre Musnier, ingénieur travaux chez Seaboost (entreprise Génie Écologique)

Vous êtes spécialisé dans le Génie Écologique en milieu marin, pourquoi vous être intéressé à l'impression 3D ?

Nous suivons la technologie 3D depuis plusieurs années, de même que le biomimétisme, afin de créer des modules avec une fonctionnalité écologique importante et mieux adaptée aux besoins du milieu marin.

Le récif réalisé en impression 3D béton est en sorte la concrétisation de ces années de recherche et développement technique...

En effet, le partenariat avec l'entreprise XtreeE nous a permis de concevoir un récif de nouvelle génération en nous affranchissant de beaucoup de contraintes liées à la fabrication classique en béton. Il présente un ratio de volume et de diversité d'habitat écologique par rapport à son poids et à son volume sans communes mesures avec ce qui a été fait dans le secteur du Génie Écologique.

•••

plus favorable à la colonisation », détaille Alexandre Musnier, qui a piloté le projet. La stabilité de ces mastodontes des mers a été validée par un laboratoire spécialisé dans la modélisation et le calcul des fluides et des houles marines.

Le récif Connectivité, développé par Seaboost, est un procédé mixte, constitué de deux plaques de béton ancrées sur une dalle béton, et dans lesquelles viennent s'insérer des sortes de poches tubulaires métalliques, remplies de fibres végétales et de coquilles. De 1,5 m de hauteur et 1,5 m de longueur, et d'une masse de 2 tonnes, il présente lui aussi l'avantage de s'assembler en fonction de la longueur de récif que l'on souhaite mettre en œuvre et, surtout, des espèces ciblées. Plus expérimentale encore, la réalisation d'un récif en béton avec une imprimante 3D par XtreeE, en partenariat avec Seaboost, une première mondiale.

En Corse, du béton biomimétique pour repeupler la Grande Bleue

Malgré ses eaux cristallines, l'île de Beauté n'est pas épargnée par la perte de biodiversité et la raréfaction des ressources halieutiques. Aussi, au large d'Ajaccio, l'Office de l'Environ-

nement de la Corse (OEC) a lancé en 2016 un projet expérimental de récifs artificiels, afin de favoriser le repeuplement de la faune sous-marine. « *Le site de Ricantu a été choisi pour cette expérience, car il présente plusieurs avantages* », précise Alexandra Agostini Nardini, responsable du programme à l'OEC.

Située à proximité de l'aéroport, la zone est interdite de pêche et de mouillage, idéale donc pour mettre en place une « nurserie ». Par ailleurs, les fonds marins sont vaseux et sablonneux et proches de l'estuaire de deux fleuves, riches en nutriments pour les poissons. Trois types de modules, « *tous des prototypes* », souligne Alexandra Agostini Nardini, ont été immergés en août 2017 : deux utilisent des modes constructifs usuels (support béton et métal), mais avec des applications et des conditions de mise en œuvre très précises, le troisième découle de la recherche appliquée. Ce récif artificiel en béton a été développé par Sylvain Pioch et Jean-Claude Souche, docteur en Génie Civil, enseignant-chercheur à l'École des mines d'Alès, et plongeur apnéiste. « *Il fait appel aux principes du biomimétisme et reproduit très fidèlement, grâce à un coffrage adapté et très particulier de l'entreprise LIB Industries (Nîmes), l'état de surface*

d'une roche naturelle, avec ses différentes aspérités, indispensables pour attirer les espèces ciblées, homards, sars, daurades... »

Le coffrage a servi pour la réalisation des prototypes par l'entreprise Isula Service, qui a mis en place des armatures de béton armé, puis coulé un béton formulé avec un ciment PM (Prise Mer) « *disponible localement, facile à mettre en œuvre et garantissant la résistance requise* », explique Jean-Claude Souche. Cette option d'un ciment classique pour des ouvrages en mer offre un avantage indéniable, la maîtrise des coûts.

Puis des tests ont permis de définir la formulation idéale pour une prise à la fois rapide du béton, avec la forte contrainte des anfractuosités, tout en garantissant la résistance et la durabilité des ouvrages.

Par ailleurs, chercheurs et entreprise ont mené des tests de coloration des bétons mis en œuvre, afin d'obtenir une pluralité des teintes et un mimétisme le plus parfait possible avec le milieu sous-marin.

L'autre contrainte venait des conditions de mise en place des éléments par moyens nautiques et subaquatiques, dans ce secteur de forte houle et de coups de vent récurrents. L'ensemble du récif est composé de 9 éléments en béton, des rochers artificiels en quelque sorte, posés entre 20 et 30 m de profondeur, recréant ainsi un habitat biomimétique et quasi indécélable, même pour un œil de plongeur averti.

Le choix de plusieurs modules de « seulement » 2,5 tonnes, simplement posés les uns sur les autres, est stratégique. « *Il a permis d'avoir recours à des engins de levage portuaire classiques, présents à Ajaccio et facilement mobilisables* », précise Alexandra Agostini Nardini. Cette grande proximité est d'ailleurs le maître mot de cette opération expérimentale, facilement duplicable dans d'autres sites de l'île.

Cette opération fait aussi l'objet d'un suivi écologique (comptages ichtyologiques, suivi de la faune-flore fixée...) jusqu'en 2020. Les premières constatations confirment que les récifs en béton sont d'ores et déjà adoptés par les poissons. ■



H



I

H __
 Calanque de Cortiou, le récif Connectivité (Seaboost) mettant en œuvre des dalles de béton PM et des pochons en métal remplis de coquilles et fibres naturelles.



J

I __
 Le récif Fractal® HD immergé dans la Grande Bleue : 10 modules de 400 kg arrimés sur une dalle. Une fleur de 10 tonnes pour repeupler la mer.

J __
 Plongeur en action : mise en place d'un récif Rague par moins 20 m.

K __
 Dans le parc des Calanques, mise à l'eau du Fractal®, avec des moyens de levage exceptionnels.



K



L

L __
 Le CCV, Composite Ciment Verre, et ses alvéoles irrégulières, plébiscitées par les poissons sur la route du Littoral.

CREIL

PASSERELLE NELSON MANDELA : UN TABLIER ULTRAMINCE

Reliant une rive urbaine à un parc naturel, la passerelle Nelson Mandela résout la dualité par une structure asymétrique suspendue très épurée.

TEXTE : DELPHINE DÉSVEAUX – REPORTAGE PHOTOS : MICHEL DENANCÉ

Conçue par l'ingénieur-architecte Jean-François Blassel (SPAN) et les experts du bureau d'études RFR, la passerelle Nelson Mandela enjambe l'Oise sur 112 m. Dédiée aux piétons et aux cyclistes, cette « agrafe » entre ville et nature offre une esthétique délicate : la finesse d'un ruban de béton pour le tablier, un réseau arachnéen de suspentes, un mât en acier flanqué au milieu des arbres, des massifs d'ancrage en béton presque invisibles, des béquilles très discrètes, aucun impact dans la rivière, très peu dans le parc paysagé de l'île Saint-Maurice où les transparences sont préservées, et une aménité urbaine dans l'espace public du nouveau quartier. L'analyse du site révèle un contraste entre les deux berges : en rive gauche, le parc arboré de l'île Saint-Maurice s'adosse aux coteaux boisés qui mènent au plateau de Creil ; en rive droite, l'ancien quartier industriel de Gournay fait l'objet d'une rénovation urbaine pilotée par l'ANRU. Si l'asymétrie répond à cette dualité, la solution « suspendue » a été guidée par l'obligation de ne pas gêner le trafic fluvial. Ancré dans le sol de l'île Saint-Maurice par des

tirants, le mât (un V inversé de 28 m de haut) se fond dans la végétation. Arrimés en tête du mât, deux câbles porteurs franchissent l'Oise jusqu'à la culée « urbaine » dont la forme en A transfère les efforts au sol. Le réseau de suspentes croisées fixées aux câbles porteurs reprend les charges dissymétriques à la manière d'un treillis. Ainsi suspendu, le tablier en béton armé franchit l'Oise en une seule travée de 80 m d'une minceur extrême : moins de 30 cm d'épaisseur aux extrémités et seulement 17 cm au centre. L'ouvrage dégage un rectangle de navigation de 7 m au-dessus du niveau de l'eau.

Économie structurelle

Le tablier est constitué de voussoirs en béton préfabriqués sur site. Facilitant l'assemblage du tablier, la préfabrication à joints conjugués a permis un contrôle précis de la géométrie du tablier et de la qualité de surface du béton. Les éléments ont été positionnés par barge, levés par grue et reliés à des suspentes verticales provisoires afin d'éviter la compression du tablier pendant le montage. Une fois les suspentes réglées et la géométrie définitive

Chiffres clés

Longueur tablier : 112 m
(+ 100 m rampe rive droite)

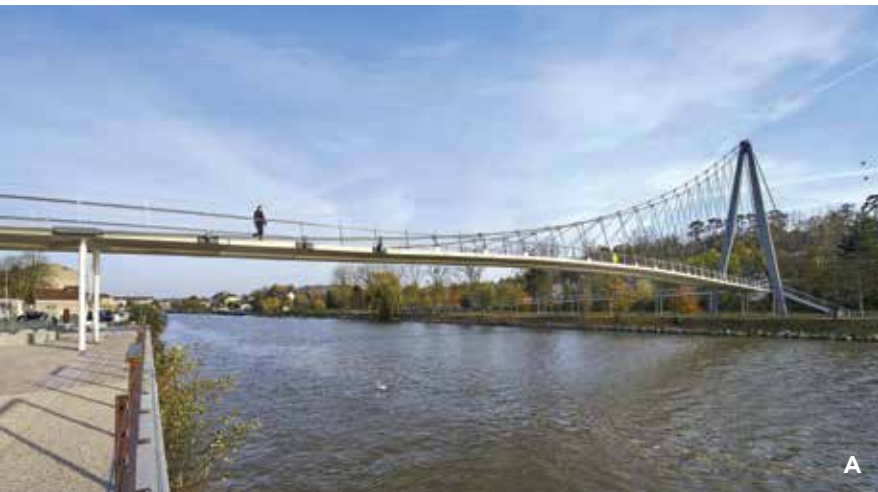
25 voussoirs : de 4 x 4 m et 8 t environ chacun

Béton : C 35/45 pour le tablier et les massifs d'ancrage

atteinte, le tablier est rendu monolithique par clavage, activant le fonctionnement structurel en treillis entre le tablier béton, les suspentes diagonales et les câbles porteurs. L'ouvrage se prolonge de part et d'autre par deux rampes en pente douce. En rive droite, la rampe « urbaine » emprunte le même vocabulaire que le tablier, créant un long ruban de béton qui s'étire sur presque 200 m. Portée par de fins potelets, elle couvre une partie de la place Fichet et sert de préau aux élèves de la nouvelle école Danièle Mitterrand... Sur les deux ouvrages en béton, la matière est restée telle quelle, sans parement ni étanchéité. Pareille simplicité est rare. Mais pour Jean-François Blassel, c'était une fin en soi : enseignant l'architecture postcarbone à Marne-la-Vallée, il prône l'économie de matière et l'intérêt de revenir à l'essentiel : « Dans une période où les ressources sont précieuses, il faut mettre la stricte quantité de matière et d'énergie. Nul besoin d'en faire plus que nécessaire. J'ai voulu que cet ouvrage soit un chemin, non un objet. » ■

Maître d'ouvrage : communauté de l'agglomération creilloise – **Maître d'œuvre** : Jean-François Blassel (SPAN), architecte ; RFR Ingénieurs, BET structure – **Entreprises** : Bouygues TP Régions France – **Coût** : 5,2 M€ TTC (valeur 2015) – **Livraison** : août 2015.

Prix de l'ouvrage d'art de l'Équerre d'argent 2017.



A



B



C



D



E

A ____
Pour ne pas gêner la navigation, l'ouvrage est suspendu.

B ____
Une agrafe entre ville et nature.

C ____
Sur le tablier, le béton n'a pas de revêtement.

D ____
Le tablier en béton franchit l'Oise en une seule travée de 80 m.

E ____
Le mât se confond dans la végétation.

GRAND PARIS EXPRESS

LIGNE 15 SUD, LE TEMPS DU GÉNIE CIVIL

La ligne 15 Sud est la première du Grand Paris Express (GPE) à être entrée en travaux. Les chantiers de Génie Civil ont commencé dans toutes les gares et dans plusieurs ouvrages annexes.

TEXTE : DELPHINE DÉSVEAUX – REPORTAGE PHOTOS : SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS : JULIE BOURGES, GÉRARD ROLLANDO, VALENTIN DESJARDINS, FLORENCE JOUBERT

La ligne 15 Sud sera mise en service en 2024. Longue de 33 km, elle dessert par voie souterraine 22 communes, 16 gares depuis Pont-de-Sèvres (92) jusqu'à Noisy-Champs (93 et 77) et concerne la vie d'un million de personnes. À ces données, s'ajoutent 4 km de raccordement au site de maintenance des infrastructures à Vitry et au site de maintenance et de remisage du matériel roulant à Champigny. Entre 2015 et 2017, la majorité des déviations des réseaux concessionnaires ont été réalisées. Les huit marchés de Génie Civil ont été attribués en 2016 et 2017 pour un montant total de 3,7 Mds €. Depuis, les chantiers montent en puissance. Leur impact économique est perceptible : fin septembre 2017, 208 M€ étaient engagés auprès de 513 PME, dont 337 franciliennes. 2 000 personnes, encadrement compris, travaillent sur la ligne. Plus du double est attendu en 2019.

Chiffres clés

33 km en souterrain

16 gares dont 15 en interconnexion avec les radiales (RER, métro, tramway)

150 000 voussoirs

22 communes desservies

dans 4 départements : Val-de-Marne, Hauts-de-Seine, Seine-Saint-Denis, Seine-et-Marne

Les tunneliers et les tunnels

S'inscrivant dans un contexte urbain très dense et passant sous des zones de bâtiments de grande hauteur, aux fondations profondes, la ligne 15 Sud est marquée en 2018 par l'entrée en action des tunneliers. La présence d'anciennes carrières – qui seront comblées avant le passage du tunnelier – et la nature de certaines strates géologiques obligent à creuser à plus de 40 m de profondeur par endroits. Les gares les plus « superficielles » se situeront à une vingtaine de mètres sous terre, les plus profondes à 50 m. À titre de comparaison, le métro parisien se trouve en moyenne à 10 m sous la surface du sol.

Dix tunneliers seront nécessaires pour creuser la ligne 15 Sud. Ils évolueront à une profondeur comprise entre 15 et 55 m à une vitesse moyenne de 10 à 12 m/j. Le creusement du premier tunnel, un tronçon de 2,2 km pour raccorder le site de maintenance et de remisage (Champigny) à la ligne principale (Villiers), a démarré en avril 2018. Le creusement du tunnel inter-gare entre Noisy-Champs et Bry-Villiers-Champigny (4,7 km) a débuté en septembre 2018. C'est sur ce tronçon qu'auront lieu les premiers essais de matériel, en 2022. Chaque tunnelier est introduit dans le sous-sol par un puits en parois moulées. Une fois les parois coulées, le volume intérieur est terrassé, le radier construit, tandis que les parois sont soutenues par des butons.

Le tunnelier est ensuite placé sur le radier, assemblé avec une roue de coupe adaptée à la nature du sous-sol traversé. Les déblais issus du creusement sont broyés puis remontés en surface. Les voussoirs préfabriqués en béton sont acheminés par wagon à l'arrière du tunnelier, puis posés au fur et à mesure du creusement grâce à un érecteur. Une fois assemblés, ils forment un anneau de béton armé (7 voussoirs ; 9,5 m de diamètre extérieur) qui constitue le revêtement définitif du tunnel. Le tunnelier avance en excavant le sol par pas successifs correspondant à la longueur de chaque anneau. Il prend appui à l'aide de vérins sur l'anneau précédent. Cette technique en continu garantit un soutènement permanent du tunnel.

Les parois moulées de la gare Pont-de-Sèvres

La gare souterraine de Pont-de-Sèvres est implantée sous le quai Georges Gorse en rive droite de la Seine, dans une zone dense en termes d'infrastructures routières et de bâtiments, et en bordure immédiate de la Seine. Les opérations de Génie Civil de la gare et de dévoiement des réseaux existants ont commencé en octobre 2017. Outre la boîte gare, l'infrastructure se prolonge par un couloir de correspondance souterrain avec le métro M9 et par une émergence sur le quai. Ces trois parties comportent une enceinte en parois moulées (1,50 m d'épaisseur, 45 m de profon-



A —
Lancement
du premier
tunnelier
du Grand
Paris Express
à Champigny,
février 2018.

•••

leur pour des quais à 28 m de profondeur). Les parois ont été réalisées avec un béton de résistance élevée pour répondre aux exigences du chantier (limitation des déplacements, faible butée des terrains).

La dalle de couverture de la gare Fort d'Issy-Vanves-Clamart

À l'intersection des communes de Clamart, Issy-les-Moulineaux, Vanves et Malakoff, la nouvelle gare est en interconnexion avec la ligne N du Transilien. C'est le premier grand chantier de la ligne 15 Sud, lancé en avant-première en mai 2016 pour être à l'heure au rendez-vous fixé quatre ans plus tôt par la SNCF entre les 12 et 16 août 2017.

– Réalisation des parois moulées et de la dalle de couverture

Situé sous la gare existante de Clamart et les quatre voies ferrées en exploitation, le chantier sert aussi de point d'arrivée aux deux tunneliers des lots adjacents, T3A et T3C. Les travaux de Génie Civil ont commencé par le décaissement d'une partie de l'emprise est, à proximité de l'implantation finale de la future gare, pour préfabriquer la dalle de couverture trapézoïdale. Réalisée en béton armé et sans joint de dilatation, elle a été coulée en six plots successifs sur étaielement.

En parallèle, la SNCF a installé une passerelle piétons provisoire et remplacé les voies ferrées existantes par quatre tabliers provisoires à double travée afin de procéder aux terrassements en sous-œuvre sans impacter la circulation des trains. L'objectif était de libérer un gabarit de 6 m de hauteur pour réaliser les parois moulées. Ces dernières sont rehaussées par des voiles de 4,50 m de hauteur qui servent d'appuis définitifs à la dalle. Grâce à une cadence élevée, tout était prêt pour lancer le ripage.

– Ripage de la dalle de couverture

Du 12 au 16 août 2017, 42 chariots automoteurs multiroues ont déplacé la dalle (7 000 tonnes, 77 m de long, 24 à 53 m de large, 1,50 m d'épaisseur) jusqu'à son emplacement définitif. Durant 96 h – mieux que

les 100 h prévues –, il a fallu démonter les ponts provisoires, libérer l'emprise de la couverture, faire riper (3 h) et sceller la dalle, réaliser les travaux d'étanchéité sur la dalle, qui sert aussi de couverture à la gare, installer la plate-forme ferroviaire et les rails, faire les tests, reposer les caténaires, reconstruire les remblais de part et d'autre du toit...

Gare Châtillon-Montrouge

La nouvelle gare Châtillon-Montrouge est constituée d'un corps principal souterrain, d'un accès et d'un couloir de correspondance, mi-souterrain mi-aérien. Les quais sont situés à 33 m de profondeur (quatrième niveau de sous-sol). Au cœur de la boîte gare, une grande trémie en forme de losange est bordée par des circulations verticales qui reprennent le principe d'escalier à double volée du château de Chambord. L'objectif est de théâtraliser les circulations, de « susciter une expérience de la grande hauteur, valoriser la profondeur, la rendre tellurique », selon l'architecte David Trottin.

– La réalisation de la boîte gare

Les travaux de Génie Civil ont commencé au premier trimestre 2018. Des parois moulées (1,80 m d'épaisseur) ceinturent la boîte gare. Au sud, les panneaux plongent jusqu'à 65 m de profondeur pour reprendre les efforts générés par les appuis du bâtiment voyageurs et du projet connexe en surplomb. L'ensemble de la structure est réalisé en béton armé. Les planchers sont portés par un système de poteaux ancrés dans la craie et de poutres « butonnantes » (1,5 m à 2 m d'épaisseur) ou par des liernes qui reportent les efforts sur les poutres afin d'assurer un auto-équilibrage des poussées. Aucun poteau ne monte jusqu'à la dalle de couverture, d'une épaisseur constante de 2 m, qui assure le butonnage en tête des parois moulées. La gare est réalisée en sous-œuvre, à l'abri de la dalle de couverture.

Le pont-dalle d'Arcueil - Cachan

Au nord-ouest de Cachan, la gare est construite à proximité de l'actuelle gare RER B pour assu-

rer l'interconnexion. Son implantation se double d'un programme mixte (logements, bureaux, hôtel et commerces) afin de valoriser le quartier autour de la gare.

Comme à Fort d'Issy-Clamart-Vanves, un passage est prévu sous la voie du RER B. La première phase a consisté à réaliser les fondations (pieux et parois de soutènement) du pont-dalle de part et d'autre du talus de la voie ferrée. D'avril à mai 2017, Sogea TPI a construit les trois longrines qui supportent le tablier et creusé des galeries sous les voies pour réaliser les deux culées définitives du pont ainsi qu'un pilier central temporaire. La construction du pont-dalle prééquipé (quais, candélabres, ballast) s'est déroulée de mai à octobre 2017 à proximité de son futur emplacement. Comme son nom l'indique, il sert à la fois de toit pour la future gare et de tablier pour la ligne RER B. Le trafic a été interrompu entre le 1^{er} et le 5 novembre 2017, le temps de déposer la voie ferrée, les systèmes ferroviaires, les quais, les équipements et de terrasser le remblai avant l'étape clé du ripage. Le top départ a été donné à 1 h 18 dans la nuit du 1^{er} au 2 novembre 2017. Le tablier en béton (40 m de long, 13 m de large, 3 000 t) a été glissé à l'aide de câbles tirés par des vérins « avaleurs » selon la méthode développée par l'entreprise Freyssinet. À 9 h 58, l'ouvrage était positionné à l'aplomb des culées, soit une vitesse moyenne de 5 km/h pour franchir les 26 m. Restait à reconstituer le talus, poser la nouvelle voie, raccorder les quais, installer les équipements de signalisation, les tester, finaliser les travaux de Génie Civil en comblant les vides entre le tablier et le talus, réaliser les essais dynamiques à vide... Le tout aura duré 124 heures. (Les travaux de construction des parois moulées de la boîte gare ainsi que le creusement du puits d'accès qui accueillera l'un des 10 tunneliers sont en cours.)

Les parois moulées de la gare de Villejuif Institut Gustave Roussy

La construction de la gare s'accompagne d'une grande opération d'aménagement du quartier Campus Grand Parc (80 ha), l'une des



B



C



D



E



F

B
Ripage de la dalle de couverture pour la gare Fort d'Issy - Vanves - Clamart.

C
Puits d'essai de Boulogne.

D
Ripage du pont-rail à Champigny.

E
Avancée du chantier à Arcueil - Cachan avec mise en place du pont-dalle.

F
Ripage du pont-rail à Champigny.

Avis d'expert

Guillaume Pons, directeur de projet de la ligne 15 Sud, Société du Grand Paris

Pourquoi la ligne 15 Sud est la première à être mise en service ?

À l'origine, elle était effectivement la plus avancée pour deux raisons : ce secteur du Val-de-Marne avait été bien décanté par l'association Orbival et c'est la zone de charge attendue la plus conséquente du Grand Paris Express. Mais avec la nouvelle feuille de route, l'échéance est passée à 2024 juste après les lignes ou tronçons de lignes nécessaires aux sites des JO en 2024.

Quels sont les moments les plus intéressants des chantiers en cours ?

Les travaux les plus spectaculaires sont ceux qui ont été réalisés par RATP et SNCF. Ce sont des emprises où soit la gare, soit un couloir de correspondance, soit une sortie passe sous le faisceau ferroviaire, ce qui impose des dispositions particulières : en 2017, le passage d'un ouvrage cadre à Champigny ; la construction et le ripage d'une dalle de couverture à Clamart ; le ripage d'un pont ferroviaire à Cachan. En 2018, plusieurs opérations importantes ont eu lieu : du 19 au 21 mai, SNCF a procédé au passage d'un couloir de correspondance aux Ardoines après que les parois de la gare et les terrassements ont été réalisés. À Vert-de-Maisons, SNCF réalise un couloir de correspondance en sous-œuvre des quais du RER. À Créteil-l'Échat, RATP a mis en place un « couloir de lien avec la ville » sous la ligne 8 entre mi-juillet et mi-août. L'opération s'est déroulée à ciel ouvert avec interruption de la circulation. En novembre prochain, RATP va lancer le ripage du pont-rail de Noisy-Champs, sous lequel va s'implanter la totalité de la gare.

La ligne 15 Sud présente-t-elle des complexités particulières ?

Ce qui est exceptionnel sur cette ligne, c'est la profondeur des parois moulées en béton armé qui sont situées largement sous le radier des gares pour assurer leur stabilité mécanique et hydrogéologique. Du fait de la géologie à Saint-Maur-Créteil par exemple, les quais sont implantés à 52 m de profondeur, sous le RER A et un immeuble. Les parois moulées (1,80 m d'épaisseur) plongent à 70 m. Idem à Vert-de-Maisons, avec une épaisseur moindre (1,50 m). On est très clairement dans des dimensions exceptionnelles pour ce type de travaux. Les entreprises savent faire, mais réaliser ces parois avec les joints d'étanchéité entre deux panneaux sur une telle profondeur reste un challenge.

La nature des chantiers induit des volumes de béton considérables.

Avez-vous spécifié des exigences particulières ?

La Société du Grand Paris a voulu faire des cahiers des charges standards. Un livret béton impose sur un certain nombre de gares des contraintes fortes en termes d'étanchéité entre les panneaux en béton armé des parois moulées pour prévenir toute infiltration à l'intérieur de l'ouvrage. Les exigences portent également sur les voussoirs en béton armé et la SGP a prévu d'expérimenter le béton fibré pour certains tronçons de tunnel.

•••

plus importantes de la métropole parisienne. Outre des opérations de logements et la réhabilitation de plusieurs grands ensembles collectifs, Grand Parc verra l'implantation du futur cluster français de la santé.

La gare s'inscrit sur neuf niveaux souterrains, à 49 m de profondeur, où se situent les quais de la ligne 15 Sud, en interconnexion avec ceux de la ligne 14. Les travaux de Génie Civil ont commencé en mai 2017 avec les terrassements et les parois moulées des locaux techniques. La réalisation des parois circulaires du puits central accueillant la gare a débuté en novembre.

La méthode utilisée pour les parois moulées est classique, mais il s'agit néanmoins d'un chantier de grande ampleur compte tenu de la forme cylindrique et de la profondeur de l'ouvrage (plus de 50 m). Le forage des panneaux est réalisé à la benne mécanique. Au fur et à mesure du creusement, un coulis de bentonite est substitué au terrain excavé. Des cages d'armatures sont positionnées dans la tranchée. Un joint est posé aux deux extrémités pour assurer l'étanchéité de la paroi avec les panneaux adjacents. Le béton est coulé dans la tranchée du bas vers le haut. Il chasse la bentonite qui remonte à la surface et qui est traitée pour être réutilisée. Les parois sont réalisées par panneaux successifs de 7 m de large.

Le pont-rail de Champigny Centre

Le projet de l'agence Richez & Associés prévoit un accès à l'est, sous les voies de la Grande Ceinture, ce qui nécessite d'insérer un pont-rail en béton armé dans le talus de la voie ferrée. Comme à Clamart ou à Cachan, le cadre en béton du pont-rail a été préfabriqué sur une plate-forme. Après interruption du trafic, le talus est creusé, 6 000 m³ de terre sont évacués. Le portique en béton (3 600 t) a ensuite été déplacé à son emplacement définitif, 47 m plus loin, au rythme de 2 ou 3 m/h (17 h au total). Une fois le ripage terminé, les rails et les équipements des voies sont réinstallés. La réalisation des parois moulées de la gare a commencé au premier trimestre 2018. ■



G



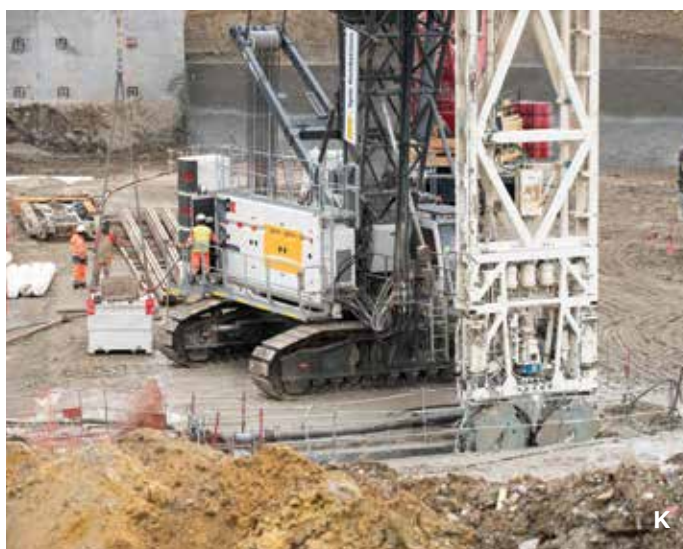
H



I



J



K

G, H ___
Pont-dalle
à Arcueil -
Cachan.
Après
le coulage et
quelques jours
avant le ripage.

I ___
Réalisation
du pont-dalle.

J ___
Début de
l'opération
de ripage
du pont-dalle.

K ___
Chantier des
parois moulées
à Villejuif
Institut Gustave
Roussy.

MARSEILLE - MONACO

UNE DIGUE DE CAISSONS GÉANTS EN BÉTON

En 2025, la principauté sera dotée d'un nouvel écoquartier de 6 hectares, baptisé l'Anse du Portier et entièrement bâti sur une extension de la ville en mer.

TEXTE : OLIVIER BAUMANN – REPORTAGE PHOTOS : VALODE & PISTRES ARCHITECTES ; OLIVIER BAUMANN ; BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS – ANDROMÈDE OCÉANOLOGIE ; HELIOS IMAGE

Avec ses 2 km², la Principauté de Monaco est le deuxième plus petit État indépendant du monde après le Vatican. À partir de la deuxième moitié du xx^e siècle, pour faire face à la croissance de sa population, la cité princière s'est étirée verticalement, avec la construction de nombreuses tours d'habitation, et horizontalement, avec l'aménagement de plusieurs extensions en mer.

Sous le règne de Rainier III, surnommé « le prince bâtisseur », 20 % de sa superficie actuelle ont ainsi été gagnés sur la mer. Aux premières extensions majeures, celles du Portier et du Larvotto, réalisées au début des années 60, succédera la plus importante, celle du quartier de Fontvieille, sur une surface de plus de 20 ha, achevée en 1973.

Lorsqu'au printemps 2013, le prince Albert II annonce sa décision de lancer une nouvelle extension, baptisée l'Anse du Portier, il s'inscrit ainsi dans la continuité de son père.

D'une superficie de 6 ha, ce nouvel écoquartier exclusivement piétonnier accueillera, en 2025, 60 000 m² de logements de très grand luxe, 3 000 m² de commerces et des équipements publics, dont un parc végétalisé et une extension du Grimaldi Forum de 5 000 m². En juillet 2015, le groupement SAM l'Anse du Portier a retenu Bouygues Travaux Publics pour un contrat de conception-construction de l'infrastructure maritime.

Résister à la houle, aux séismes et... aux tsunamis !

L'ensemble de ces programmes sera installé à la surface d'un gigantesque terre-plein gagné sur la mer. Pour protéger cet aménagement de grande ampleur des assauts de la houle et le confiner, il a été prévu de le ceinturer d'une ligne très robuste et épaisse de 18 caissons géants en béton armé. Ceux-ci prennent la forme de blocs de 10 000 tonnes aux dimensions d'un immeuble de 10 étages : 25 m de

Chiffres clés

Montant total des travaux d'infrastructures
842 M€ HT

56 mois de travaux

18 caissons : 86 000 m³ de béton
18 000 tonnes d'armatures,
dont 3 500 tonnes en acier inoxydable :
soit un total de 10 000 tonnes/caisson

haut, 28 m de longueur et 30 m de large en moyenne. « Les caissons sont répartis en sept types différents, mais chaque unité possède en réalité une géométrie unique, dessinant un trapèze dans une coupe en plan, une forme qui permet à l'ensemble de suivre la ligne courbe dessinée par la digue », décrit Éric Cheype, directeur travaux pour Bouygues Travaux Publics.

L'enveloppe extérieure des caissons constituée de quatre voiles de 70 cm d'épaisseur est contreventée par une grille de voiles intérieurs orthogonaux de 35 et 45 cm d'épaisseurs formant jusqu'à 24 cellules. « Ces contreventements sont destinés à reprendre les nombreuses sollicitations mécaniques que les caissons subiront une fois la ceinture en place, à savoir les efforts générés par la houle, les séismes et même les tsunamis ! », poursuit le directeur du chantier, précisant que les ouvrages ont été conçus en antici-

Autorité concédante : Principauté de Monaco – **Groupement de concession pour la conception, la réalisation et la commercialisation de l'opération** : Société Anonyme Monégasque « L'Anse du Portier » composée de : **Constructeurs** : Bouygues Travaux Publics, Bouygues Bâtiment Sud-Est, Bouygues SAS ; Engeco, JB Pastor & Fils ; Michel Pastor Group, Smetra – Satri **Architectes, urbanistes, paysagistes** : Alexandre Giraldi, Patrick Raymond ; Valode & Pistre Architectes ; Michel Desvigne ; Renzo Piano, Emmanuel et Olivier Deverini – **Bureau d'études techniques, environnement** : Egis, Oasis, Somibat, MBA (AMO), JB Pastor & SNEF, Creaplan, A9C – **Contrôleur technique** : Socotec, Cowi.



A —
 La nouvelle extension de l'Anse du Portier fait gagner à Monaco 6 ha sur la mer. Le futur écoquartier s'inscrit entre deux réserves naturelles marines : celle du Larvotto au nord et celle des Spélugues au sud.

B —
 Les programmes de l'extension (logements de très grand luxe, commerces...) seront fondés sur un remblai de sable marin. La face supérieure de la ceinture de caissons accueillera une promenade piétonnière.

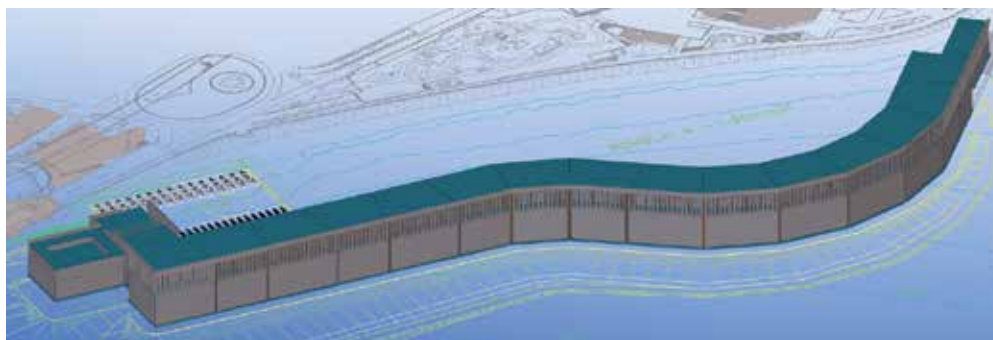
•••

pant une élévation du niveau de la mer liée au réchauffement climatique. En partie haute de chaque caisson, dans la zone de marnage, une chambre d'atténuation – dite chambre Jarlan – est ménagée pour briser les vagues et atténuer leur énergie. Une « grille » – constituée d'une quinzaine de poteaux de 7,5 m de haut et de sections carrées de 0,9 m – marque l'entrée de cette cavité de béton.

Un chantier principalement marin

Inédites, les méthodes constructives ont été conçues afin de maximiser la productivité du chantier et de minimiser son impact sur l'environnement. Par manque de place, il n'était pas envisageable d'accueillir le chantier de préfabrication des 18 caissons sur la Principauté de Monaco. Après avoir évalué les potentialités de plusieurs sites, c'est finalement au cœur du bassin est du Grand Port Maritime de Marseille que le consortium a décidé de l'installer. Il y occupe 8 ha de plans d'eau et plus de 2 ha de terre-pleins, dont 1 ha de surface destiné au façonnage des armatures et au montage des coffrages des caissons.

Le mode opératoire de construction, réalisé totalement depuis la mer, est inédit en France. Les caissons sont fabriqués l'un après



La ceinture de confinement de l'extension est constituée de 18 caissons en béton armé géants. Leur forme trapézoïdale, unique pour chacun d'eux, permet de dessiner une ligne courbe. Chaque caisson est jointoyé à ses voisins sans liaisonnement mécanique.

l'autre dans un « caissonnier », une barge unique en son genre, à la conception très ingénieuse. Haute de 27 m, large de 50 m et longue de 56 m, cette usine flottante de 4 600 tonnes, baptisée Marco Polo, dispose d'un poste de commande qui permet de contrôler son niveau d'immersion, sa stabilité et son inclinaison afin qu'elle reste en permanence parfaitement horizontale.

Chaque caisson est construit au sein du caissonnier suivant un mode opératoire identique : du bas vers le haut, à l'aide d'un coffrage glissant dont la cadence moyenne d'élévation a été fixée à 12 cm/heure. Particularité de cette opération : « Le coulage de béton est en continu et ne s'arrête que lorsque le sommet

du caisson a été atteint, soit en moyenne au bout de 10 jours », explique Éric Cheype. Pour assurer la continuité de coulage tout en satisfaisant à l'ensemble des contraintes de durabilité auxquelles l'ouvrage est soumis, une formule unique d'un béton adapté a été mise au point (voir encadré p. 30).

Quand le caisson s'alourdit, le caissonnier s'enfonce dans l'eau

La première étape de construction consiste à réaliser le radier du caisson (700 m² et 80 cm d'épaisseur) sur le pont du caissonnier, alors hors d'eau. Puis le coffrage glissant est installé : sa géométrie est réglée avec précision en fonction de celle du caisson à réaliser. Il peut alors démarrer son ascension, grâce à la poussée coordonnée de 186 vérins hydrauliques, pour réaliser des passes de 1,2 m. Ce sont alors 250 à 300 m linéaires de voiles en béton armé qui sont coulés simultanément à chaque levée.

Au fur et à mesure que le caisson prend de la hauteur, il s'alourdit, ce qui a pour effet de faire progressivement « couler » le caissonnier sur lequel il est posé. Si bien qu'une fois le sommet du caisson atteint, sa « moitié » basse est immergée (tirant d'eau moyen de 13 m). « Le ballastage du caissonnier permet alors de « décoller » le caisson et de le mettre en flottaison », décrit le directeur du chantier. Il est alors déplacé jusqu'à un deuxième atelier, situé à quelques dizaines de mètres de là, où sont réalisés les poteaux en béton armé constituant la « grille » d'entrée de la chambre Jarlan.

Un bétonnage 24 h/24 et 7 j/7 !

L'enjeu principal du chantier de fabrication des caissons est la productivité. « L'objectif est de réaliser un caisson tous les dix jours », explique Éric Cheype. Pour tenir ce rendement très soutenu, le coulage de béton est continu. Il s'effectue en travail posté de 3 équipes, 24 h/24 et 7 j/7, avec un objectif d'élévation moyenne de 12 cm/heure. Autant dire que la logistique d'approvisionnement et les équipes de travaux doivent être parfaitement rodées pour assurer cette continuité.

Le volume impressionnant de béton nécessaire à la fabrication de chaque caisson (3 600 m³ pour les treize plus gros, hors poteaux Jarlan) est ainsi coulé par l'intermédiaire de trois mâts de bétonnage, capables de placer le béton en tout point du coffrage glissant. Ces mâts sont reliés en contrebas à autant de pompes à béton, elles-mêmes alimentées en permanence par deux à trois camions toupies par heure, en provenance des deux centrales à béton des industriels Lafarge et Cemex, la première étant située sur le port de Marseille, l'autre à proximité. Pour sécuriser l'approvisionnement et la production, des pompes de secours et une troisième centrale à béton sont disponibles à tout moment.



C



D



E



F



G

C ____
Le coulage de chaque caisson dans un coffrage glissant intégral est réalisé en continu 24 h/24 et 7 j/7. L'élévation moyenne est fixée à 12 cm/h.

D ____
Les caissons sont fabriqués l'un après l'autre dans un caissonnier installé dans le bassin est du Grand Port de Marseille. Ce dock flottant unique en son genre s'enfonce dans l'eau au fur et à mesure que le caisson prend de la hauteur et s'alourdit.

E ____
Afin d'éclaircir la teinte des poteaux Jarlan en béton qui resteront visibles en phase définitive, leur formulation intègre du dioxyde de titane.

F ____
Le bétonnage continu des caissons est réalisé par l'intermédiaire de trois mâts de bétonnage, reliés sur le quai à trois pompes à béton, alimentées par des camions toupies béton.

G ____
Vue de la future chambre Jarlan, dont la fonction est d'atténuer l'énergie des vagues.

Une formule de béton unique pour tous les ouvrages

Afin de garantir un haut niveau de productivité, il a été décidé d'utiliser une formule de béton unique pour couler la totalité des structures des caissons. Celle-ci a été mise au point durant neuf mois par les experts béton de Bouygues Travaux Publics, en tenant compte de l'ensemble des contraintes – parfois antagonistes – auxquelles seront soumises les structures.

Le béton doit ainsi être durable dans le temps (ouvrage conçu pour une durée d'utilisation de 100 ans) et résister aux chlorures marins. Mais il doit simultanément présenter une excellente pompabilité, pour que les pompes de bétonnage puissent servir les zones les plus éloignées, situées à 200 m de là et à 25 m de haut, et faire prise suffisamment rapidement pour tenir le rythme des cadences imposé par le coffrage glissant. Pour cela, il a été fait appel à un béton de classe de résistance C35/45, très fermé puisqu'il dispose d'un rapport E/C très faible (0,39). Pour maintenir sa bonne ouvrabilité, plusieurs types d'adjuvants sont employés : des superplastifiants et des retardateurs de prise.

Le ciment est quant à lui de type CEM V PM/ES. « *Ce ciment comporte une proportion importante de cendres volantes et de laitiers de hauts-fourneaux, ce qui limite la chaleur générée lors de la prise du béton, et donc les risques de fissuration* », complète Éric Cheype.

Dans les caissons, la densité d'armatures est très importante, puisqu'elle atteint 250 à 350 kg/m³ de béton. Dans les poteaux Jarlan, elle est même de 450 kg/m³. Pour garantir encore la durabilité structurelle des caissons, l'acier au carbone classique des armatures est remplacé par de l'acier inoxydable dans les zones immergées et de marnage. De plus, pour accroître « l'étanchéité » des bétons au jeune âge – une fois décoffrés, les voiles se retrouvent rapidement immergés – et empêcher la pénétration des ions chlorures, une résine Masterseal est appliquée au rouleau sur les parties immergées. Enfin, sur les parties des caissons qui resteront émergées, et donc visibles depuis la mer, la teinte est éclaircie pour des raisons esthétiques, par ajout de dioxyde de titane dans la formulation.

•••

Les caissons convoyés, puis échoués à Monaco

Une fois cette étape finalisée, les caissons, toujours flottants, sont stockés sur un troisième site. Jusqu'à six caissons peuvent y être stockés avant d'être remorqués un par un jusqu'à Monaco au cours d'un périple marin d'une durée de 48 à 72 heures. Là, ils sont ballastés puis échoués sur un remblai d'assise préalablement préparé et vibro-compacté. Une fois le caisson positionné, l'eau utilisée pour le ballastage est remplacée par un matériau de lestage de granulométrie 0/20. Les travaux de finition des caissons – dalles

de couverture et superstructures de protection de la future promenade – peuvent alors se dérouler.

Les opérations précédentes se répètent pour le caisson adjacent. Une fois mis en position sur le remblai d'assise, il est simplement jointoyé au caisson précédent, sans liaisonnement mécanique.

Fin 2019, la ceinture de caissons devrait être terminée. Les opérations de remblaiement du terre-plein par 600 000 m³ de sable marin en provenance de Sicile achèveront les travaux d'infrastructures. La plate-forme sera alors prête à accueillir le nouvel écoquartier.

Au final, depuis 2015, il faudra 56 mois aux équipes travaux pour mener à son terme ce chantier ambitieux, essentiellement réalisé depuis la mer.

Le tout en restant particulièrement attentif à la maîtrise des impacts écologiques du projet.

Un chantier au milieu de deux réserves marines

La future extension tangente deux réserves marines protégées, les réserves du Larvotto et des Spélugues. L'ensemble des travaux de construction à Monaco se déroule ainsi sous haute surveillance environnementale.

Des mesures de protection sont prises à chaque phase du chantier. En amont d'abord, des espèces protégées situées sur l'emprise du chantier ont été déplacées. 518 m² d'herbiers de posidonie, 143 grandes nacres (30 à 40 cm de haut) et un ensemble de rochers colonisés par une algue protégée appelée *Lithophyllum bissoïde* ont ainsi été transférés dans les différentes réserves.

Des mesures sont également mises en œuvre durant le chantier. En remuant les sédiments du fond de la mer, les opérations de dragage préalables et de construction du remblai d'assise des caissons génèrent de la turbidité. Pour la limiter, un système de suivi continu a été mis en place : des bouées permettant de surveiller son niveau et de déclencher des alertes si nécessaire. Lorsque celui-ci est dépassé, des mesures d'adaptation sont déployées. Des écrans sous-marins de grande hauteur ont été installés tout autour du chantier afin de confiner les sédiments à l'intérieur de la zone. Cette barrière d'écrans antiturbidité installée du côté de la réserve du Larvotto mesure ainsi 300 m de long et couvre la quasi-totalité de la colonne d'eau.

Enfin, pour favoriser le retour de la faune et de la flore une fois le chantier terminé, les parois des caissons sont spécifiquement conçues : un rainurage vertical et régulier de 15 mm de profondeur y est creusé et des surfaces dédiées sont matricées pour créer des aspérités favorables à l'installation des écosystèmes. ■



H —
Le caissonnier a été baptisé **Marco Polo**, référence au célèbre explorateur, mais également contraction de trois lieux : **Marseille**, où sont fabriqués les caissons, **Monaco**, où ils seront posés, et **Pologne**, où le caissonnier a été fabriqué !

I —
Fabriqué en Pologne, le caissonnier **Marco Polo** a été convoyé sur un navire submersible à travers la mer du Nord, la Manche, l'Atlantique, le détroit de Gibraltar et enfin la Méditerranée. Il est arrivé au Grand Port de Marseille après un périple de 14 jours.



J —
De nombreuses mesures écologiques ont été prises sur la future emprise de l'extension en amont du chantier. 143 grandes nacres, espèce protégée, ont par exemple été déplacées vers la réserve marine attenante du Larvotto.



K —
En amont des travaux maritimes, une espèce d'algue invasive, la « caulerpe », a fait l'objet d'une éradication complète.

STREET ART ET GÉNIE CIVIL : UN PAS DE PLUS VERS LA CRÉATIVITÉ

Fresques ou graffitis, petits espaces pris sur de grands murs, pour des messages poétiques ou politiques, ce sont les mille visages de l'art urbain déclinés sur des ouvrages de Génie Civil. Petite promenade en France et ailleurs, à travers ces espaces d'expression hors de la ville, le plus souvent sur commande publique ou privée.

TEXTE : MURIEL CARBONNET

Depuis une quarantaine d'années, le Street Art est un courant artistique important, devenu aujourd'hui un nouveau monde d'images de la mondialisation. Les murs parlent, tiennent le haut du pavé et portent la parole de ces artistes de rue indignés par trop de discours médiatiques politiquement corrects. Les artistes engagés n'acceptent plus l'austérité éternellement reconductible de la vie politique, économique ou sociale. Le Street Art joue le rôle de la sentinelle inductrice de prise de conscience sociétale. Tel un jeu virtuel de subversion urbaine, le Street Art induit une vision nouvelle des murs du quotidien. Par ce détournement du mobilier urbain, les artistes en métamorphosent les espaces comme par la magie d'un regard entre les guillemets d'un panneau publicitaire ou d'une palissade de chantier. C'est la liberté de réinventer le monde dans une joyeuse contestation créative. Des peintures rupestres aux graffitis de New York, le Street Art démystifie la valeur d'originale nouveauté pour y voir un art humaniste à destination des populations locales. Entre bombes aérosols et messages poétiques, ces artistes électron libes et souvent anonymes, dont la perception oscille entre vandalisme et génie, sous-culture et contre-culture, emportent souvent l'adhésion du public. Le monde est une toile, dont

les murs ont la mémoire longue, dans le hasard des rues, impossible de ne pas rencontrer une fresque éphémère, c'est la démocratisation de l'expression artistique vers un large public qui fait du Street Art un acte politique. Qu'ils soient anonymes, pseudonymes ou simples quidams, les Street artistes ou peintres de rue revendiquent leurs origines politiques ou poétiques dans l'espace de création urbain. Mais pour les ouvrages d'art hors de la ville, on s'oriente vers des commandes précises de l'espace privé ou public au sens très large, dépassant la communauté urbaine.

De la centrale de Cruas...

Première halte devant la centrale nucléaire de Cruas. C'est ainsi qu'en 1991, la première peinture monumentale que l'on peut relier au Street art est réalisée par Jean-Marie Pierret. « Le Verseau », représentant un enfant nu tenant une coquille dans la main, sur l'une des tours de refroidissement de la centrale EDF de Cruas-Meysses en Ardèche, est visible de l'autoroute A7. Six mois d'études et trois mois de travail furent nécessaires pour sa réalisation, 12 500 m² sur 155 m de haut. C'est une référence au mythe du Verseau, à la présence de l'eau dans le schiste ardéchois, à l'idée de fusion et de refroidissement conjugués au cœur de la peinture.

C'est en empruntant un chemin de randonnée que l'on découvre la fresque de Ella & Pitir. Ils travaillent ensemble depuis plus de 10 ans et sont connus pour leurs peintures géantes au sol ou sur les toits, représentant des « colosses endormis » dans le chaos des villes. De nombreuses créatures du duo stéphanois sont en train de dormir les jambes ramassées, contraintes par le cadre imposé du support choisi, comme au barrage du Piney de la commune de La Valla-en-Gier au Pilat, avec la fresque « Le Naufrage de bienvenue ». Une commande de la ville de Saint-Étienne ayant demandé 10 jours de travail. Ce nouveau géant de 47 m de hauteur et au calme étrange du sommeil des enfants est appelé à s'inscrire dans le patrimoine régional. Il est porteur d'un ailleurs, d'autres possibilités de vie et de rêves à inventer. Une échappée belle poétique, esthétique et politique.

... à la Réunion

Bien qu'il vienne régulièrement en métropole, c'est dans l'île de la Réunion au sein de l'océan Indien que sévit Jace. Certes, il a commencé par du Street Art sauvage, mais il répond aussi à des commandes. Ainsi, c'est la région Réunion qui le sollicite, lui offrant une pile d'un pont de 16 m de hauteur en béton brut dressée dans le lit de la rivière Saint-Étienne,



A __
Jace -
Pylône-test
de Saint-Louis,
la Réunion,
2014. [©Jace]

A

•••

afin de valider les matériaux utilisés avant le début de la construction du pont. Jace peut y exercer son art, en dessinant son célèbre Gouzou, qui court partout. Elle est désormais devenue une œuvre d'art, représentant deux anges actionnant une fermeture Éclair pour recouvrir un mur de briques, le tout dans un décor de forêt tropicale. Au dos de l'édifice, des anges Gouzous semblent heureux de se prélasser dans la forêt. Une scène qui vient enrichir la galerie des petits bonshommes de Jace à la Réunion. Ce travail fut réalisé en présence de nombreux fans, désirant découvrir le visage de l'artiste. Tout le monde peut admirer l'œuvre de Jace à droite du pont, côté Saint-Louis en allant vers le sud. Jolie reconversion pour une pile témoin, qui devait être démontée.

En 2009, alors que l'autoroute des Tamarins se termine, Jace et ses complices repeignent en une nuit un mur de soutènement de 1 000 m². La région finira par entériner l'œuvre et ne fera changer que le fond bleu de la fresque.

De l'exubérance du style à La Coulure

Voici Speedy Graphito avec son exubérance de style. Il officie en ville, mais aussi sur des ouvrages de Génie Civil, comme au festival « La voie est libre » de Montreuil en 2012.



Chaque année, une portion de route est fermée afin d'inviter les passants à s'y promener. Une dizaine de Street Artistes colorent cette balade atypique. Speedy Graphito se définit comme un DJ des arts plastiques, il mixe les genres, les époques et les images. Il n'hésite pas à confronter Mickey et Mario Bros, à faire croquer Blanche-Neige dans le logo d'Apple. Il brouille les aiguilles du temps et désynchronise l'espace pour faire basculer vers une autre dimension. En juillet 2015, le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) de Saclay, à Gif-sur-Yvette dans l'Essonne, a ouvert ses portes au public afin de lui faire découvrir les œuvres du street artiste C215, qui a transformé ce « petit village » en galerie d'art. L'exposition E = MC215 où l'art rencontre la science. Lorsque Jean-Luc Sida, chercheur au CEA, propose à C215 un partenariat, le Street artiste de 40 ans commence par hésiter pour des raisons de positionnement sur le nucléaire, mais accepte finalement de relever le défi de cette mission. Au total, 25 de ses œuvres représentant des personnages illustres de la physique sont disséminées sur l'ensemble de cet espace quasi aseptisé. Et parmi tous ces personnages, quelques peintures de chats ou d'oiseaux sont aléatoirement distribuées dans les locaux. Ce grand projet est ainsi à l'image de la carrière tardive de C215, adaptative, hétéroclite, mais néanmoins très personnelle. L'état d'esprit E = MC215 se poursuit avec une exposition transversale au CNAM et au musée des Arts et Métiers, à Paris. Le Street artiste y ressuscite des objets scientifiques quelquefois désuets, afin de les animer d'une vie nouvelle.

En 2007, le collectif La Coulure est créé grâce à la motivation de Reno Kidd et de Dr Chips, deux artistes évoluant ensemble dans le monde du graffiti et du Street Art depuis une dizaine d'années.

Grand projet de l'été 2014, la peinture réalisée sur le château d'eau de Blanzay, en Saône-et-Loire, a pris beaucoup de temps et d'énergie. La surface à peindre est d'environ 250 m². « Perchés à 15 m de hauteur sur notre nacelle, nous n'en menions pas large. La maquette a été réalisée avec les enfants et adolescents de la ville sous forme d'ateliers en partenariat avec le centre social local. Elle a ensuite été validée par la mairie, la communauté de communes et Orange France Télécom. Nous avons travaillé sur une représentation de la ville de Blanzay, ses monuments et points de repère, ses activités et ses habitants », explique Reno Kidd.

Le Génie Civil sur le terrain de l'art

C'est à travers ce petit périple de la métropole à la Réunion que nous vous avons fait découvrir certains exemples du Street Art sur des ouvrages de Génie Civil hors de la ville. Les Street artistes ont désormais sur commande un nouveau terrain de jeu à échelle monumentale et visible de tous.

Diderot soulignait que « le patrimoine, c'est aimer et désirer ce que l'on possède déjà », pourtant le patrimoine, c'est aussi le mélange des cultures. Ainsi, comme l'ont montré les Streets artistes à travers le monde, les graffitis et le Génie Civil à priori antinomiques, se rejoignent sur le terrain de l'art. ■



D



E

B ____
Speedy Graphito - Festival « La voie est libre » à Montreuil, 2012. [©Speedy Graphito]



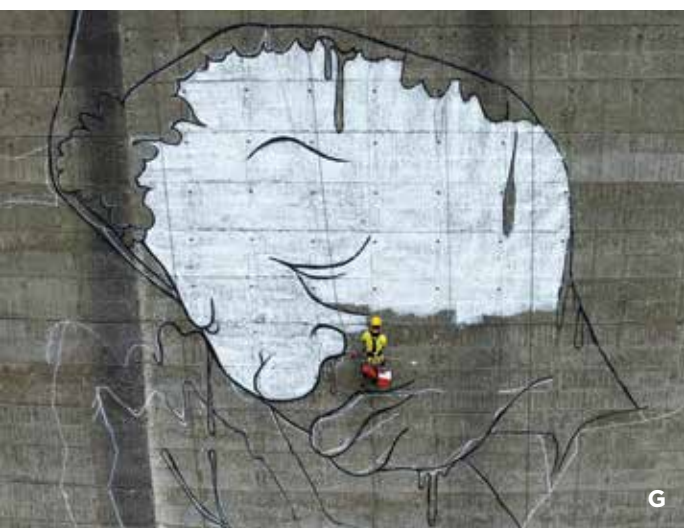
F

C ____
Jace - Mur de soutènement de l'autoroute des Tamarins, Trois Bassins à la Réunion, 2009. [©Jace]

D ____
Jean-Marie Pierret - Le Verseau, 1991. Centrale nucléaire du Cruas. [©EDF-Cruas]

E ____
La Coulure - Château d'eau de Blanzay, 2014. [©www.lacoulure.com]

F, G ____
Ella & Pitr - Le Naufrage de bienvenue, barrage du Piney, 2017. [©Ella & Pitr]



G



H

H ____
C215 - E = MC215 - commandant Jacques-Yves Cousteau, 2015. CEA de Saclay.

Journées techniques GC 2019

les 20 et 21 mars 2019, à l'ESTP Paris



Association Française de Génie Civil

L'Association Française de Génie Civil (AFGC) organise les journées techniques GC 2019 sur le thème « **le Génie Civil au cœur des mutations techniques et numériques** ».

Les journées GC 2019 vont permettre d'analyser les réponses apportées par notre profession en démontrant son intelligence et sa capacité à relever les défis face à ces enjeux majeurs dans

la construction et à catalyser une nouvelle dynamique.

Elles visent à identifier les principaux vecteurs de développement et à décrire les progrès dans les domaines clés et d'analyser comment les nouvelles technologies vont impacter la conception des structures et la réalisation des ouvrages.

Elles identifieront les réalisations pratiques et décriront les innovations, les développements clés pour l'avenir et la mobilisation de la recherche pour développer le numérique dans toutes les composantes de l'acte de construire.

Contact : p.guiraud@cimbeton.net

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrage et des maîtres d'œuvre pour bien prescrire les bétons des ouvrages de Génie Civil

Un groupe de travail de l'Association Française de Génie Civil (AFGC) composé de 50 experts représentant tous les acteurs de l'acte de construire en béton a rédigé un ensemble de recommandations pour « **bien prescrire les bétons** ».

Ces recommandations s'adressent aux rédacteurs du CCTP « béton » des ouvrages de Génie Civil en béton. Elles ont pour objectif de transmettre les bonnes pratiques et les éléments techniques nécessaires à la conception des bétons de qualité, adaptés aux besoins techniques et normatifs de l'ouvrage pour en assurer sa durabilité.

Elles couvrent les ouvrages ou parties d'ouvrage en béton armé, béton précontraint ou béton projeté réalisés en Béton Prêt à l'Emploi, sur chantier, ou à partir de produits préfabriqués en béton. Elles sont destinées aux maîtres d'ouvrage, aux experts des bureaux d'ingénierie et aux maîtres d'œuvre en charge de la conception d'un projet d'ouvrage en béton.

Elles visent à expliquer les choix fondamentaux relevant de la responsabilité de chaque acteur et faciliter la rédaction des marchés de travaux en mettant l'accent sur l'ensemble des éléments à fournir par le prescripteur. Elles explicitent la cohérence et les finalités des diverses normes et fascicules en vigueur et permettent de prendre en compte les dernières évolutions des bétons. Elles sont disponibles en version numérique sur le site de l'AFGC : www.afgc.asso.fr

Au cours de l'année 2018, des journées techniques de présentation des recommandations sont organisées au sein des 7 délégations régionales de l'AFGC :

6 février à Toulouse – 20 mars à Lyon – 3 juillet à Nancy – 25 septembre à Paris – 11 octobre à Aix-en-Provence – 8 novembre à Rennes – 14 novembre à Lille.

POLLUTECH 2018

LYON EUREXPO

DU 27 AU 30 NOVEMBRE 2018



Le 28^e Salon international des équipements, des technologies et des services de l'environnement aura lieu à Lyon Eurexpo.

CIMbéton, la FIB, le CERIB et les industriels de FIB Assainissement seront présents au sein du « **Village Béton** » avec la signature « **les smart systèmes en béton pour la gestion de l'eau** ».

Rendez-vous : hall 6.

PUBLICATION CIMBÉTON



LES SOLUTIONS BÉTON AU SERVICE DE LA CROISSANCE VERTE

La filière béton contribue à la démarche de transition vers un modèle de croissance verte, en offrant une

gamme de produits et de solutions constructives locales, innovantes, adaptables, pérennes, recyclables et respectueuses de l'environnement. Elle permet de relever les nouveaux défis de la construction, pour développer les territoires et densifier les villes, tout en luttant contre les effets du changement climatique, en améliorant le cadre de vie, en favorisant l'utilisation efficiente des ressources et en préservant la biodiversité, dans une logique d'économie circulaire et d'écologie industrielle territoriale.

Réf. SB-OA 2018-1



LE PROGRÈS S'APPELLE DÉDÉ Manifeste pour redonner un sens au mot « progrès » avec le Développement Durable

DOMINIQUE BIDOU

Ce livre électronique, ou e-book, est tiré des textes du blog, créé en 2006, par Dominique Bidou. Son sous-titre « Manifeste pour redonner un sens au mot progrès, avec le Développement Durable » résume les intentions de l'auteur. Son objectif est de montrer que le développement durable n'est pas, comme il a été caricaturé, une pénitence ni un retour en arrière, mais une formidable opportunité.

Cet ouvrage peut être téléchargé en deux formats :
PDF : <http://www.dictionnaire-du-developpement-durable.fr/images/pdf/Le-progres-s-appelle-DeDe.pdf>
ou EPUB pour les tablettes et smartphones :
<http://www.dictionnaire-du-developpementdurable.fr/images/pdf/Le-progres-s-appelle-DeDe.epub>



GUIDE CEREMA Conception des réparations structurales et des renforcements des ouvrages d'art

Ce guide, rédigé par un groupe de travail constitué

de membres du Cerema et des Directions Interdépartementales des Routes (DIR), expose les pratiques en vigueur. Il propose une adaptation des règlements et règles de l'art utilisés pour le calcul des ouvrages d'art neufs au cas des ouvrages existants.

Il rappelle la démarche générale d'élaboration d'un projet de réparation et traite du « calcul et de la modélisation » du projet, en proposant des réponses aux questions récurrentes auxquelles sont confrontés les projecteurs.

Cerema collection « Référence »



MANIFESTE POUR UNE COMPTABILITÉ UNIVERSELLE

GÉRARD SCHOUN, JACQUES DE SAINT FRONT, PAULINE DE SAINT FRONT, MICHEL VEILLARD

Aujourd'hui, le bilan économique d'une organisation ne reflète que très partiellement son impact sur la société ou l'environnement. La Comptabilité Universelle est un outil qui permet aux entreprises de traduire en chiffres comptables les impacts sociaux, sociétaux, environnementaux et économiques de leurs actions RSE.

Le langage de la comptabilité classique est monochrome. Il faut lui donner des couleurs pour lui permettre de révéler la vraie richesse des organisations. C'est le défi de la Comptabilité Universelle : compter ce qui compte.

Éditions L'Harmattan



GUIDE CEREMA Conception et calcul du Génie Civil des écrans de protection phonique routiers

Le bruit figure parmi les préoccupations importantes

des Français, car il est perçu comme une grave atteinte à la qualité de vie. Le guide traite de la conception de l'ossature support des écrans acoustiques destinés à équiper les infrastructures routières. Il permet de maîtriser la conception générale du Génie Civil des écrans acoustiques dans des situations de projet variées et de dimensionner les éléments structuraux principaux en accord avec les Eurocodes. Il se limite aux écrans acoustiques implantés en rive de voies routières.

Cerema collection « Référence »



DE LA HALLE FREYSSINET À STATION F

MICHÈLE LELOUP

En 1929, Eugène Freyssinet construit un bâtiment exceptionnel, capable d'abriter en son sein des trains entiers de marchandises. Un bâtiment gigantesque, novateur, qui fit appel à des techniques de construction à la pointe de la modernité, prémices du béton précontraint. Depuis 2017, cette halle revit et accueille le plus grand campus de start-up au monde : la Station F. L'architecte Jean-Michel Wilmotte a repensé entièrement le bâtiment pour l'adapter à ses nouvelles fonctions tout en respectant l'esprit de sa conception. Ce livre est le récit de cette transformation.

Éditions Alternatives



LA BIODIVERSITÉ

Hubert Reeves explique aux enfants

DANIEL CASANAVE, HUBERT REEVES, NELLY BOUTINOT

Dans cette bande dessinée illustrée par Daniel Casanave, le célèbre astrophysicien canadien Hubert Reeves explique la Biodiversité à de jeunes élèves à l'occasion d'un voyage scolaire. À partir des étoiles, il entraîne ses jeunes auditeurs et lecteurs dans un voyage passionnant qui leur fera comprendre l'importance de la protection des êtres vivants.

Éditions Le Lombard



Récifs artificiels réalisés en impression 3D
par XtreeE en partenariat avec Seaboost.
Photographe : Julien Dalle, Seaboost