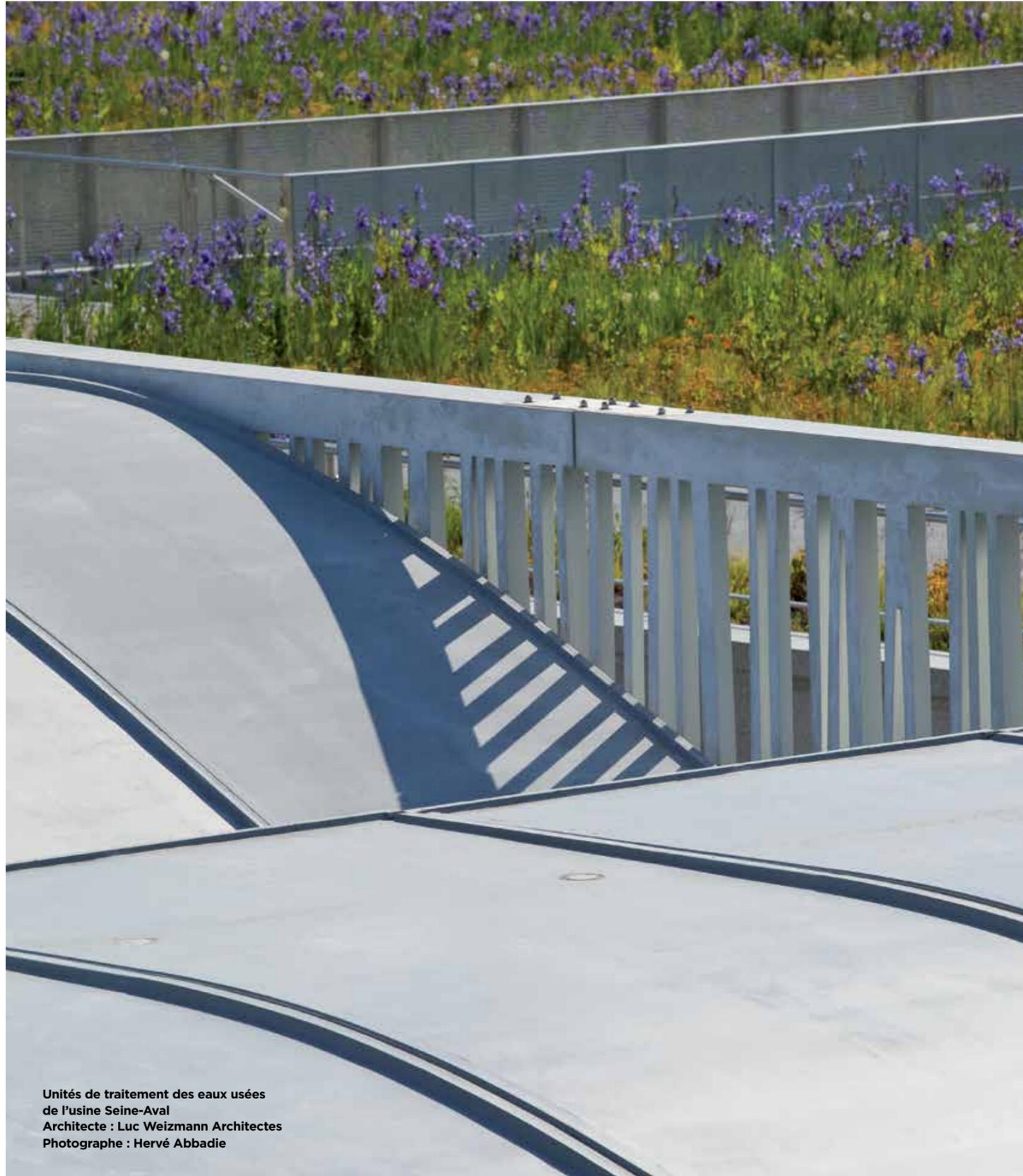


CONSTRUCTION MODERNE

OUVRAGES D'ART
SEPTEMBRE
2016

N° 149





Unités de traitement des eaux usées
de l'usine Seine-Aval
Architecte : Luc Weizmann Architectes
Photographe : Hervé Abbadie

p. 2 **PARIS - SAINT-OUEN**
LA LIGNE 14 SE PROLONGE
JUSQU'À MAIRIE DE SAINT-OUEN

p. 6 **VILLEJUIF**
R7, LE BÉTON AU SERVICE
DE L'EAU POTABLE

p. 10 **PARIS**
DE FREYSSINET À NIEL,
L'EXCELLENCE DE L'INNOVATION



p. 14 **TURQUIE**
PONT YAVUZ SULTAN SELIM,
LE PONT DES RECORDS



p. 18 **SEINE-AVAL**
RÉSILIENCE TERRITORIALE
ET INSCRIPTION CITOYENNE

p. 22 **VIROFLAY**
DEUX NEFS EN BÉTON POUR
DES GARES SOUTERRAINES

p. 26 **VANNES**
UN TUNNEL SOUS L'EAU POUR
FLUIDIFIER LA CIRCULATION

p. 30 **AVORD**
BA 702 : UN HANGAR
FREYSSINET CENTENAIRE

p. 34 **RAMATUELLE**
À RAMATUELLE,
UN BÉTON CAMÉLÉON

ÉDITO

Le béton, un matériau qui bouge !

Élément structurel de notre quotidien, le béton façonne nos territoires et nos villes, aujourd'hui et demain. Matériau de haute technicité, fiable et doté d'une capacité d'adaptation exceptionnelle, il compte des applications par centaines et s'appuie sur une industrie 100 % locale. En France, les hautes exigences constructives ont favorisé de longue date le choix d'un matériau robuste et sûr, sur lequel on peut compter. Quels que soient les fonctionnalités et usages attendus des ouvrages (préserver, aménager, protéger, se loger, se déplacer...), le béton sait tout faire ! La protection contre le feu et le séisme, la durabilité, l'inertie thermique, le confort acoustique, la qualité de l'air..., le béton offre une gamme de solutions multiples, qui en fait le premier matériau de construction au monde. Facile à utiliser, disponible en tout lieu et économique, ce matériau tient en un paradoxe : indestructible et pourtant le plus souple qui soit. Pour peu que l'on sache explorer ses qualités et maîtriser ses contraintes. Pour que cela se sache le plus largement possible, toute la filière est désormais unie sous la marque « By BÉTON » et s'est dotée avec cet outil d'une empreinte numérique forte, afin de nouer et de nourrir un lien puissant entre la filière et ses acteurs, prescripteurs et utilisateurs. Un lien placé sous le signe du dialogue pour informer, expliquer, accompagner, échanger... sur les aspects techniques, esthétiques, environnementaux et économiques du matériau.

PHILIPPE GRUAT
PRÉSIDENT de By BÉTON

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
Président : Raoul de Parisot • 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 : Gares souterraines T6, à Viroflay - Architecte : Atelier Schall - Photographe : Hugo Hébrard.

PARIS - SAINT-OUEN

LA LIGNE 14 SE PROLONGE JUSQU'À MAIRIE DE SAINT-OUEN

Quatre nouvelles stations de métro, un tunnel de 5,8 km qui les relie... le chantier destiné à prolonger la ligne 14, de Saint-Lazare à Mairie de Saint-Ouen, est de grande ampleur.

TEXTE ET REPORTAGE PHOTOS : MICHEL BARBERON

Avec 610 000 voyageurs chaque jour, la ligne 13 est l'une des plus chargées du réseau de métro parisien, surtout au-delà de Saint-Lazare. L'extension en cours de la ligne 14 vers le nord, qui ouvrira en 2019, doit réduire sa saturation : son objectif principal vise en effet à diminuer son trafic de 20 à 25 %. Mais le prolongement offrira aussi une meilleure desserte des territoires en développement et des projets urbains, grâce à la création de quatre stations. Pont Cardinet, Porte de Clichy, Clichy Saint-Ouen et Mairie de Saint-Ouen se trouveront au plus près des nouveaux quartiers : celui de Clichy Batignolles à Paris, les ZAC de Clichy-la-Garenne et le futur quartier des Docks à Saint-Ouen. Des secteurs qui réunissent quelque 96 000 habitants et 72 000 emplois. Outre un renforcement des correspondances avec le réseau de transports en commun actuel ou à venir, ce tronçon de la ligne 14 va aussi constituer la colonne vertébrale du futur réseau de transports du Grand Paris Express.

Deux maîtres d'ouvrage portent le projet dont le coût est estimé à 1,4 milliard d'euros. Le Syndicat des Transports d'Île-de-France (STIF), autorité organisatrice des transports, veille au respect du programme, du calendrier et des coûts pendant la réalisation. Et la RATP, exploitante de la ligne 14 actuelle, est chargée de concevoir et de mener les travaux qui ont officiellement démarré le 11 juin 2014. Outre les classiques déviations de réseaux situés à l'aplomb du tracé, la première étape a concerné le gros œuvre des quatre futures stations. Compte tenu de la géologie du terrain constitué de sables de Beauchamp, de calcaires de Saint-Ouen, de marne et caillasses, la technique de la paroi moulée, aussi mise en œuvre pour certains ouvrages annexes, a été privilégiée. « L'opération évite les risques de déstabilisation des terrains et des bâtiments environnants, et apporte de la sécurité pour le chantier », explique Olivier Le Berre, chef de projet RATP. Des tranchées de 0,80 m à 1,50 m de large et de 40 m à 60 m de profondeur sont creusées pour

Chiffres clés

Longueur : 5,8 km, en souterrain

Matériaux à extraire : 360 000 m³

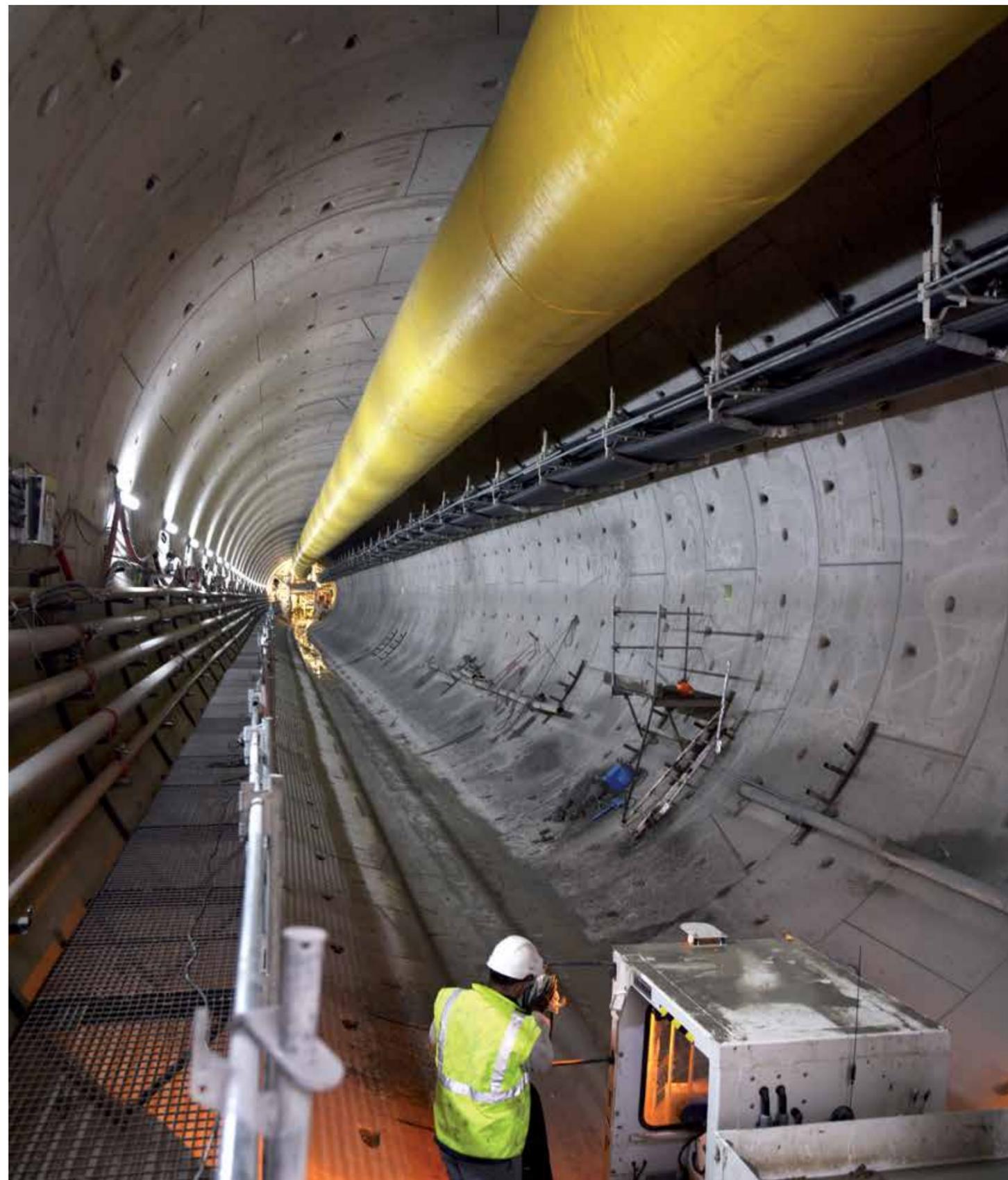
Volume de béton lots 1 et 2 (hors tunnels) : 195 000 m³

4 nouvelles stations

2 correspondances : avec la ligne 13 à la station Porte de Clichy, branche Asnières-Gennevilliers ; à Mairie de Saint-Ouen, branche Saint-Denis Université

atteindre le calcaire grossier. Des cages d'armatures métalliques sont disposées à l'intérieur de la cavité, puis les parois en béton sont coulées par panneaux de 7 m de large. Le volume intérieur de la « boîte » est ensuite évidé. Situées sur des terrains ferroviaires en friches, les futures stations Pont Cardinet et Porte de Clichy sont excavées à ciel ouvert. Le principe est différent pour celles de Clichy Saint-Ouen et de Mairie de Saint-Ouen situées en milieu urbain dense. Pour préserver la vie locale et maintenir la circulation automobile, l'excavation correspondant au volume de la station est réalisée selon le principe de la tranchée couverte.

Long de 5,8 km, d'un diamètre interne de 7,75 m, le tunnel principal entre Saint-Lazare et Mairie de Saint-Ouen, est foré par deux tunneliers. « En utilisant deux tunneliers au lieu d'un,



Calendrier

2014 : début des travaux

2015-2018 : Génie Civil des stations, tunnels, site de maintenance des rames, ouvrages annexes

2017-2019 : aménagements

2018-2019 : essais, marches à blanc

2019 : mise en service

•••

nous gagnons un an sur la durée du chantier », ajoute Olivier Le Berre. « Et cela procure du temps supplémentaire pour faire des injections de confortement de terrain à certains endroits, sous le passage du RER C par exemple, ou encore sous des ouvrages aux fondations sensibles. » Spécifiquement conçus pour le projet, avec une roue de coupe adaptée à la géologie des terrains, les deux tunneliers sont à pression de terre, une technique qui consiste à maintenir un front pressurisé favorisant la stabilité d'un terrain meuble, sableux, où il y a présence d'eau. Le tronçon sud, entre Clichy Saint-Ouen et Saint-Lazare, est mené par le groupement Eiffage et Razel Bec. Introduit dans la future station Pont Cardinet, « Magaly », le premier tunnelier, du constructeur Herrenknecht, a démarré en septembre 2015 son parcours en direction de la gare Saint-Lazare. Arrivé à destination, il sera démonté, transporté et remonté à son point de départ (Pont Cardinet) pour repartir jusqu'à la station Clichy Saint-Ouen, soit un linéaire total de 3 620 m. Le tronçon nord est réalisé par Bouygues Travaux Publics/Soletanche Bachy France/Soletanche Bachy tunnel/CSM Bessac. « Solenne », le tunnelier de ce groupement, fabriqué par NFM Technologies, doit réaliser 1 719 m de tunnel entre la future station Clichy Saint-Ouen RER et la rue Marcel Cachin, à Saint-Denis. Assemblé au fond de la « boîte » de l'ouvrage annexe place du Capitaine Glarner, à une trentaine de mètres sous la surface du terrain naturel, il a démarré son creusement en 2016 en direction de Mairie de Saint-Ouen. C'est aussi lui qui réalisera

sur 501 m le raccordement souterrain au Site de Maintenance et de Remisage (SMR) des rames, seule une courte portion, dans le quartier des Docks de Saint-Ouen, étant effectuée en tranchée couverte depuis la surface. Enfin, « Solenne » reviendra à son point de départ et sera retourné pour creuser le tronçon rejoignant la station Clichy Saint-Ouen. Les deux tunneliers fonctionnent 24 heures sur 24, de cinq à sept jours par semaine, à raison de 12 m d'avancement moyen au quotidien, soit une cadence d'environ 250 m par mois. Chaque chantier occupe environ 70 techniciens répartis en trois postes.

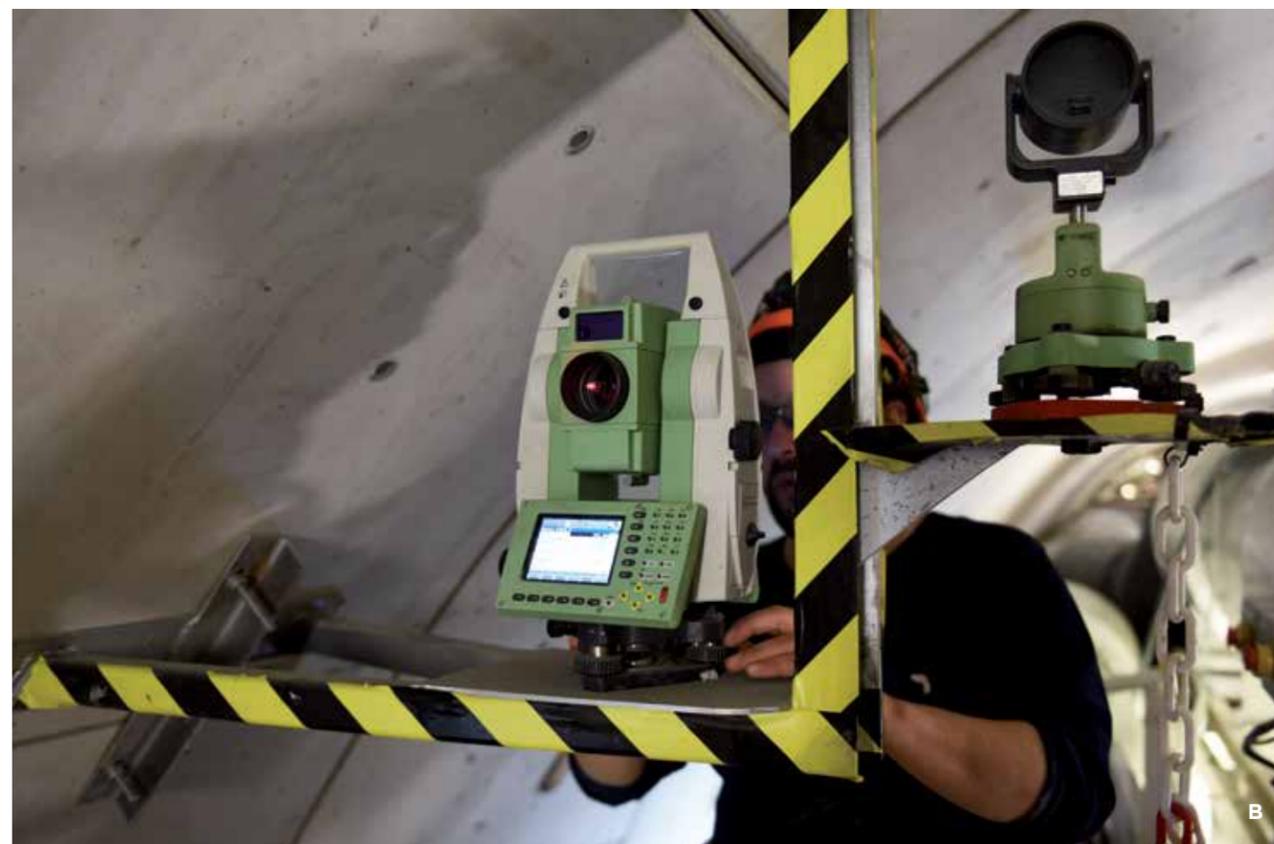
Bonna Sabla – Capremib, 24 000 voussoirs béton à produire

La société Bonna Sabla, associée pour le lot 1 à Capremib, Razel-Bec et Eiffage et pour le lot 2 à Capremib, participe au prolongement de la ligne 14. À Conflans-Sainte-Honorine (Yvelines), elle produit et fournit les éléments préfabriqués pour environ 6 km du tunnel de diamètre intérieur 7,75 m. Soit 24 000 voussoirs représentant un volume de béton de 58 000 m³ et 5 300 tonnes d'armatures ! Pour répondre à ce défi, les installations de son site historique, créé en 1894 par Aimé Bonna, l'inventeur du tuyau en béton âme tôle, ont été rénovées et deux nouvelles centrales à béton ont vu le jour. La production industrielle a démarré en avril 2015, quelques mois avant que le premier tunnelier n'entame son creusement. Un laps de temps nécessaire pour constituer un stock suffisant de voussoirs afin d'alimenter en continu à Pont Cardinet le tunnelier du lot 1 et à Saint-Ouen le tunnelier du lot 2. La production des voussoirs est répartie sur deux ateliers pour fabriquer les anneaux composés de 7 voussoirs. La production effectuée sur postes fixes permet de réaliser environ 8 anneaux par jour pour le lot 1 et 6 pour le lot 2. « Les voussoirs sont très techniques sur le plan dimensionnel, avec des tolérances géométriques strictes, de l'ordre du millimètre, et de fortes exigences sur la qualité du béton », explique Farida Maibeche-Caperon, directeur opérationnel Génie Civil/hydraulique chez

L'énergie du sol pour chauffer, ou rafraîchir, les stations Porte de Clichy et Mairie de Saint-Ouen

La technique éprouvée depuis plusieurs années dans certains pays européens commence à se développer en France. Elle est notamment mise en œuvre pour les stations Porte de Clichy et Mairie de Saint-Ouen qui vont se chauffer, ou se refroidir, grâce à des fondations thermoactives. La technique utilise des tubes de captage insérés dans les cages d'armature des parois moulées des fondations des stations qui se trouvent dans un sol à une température constante d'environ 12 °C. Ces tubes, parcourus par un fluide caloporteur (eau-glycol) qui pare à tout risque de gel, sont associés à des dispositifs échangeurs couplés à une pompe à chaleur, dont le rôle consiste à effectuer les échanges thermiques entre le circuit primaire (réseaux géothermiques) et le circuit secondaire (réseaux de distribution de l'énergie). En fonction de la température ambiante, et selon un principe de réversibilité, les boucles de captage géothermique transmettent de la chaleur depuis ou vers le sol, et assurent ainsi une régulation climatique de la station : chauffage l'hiver, climatisation l'été.

Bonna Sabla. Un anneau de 1,80 m de long correspond à un volume d'environ 18 m³ de béton, un anneau de 1,50 m à environ 14 m³. Le béton de classe de résistance C35/45 correspond aux classes d'exposition XC3/XA2. Après séchage de quelques heures dans leurs moules, les voussoirs pesant près de 7 tonnes chacun sont démoulés, retournés, puis stockés en piles de sept, sur un parc de 20 000 m². Une noria de camions – quelque 12 000 rotations au total ! – est nécessaire pour acheminer les matières premières à l'usine, puis livrer les voussoirs sur les sites du nord de Paris. Bonna Sabla, qui espère désormais se placer sur les autres chantiers du Grand Paris Express, imagine rénover les accès par le rail et par la Seine de son usine afin de minimiser l'impact environnemental du transport. ■



A — Pour améliorer le calendrier général du projet, deux tunneliers creusent simultanément des portions différentes du tunnel principal long de 5,8 km.

B — Le tracé est enregistré en machine et un contrôle permanent par théodolite est effectué lors du creusement. Le géomètre donne les instructions au pilote, anneau par anneau, pour suivre la bonne direction.

VILLEJUIF

R7, LE BÉTON AU SERVICE DE L'EAU POTABLE

Le nouveau réservoir de Villejuif, le R7, d'une capacité de 50 000 m³, est constitué d'une enveloppe semi-enterrée en voiles de béton, habillés de parement en Ductal teinté et scintillant.

TEXTE : SYLVIE ROMAN – REPORTAGE PHOTOS : LAURENT THION

Le Réservoir 7 (R7) de Villejuif fait partie de la ceinture d'alimentation en eau de la capitale et de la petite couronne, renforçant les trois « réservoirs-fûts » construits par le SEDIF (Syndicat des Eaux d'Île-de-France) dans les années 90 et toujours en service. Dans un environnement contraint, en pente et exigu, situé entre l'hôpital Gustave Roussy de Villejuif et plusieurs routes ou chemins piétons, le défi était d'implanter un réservoir de 50 000 m³, le plus intégré possible, « directement au pied des fûts de 33 m de haut, et donc de creuser à plus de 6 m de profondeur », précise Giovanni Lelli, co-architecte du projet avec Dominique Lelli, « sans provoquer de dommages sur les fondations des châteaux d'eau, ou risquer un affaissement du sol, en pente ».

Autre contrainte, l'implantation d'une galerie passant sous le réservoir existant et reliant la chambre d'adduction d'eau au nouveau R7. L'architecture joue sur le contraste, saisissant, entre les neuf tourelles (trois groupes de trois) évasées des châteaux d'eau (Charon

Architectes), et une longue bande chamarrée, qui semble former un socle. En effet, par un habile effet d'optique, les châteaux d'eau se prolongent et se reflètent comme dans un bassin où l'eau serait apparente. Mais tout n'est qu'illusion... de béton.

L'habillage de la partie apparente du réservoir de 109 x 52 m « évoque l'objet même de la construction, l'eau », souligne encore Giovanni Lelli. Surtout, ces parements biseautés et colorés cassent la monotonie d'une si longue façade, l'allègent, créant une ondulation semblable à des vagues sur un plan d'eau.

Des voiles de béton semi-enterrés

Ce nouveau réservoir, le plus important du SEDIF, est entièrement construit avec un béton capable de résister à la fois aux fortes poussées provoquées par les 50 000 m³ d'eau qu'il contient, aux corrosions des agents chimiques et au chlore utilisés pour potabiliser l'eau. Le béton a été coulé en voiles de 75 cm d'épaisseur et 12 m de hauteur, dont

6 m seulement apparents. En raison des longueurs de façades très importantes, plus de 100 m, les équipes de Bouygues TP ont mis en place des joints de dilatation de 2 cm, de type *waterstop*. Sur la face interne, afin d'amortir les efforts de poussées sur les parois, les angles des réservoirs sont arrondis, coulés en place grâce à un outil coffrant cintrable. Quant au radier, fractionné en huit plots de 400 à 800 m³ de béton, réalisés en coulage continu, il a été dimensionné afin de résister aux poids des voiles béton de 12 m de hauteur, et aux efforts particuliers générés par la poussée de l'eau. Ainsi, l'épaisseur du béton du radier varie, passant de 70 cm sur les 20 m centraux, à 1 m d'épaisseur sur les 3 m périphériques.

Le réservoir épouse la pente naturelle du site

Par ailleurs, pour des raisons de process, « le R7 étant un ouvrage de fin de course de traitement avant la redistribution dans les réseaux », le bâtiment est constitué de deux « boîtes » parallélépipédiques mitoyennes dans le sens longitudinal, et décalées d'une dizaine de mètres. Ces parallélépipèdes sont reliés par un passage permettant à l'eau de cheminer en U, sur deux fois 100 m, avant qu'elle ne soit réinjectée dans le réseau. Par ailleurs, les parties mitoyennes des « boîtes » sont séparées par un large joint de dilatation de 6 cm d'épaisseur, pour des raisons de sécu-



A



B

A — Effet d'optique du béton coloré. Les châteaux d'eau se prolongent dans le socle revêtu d'un parement en béton scintillant, se reflétant dans une pièce d'eau biseautée.

B — Angle nord-est du réservoir, quelques-uns des 356 panneaux de béton déclinés en 23 teintes.

Un parement cubiste en béton scintillant

356 panneaux de béton scintillant arborant 23 teintes en dégradés, de gris pâle à vert vif, entourent l'imposante masse du R7. Cette ceinture cubiste est constituée d'un parement en BFUP (Ductal) aux propriétés spécifiques, permettant d'incruster jusqu'à un million de microbilles de verres dans le béton teinté dans la masse, afin de réfléchir et fractionner la lumière.

« Nous avons déjà utilisé cette technique au Stade de France, sur de toutes petites surfaces », précise Didier Gazeau, directeur du développement de l'entreprise Edycem Naullet. « Alors qu'ici, nous avons réalisé des panneaux de 15 à 20 m², les parements ayant différentes formes, trapézoïdales ou rectangulaires. »

Alors comment insérer des billes de 2 mm de diamètre, pour qu'elles soient incorporées et ne se décrochent pas, tout en conservant leur propriété de réflexion ? « Elles sont juxtaposées, malgré leur faible diamètre. Il est évident qu'aucune ne devait se chevaucher, même en partie. En fait, elles sont ancrées dans le béton sur un peu plus d'un demi-diamètre », dévoile Didier Gazeau tout en gardant une part d'énigme... Les panneaux, d'une épaisseur de 70 mm, ont des hauteurs constantes, 6 m, pour des largeurs variables autour de 2,60 m, les architectes ayant dessiné pas moins de 43 pièces différentes ! Puis, ils sont « suspendus aux parois du réservoir » par des suspentes de type FPA5 de Halfen. Afin de répondre à la commande hors normes des architectes, l'usine d'Angers a fabriqué des tables coffrantes spécifiques, et a formé spécialement trois opérateurs, lesquels coulaient jusqu'à quatre panneaux par jour, dans un process à la fois artisanal et industriel. « Cela nous a permis de pousser nos limites et techniques de fabrication, notamment dans la recherche et les possibilités d'incorporer différents matériaux dans le béton. »

Mais le Ductal employé au R7 n'est pas tout à fait classique : Pascal Dupont, ingénieur consultant de Bton Design, a en effet mis au point un béton breveté portant sur la tenue des billes « pour que toutes soient contiguës, homogènes et enchâssées de la même manière. La grande difficulté, c'était la différence d'échelle entre les billes et les panneaux ». Les 23 teintes, toutes créées aux pastels gras et caledonnées par Giovanni Lelli, ont aussi fait l'objet de très nombreux essais de colorants... « Notre métier est de rendre les rêves des architectes possibles ! »

...

rité et de stabilité de l'ouvrage en phase de remplissage. Enfin, en toiture, des serpentins d'eau tiède ont été intégrés dans la structure béton, afin « d'éviter les condensations dans le ciel gazeux en sous-face du plafond, et de conserver l'eau du réservoir hors gel en hiver », précise Giovanni Lelli.

Afin de relier le nouvel équipement à la fois aux réservoirs-fûts et au système d'adduction d'eau provenant de Choisy-le-Roi, une longue galerie de 80 m a été creusée dès 2013. Elle se faufile à une faible profondeur, environ 5 m, sous le réservoir existant. La galerie

de près de 3 m de diamètre, réalisée avec un assemblage de voussoirs préfabriqués (Stradal), a été forée par une machine à attaque ponctuelle et confinement par air confiné (CSM Bessac) particulièrement adaptée aux emprises réduites et à l'usage final.

Autre particularité, le nouveau réservoir épouse la pente naturelle du site, et il est donc semi-enterré de façon naturelle côté nord-est, et grâce au remodelage de la pente des côtés sud-est et sud-ouest.

Pour cela, une partie des 30 000 m³ des terres excavées pour le chantier ont été réem-

ployées pour former des sortes de grands talus végétalisés et arborés, qui, espèrent les architectes, « seront rapidement colonisés par les oiseaux ».

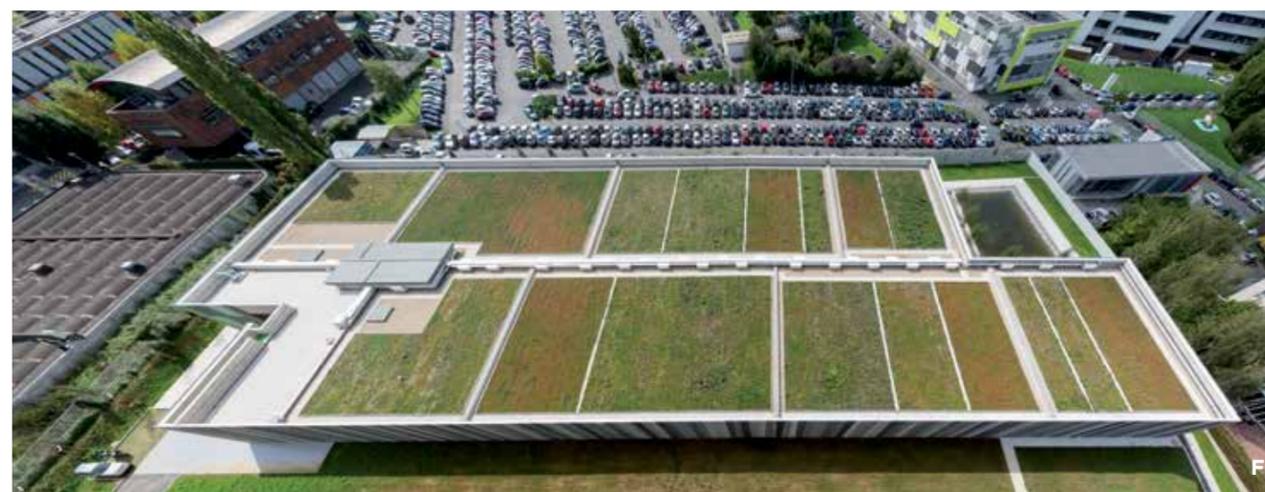
L'insertion paysagère mise sur les bétons

L'eau comme fil conducteur du projet, presque une évidence pour un réservoir de cette importance ! Libérée de son carcan de béton, elle devient apparente, miroitant dans un bassin de 400 m² réalisé en... béton ! La pièce d'eau-miroir de forme trapézoïdale occupe l'angle coupé du réservoir, en contre-bas de celui-ci, sur l'un des côtés les plus visibles. Elle est alimentée par les eaux de pluie et de ruissellement qui empruntent une noue en béton préfabriqué en structures d'écailles. Ce système permet d'oxygéner l'eau qui se déverse dans le bassin, et de favoriser ainsi la biodiversité et le développement de plantes aquatiques.

Rompant avec le « tout minéral et béton » du projet, les architectes ont opté pour un verdissement des 5 000 m² de la toiture-terrasse, par une végétalisation d'espèces indigènes, « plantées dans l'esprit du jardin de curé », souligne Giovanni Lelli. Ce qui permet de minimiser l'impact visuel de cette masse, particulièrement visible depuis les niveaux supérieurs de l'hôpital Gustave Roussy, tout proche.

À l'opposé du bassin, au pied des « réservoirs-fûts » et le long d'un chemin piéton reliant l'hôpital à la rue Allende, la parcelle est recouverte d'une prairie, « une demande du maître d'ouvrage », qui souhaitait conserver ou recréer les espaces verts que le R7 est venu remplacer.

Le béton est aussi le matériau phare pour la clôture du site, classé Seveso et Vigipirate. Jouant de toute la palette du dessinateur, les architectes ont conçu deux types de clôture : côté ville, un socle de béton intégrant des briques cassées et des pierres, couronné de palissade en Corten, et du côté de l'hôpital, une clôture en partie réalisée avec des panneaux trapézoïdaux en BFUP (Ductal), dans des teintes colorées. ■



C
Parement cubiste en béton scintillant revêtu de millions de microbilles.

D, E
Gros plan sur le revêtement en « peau de sirène » des parements de béton.

F
La toiture-terrasse, végétalisée en damier, et qui reprend les coloris des bétons de façades.

PARIS

DE FREYSSINET À NIEL, L'EXCELLENCE DE L'INNOVATION

Sauvé *in extremis* de la destruction, ce chef-d'œuvre de l'architecture industrielle qui révèle les premières grandes inventions d'Eugène Freyssinet va accueillir le plus grand campus de start-up du monde.

TEXTE : DELPHINE DÉSVEAUX – REPORTAGE PHOTOS : PATRICK TOURNEBŒUF ET FRÉDÉRIC GLUZICKI – IMAGES DE SYNTHÈSE : WILMOTTE & ASSOCIÉS ARCHITECTES

Si elle n'a pas la dimension iconique des hangars aéronautiques d'Orly ou du pont Albert Loupe à Plougastel, la Halle Freyssinet signe le début des grandes inventions du génial ingénieur. Construite entre 1927 et 1929 près de la gare d'Austerlitz, elle était destinée à abriter les opérations de transbordements postaux train-camions. Présentant trois nefs parallèles éclairées par des lanterneaux, la Halle est constituée de minces voûtes en béton (5 cm au faitage) supportées par de fins piliers pyramidaux. Cette légèreté est due à une solution technique inédite : les auvents qui animent les longues façades nord et sud sont suspendus et stabilisés par des tirants métalliques noyés dans le béton. Faisant ainsi contrepoids, ils permettent d'optimiser la matière, véritable obsession de Freyssinet. Outre l'élégance inhabituelle de ce hangar industriel, ce dispositif inaugure les réflexions du grand homme sur la précontrainte du béton, dont il dépose le brevet en octobre 1928, et sur la technique de la vibration qui améliore la compacité du béton lors de sa mise en place. Exploitée par le Sernam jusqu'en 2006, puis par une entreprise d'événementiels (Jaulin), elle a failli être démolie :

la SNCF souhaitait s'en séparer et la SEMAPA, aménageur de Paris Rive Gauche, cherchait à valoriser le foncier. Faisant prévaloir son caractère innovant, CIMbéton, l'association Eugène Freyssinet, Paris Historique et les Architectes du Patrimoine ont réussi à convaincre les autorités de la conserver. Depuis 2012, la Halle est inscrite au titre des Monuments Historiques comme « prototype faisant date dans l'histoire de la technique du béton ».

Le projet architectural

En 2013, Xavier Niel, fondateur de Free et vice-président du groupe Iliad, acquiert la Halle. Son projet ? Faire de ces 34 000 m² le plus grand campus de start-up au monde appelé STATION F. La reconversion architecturale est assurée par l'agence Wilmotte & Associés. Conservant la mémoire logistique et ferroviaire du site, les architectes aménagent les deux nefs latérales avec des containers qui accueillent les éléments du programme, soit plus de 3 000 postes de travail répartis sur trois types d'espace : une zone « Share » accueillant entre autres des start-up, le Fab Lab et une bou-

Calendrier

2012 : inscription de la Halle à l'inventaire supplémentaire des Monuments Historiques

24 septembre 2013 : annonce officielle du projet

Décembre 2013 : dépôt du permis de construire

Avril 2014 : obtention du permis de construire

Septembre 2014 : début des travaux

Durée du chantier : 2 ans

2017 : livraison

tique éphémère ; une zone « Create » où seront installées les start-up incubées ; et une zone « Chill » ouverte au public comprenant des restaurants et des bars ouverts 24 h/24 h. Libre de toute construction, la nef centrale abrite des espaces polyvalents et communautaires. « Nous avons conçu les espaces de manière à favoriser l'échange, l'émulation et le partage entre les occupants », explique l'architecte Florian Giroguy, chef de projet chez Wilmotte.

Grâce à ses 34 000 m² et ses hauteurs sous voûtes, la Halle Freyssinet offrira fin 2016 des espaces de co-working, un Fab Lab avec atelier de prototypage et imprimantes 3D, un auditorium en sous-sol, des salles de réunion, des espaces de détente, des bars, quatre res-



A
La halle se compose de trois nefs parallèles éclairées par des lanterneaux.

B
La nef centrale abritera des espaces polyvalents et communautaires.

Rencontre avec

Roxanne Varza,
directrice du campus de start-up*Comment êtes-vous entrée dans l'univers numérique ?*

Je suis née à San Francisco de parents iraniens. Partie un an en France dans le cadre de ma licence de littérature française à UCLA, j'ai découvert la high-tech.

Mon premier job chez Business France consistait à aider des start-up de la Silicon Valley à s'implanter en France. Beaucoup d'entrepreneurs rêvent d'investir en France qui a pour elle la qualité de ses ingénieurs, le crédit d'impôt recherche, l'aide aux entreprises innovantes. Dans la Silicon Valley, les gens sont motivés par l'argent ; ici, par la beauté de l'innovation... qui me passionne. J'ai ensuite été recrutée pour créer l'accélérateur de start-up de Microsoft.

*Xavier Niel compte accueillir un millier de start-up.**Quels sont les critères de sélection ?*

Nous n'avons pas encore ouvert les candidatures, mais nous savons d'ores et déjà que nous n'aurons pas de difficulté à trouver des projets : nous sommes en contact avec les grandes écoles et les universités du monde entier, et je reçois des prises de contact de dix start-up par jour. Notre objectif est de comprendre ce qu'on peut apporter de différent dans l'organisation des espaces et des services pour faciliter l'accès des acteurs étrangers et des investisseurs. J'ai visité des incubateurs un peu partout dans le monde. Ce benchmark a permis de définir un modèle de fonctionnement dont on a discuté avec les architectes pour concevoir des espaces communs, des lieux de co-working, une grande flexibilité d'usage...

*Avez-vous prévu un espace à la mémoire d'Eugène Freyssinet ?**Votre stratégie entend-elle développer des projets à la croisée du Génie Civil et du numérique ?*

Oui, car Eugène Freyssinet fait partie de l'histoire du bâtiment, de l'innovation et de l'entrepreneuriat. Quant au Génie Civil, c'est un domaine qui nous intéresse. J'ai déjà reçu par exemple une start-up française qui réalise du béton connecté avec du wifi intégré. Mais pour l'heure, rien n'est arrêté.

•••

taurants ouverts sur le quartier par une terrasse. L'ensemble sera « connecté » à la ville par une requalification globale des abords et la création de nouvelles voies d'accès. Les travaux, d'une durée de deux ans, ont commencé à l'automne 2014. En raison de sa finesse, l'ossature en béton ne peut supporter des charges supplémentaires ni être percée. L'isolation thermique et l'étanchéité nécessaires au confort des futurs occupants ont été posées via une surtoiture respectant les courbes, la texture et la teinte du béton.

L'emblème du numérique hexagonal

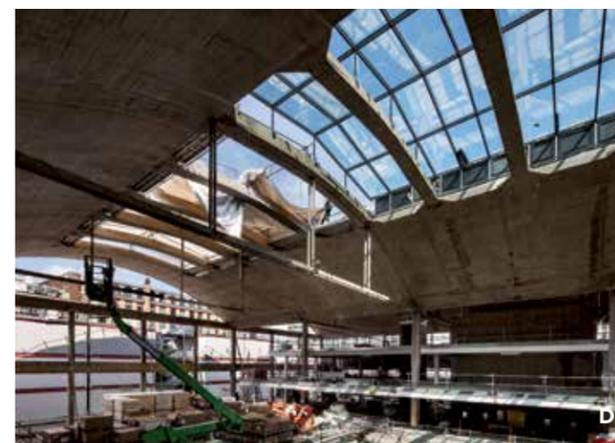
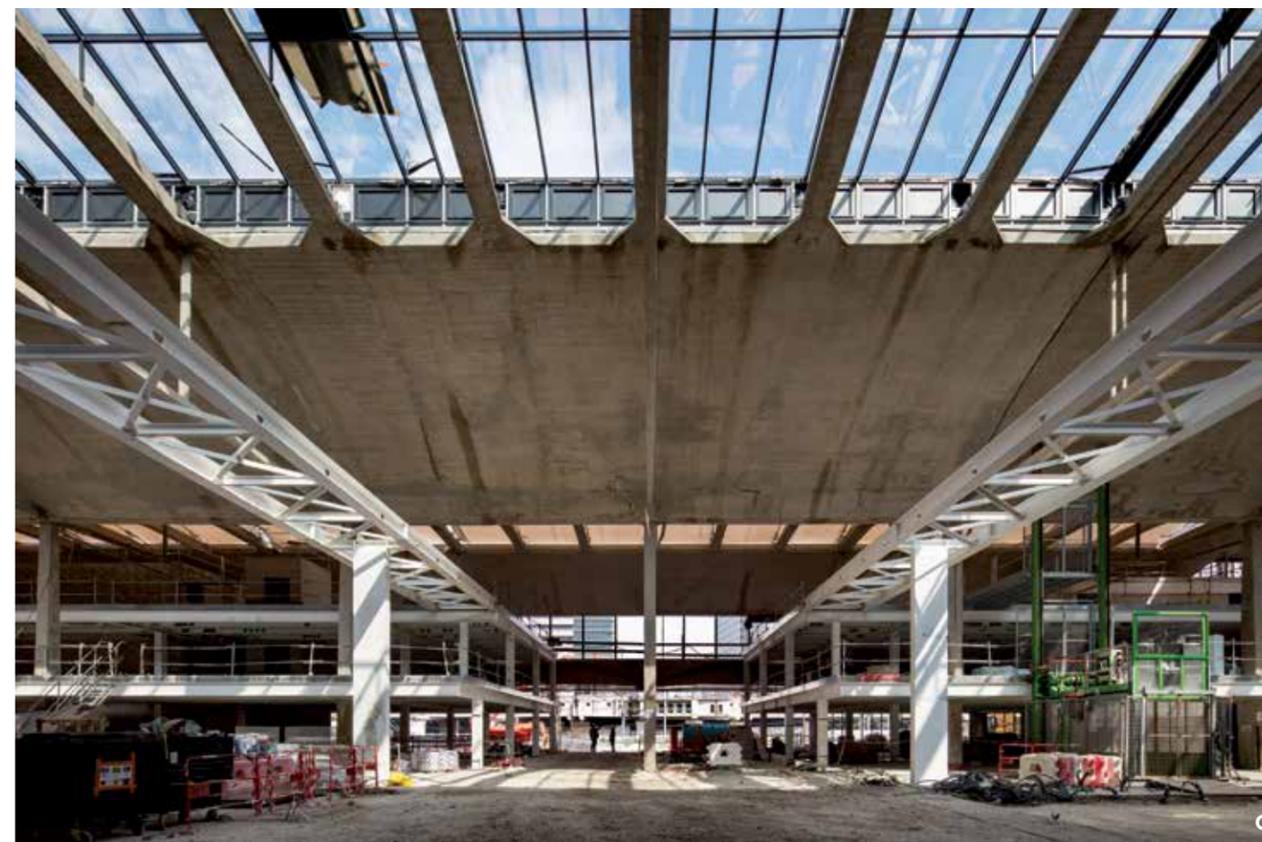
Si la French Tech, mouvement d'entrepreneurs installés en France et à l'étranger, a contribué à faire évoluer les mentalités autour de la création d'entreprise et de la « high-tech », le projet de Xavier Niel n'en est pas moins très ambitieux : aucune pépinière dans le monde n'atteint cette ampleur.

À titre de comparaison, le Cambridge Innovation Center de Boston, pourtant une référence, n'accueille que 600 entreprises. L'occasion de revaloriser l'image de la France auprès

Chiffres clés**Surface** : 33 747 m² SDP**Longueur** : 310 m**Largeur** : 58 m**3 nefs parallèles** faites de voûtes minces en béton précontraint de 5 cm au faîtage

des investisseurs étrangers. Cette pépinière pourrait donc devenir le terreau d'une compétitivité française retrouvée et être érigée en facteur d'attractivité pour la haute technologie. Pour la Halle Freyssinet, haut lieu de la créativité française et trait d'union remarquable entre le xx^e et le xxi^e siècle, le symbole est fort : construite par un ingénieur qui a révolutionné l'art de construire au xx^e siècle, elle accueille le précurseur du numérique au xxi^e siècle.

Ce parallèle entre les deux hommes, Freyssinet et Niel, éminences grises de l'excellence française en matière d'ingénierie, ne devrait-il pas favoriser des synergies entre le Génie Civil et le numérique ? Si les deux univers s'ignorent encore, ils partagent sans aucun doute la même vision du progrès et de l'excellence. Les acteurs du génie civil développeraient l'usage des outils numériques tandis que les jeunes des start-up emprunteraient aux professionnels de la construction leur esprit concret, et apprendraient ainsi à transformer l'idée en prototype. ■



C, D

La halle est constituée de minces voûtes en béton (5 cm au faîtage) supportées par de fins piliers pyramidaux.

E

Le projet conserve la mémoire logistique et ferroviaire du site.

F

La légèreté de la structure est due aux auvents suspendus et stabilisés par des tirants métalliques noyés dans le béton.

G

La halle sera « connectée » à la ville par une requalification de ses abords.



TURQUIE

PONT YAVUZ SULTAN SELIM, LE PONT DES RECORDS

Par son comportement hybride, le troisième pont sur le Bosphore résout l'équation contradictoire d'un ouvrage suspendu et haubané à profil aérodynamique.

TEXTE : DELPHINE DÉSVAUX – REPORTAGE PHOTOS : THIERRY DELÉMONT – T INGÉNIERIE

À cheval entre l'Europe et l'Asie, séparée par le détroit du Bosphore, Istanbul était jusqu'en 2016 reliée aux deux continents par deux ouvrages suspendus à profil aérodynamique, respectivement construits en 1973 et en 1988. En 2012, les autorités turques décident de réaliser une nouvelle autoroute de 150 kilomètres dotée d'un troisième pont pour décongestionner la métropole et déporter le trafic international hors de l'agglomération. En février de la même année, le consortium italo-turc Astaldi-Içtaş appelle l'ingénieur Michel Virlogeux et Jean-François Klein, administrateur du bureau d'études suisse T Ingénierie, pour répondre au concours.

Le programme insistait sur la qualité architecturale et imposait un ouvrage suspendu dans la lignée des ouvrages existants. Autre impératif, remettre l'offre fin avril : les concepteurs disposaient donc de huit semaines pour concevoir le projet ! C'est peu... Ni une ni deux, les deux ingénieurs, qui se connaissent bien, se mettent au travail et, en l'absence de

données, lancent une véritable « machine de guerre » en faisant appel aux expertises de leurs relations.

Un pont suspendu à haute rigidité

Deux mois plus tard, ils rendent un projet de pont suspendu et haubané à tablier aérodynamique dont la silhouette élégante séduit d'autant plus le jury que les propositions concurrentes ne présentent pas les mêmes qualités esthétiques... et financières. De fait, la finesse du profil relève du tour de force quand on sait que l'ouvrage porte deux voies ferrées, huit voies d'autoroute et des trottoirs latéraux. « *Les grands ponts mixtes rail-route doivent nécessairement avoir un tablier très rigide pour supporter les charges ferroviaires, aussi variables que conséquentes, définies par l'Union Internationale des Chemins de fer (UIC). C'est pourquoi ils sont en général sur deux niveaux et rigidifiés par un épais treillis d'une quinzaine de mètres de hauteur, pas du tout dans l'esprit du pont espéré* », explique Michel Virlogeux.

Concessionnaire : Astaldi S.p.A ; IC Içtaş İnşaat – **Conception** : Michel Virlogeux ; Jean-François Klein T Ingénierie – **Contrôle pour le concessionnaire** : Setec tpi – **Études géotechniques** : Lombardi – **BET** : T Ingénierie – **Essais en soufflerie** : CSTB, Politecnico di Milano – **Haubans et câbles de suspension** : Freyssinet – **Entreprises** : Astaldi S.p.A ; IC Içtaş İnşaat ; Hyundai Engineering & Construction ; SK Engineering & Construction Joint Venture ; Freyssinet – **Calendrier** : février 2012 – août 2016 – **Coût** : 900 M\$.

Chiffres clés

Le plus long pont à haubans et suspendes : 2 164 m de longueur totale et 1 408 m de portée entre les pylônes

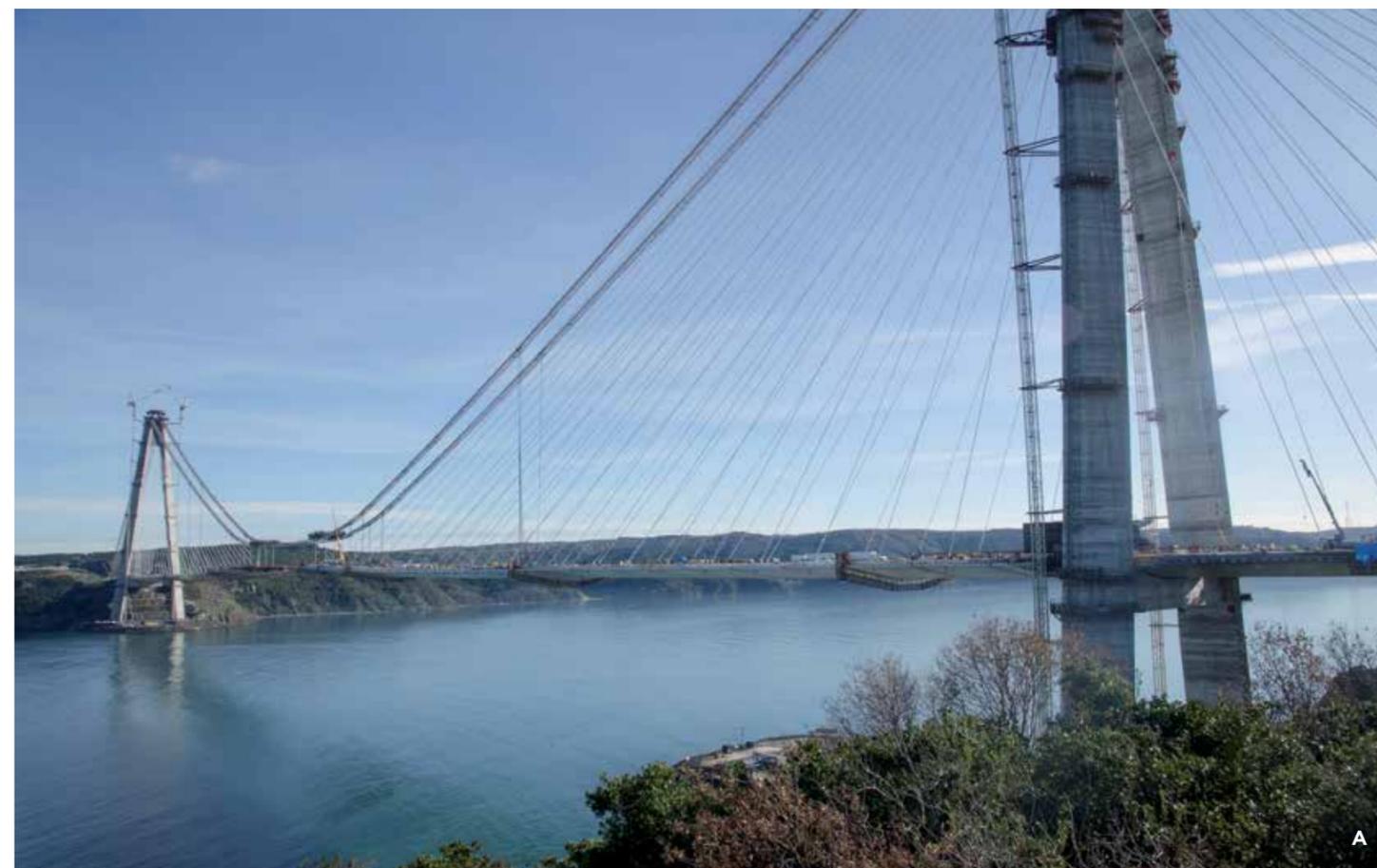
Les plus hauts pylônes : 322 m de hauteur

Le plus long pont équipé de voies ferrées

Le tablier le plus large : 58,50 m

Pour des raisons esthétiques et après validation par des essais en soufflerie réalisés par le CSTB de Nantes, les deux ingénieurs conçoivent un tablier à un seul niveau, suspendu, mince (5,35 m d'épaisseur) dont le dimensionnement bat plusieurs records du monde.

Cependant, l'obligation de pont suspendu pose le problème de la déformabilité de l'ouvrage lors du passage des trains : les câbles porteurs de la suspension se dérobent sous la charge, produisant des déformations verticales (flèches) incompatibles avec la circulation ferroviaire. Pour pallier cette souplesse de fonctionnement, le tablier est rigidifié par des « câbles de rigidification », autrement dit des haubans, ancrés de part et d'autre des pylônes en rives du tablier. Ce système stabilise ainsi l'ouvrage en réduisant très significativement les flèches. Dès lors, la travée centrale, un caisson orthotrope en acier, adopte trois types de comportement : une zone hau-



A —
À la fois suspendu et haubané, l'ouvrage adopte un profil aérodynamique.

B —
Le pylône européen est fondé sur la rive, non dans l'eau.

...

banée aux abords des pylônes ; une zone suspendue au centre de la grande travée, avec des suspentes ancrées de part et d'autre des voies ferrées situées au milieu du tablier pour limiter les rotations de torsion ; et entre les deux, une zone de transition qui régularise les déformations en mixant les haubans et les suspentes.

Une portée rallongée

Autre tour de force : la construction, dont le concours stipulait qu'elle devait se dérouler en 36 mois. Elle commence officielle-

ment, le 29 mai 2013, date anniversaire de la prise de Constantinople (1453). En réalité, le consortium Astaldi-Içtaş, qui voulait sous-traiter la réalisation de l'ouvrage, a pris le risque de démarrer les travaux avant même d'avoir choisi les sous-traitants. Lorsque l'entreprise coréenne est arrivée, une avancée dans le Bosphore était réalisée pour installer le chantier et les fondations des pylônes étaient creusées. Contrairement au programme qui stipulait l'implantation du pylône européen dans l'eau, Michel Virlogeux et Jean-François Klein choisissent de le fonder sur la rive. Il leur

faudra mobiliser une grande force de persuasion pour convaincre l'entreprise d'allonger la portée du tablier, qui passe ainsi de 1 255 m à 1 408 m, nouveau record dans la catégorie des ouvrages à « haubans suspendus », jusqu'alors détenu par le pont Russky (2012). « Au final, tout le monde s'est félicité de ce choix judicieux qui a permis de sécuriser le planning et les coûts en évitant les aléas des travaux offshore », résume Jean-François Klein.

Un temps de construction record

Le chantier a commencé de façon classique par les fondations des pylônes. Pas de fait notable sinon un rythme intense, 7 jours sur 7, 24 h sur 24.

Les appuis – culées, piles intermédiaires, pylônes de 322 m de hauteur –, les travées de rive et les massifs d'ancrage sont en béton (classe de résistance : C60/70). Les massifs d'ancrage, gigantesques cathédrales creusées à ciel ouvert à 60 m de profondeur, s'élèvent peu à peu en intégrant les gabarits des câbles pour les futurs ancrages des torons du câble principal. Les travées de rive – des caissons multicellulaires en béton pesant 170 tonnes par mètre linéaire – se prolongent jusqu'à la jonction avec le tablier en acier, 24 m au-delà des pylônes. Les voussoirs (24 m de longueur et pesant près de 900 tonnes) sont levés et assemblés par encorbellements successifs jusqu'au vingtième et stabilisés au fur et à mesure par les haubans. Les voussoirs de la travée centrale sont levés à l'aide de suspentes provisoires pour les premiers, puis avec les suspentes définitives.

Conçus par Jean-François Klein avec l'aide de l'architecte Frédéric Zirk, les pylônes sont de section triangulaire variable avec des fûts élancés légèrement convergents réunis par une entretoise en partie supérieure. Ils ont été réalisés jusqu'à 208 m de hauteur avec un coffrage glissant ; au-delà, avec un coffrage grim pant, qui facilite la pose des 22 boîtes d'ancrage des haubans.

Le clavage du pont Yavuz Sultan Selim, père de Soliman le Magnifique, a eu lieu le 6 mars 2016 en présence du président Erdoğan, cinq mois avant l'inauguration en août 2016. ■

Questions à

Michel Virlogeux, consultant

Cet ouvrage hybride allie suspension et haubanage. Est-ce un fonctionnement courant ?

Non, ce principe qui consiste à donner une rigidité à un pont suspendu en ajoutant des haubans près des pylônes n'est pas courant. John Roebling l'avait utilisé avec un léger treillis pour un pont en bois sur le Niagara, ainsi que pour le pont de Brooklyn à New York (1883). Depuis, ce système a été abandonné. En général, la typologie des ponts mixtes rail-route est un tablier en treillis à deux étages... Modèle que je ne trouve pas particulièrement élégant.

Vous avez choisi de faire un tablier à un seul niveau pour des raisons esthétiques et un fonctionnement en suspension pour répondre au programme. Or, les charges imposaient de rigidifier l'ouvrage. Comment avez-vous résolu cet oxymore ?

Dans une configuration de pont suspendu, le câble porteur se dérobe sous la charge au passage des trains. Nous avons renforcé la rigidité de l'ouvrage par des haubans qui transfèrent les charges directement à la tête du pylône. En outre, les travées de rive comportent des appuis intermédiaires, ce qui les rend très raides. S'est néanmoins posé un problème très complexe : habituellement, les haubans de la grande travée sont équilibrés par autant de haubans ancrés dans les travées de rive. Or ici, les rives du Bosphore sont très escarpées et les travées de rive sont donc très courtes, imposant d'ancrer cinq paires de haubans directement dans le sol, ce qui induit un important déplacement longitudinal du tablier vers une culée au passage des trains. Le rôle de l'ingénieur, c'est de savoir jouer avec le flux des efforts pour les transmettre au terrain de la façon la plus efficace et la plus directe possible. Nous avons obtenu l'équilibre de la composante horizontale des efforts par un principe tout à fait inhabituel qui consiste à mettre en traction la partie centrale du tablier.

La réalisation du pont de Normandie a pris 19 ans. Celui de Millau : 17 ans.

Celui-ci : 4 ans et demi. Comment accepter et tenir un tel délai ?

La passion parle. Et l'envie de relever le défi. Nous savions que c'était possible et nous n'avons pas eu le temps d'en perdre en discussions. Le consortium italo-turc a pris le risque de nous faire confiance.



C



D



E



F



G



H

C _
Un pont suspendu à haute rigidité pour franchir le Bosphore.

D _
Les pylônes sont de section triangulaire variable...

E _
... avec des fûts convergents réunis par une entretoise en partie supérieure.

F _
Ils sont réalisés jusqu'à 208 m de hauteur avec un coffrage glissant.

G _
Au-delà, par un coffrage grim pant.

H _
Les appuis, les travées de rive et les massifs d'ancrage sont en béton.

SEINE-AVAL

RÉSILIENCE TERRITORIALE ET INSCRIPTION CITOYENNE

Depuis 1993, l'architecte Luc Weizmann* réalise des unités de traitement de l'eau à Seine-Aval. Le sens de son engagement ? Transformer des infrastructures industrielles en architectures publiques à part entière.

ENTRETIEN RÉALISÉ PAR : DELPHINE DÉSVEAUX – REPORTAGE PHOTOS : HERVÉ ABBADIE ET CLAUDE CIEUTAT

Comment votre agence est-elle intervenue sur le site de l'usine Seine-Aval ?

C'est l'histoire d'une relation durable avec un maître d'ouvrage public, le SIAAP¹, qui promeut l'architecture. Notre agence participe à la refonte complète de l'usine depuis plus de vingt ans, puisque nous y avons réalisé une douzaine d'ouvrages importants relatifs au traitement de l'eau : l'unité de clarifloculation (2000) et son extension (2003) pour traiter les rejets urbains par temps de pluie ; l'unité de traitement des pollutions azotées, dite de nitrification et de dénitrification des eaux (2007), les unités de postdénitrification des eaux et de traitement des boues (2011) pour répondre aux objectifs de la Directive Eaux Résiduaires Urbaines (DERU). Nous développons actuellement le projet complémentaire dit de « la file biologique de traitement des eaux ». Travailler ainsi dans la continuité sur un même lieu est assez rare dans une vie d'architecte et j'y vois un gage de confiance et de satisfaction de la part d'un maître d'ouvrage exploitant.

¹ – Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne.

Maître d'ouvrage : Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (SIAAP) – **Architecte** : Agence Luc Weizmann Architectes – **Groupement d'entreprises** : OTV ; Degrémont France ; Eiffage Génie Civil ; GTM TP IDF ; SOGEA IDF – **Programme** : unités de traitement des eaux usées de l'usine Seine-Aval.

La plaine d'Achères était autrefois une riche plaine maraîchère.

Comment est advenue cette mutation ?

Depuis le XIX^e siècle, la plaine d'Achères appartient à l'histoire de Paris. Sous le baron Haussmann, lors de la mise en place du tout-à-l'égout, la plaine a été transformée en lieu d'assainissement. À l'époque, la société était fière de cette réalisation magistrale, essentielle pour l'hygiène de la capitale. Les femmes en crinoline venaient visiter les champs d'épandage des boues et les « Jardins de Paris » où l'on cultivait les futurs arbres d'alignement et les végétaux d'ornement de la capitale, mais aussi les légumes, notamment les poireaux, qui étaient vendus aux Halles : avec ses effluents, Paris fertilisait le territoire d'Achères dont les produits maraîchers nourrissaient la capitale. La boucle était bouclée de façon remarquable, exemplaire. J'ai toujours été fasciné par cette relation entre ce site de résilience et le ventre de Paris. Entre 1940 et 1970, les techniques d'assainissement ont évolué vers des solutions plus sophistiquées, devenant de véritables

infrastructures industrielles réalisées progressivement en quatre tranches.

Dans les années 1990, le traitement d'une pollution plus complexe, les nouvelles attentes en termes de maîtrise des nuisances visuelles, sonores et olfactives, ont induit une évolution des procédés de traitement, générant une nouvelle typologie de bâtiments dont la conception était à inventer... C'est sur cette troisième génération que nous sommes intervenus. Considérant la créativité à la fois hydraulique et technique avec laquelle s'est développé ce site, l'enjeu était de conférer à ces nouveaux projets une véritable identité architecturale, les affirmant comme des équipements publics à part entière au service de la cité. Car, s'il est méconnu des Franciliens, Seine-Aval est le plus grand site d'assainissement d'Europe et constitue de fait un équipement majeur du Grand Paris, lié aux problématiques environnementales contemporaines, au même titre que le Stade de France, Eurodisney ou le château de Versailles le sont dans les domaines du sport, des loisirs ou de la culture...

Vous avez su élever ces programmes communément jugés ingrats au rang d'équipements publics citoyens. Quel est l'impact de ce glissement sémantique sur votre travail d'architecte ?

Il s'agissait de transformer la connotation négative de ces programmes en exprimant la noblesse d'une activité citoyenne qui soigne



A —
L'unité de nitrification des eaux intègre la logique fonctionnelle du process et une expression architecturale à l'échelle du paysage...

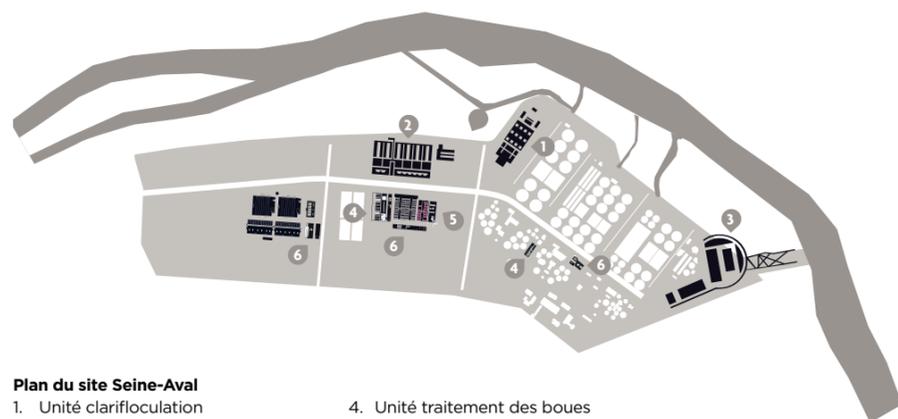
B —
... de la plaine d'Achères, dans une boucle de la Seine.

...

l'eau et préserve le milieu naturel. Considérer ces infrastructures de Génie Civil comme des bâtiments publics nous a permis de sortir de la seule fonction industrielle pour dégager une formalisation architecturale nouvelle. La part purement technique et industrielle des ouvrages est intégrée dans le dessin d'une véritable architecture qui exalte la vocation environnementale des équipements, leur conférant une présence sereine dans cette boucle de Seine, pour le personnel, pour les riverains et les visiteurs. Nous avons conçu avec soin une typologie de projets qui valorisent la lutte contre la pollution, la maîtrise des nuisances et la préciosité de l'eau, fait intervenir des artistes dans l'idée de modifier la perception sensible de ces usines, organisé des circuits pédagogiques au sein même des espaces. Je ne peux d'ailleurs m'empêcher de faire le parallèle entre l'usine d'Achères et Beaubourg, édifice culturel par excellence, qui exalte sa technicité au cœur de Paris, quand les nouvelles unités de traitement d'eau introvertissent l'activité industrielle au profit d'une relation pacifiée avec le grand paysage.

Vous avez développé une écriture à la fois urbaine et architecturale particulière...

Ces projets, tous différents du fait de leurs contraintes spécifiques, nous ont en effet fourni l'opportunité unique de développer, avec beaucoup d'enthousiasme, une écriture architecturale homogène, à la fois unitaire et diversifiée. L'ensemble compose progressivement un véritable cité-jardin, au service de l'eau, mais aussi des personnes qui y travaillent. Tisser des relations fonctionnelles et spatiales a supposé une approche très variée des formes, des couleurs, des textures. Le béton y a toute sa place, non seulement pour des raisons de pérennité vis-à-vis des ambiances corrosives, mais également pour sa plasticité et sa matérialité. La spécificité des infrastructures de Génie Civil liées à l'eau impose l'emploi de bétons hydrauliques complexes pour résister aux agressions chimiques et de bétons structurels pour des ouvrages de grande dimension. En superstructure, nous utilisons des bétons aux finitions variées (brut,



Plan du site Seine-Aval

- | | |
|--|-------------------------------|
| 1. Unité clarifloculation | 4. Unité traitement des boues |
| 2. Unité traitement pollutions azotées | 5. Unité postdénitrification |
| 3. Unité prétraitement | 6. Unité file biologique |

matricé, poli, sablé, désactivé, lisse, rainuré, clair, teinté dans la masse...) pour créer parfois des formes sculpturales comme les « coques » et la résille de l'unité de postdénitrification. On pourrait presque dire que Seine-Aval est un festival du béton dont le volume considérable se chiffre en dizaines de milliers de mètres cubes. L'enjeu est donc d'apporter un traitement qualitatif, subtil, des peaux, des éléments de second œuvre et de la composition du paysage.

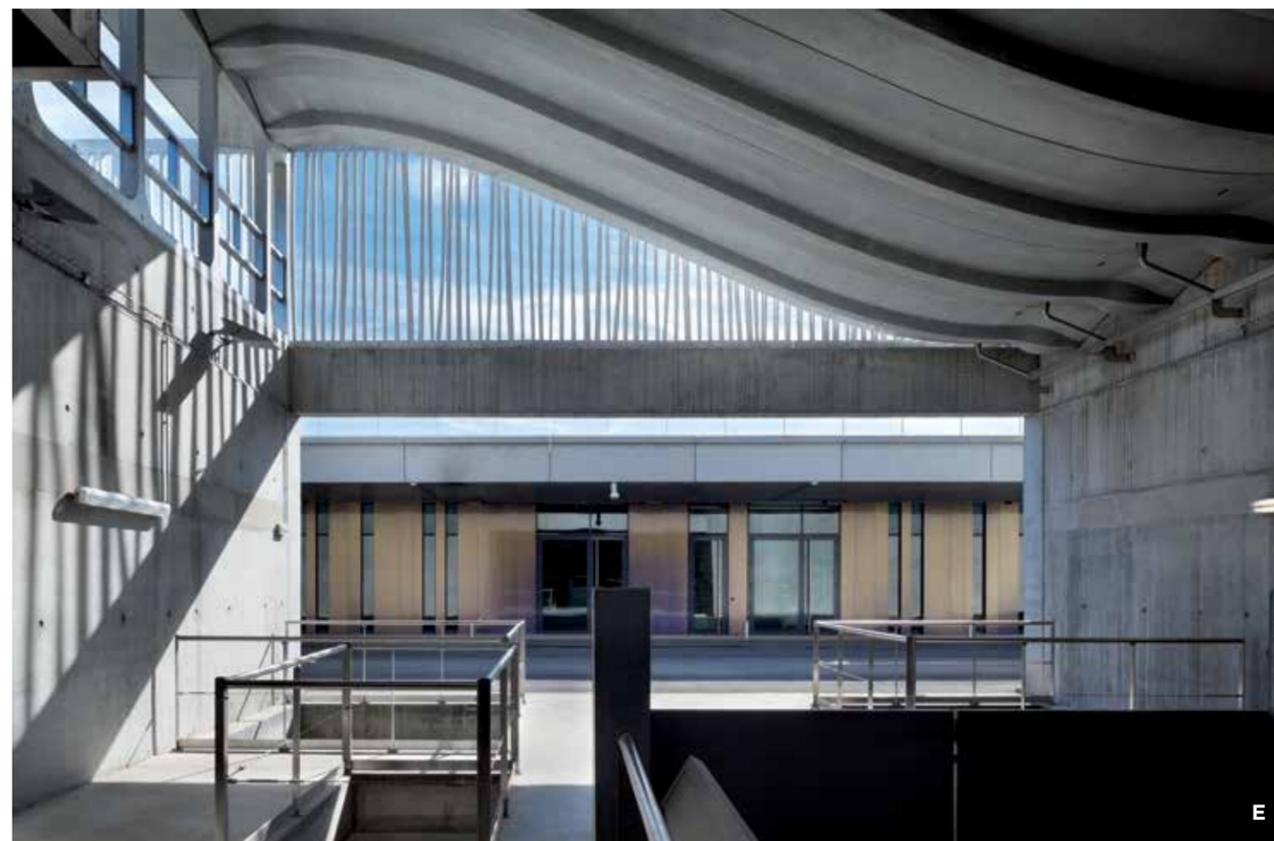
Les unités de la file biologique des eaux que vous êtes en train de construire sont très représentatives de votre préoccupation d'aménagement territorial. L'implantation des différents ouvrages, leur plastique, le choix des matériaux rappellent singulièrement les usines que vous avez précédemment réalisées.

Les unités de la file biologique répondent aux nouvelles normes européennes d'assainissement et prolongent la refonte progressive de l'usine des eaux. C'est un projet important, qui compte un grand nombre d'ouvrages, c'est pourquoi nous sommes associés à l'agence Lelli Architectes, elle-même familiarisée avec ce type de programmes.

L'architecture combine les formes très horizontales des bassins avec le rythme vertical des bâtiments techniques. Ce contrepoint volumétrique unifie l'ordonnement à l'échelle du territoire, le sentiment d'unité

étant renforcé par une implantation des bâtiments et un traitement des façades en rapport avec les équipements construits. Là encore, le béton est très présent, un peu partout et sous toutes ses formes, qui donne un air de famille aux différentes unités. Pour les ouvrages de biofiltration, par exemple, le volume des bassins, surélevé par rapport au sol, comprend un soubassement en béton matricé et un couronnement en résille de béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP) qui permet un usage en simple peau structurelle autoportante et non corrodable. Cette enveloppe diaphane unifie l'ensemble des constructions tandis que la transparence du claustra tempère la massivité des canaux. Faisant écho aux grandes lignes des autres ouvrages, la couverture des bassins est constituée de coques dont la forme répétitive évoque le mouvement des eaux. Au nord, en vis-à-vis de l'unité de nitrification, les trois postes de pompage sont fédérés par une façade linéaire en béton poli gris-bleu percé de failles verticales. Et si nous aimons travailler ses textures, nous avons aussi grand plaisir à l'associer à d'autres matériaux : nous avons ici tempéré sa présence avec du bois, des façades vitrées, des murs de gabions et par une ambiance très végétale qui fait la part belle aux espaces paysagers. ■

* Livre « Espaces inattendus », Luc Weizmann, Delphine Désveaux, coédition Créaphis Metropolis, 2014.



C
Unité de traitement des boues.

D
Unité de traitement des pollutions azotées, dite de nitrification.

E, F, G
L'unité de postdénitrification des eaux est desservie par une grande faille organisée entre les bassins de traitement et les locaux techniques intégrés sous une terrasse-jardin. Une création originale de coques structurelles précontraintes et de fines résilles à base de BFUP se développe en couverture et en façade des bassins de traitement.

VIROFLAY

DEUX NEFS EN BÉTON POUR DES GARES SOUTERRAINES

Les deux nouvelles gares souterraines du T6 de Viroflay ont nécessité d'importants travaux de Génie Civil. L'Atelier Schall a opté, pour chaque gare, pour une vaste nef aux structures apparentes en béton brut.

TEXTE : SYLVIE ROMAN – REPORTAGE PHOTOS : HUGO HÉBRARD

« **L**a conception architecturale d'une gare de tramway est particulière, et doit se différencier d'une gare de métro, notamment en conservant une certaine continuité urbaine », souligne Lucie Coursaget, architecte chargée du projet au sein de l'Atelier Schall, maître d'œuvre. « Nous devons aussi trouver une architecture pérenne qui ne vieillisse pas. »

Le prolongement de la ligne de tramway T6, Châtillon-Vélizy-Viroflay, soit environ 2 km, est en partie souterrain : le tunnel plonge sous la colline avec une pente de près de 10 %, pour desservir les deux gares souterraines, Viroflay Rive Gauche puis Viroflay Rive Droite. Cette configuration particulière a influencé le mode constructif des gares situées à quelques centaines de mètres l'une de l'autre, mais connectées à différents pôles de transports.

Une architecture de la transparence... en béton

Dans les deux gares, qui développent des quais de 42 m de longueur, l'architecte a opté pour un langage commun, tant dans la manière que dans la matière. C'est une « archi-

ture transparente », donnant à voir l'espace et les quais dès la descente dans la gare par les escaliers, une vingtaine de mètres plus bas. Paradoxalement, cette plongée relativement brutale dans le monde souterrain s'ouvre d'un seul regard vers la lumière et la simplicité des formes. « Si l'espace est intelligible, alors on aura réussi ! », lance l'architecte. Car bien que le résultat final les gomme, les contraintes techniques ne manquaient pas. Comme pour tout ouvrage de Génie Civil souterrain, la difficulté principale tenait aux accès, pour laisser passer les engins de chantier, les matériaux, et les hommes, mais aussi à la configuration très urbaine offrant très peu d'espace et de recul en surface.

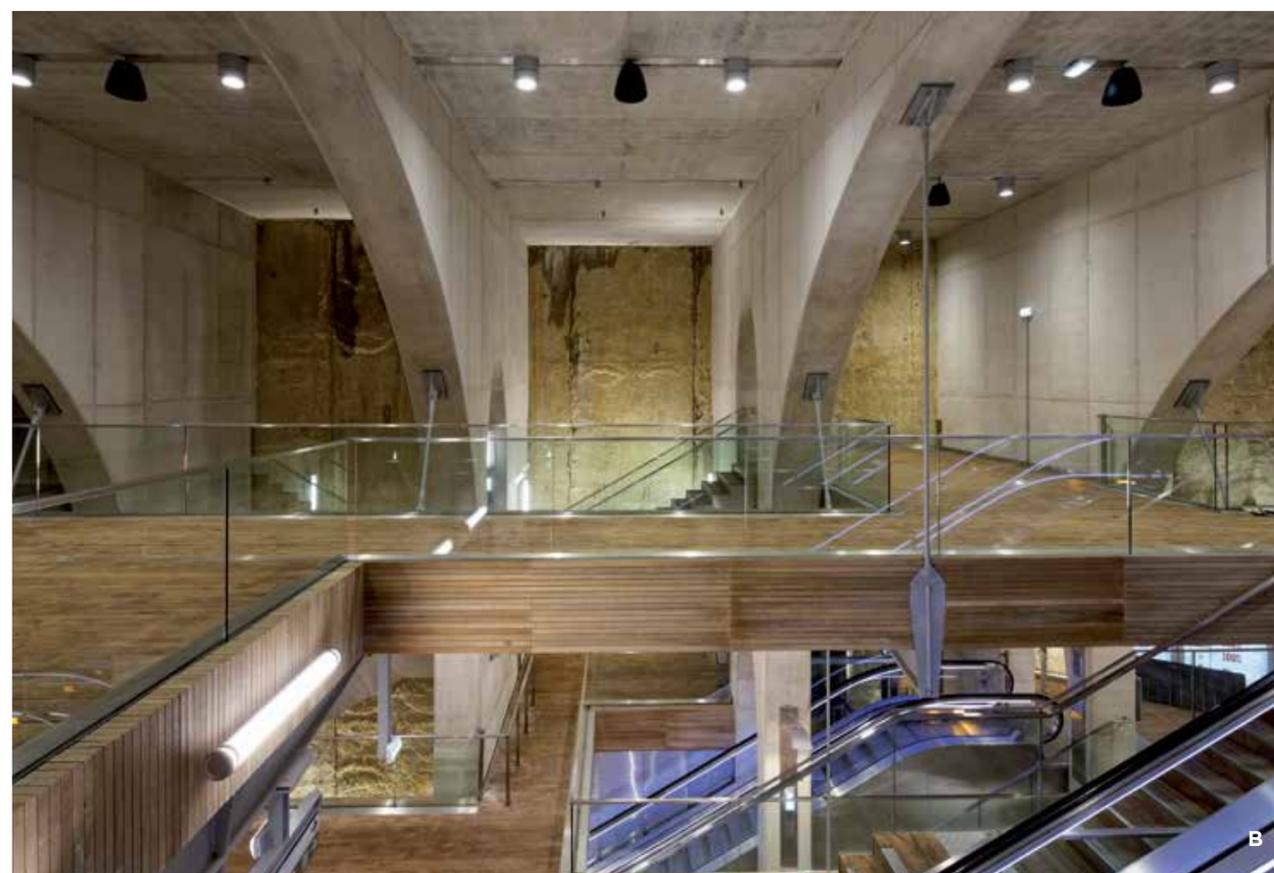
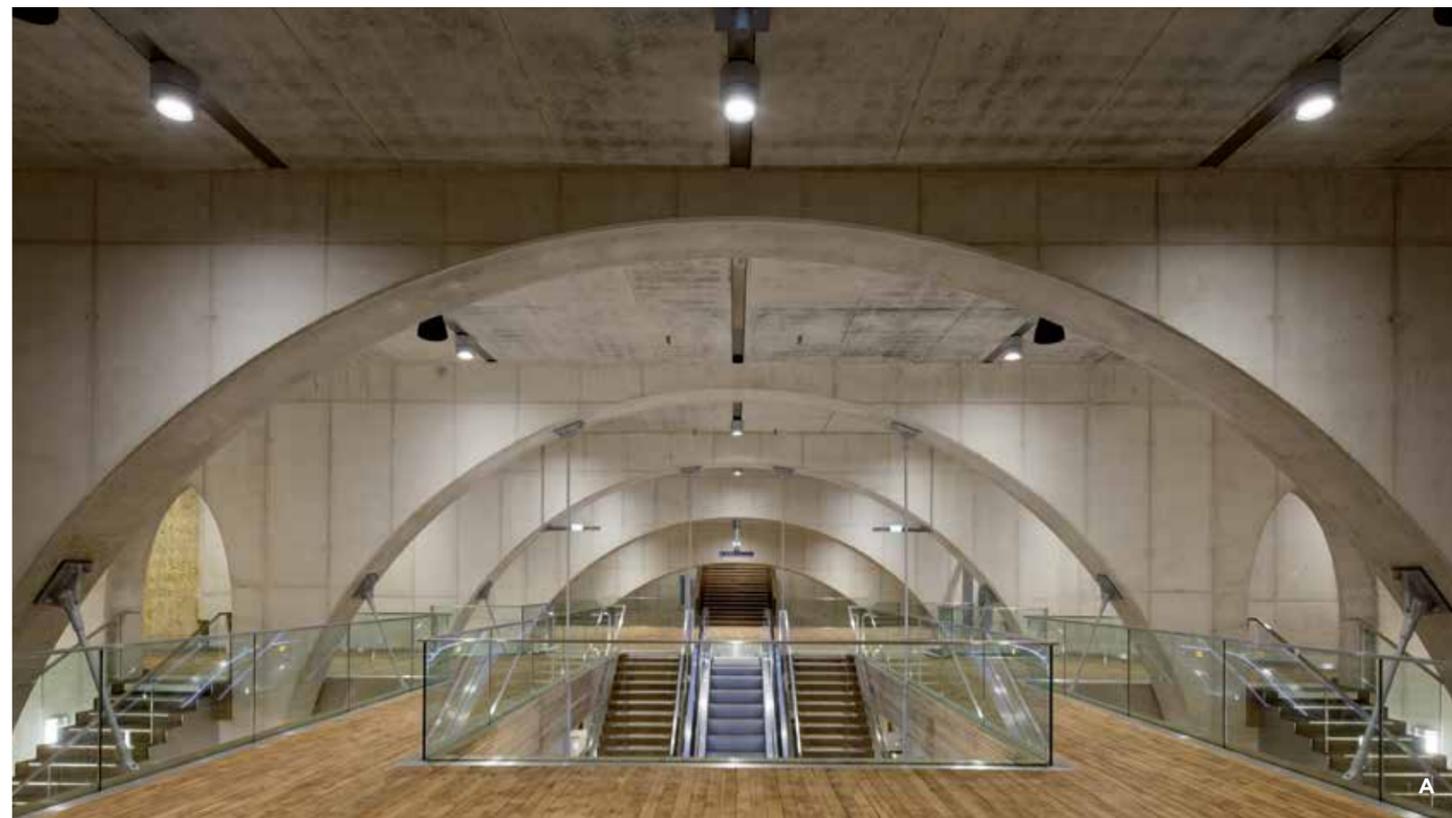
Ainsi, rive gauche, alors que le tunnelier officiait à près de 30 m sous terre, avançant peu à peu vers la future gare (à la vitesse d'une quinzaine de mètres par jour), en surface les équipes d'Eiffage Génie Civil réalisaient une trémie relativement réduite de 10 x 10 m de section afin de permettre l'accès au chantier souterrain : machines, matériaux et hommes, l'ensemble de l'approvisionnement du chantier est passé par cette trémie.

La dalle de couverture de la gare a été mise en œuvre « en pianotant sur les zones de circulation », afin de gêner *a minima*, tandis que les parois de « la boîte » de la gare de tramway ont été creusées sur 30 m de profondeur. Au fur et à mesure de la réalisation des parois moulées, avec la mise en place de butons provisoires, « nous avons construit un radier puis les poteaux des arches, enfin nous avons coulé la dalle intermédiaire des locaux techniques », détaille Benoît Lapostolle, directeur du projet chez Eiffage Génie Civil. « C'était un véritable puzzle ! » Autre difficulté, liée à la contrainte spatiale, l'ensemble de ces opérations s'est fait manuellement, avec des coffrages manportables et sans grues.

Un béton de roulement extraplat

Après la réalisation des parois moulées et des « arches-butons », le coulage du béton de fond de tunnel, sur 2 m d'épaisseur, a pu démarrer. « C'est une division spécialisée dans les bétons à plat, au sein d'Eiffage Génie Civil, qui a réalisé tous les bétons », précise Benoît Lapostolle. Soit 6 mois de coulage pour l'ensemble du tunnel et des deux gares.

Ce n'est pas une « simple » opération puisque la planéité du béton doit être parfaite avec une tolérance proche du millimètre, malgré plusieurs courbes dans le tunnel. Par ailleurs, afin d'augmenter l'adhérence des pneus du tramway, le béton a été hydrodécapé sur



A —
Gare de Viroflay Rive Gauche. La succession d'arches en béton de 20 m de portée, évidées pour laisser passer les escaliers.

B —
Jeu de contrastes des bétons bruts : les arches en béton blanc et les parois moulées.

...

toute la longueur de la voie, de part et d'autre des deux rails de guidage du tramway dans chaque sens de circulation.

Des arches en béton blanc

Aucun pilier, aucune poutre, ne soutiennent la dalle de 20 m de portée : seulement des butons en forme d'arches, réalisés en béton brut clair et dégageant ainsi un très large espace qui amplifie l'effet de vide.

« Pour des raisons techniques, toutes les arches de soutènement, huit par gare et d'une quinzaine de mètres de large, ont été coulées en place », explique Éric Mordant, ingénieur travaux en charge des gares chez Eiffage Génie Civil. Après le passage du tunnelier et la mise en place des voussoirs préfabriqués en béton, les équipes se sont donc atte-

lées à la réalisation des poteaux des arches. « Pour ce chantier assez complexe, nous avons mis au point deux outils coffrants spécifiques, car évidemment, les arches ont des rayons de courbure différents d'une gare à l'autre. » Par ailleurs, l'agence d'architectes a souhaité jouer sur les contrastes entre le beige clair du béton coulé des parois et le soyeux blanc grisé des parois de béton brut des arches. « Un vrai défi pour nos équipes surtout dans ces conditions de travail. Le parement est donc très soigné, avec un haut niveau de finition. Et les grandes hauteurs des arches et des parois moulées accentuent la visibilité des différents bétons, qui sont l'identité et la caractéristique de ces deux gares », souligne de son côté Benoît Lapostolle. Le béton clair, qui provient de la centrale

Cemex d'Issy-les-Moulineaux, est très ferrailé, du fait de la relative finesse des arches, 450 mm pour 15 m jusqu'à la clé de voûte de la plus haute arche. D'ailleurs, ces fines structures remplissent deux fonctions distinctes : un rôle de butonnage des parois moulées, et un rôle de soutènement de la dalle intermédiaire des locaux techniques, un béton de 30 cm d'épaisseur et 20 m de portée.

Autre particularité des arches, elles sont évi-dées sur différents niveaux, en diagonale et en décalé, afin de ménager un espace pour laisser passer les escaliers mécaniques, ce qui a compliqué leur dimensionnement et leur réalisation.

Un subtil jeu de lumière

Enfin, pour des raisons esthétiques, l'architecte souhaitant la mise en avant de la matière, tous les réseaux sont camouflés dans les arches de béton, grâce à des engravures pratiquées lors du coffrage, et fermées par des plaques d'innox. Un subtil jeu de lumières, positionnées sur les arches ou encore dans le sol au raz des parois moulées, accentue les effets de matière et augmente les volumes. Jouant le jeu du béton jusqu'aux finitions, l'architecte a aussi dessiné les bancs, préfabriqués dans un béton d'une teinte proche de celui des arches, et suspendus par des ancrages invisibles fixés dans les parois moulées.

Même si « l'effet cathédrale » des gares est à présent en partie atténué par l'installation d'une mezzanine intermédiaire, c'est la matière brute du béton qui attire tous les regards et ne manquera pas de susciter des questionnements, tant le projet est original. ■



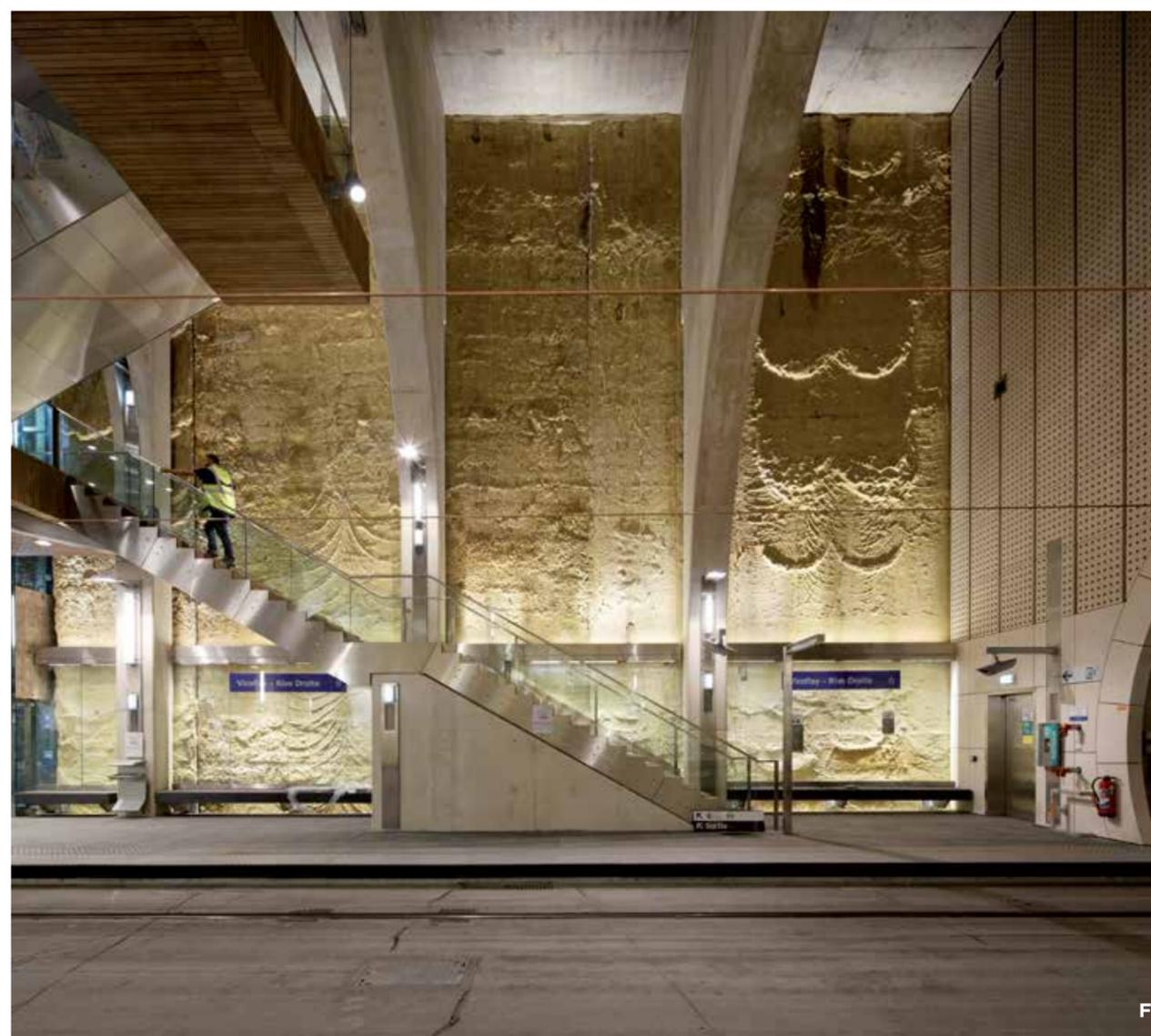
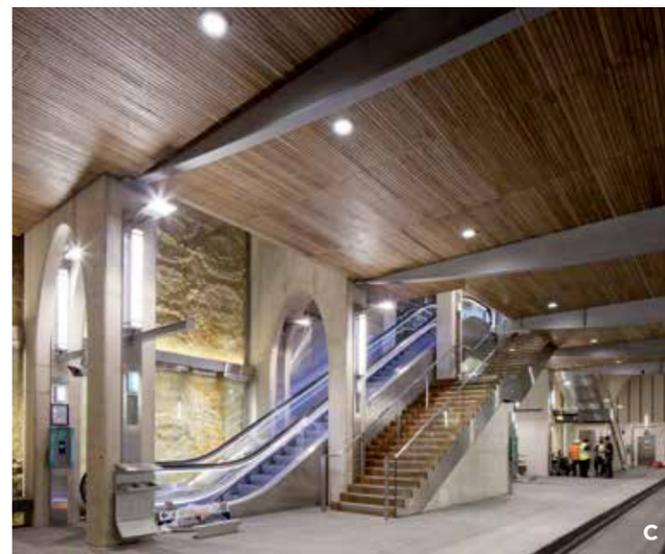
Des parois moulées façon pierre meulière

C'est l'un des effets les plus spectaculaires de la gare : des parois moulées d'une vingtaine de mètres de hauteur, avec un béton dont la coloration et l'aspect rappellent la pierre meulière si caractéristique de Viroflay. Cette demande assez originale faite à l'entreprise Soletanche Bachy s'explique par la volonté de l'architecte de laisser le béton apparent, avec ses aspérités et ses « défauts » de coulage, propres à la technique employée...

Cette mise en valeur des parois moulées « est un véritable défi, tant le résultat est dépendant de la géologie des couches traversées, et non pas de la technique ou de l'intervention des équipes », tient à souligner Jeroni Boude, ingénieur en charge des travaux chez Soletanche Bachy. Pour réaliser ces parois, des panneaux de 30 m de hauteur (dont 20 m visibles) pour 1 m d'épaisseur et plus de 170 m de longueur, deux outillages de chez Soletanche Bachy ont été utilisés : une benne hydraulique pour les couches de surface, plus tendres, et une hydrofraise compacte en raison du peu de place pour réaliser l'ancrage du pied des parois.

Le processus d'excavation et de réalisation était tout à fait classique, avec la mise en œuvre d'une cage d'armature (ferrailage de 85 à 90 kg/m³), la mise en place de joints *waterstop* entre les panneaux, tous les 6 m environ, et le bétonnage à l'aide de tubes plongeurs. Au total, 4 mois de chantier par gare.

Mais la particularité d'une paroi moulée tient au fait que celle-ci n'est visible d'un côté qu'une fois le terrassement réalisé. Le projet de l'Atelier Schall étant de mettre en valeur la matière, tout en rappelant la pierre locale, les bétons structurants constituent ainsi les parements des deux gares. Il aura fallu attendre plusieurs mois avant de découvrir le résultat, avec ses vagues, ses plis et ses coulures de béton. La paroi a tout de même reçu un lavage haute pression, afin de dégager les traces terreuses, mais « toutes les aspérités ont été conservées », poursuit Jeroni Boude. Il a ensuite été coloré par projection de peinture, ce qui a nécessité de nombreux essais pour trouver la teinte souhaitée par l'architecte. « C'était un pari, d'autant que la surface apparente de la paroi est relativement importante. »



C **Système des arches évidées en diagonale pour les escaliers ; les engravures des piliers accueillent les éclairages.**

D **Gare de Viroflay Rive Droite : les arches de soutènement et la voie du tramway en béton brut d'une parfaite planéité.**

E **Parois moulées en béton apparent, puis teinté, avec les « draperies » de forage. Une simple lame de verre protège la paroi.**

F **Paroi moulée et arches de soutènement, à l'entrée du tunnel. Le long, les bancs en béton blanc.**

VANNES

UN TUNNEL SOUS L'EAU POUR FLUIDIFIER LA CIRCULATION

Ouvrage destiné à fluidifier la circulation routière à l'entrée du port de Vannes, le tunnel de Kérino améliore aussi les liaisons de transports en commun et offre un passage sécurisé aux cyclistes et aux piétons.

TEXTE : MICHEL BARBERON – REPORTAGE PHOTOS : MICHEL BARBERON ET FRÉDÉRIC HENRY

Le port de plaisance de Vannes est formé par le chenal de la rivière Marle qui se mêle aux eaux du golfe du Morbihan après son passage sous la porte historique Saint-Vincent. À environ 2 km de cette dernière, au niveau du pont de Kérino, l'entrée du port représente depuis longtemps une source de conflits entre véhicules terrestres et bateaux, surtout en période estivale. Les deux modes doivent en effet se partager le pont tournant ouvert au gré des marées. Le premier mode, estimé à 17 000 véhicules routiers par jour, pour franchir l'entrée du port et aller d'une rive à l'autre.

Le second, quelque 7 500 passages par an, pour entrer ou sortir du bassin à flots. Lorsque le pont de Kérino est ouvert à la navigation, le trafic automobile se déporte sur le cœur de ville. Par ailleurs, l'itinéraire des bus Kicéo l'évite systématiquement en passant par le centre. Solution retenue donc pour améliorer le maillage des transports en commun au sud et fluidifier la circulation : créer un passage

sous-marin se substituant au pont. La décision est prise en 2006. Mais il faudra attendre le 19 octobre 2012 pour que le conseil municipal choisisse le partenaire chargé de l'opération : Vinci Construction France, dont le contrat de Partenariat Public-Privé s'étend jusqu'en 2040. La conception démarre dès novembre 2012 et les travaux en octobre 2013. Ils sont prévus sur deux ans, avec une livraison programmée pour octobre 2015. Des difficultés techniques la repoussent à l'été 2016.

Tunnel routier et « voie douce »

Situé à une cinquantaine de mètres en aval du pont, l'ouvrage souterrain comporte deux espaces de circulation, vidéosurveillés et avec Détection Automatique d'Incident (DAI). Les voitures, les deux-roues motorisés, les bus et les poids lourds ont leur propre tunnel. Les cycles et les piétons le leur, parallèle : une « voie douce » aménagée avec différentes séquences d'ambiance et d'éclairage. Avec deux nouveaux giratoires et leurs rampes

Contrat de Partenariat Public-Privé : entre la ville de Vannes et la SPIK (Société du passage inférieur de Kérino), détenu par Vinci Construction France et des financeurs – **Conception et réalisation** : assurées par le groupement Ingérop (maître d'œuvre-concepteur des structures) ; Enet-Dolowy (architecte-urbaniste) ; Antea Groupe (bureau d'études pour les fonds de la rivière) – **Sous-groupe réalisation** : composé de Cofely-Ineo et GTM Ouest, mandataire général – **Autre contrat d'exploitation** : concernera la maintenance jusqu'en 2040, année au cours de laquelle Vinci rétrocédera le tunnel à la ville.

Chiffres clés

Longueur : 250 m

Terrassements : 82 000 m³

Béton : 17 500 m³

Armatures : 2 200 tonnes

Coût : 76 millions d'euros

d'accès à 6 %, les nouvelles voies routières sont longues de 580 m, dont 250 m souterrains. En partie sous l'eau, un « exploit » rendu possible grâce au béton, l'ouvrage est un caisson large de 17,20 m à l'extérieur, de 15,20 m à l'intérieur, avec un gabarit de 4,60 m autorisant l'accès à tous les camions, ceux transportant des matières dangereuses en étant toutefois exclus. La partie route, comportant une voie pour chaque sens, est large de 10,20 m avec un terre-plein central de 2,10 m permettant le cas échéant aux véhicules de secours de l'emprunter. La séparation entre la zone routière et celle de 4,50 m dédiée aux modes doux est constituée d'une cloison composée d'une assise de béton surmontée d'un mur en blocs de béton (parpaings). Le tunnel n'atteignant pas les 300 m de longueur, selon la législation, cette séparation totale n'était pas obligatoire, mais elle a cependant été retenue pour apporter plus de confort aux piétons et aux cyclistes. L'aspect le plus contraignant



A — Le tunnel est situé à une cinquantaine de mètres en aval du pont de Kérino. Pour conserver en permanence un accès à l'avant-port, sa réalisation, à l'abri de batardeaux, a été menée en plusieurs phases.

B — Les véhicules à moteur ont pu emprunter le tunnel dès le 24 juin. Mais la livraison « officielle » à la ville de Vannes a eu lieu le 26 juillet, jour où la partie réservée aux « modes doux » a aussi été ouverte.

...

du chantier a été de garder en permanence l'accès au port de plaisance. Un impératif qui a impliqué la réalisation du tunnel, à l'abri de batardeaux, en plusieurs phases. Tout d'abord, après création d'un chenal provisoire de navigation, mise en place du batardeau en rive ouest pour construire la première moitié du tunnel. Puis, installation des parties terrestre et nautique du batardeau en rive est pour la réalisation de la deuxième section. Un batardeau central de jonction étanche a ensuite permis de relier les deux parties de tunnel déjà réalisées, le chenal de navigation définitif, offrant un tirant d'eau de 2,50 m à mi-marée, pouvant alors être rétabli. « Nous avons fait du terrassement traditionnel à ciel ouvert à l'abri de ce batardeau constitué de palplanches et de palplanches pour les rideaux, ainsi que de micropieux (réalisés en coulis de ciment à l'intérieur de chaque palpieu), et de tirants d'ancrage. Techniquement, sa réalisation a vraiment été très spécifique », explique Guillaume Gudefin, directeur travaux chez GTM ouest. « Le batardeau est relativement long. Il est large avec ses 27 m. Il est suspendu et n'a que trois côtés à chaque fois et cela a son importance puisque les efforts à reprendre étaient compliqués. »

La rencontre avec un granit très dur

Dès le démarrage du chantier, une difficulté majeure est apparue : la rencontre d'un granit très dur. « La dureté de la roche nous a empêchés de battre et de descendre correctement les palplanches. Ajoutée à une perméabilité excessive de cette roche, que les sondages n'avaient pas révélée, l'étalement du batardeau a été rendu complexe. Dans une cavité où 500 litres de coulis devaient être injectés, nous en mettions jusqu'à 6 m³ sans mise en pression ! Nous avons donc dû modifier la technique d'injection, ce qui a considérablement allongé la durée du chantier ! » Lors de la construction de l'ouvrage, l'une des contraintes fortes a été le peu d'espace laissé en partie supérieure par les butons, indispensables pour consolider et maintenir l'écartement entre les parois des batardeaux. Les quatre petits mètres libres

entre deux de ces pièces successives compliquaient en effet les manutentions à la grue à tour, ce qui a conditionné la méthode de construction. « Les 250 m de l'ouvrage sont scindés en 25 plots de 10 m, soit 25 radiers, 50 voiles et 25 traverses supérieures. D'une épaisseur de 1 m, le radier est en fait une succession de cages d'armatures métalliques, déposées à la grue, avant coulage du béton au rythme d'un plot tous les deux jours », poursuit Guillaume Gudefin.

Des outils spécifiques pour le chantier

Pour s'adapter à ce manque d'espace et faciliter les manutentions, GTM a développé des outils spécifiques. Un basculeur pour monter à l'horizontale les armatures des voiles à l'avancement, puis les relever ensuite, sécurisant ainsi les conditions de travail. Autres outils, deux portiques, un de chaque côté de l'ouvrage, tirés par des treuils pour éviter la manutention des banches des voiles à la grue.

« Pour réaliser ces voiles, nous avons ajouté des poutres treillis derrière les coffrages afin de les rigidifier sur les 5,50 m de hauteur et ainsi supprimer les tiges de maintien des banches. Les potentielles arrivées d'eau par les trous de banches dans l'ouvrage ont ainsi été limitées. » Pour créer les traverses, coulées au rythme d'une tous les trois jours, une table coffrante a été développée permettant la mise en place des armatures, indépendamment du coulage des traverses. À noter que le radier a une largeur totale de 19,20 m. Ce mètre supplémentaire extérieur de chaque côté assure une assise complémentaire de l'ouvrage, la zone étant remblayée entre le radier et les palplanches qui seront découpées au niveau de la partie supérieure du tunnel. Un dispositif qui assurera une protection supplémentaire en cas de choc de bateau. Côté est, sur le « toit » de l'ouvrage, l'entreprise réalise aussi une cale de mise à l'eau des bateaux, ainsi qu'une jetée longue de 30 m. À cet endroit, même lors des plus faibles coefficients de marée, il subsistera toujours 1 m minimum d'eau.

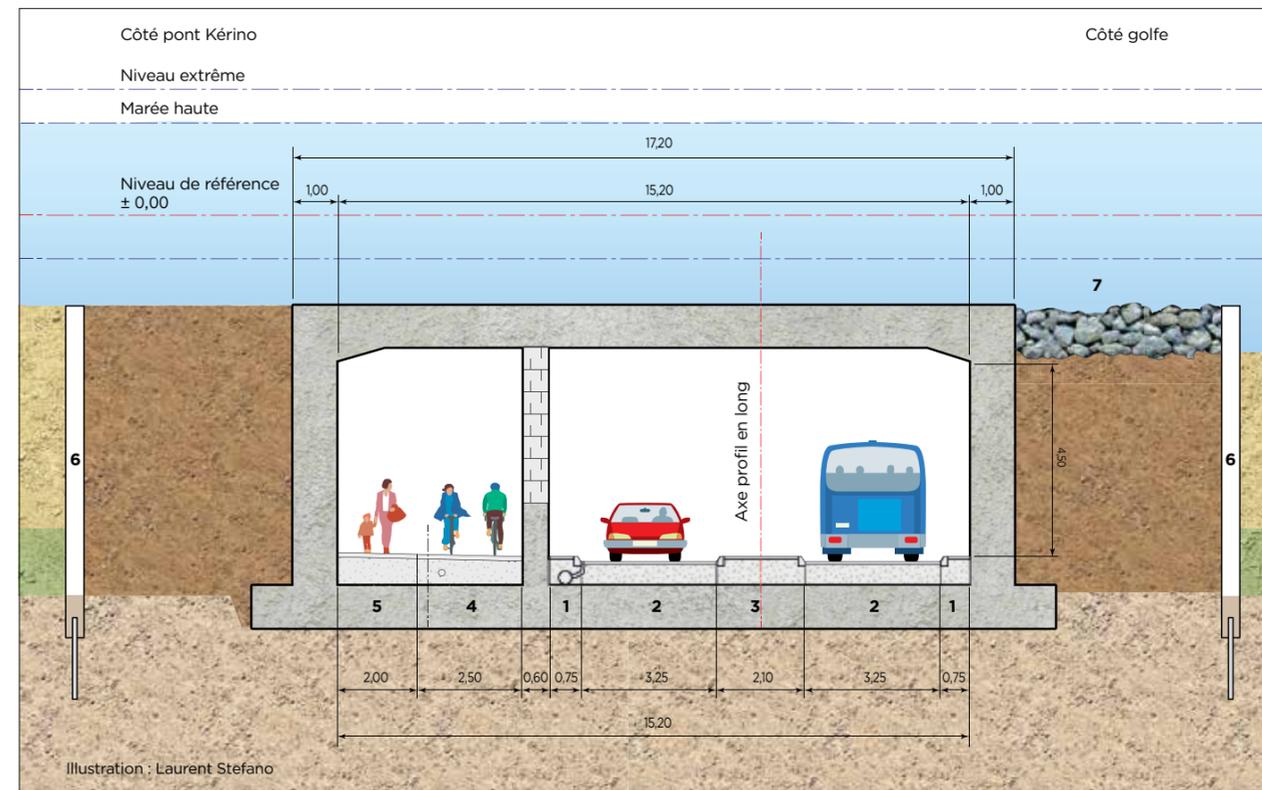
Respecter l'environnement

Valoriser et respecter l'environnement naturel du site, tels ont été les objectifs suivis lors de la construction du tunnel. Les sédiments extraits hydrauliquement lors de l'opération de dragage ont été acheminés par conduites étanches jusqu'à un site de transit et de valorisation des bassins de Tohannic, un lieu-dit proche du chantier. Vasière et haie, des éléments naturels sensibles, ont fait l'objet d'un suivi lors des travaux. De nouvelles plantations vont valoriser les espaces et participer à l'intégration de l'ouvrage.

Le coût de l'opération atteint 76 millions d'euros. Il englobe la construction du passage inférieur, son entretien pendant 25 ans, la création de parkings, le dragage du port, l'aménagement d'une ICPE (Installation Classée pour la Protection de l'Environnement) permettant la valorisation des sédiments, les aménagements paysagers.

Un béton adapté au milieu maritime

La formulation des bétons de structure pour les voiles et la traverse supérieure du tunnel, fournis par deux centrales, Eqiom et Lafarge, situées à Saint-Avé, non loin de Vannes, s'est avérée complexe. Très spécifique et très technique, c'est un béton de classe de résistance C35/45, de classe de chlorure 0,2 et de classe d'exposition XS3 (milieu maritime agressif) en conformité avec la norme NF EN 206/CN. Bien que sa longueur inférieure à 300 m ne permette pas de le considérer comme un « vrai » tunnel, le béton choisi offre une résistance au feu de niveau N3 (la plus contraignante), grâce à l'adjonction de fibres polypropylènes (1,2 kg par m³). Les essais de résistance au feu ont été réalisés au CERIB (Centre de Recherche de l'Industrie du Béton) où des échantillons de béton mis en œuvre pour le tunnel de Kérino ont été soumis à une température de 1 400° pendant deux heures dans le four Prométhée. Les caractéristiques du béton du radier sont identiques, mais il ne contient pas de fibres. ■



Voies séparées dans la tranchée couverte

- 1. Chasse roues
- 2. Chaussées
- 3. Terre-plein central
- 4. Piste cyclable
- 5. Trottoir
- 6. Palplanches
- 7. Enrochement



Sur un volume total de béton atteignant les 17 500 m³, celui mis en œuvre pour la structure des voiles et de la traverse supérieure présente une formulation complexe. À noter, en façade, les reliefs en « décrochement » évoquant les vagues.

AVORD

BA 702 : UN HANGAR FREYSSINET CENTENAIRE

Le dernier rescapé des « hangars-voûtes » conçus par Freyssinet pour l'aviation militaire fête ses 100 ans en 2016. Reportage sur la base aérienne d'Avord.

TEXTE ET REPORTAGE PHOTOS : GUILHEM LABEEUW

Conçus par Eugène Freyssinet en 1916, les 8 hangars-voûtes sont à l'origine destinés à la maintenance des biplans de l'école d'aviation d'Avord. À l'époque, ils constituent sans doute la première réalisation française de hangars pour avions en béton armé. Dans les années 2000, le seul hangar restant est affecté au Centre de Formation de Défense Sol-Air de l'Armée de l'Air. Son centenaire est l'occasion de revenir sur l'importance historique de cet ouvrage et de valider les conditions de sa préservation.

Historique

Créé en 1912, le centre d'aviation d'Avord devient au cours de la Première Guerre mondiale l'école d'aviation la plus importante en France, formant plus de 10 000 aviateurs durant le conflit. Le nombre d'avions basés à Avord ne cesse de croître (1 300 en 1918), nécessitant d'importants travaux d'infrastructure. En 1914, l'archétype du hangar pour avions est pourtant une construction en bois et toile (Bessonneau), dont les différentes tailles répondent aux envergures des avions. Par leur légèreté, les structures bois sont employées aussi bien sur les terrains du front que sur les grands camps d'aviation à

l'arrière. Les structures en acier sont quant à elles pénalisées par les besoins en ressources pour l'armement, poussant les ingénieurs à inventer des structures de très grande portée (80 m) comme les hangars métalliques à fermes haubanées (Arnodin-Eiffel et Dubois). En France, l'utilisation du béton armé dans les hangars pour avions devra attendre 1916 avec les premiers travaux des ingénieurs Freyssinet, Lossier et Caquot.

En réalité, Eugène Freyssinet jette dès 1913 les premières bases d'un hangar pour avions en béton armé en soumettant au Génie d'Orléans des projets audacieux pour l'époque. « *Un de ces projets comportait l'emploi d'une série de nefs voûtées, recoupées par une nef identique, mais perpendiculaire aux précédentes, de manière à déterminer des voûtes d'arêtes. La note descriptive du projet fut jugée paradoxale, parce qu'elle affirmait que, pour la construction des grands hangars d'aviation, le « ciment armé » permettrait de réaliser des conditions de solidité, de sécurité, d'étanchéité et de résistance à l'incendie, inconnues jusqu'à ce jour, avantages auxquels viendra s'ajouter l'économie du prix de revient.* »

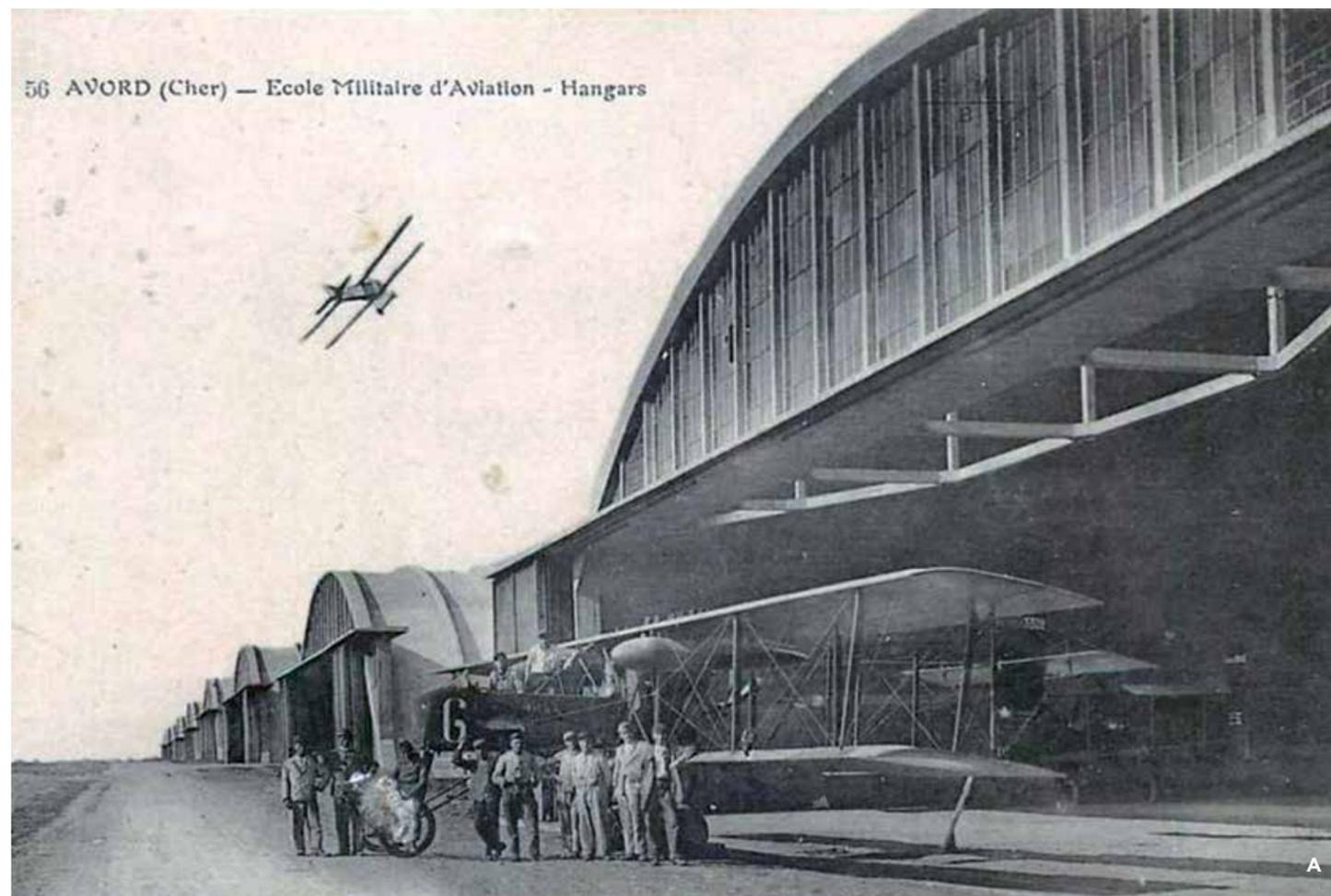
1 – Article du Génie Civil du 22 septembre 1923.

Fin 1915, le projet de Freyssinet, refoulé par le Génie deux ans plus tôt en raison de la guerre, est relancé avec d'autant plus d'intérêt que la pénurie d'acier rendait difficile l'emploi de charpentes métalliques. Eugène Freyssinet remporte le programme de construction de 8 hangars sur le camp d'Avord, avec l'entreprise Limousin, en concevant une structure en voûte de 46 m de portée et de 60 m de longueur, pour une hauteur utile de 11,50 m, une prouesse pour l'époque.

De l'invention de la voûte à nervures supérieures

À l'opposé des hangars où la charpente et la couverture forment deux éléments distincts, Freyssinet conçoit une structure monolithique en béton armé, en forme de voûte mince en berceau, raidi par des arcs-nervures régulièrement espacés de 3,91 m à l'entraxe. Tirant parti des caractéristiques géotechniques du sol d'Avord, il prolonge la voûte jusqu'au sol, appuyant les arcs sur des massifs largement ancrés (environ 2 m à la base) et formant culées, tandis que les hourdis de la voûte sont eux aussi bloqués par une fondation de 1 m de largeur. De ce fait, les arcs-nervures ont une section variable allant de 120 cm à la base à 45 cm à la clef et les hourdis de 30 cm à 9 cm.

Freyssinet adopte pour ces arcs un schéma d'encastrement plutôt qu'un arc à 3 articulations, système retenu par l'ingénieur Lossier



A — La série des 8 hangars-voûtes vers 1920.

B — Vue du pignon est, muré par l'adjonction d'appentis intérieur.

...

pour le hangar à dirigeables d'Écausseville² à la même époque. Sans ignorer certains avantages du système de Lossier, Freyssinet développera dans l'article du Génie Civil de 1923 les raisons pour lesquelles la voûte monolithique lui paraît plus adaptée en termes de durabilité et d'économie sur le long terme.

Une autre spécificité de la voûte se révélera par la suite une des innovations majeures des années 1910-1920 : en plaçant les arcs sur l'extrados de la voûte, Freyssinet simplifie les coûts de coffrage en recourant à des cintres entièrement lisses et de faible largeur, facilement déplaçables par des chariots. Le coffrage des hangars est par conséquent effectué en deux temps : les voûtes sont réalisées en premier puis les nervures sont coffrées par le dessus de façon répétitive, bénéficiant de la voûte comme plate-forme de travail.

Dans le projet d'Avord, les deux pignons des hangars sont dotés de portes roulantes au sol à débattement extérieur de 35 m d'ouverture et de 6,50 m de hauteur. Le débattement se fait par l'intermédiaire de rails de guidage fixés sur un encorbellement. Deux poutres-au-vent réalisées en éléments en béton armé de 20 cm d'épaisseur, suspendus aux nervures, servent de contreventement. Quatre verrières en partie centrale sont disposées dans les hourdis, pour apporter un éclairage naturel au centre des hangars.

Si l'on ne dispose pas à ce jour des archives relatives à la réalisation de ces hangars, on peut néanmoins souligner la grande efficacité en termes de rapidité d'exécution que Freyssinet développe sur ces premiers hangars avions, argument supplémentaire qu'il ne tarde pas à faire valoir pour les autres programmes de hangars.

Au perfectionnement de la voûte

Fort de cette expérience, Freyssinet persuade le Génie de réaliser une série presque identique de 32 hangars sur le camp d'aviation d'Istres en 1917. Si tous ne sont pas construits, la quinzaine d'exemplaires est entièrement détruite en 1944.

Mais c'est en 1919 à Villacoublay que Freyssinet réalise une des plus belles structures de hangar à voûtes, également détruite en 1944. Située à côté des hangars Piketty construits en 1918 sur les mêmes bases que les hangars de type Lossier, le hangar de Freyssinet est constitué par la juxtaposition de trois voûtes en berceau parallèles, coupées par deux autres voûtes centrales perpendiculaires joignant la clé des premières voûtes. La surface intérieure libre de tout poteau atteignait 120 m de largeur par 45 m de profondeur, correspondant par là même au projet de hangar imaginé par Freyssinet dès 1913.

Les prémices de la précontrainte

Au début des années 20, Freyssinet fait évoluer la voûte à nervures supérieures en développant des voûtes ondulées pour des hangars à Villacoublay et pour les deux hangars à dirigeables d'Orly tout en diminuant leurs épaisseurs jusqu'à 8 cm pour maintenir la rentabilité. En 1927, les hangars de Palyvestre marquent sans doute un tournant dans les expérimentations de Freyssinet sur les voûtes minces en béton armé. Pour franchir 55 m de portée, Freyssinet met en œuvre une voûte en berceau ordinaire sous-tendue par une structure triangulée composée d'éléments ne fonctionnant qu'en traction grâce à l'introduction de déformations préalables, ce que certains verront comme les prémices de la précontrainte.

Un nouvel emploi pour le hangar Freyssinet d'Avord

Sur les huit hangars d'Avord, seuls deux hangars échappent aux bombardements de 1944. Avec des réparations minimales, ils conservent leur destination aéronautique jusque dans les années 60. Suite à la démolition d'un des deux hangars pour les besoins des avions AWACS, le dernier exemplaire est affecté au milieu des années 2000 au centre de formation du pôle de défense Sol-Air. Quelques travaux d'aménagement d'appentis sont entrepris à l'intérieur tandis que la porte ouest est déposée et le pignon correspondant muré. La poutre-

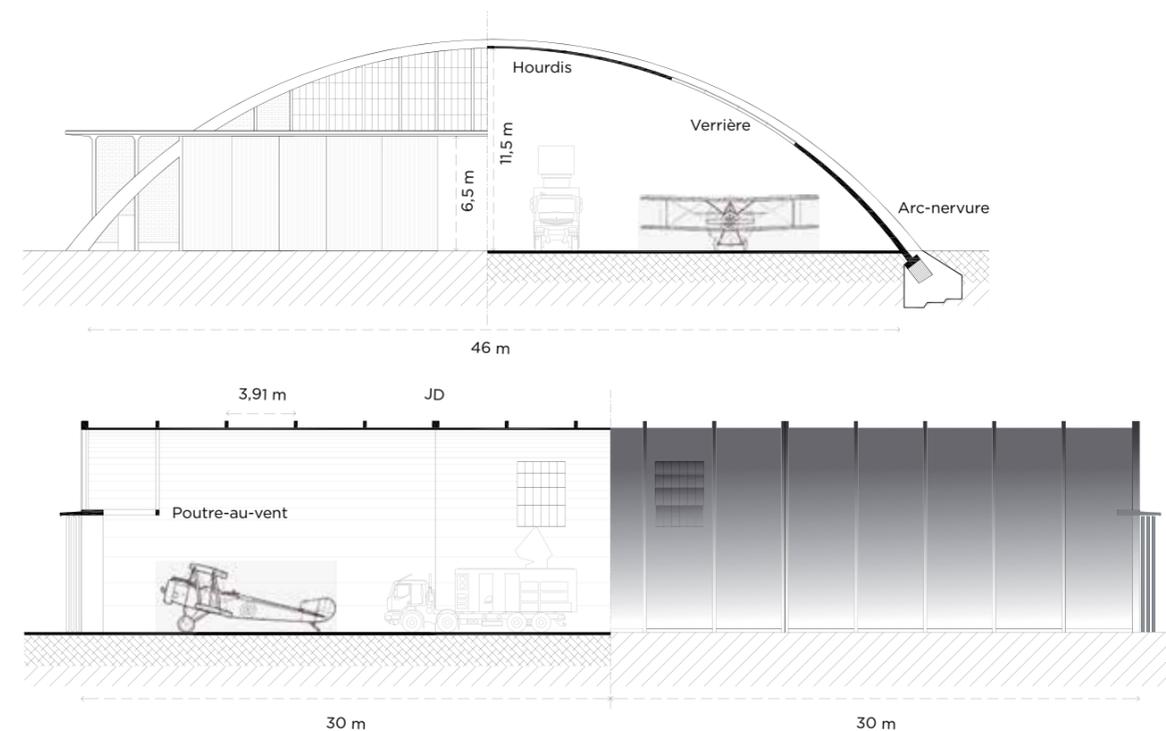
au-vent est laissée en l'état, même si elle ne joue plus de rôle de contreventement du pignon. Une étanchéité à base de membranes PVC est installée sur toute la surface extérieure de la voûte et les verrières zénithales sont remplacées par des voûtes en polycarbonates. La voûte intérieure est conservée intacte.

La voûte présente visuellement un état de conservation général très satisfaisant au regard de son âge (100 ans). Seules quelques infiltrations sont apparues avec des décollements ponctuels de la membrane extérieure. Les mesures de carbonatation effectuées révèlent une carbonatation généralisée des zones d'enrobage des aciers verticaux et horizontaux de la voûte, sans pour autant que ces derniers présentent de corrosion. Les pignons, et notamment les dalles en encorbellement, présentent en revanche des désordres plus généralisés, liés aux infiltrations d'eau. Les poutres-au-vent présentent des fissurations anciennes, sans doute dues à des utilisations non prévues, qu'une instrumentation pourrait confirmer.

Perspectives de préservation

Hormis une nécessaire remise en état localisée au niveau des dalles en encorbellement, l'état général de ce dernier exemplaire de hangar-voûte en béton armé reste exceptionnel au vu de son ancienneté. Des interventions mesurées permettraient à court terme de redonner à ce hangar un potentiel optimal pour les besoins du centre de formation, dont l'activité semble tout à fait s'accommoder avec la vocation aéronautique originelle. À moyen terme, un suivi des effets de la carbonatation du béton permettrait d'envisager sa préservation sur une période plus importante.

Si le patrimoine aéronautique militaire reste généralement d'un accès limité en raison des activités qui y sont exercées, une mise en valeur par le label Patrimoine xx^e siècle serait une reconnaissance pleinement justifiée au regard de l'importance historique de cette première réalisation et un vecteur patrimonial pour les générations futures. ■



Élévation pignon ouest et coupe transversale

Coupe longitudinale et élévation sud



C Vue du pignon ouest : les portes datent de 1945.

D Aperçu de l'intérieur de la voûte.



E Détail de la poutre-au-vent du pignon ouest.

RAMATUELLE

À RAMATUELLE, UN BÉTON CAMÉLÉON

Le projet d'agrandissement de la station d'épuration avait une contrainte de taille du fait de sa situation à proximité de la plage de Pampelonne, dans un site naturel remarquable. Pari gagné et récompensé.

TEXTE : SYLVIE ROMAN – REPORTAGE PHOTOS : DIDIER BONNET

Lancés en 2011 dans le cadre d'une mise en conformité, la réhabilitation et l'agrandissement de la station d'épuration ont fait passer ses capacités de traitement à 28 000 équivalents-habitants.

Ce programme se heurtait à plusieurs contraintes : après démolition partielle, maintien en fonctionnement d'une partie de la station, arrêt total du chantier pendant la période estivale, enfin, une implantation dans un site remarquable, visible depuis la mer.

Le process retenu par le maître d'œuvre impliquait de réaliser une sorte de sarcophage de 2 200 m² totalement clos, en bétons spéciaux.

« Afin de l'intégrer au mieux et de minimiser son impact visuel, nous avons choisi de l'encastrer dans la pente, et de réaliser un toit-terrasse, en quasi-prolongement de la colline », explique l'architecte Bruno Miranda.

Les façades ont été réalisées en béton architectonique CXB® de Cemex, provenant de la centrale de BPE de Saint-Tropez. La centrale étant certifiée ISO 14001, toutes les eaux usées issues des bassins de décantation ont été récupérées puis réintégrées dans le circuit de production.

Par ailleurs, pour des raisons d'accès (la route est très étroite), tous les panneaux préfabriqués du « sarcophage » ont été coulés sur le chantier.

La partie visible des façades a été particulièrement soignée, avec une teinte rose ocre et une certaine rugosité du béton, obtenue grâce à des matrices qui rappellent les roches en granulites du site. Pour valider la couleur du béton, Allamanno, l'entreprise de gros œuvre, a réalisé de nombreux essais, en lien avec le maître d'ouvrage, mais aussi avec l'Architecte des Bâtiments de France, puisque le projet est passé en commission des sites.

Enfin, la toiture-terrasse a été végétalisée, et des pergolas de bois et métal agrémentées de plantes grimpantes obturent en partie la façade frontale de la station, pour une intégration optimale dans le site.

Un prix du SNBPE, « Mieux protéger la planète »

La station d'épuration a obtenu le Prix SNBPE dans la catégorie « Gestion de l'eau ». « Cette réalisation est remarquable par son intégration tant visuelle qu'écologique, sonore,

ou olfactive », souligne Nicolas Luttringer, délégué régional du Syndicat National du Béton Prêt à l'Emploi (SNBPE). Et pourtant, « il y avait d'énormes contraintes ». Le choix « d'un béton matricié et teinté dans la masse, qui donne un aspect rocheux, mais aussi l'importante végétalisation en façade et en toiture apportent une impression d'une continuité totale avec le site ».

Un projet exemplaire

Le prix, attribué à l'automne 2015, récompense aussi le choix du matériau, des bétons spéciaux, comme système constructif.

En effet, « le béton remplit un rôle d'amortisseur sonore, du fait de sa masse, et grâce à son étanchéité, il crée une barrière olfactive très efficace ».

Pour le responsable du SNBPE, « c'est aussi une façon de mettre en avant la filière, au travers d'un projet exemplaire ». Le concours du SNBPE est organisé en partenariat avec le SYNAD (Syndicat National des Adjuvants pour bétons et mortiers), CIMBéton et le SNPB (Syndicat National du Pompage du Béton) sous le patronage de l'IDRRIM et de l'ATTF*. ■

* Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité, et Association des Techniciens Territoriaux de France.



A, B —
Intégration optimale pour la station d'épuration, située près de la plage de Pampelonne, dans un site naturel classé. Le béton teinté en rose ocre a une texture rugueuse proche du granite du site. La toiture, en partie végétalisée avec des espèces locales, complète l'intégration.

AFGC 3^e Symposium international BFUP 2017 Du 2 au 4 octobre 2017 à Montpellier



Organisé par l'AFGC en partenariat avec l'ACI, la fib et la RILEM, le 3^e Symposium international consacré aux Bétons Fibrés à Ultra hautes Performances (BFUP) a pour objectif de compléter et actualiser l'expérience acquise dans la connaissance et l'utilisation des BFUP. Le Symposium présentera les toutes dernières réalisations tant en Génie Civil, en bâtiment que dans le domaine des équipements et infrastructures, qu'il s'agisse de construction neuve ou de réhabilitation. Il analysera les enseignements techniques et organisationnels qui peuvent être tirés de ce retour d'expérience, en termes de conception et calcul, justification de la sécurité, organisation et assurance de la qualité, fiabilité de réalisation, performances atteintes en œuvre et durabilité.

Un point sera fait sur les investigations réalisées en lien avec les réalisations en BFUP, permettant de faire émerger à l'échelle internationale une doctrine technique et scientifique commune de conception et calcul, de spécification des caractéristiques des BFUP et de méthodologie de réalisation des ouvrages et composants.

Journées GC'2017 15 et 16 mars 2017 à l'ESTP Cachan



Les journées GC'2017, organisées par l'AFGC, auront pour thème « Le Génie Civil et l'aménagement des grandes métropoles ». Avec l'augmentation constante de la population urbaine, l'aménagement des grandes métropoles et des villes pose de nombreux défis pour accueillir toujours plus de personnes, tout en offrant un cadre de vie agréable. Les structures de Génie Civil constituent un patrimoine essentiel de notre société et sont le support indispensable de la majeure partie de nos activités. À ce titre, elles représentent un élément indispensable pour l'aménagement des villes et des grandes métropoles. Elles doivent répondre à de nouvelles attentes, en termes d'usage, de performances et de permanence d'exploitation. En outre, ce patrimoine vieillit et des problématiques majeures apparaissent pour maintenir les ouvrages en bon état de service et prolonger leur durée de vie dans ce contexte de ville pérenne.

Les journées GC'2017 vont permettre d'analyser les réponses apportées par la profession, qui démontre son intelligence et sa capacité à relever les défis face à ces enjeux majeurs du développement d'une métropole ou d'une ville durable.

Eurexpo Pollutec 2016 DU 29 NOVEMBRE AU 2 DÉCEMBRE 2016 À LYON



Ce salon international accueille les professionnels de l'environnement. Il présente les techniques de prévention et de traitement des pollutions,

de préservation de l'environnement et de mise en œuvre du Développement Durable. CIMbéton, la FIB et le CERIB présenteront l'offre de produits préfabriqués en béton pour l'assainissement sur leur stand, au sein d'un « village béton », regroupant de nombreux industriels de la FIB.

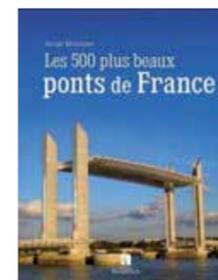
PUBLICATIONS CIMBÉTON



LES BÉTONS FIBRÉS : UN VASTE CHOIX DE SOLUTIONS CONSTRUCTIVES

Un béton fibré est un matériau composite associant une matrice (le béton) et un renfort (les fibres). Les fibres ont pour rôle principal de maîtriser la fissuration et de reprendre les efforts au droit des fissures éventuelles. Elles confèrent au béton des performances et des propriétés liées à leur nature, leurs formes et à leurs caractéristiques mécaniques. Le spectre des utilisations des bétons fibrés est devenu extrêmement large. Les bétons fibrés enrichissent l'éventail des solutions constructives en béton, grâce au développement continu d'une gamme de fibres aux propriétés multiples.

Réf. SB-OA 2015-2



LES 500 PLUS BEAUX PONTS DE FRANCE SERGE MORTENS

Les ponts français, qu'ils servent d'aqueduc, de pont transbordeur, ferroviaire, routier ou autoroutier, constituent un patrimoine exceptionnel qui n'a sans doute aucun équivalent dans le monde. Des ponts romains aux réalisations contemporaines les plus audacieuses, ce livre nous montre la variété des ouvrages d'art, utiles certes de par leur rôle de communication entre les hommes, mais remarquables aussi par leur conception technique, la qualité de leur architecture et leur insertion dans les sites qu'ils occupent.

Éditions Bonneton

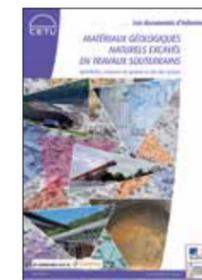


LES BÉTONS AUTOPLAÇANTS

Les bétons autoplaçants (BAP) s'inscrivent dans une logique de progrès qui contribue à une meilleure maîtrise de la construction

des ouvrages, à la sécurité et à la santé des ouvriers. Sur les chantiers, comme dans les usines de préfabrication, ils offrent une chaîne d'avantages multiples, liés à leurs caractéristiques exceptionnelles d'écoulement et leur mise en œuvre sans vibration : réduction des délais d'exécution, qualité des parements, bétonnage aisé de structures complexes, de très grande hauteur ou très armées, remplissage optimal des coffrages et des moules, réduction considérable de la pénibilité pour les ouvriers et des nuisances sonores, gain de sécurité...

Réf. SB-OA 2015-3



MATÉRIAUX GÉOLOGIQUEs NATURELS EXCAVÉS EN TRAVAUX SOUTERRAINS CETU

Ce document d'information s'adresse aux maîtres d'ouvrage afin de les aider à mettre en place une démarche de gestion des MATÉRIAUX géologiques naturels EXcavés (MATEX) lors de travaux souterrains, depuis les premières phases d'études jusqu'à la phase de travaux. Il rappelle les responsabilités du maître d'ouvrage. Les scénarios de gestion des matériaux proposés tiennent compte de la réglementation en vigueur, des orientations des différents documents de planification, ainsi que des engagements volontaires des professionnels.



MAÎTRISE DES RISQUES D'INONDATION ET DE POLLUTION EN MILIEUX ROUTIERS, AUTOROUTIERS ET FERROVIAIRES

L'accroissement des déplacements, des échanges nationaux et internationaux s'accompagne par le développement des infrastructures routières, autoroutières et ferroviaires. Il est primordial d'intégrer durablement ces infrastructures dans leur milieu et de limiter leur impact sur l'environnement. De plus, lors des événements pluvieux, elles doivent être conçues pour collecter et réguler les eaux de pluie et piéger les polluants qu'elles peuvent contenir. Rédigé par un groupe d'experts de la FIB, du CERIB et de CIMbéton, ce guide technique présente les diverses solutions en béton préfabriqué pour maîtriser les risques d'inondation et de pollution.



SACRÉ BÉTON ! Fabrique et légende d'un matériau du futur SOUS LA DIRECTION DE :

PHILIPPE GENESTIER, PIERRE GRAS

Édité en parallèle de l'exposition présentée en 2015 et 2016 au musée urbain Tony Garnier de Lyon, ce livre a été rédigé par une dizaine de spécialistes.

Au fil des chapitres, parfaitement documentés et largement illustrés, il raconte l'histoire du béton, les évolutions de sa mise en œuvre et de son image, mais aussi ses capacités d'adaptation jusqu'aux multiples applications actuelles les plus sophistiquées.

Éditions Libel



MAÎTRISE DES RISQUES D'INONDATION EN MILIEUX URBAINS ET PÉRIURBAINS

Face à l'urbanisation croissante et à l'intensification des événements pluvieux,

la maîtrise du risque d'inondation, la protection des milieux habités et la protection du milieu naturel sont devenues des enjeux fondamentaux pour les collectivités.

Rédigé par un groupe d'experts de la FIB, du CERIB et de CIMbéton, ce guide technique présente les diverses solutions en béton préfabriqué pour la maîtrise des risques d'inondation en milieux urbains et périurbains.

Il est destiné aux décideurs publics et privés et à la maîtrise d'œuvre du secteur.

Réservoir R7 à Villejuif
Architectes : Lelli Architectes,
Dominique et Giovanni Lelli
Photographe : Laurent Thion