

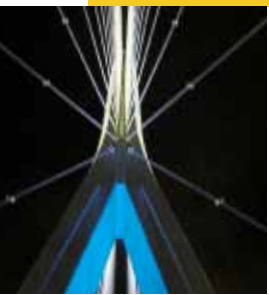
CONSTRUCTION

ANNUEL OUVRAGES D'ART 2001

MODERNE



Sommaire – Annuel ouvrages d'art • édition 2001

		PAGES
réalisations	A 43 – Viaduc Saint-André	01
	Solution béton pour ouvrage d'art "majeur"	05
	MONACO – Port de la Condamine	06
	La Méditerranée apprivoisée par l'homme	12
technologies béton	TECHNOLOGIES BÉTON	13
	Bétons et architecture souterraine	20
réalisations	SEINE – Usine d'épuration	21
	Palette de couleurs et de parements	25
	POLOGNE – Trois ponts	26
	La Pologne lance trois ponts vers l'avenir	32
	PONTS À HAUBANS	33
	Plus beaux, plus longs	38
bloc-notes	• Actualités • Livre	39
perspectives	Laurent Boutillon Roissy 2E	40

>>> En couverture :
le pont de Normandie.
(Photo : Albert
Bérengruer ;
Mise en lumière :
Yann Kersalé.)

éditorial

Les ouvrages d'art participent à l'aménagement de nos paysages naturels ou urbains et sont indispensables à notre développement, notre mobilité, notre confort... Tous ces ouvrages participent à notre modernité, ils sont à l'avant-garde de la construction. Ce numéro de *Construction moderne* nous en montre toute l'actualité et la façon dont le béton sait répondre aux exigences et aux performances qu'ils requièrent. Les ponts à haubans font partie des ouvrages qui marquent les esprits par leur originalité et leur performance. Le pont de Normandie (en couverture) a été mis en service le 20 janvier 1995, et reste le meilleur exemple de cette technique par son architecture, le record de franchissement qu'il a établi et l'engouement qu'il a suscité. De nombreux ponts à haubans battent actuellement de nouveaux records de franchissement à travers le monde : ce numéro en apporte le témoignage.

ROLAND DALLEMAGNE,
directeur de la rédaction

CONSTRUCTION MODERNE

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION : Frédéric Velter
DIRECTEUR DE LA RÉDACTION : Roland Dallemagne
CONSEILLERS TECHNIQUES :
Bernard David ; Serge Horvath ; Jean Schumacher

CIM Béton

CENTRE D'INFORMATION SUR
LE CIMENT ET SES APPLICATIONS

7, place de la Défense • 92974 Paris-la-Défense Cedex
Tél. : 01 55 23 01 00 • Fax : 01 55 23 01 10

• E-mail : centrinfo@cimbeton.net.fr •
• internet : www.cimbeton.net.fr •

CONCEPTION, RÉDACTION ET RÉALISATION :
ALTEDIA COMMUNICATION
5, rue de Milan – 75319 Paris Cedex 09

RÉDACTEUR EN CHEF : Norbert Laurent
RÉDACTEUR EN CHEF ADJOINT : Pascale Weiler

Pour les abonnements, fax : 01 55 23 01 10,
E-mail : centrinfo@cimbeton.net.fr
Pour tout renseignement concernant la rédaction,
tél.: 01 44 91 51 00



Solution béton pour ouvrage d'art "majeur"

●●● DERNIER MAILLON DE L'A 43, INAUGURÉ LE 12 JUILLET 2000, LE TRONÇON QUI RELIE SAINT-MICHEL-DE-MAURIENNE AU FRENEY S'ÉTIRE SUR UNE DISTANCE DE 13,5 KM. IMPLANTÉ AU NIVEAU DE L'EXTRÉMITÉ AMONT DE L'AUTOROUTE, LE VIADUC SAINT-ANDRÉ EST L'OUVRAGE LE PLUS IMPORTANT DE LA VALLÉE, AVEC UNE LONGUEUR DE 903,50 M. SA PARTICULARITÉ : UN TABLIER QUI FAIT EXCLUSIVEMENT APPEL AU MATÉRIAU BÉTON. UN CAS PRESQUE UNIQUE, SACHANT QUE LA QUASI-TOTALITÉ DES PONTS ET VIADUCS DE L'AUTOROUTE A 43 INTÈGRENT UNE OSSATURE MIXTE ASSOCIANT L'ACIER ET LE BÉTON.



1



2

“**N**ous sommes parvenus à rendre discret l’ouvrage le plus important de la Maurienne en l’intégrant de façon élégante dans une vallée particulièrement resserrée.” Tels sont les mots de l’architecte Charles Lavigne pour résumer la conception du viaduc Saint-André, l’un des seuls ponts de l’autoroute A 43 qui ait été construit en béton. “Le choix du matériau était lié à la difficulté d’approvisionnement le site en poutrelles métalliques”, explique l’architecte. Coincé entre deux flancs de montagnes

et sans aucune vue dégagée, encadré par un torrent (l’Arc), la RN 6 et une voie ferrée, le viaduc ne laissait que peu de possibilités architecturales. “Mais le profil de la vallée a conduit à la réalisation d’un ouvrage courbe présentant une perspective intéressante depuis la RN 6”, reprend Charles Lavigne. La forme sinieuse du tablier a imposé l’utilisation de voussoirs préfabriqués. À vrai dire, cette technique était la seule envisageable compte tenu de l’étroitesse du site. “Notre rôle essentiel concernait l’insertion de l’ouvrage dans son envi-

- >>> **1** La forme sinieuse du tablier a nécessité la mise en œuvre de voussoirs préfabriqués. **2** L’ouvrage est coincé entre deux flancs de montagne, le torrent Arc, la RN 6 et une voie ferrée.
- 3** Le chapiteau carré des appuis peut faire office de pile à lui seul. Trois appuis sont traités de cette façon. **4** Une hauteur minimale de 5 m a été dégagée sous le tablier afin de permettre le passage éventuel de blocs rocheux. **5** Extralarge, le tablier supporte 2 x 2 voies de circulation.

ronnement. Nous n’avions pas d’implication dans le calcul des structures, mais le bureau d’études imposait des contraintes au niveau du dessin du viaduc.” Et pour Charles Lavigne, la forme d’une structure doit être le reflet esthétique de sa technicité.

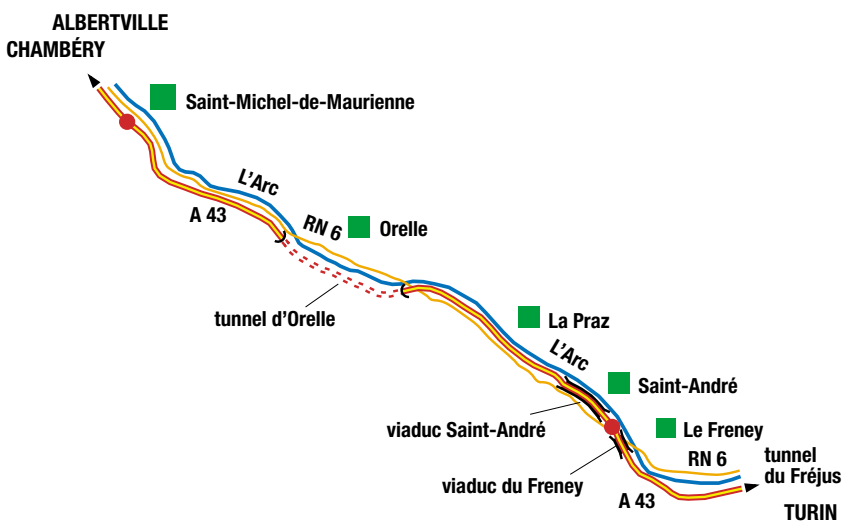
tion rendait plus ardue encore la tâche de l’architecte, celle de construire quelques piles dans le lit de l’Arc, d’où une recherche esthétique encore plus complexe : “Dans un tel contexte, chaque pile devait présenter un profil hydraulique idéal, autrement dit être de forme cylindrique.” Charles Lavigne a donc dessiné un fût circulaire de 5 m de diamètre, surmonté d’un chapiteau carré haut de 4 m. Sa particularité : faire office de pile à lui tout seul. Les trois appuis les plus courts ont été traités de cette façon.

● **Une recherche esthétique complexe**

Le pont est implanté très bas dans la vallée. Le tablier unique en constitue presque le nouveau fond. Extra-large avec ses 21,20 m, il est supporté par des piles parfois plus faible que son épaisseur. “La première difficulté tenait dans le dessin des piles, qui devait être en adéquation avec leur faible hauteur”, explique Charles Lavigne. Mais une autre obliga-

● **Unité préservée**

Le choix de la teinte de l’ouvrage s’est imposé de lui-même. “L’endroit est un peu triste, la montagne sombre, explique l’architecte. Construire dans cet environnement un pont de couleur claire aurait





3



4



5

été malvenu." L'imposant tablier est donc d'une couleur sombre. En fait, Charles Lavigne a profité d'une caractéristique du BHP, matériau utilisé pour sa réalisation : "Ce type de béton est d'une teinte plutôt foncée, alors que les architectes préfèrent les bétons clairs." Le viaduc ne rompt pas pour autant l'unité des ouvrages de la Maurienne. Les corniches du pont sont turquoises, comme l'Arc... quand il n'est pas en crue. Cette couleur revient sur l'ensemble des constructions de l'A 43. Faire respecter l'unité architecturale n'était pas très difficile, la plupart des ouvrages de l'autoroute savoyarde étant signés Charles Lavigne. L'architecte a travaillé en collaboration avec le cabinet Chambre et Vibert, chargé du design des bâtiments et des péages. Ce travail en commun a permis d'assurer une unité de forme et de couleur tout au long de l'autoroute. "Les piles des passages supérieurs et les murs de soutènement présentent des parements imitant le rocher, conclut Charles Lavigne. Des veines de quartz s'infiltrèrent dans les piles, et tous les écrans anti-bruit sont construits en bois ou en béton de bois." Preuve qu'en matière d'ouvrages d'art, esthétique et technicité vont de pair. ■

Un tablier "hautes performances"

Avec ses 903,50 m, le viaduc Saint-André est le plus long de l'autoroute A 43. Localisé en haute Maurienne, à proximité du tunnel du Fréjus, il présente un tablier large de 21,20 m qui supporte les deux voies de circulation, plus les bandes d'arrêt d'urgence. Son tracé sinueux est dicté par le contexte topographique : une vallée encaissée aux versants instables d'une part, la présence de la RN 6 et d'une voie ferrée d'autre part. Sans oublier l'Arc, dont les crues centen-

nales peuvent atteindre des débits de plus de 900 m³/s. Autant de facteurs qui ont compliqué l'implantation de l'ouvrage. "Sur la rive gauche, la zone des 'Grandes Murailles' peut entraîner l'éboulement de près d'un million de mètres cubes de déblais ; notre choix s'est donc orienté vers la rive droite, en limite de l'Arc", explique Michel Lévy, directeur de Setec TPI. Cette option a imposé le reprofilage du versant nord de la vallée, en terrassant le déblai très pentu – dit "sous la ville" – sur une lon-

gueur de 300 m. Quelque 300 000 m³ de blocs schistogréseux enveloppés d'une matrice meuble ont ainsi été évacués. L'opération visait à dégager une hauteur minimale de 5 m sous le futur tablier afin de laisser le passage à d'éventuels blocs rocheux. En parallèle, la pente du versant était adoucie pour améliorer sa stabilité, tandis que les berges étaient protégées par des enrochements en raison des sollicitations hydrauliques rencontrées sur le site.

● Voussoirs limités à 125 t

Le tablier, qui épouse le fond de la vallée, est posé sur une série de deux culées et de dix piles. Ces dernières, qui doivent



>>> Le tablier est divisé en 350 sections de 2,20 ou 2,78 m. Les voussoirs sont coulés en B 80, ce qui les rend plus résistants, plus légers et plus facile à manipuler.



1



2

TECHNIQUE

Vérins parasismiques

Le secteur de la haute vallée de la Maurienne a un caractère modérément sismique. Le viaduc Saint-André est donc très sensible aux mouvements de sol, d'autant plus que son tablier en béton précontraint, rigide et massif (21,20 m de large pour une hauteur constante de 4,50 m), est implanté au ras du sol. Une obligation, car l'ouvrage doit passer sous la voie ferrée située à l'extrémité amont du projet. Le tablier est donc posé sur des piles dont certaines sont très basses – à peine 4 m, soit l'épaisseur du chevêtre.

Dans cette configuration, la partie supérieure du viaduc ne bénéficie pas d'un amortissement naturel. C'est pourquoi les dix piles et les deux culées ont été équipées chacune d'un dispositif parasismique constitué de vérins hydrauliques. Ces derniers sont orientés dans le sens longitudinal sur les culées et transversal sur les piles. Leur rôle consiste à limiter la transmission au tablier des efforts que subissent les piles en cas de séisme. De plus, le tablier repose sur des appuis glissants multidirectionnels. Ce système garantit un déplacement suffisant du tablier pour assurer le fonctionnement des vérins. Les vérins présents sur les culées sont au nombre de douze, avec une capacité individuelle de 250 t, tandis que chaque pile reçoit deux vérins de 200 t. Ce dispositif parasismique ne s'oppose pas à la dilatation de l'ouvrage.

>>> **1** Pour pouvoir être manutentionnés, les voussoirs en béton ne pouvaient dépasser un poids unitaire de 125 t. **2** Les voussoirs sont mis en place à l'aide d'une poutre de lancement, selon la technique des encorbellements successifs. **3** Les dix piles et les deux culées sont équipées d'un dispositif parasismique constitué de vérins hydrauliques. **4** Avec ses 903,50 m, le viaduc Saint-André est l'ouvrage de franchissement le plus imposant de l'autoroute A 43.

garantir un écoulement hydraulique optimal, sont de forme circulaire et en nombre réduit eu égard à la longueur de l'ouvrage. Leur répartition a conduit à retenir des portées importantes pour le tablier : 95 m pour 7 des 11 travées. Les autres oscillent entre 39,40 m et 89,45 m. En amont, sur ses cent derniers mètres, le tablier s'élargit jusqu'à 27,36 m. Une particularité due aux biseaux d'entrée et de sortie du diffuseur du Freney, dernier dispositif d'échange avec la RN 6 avant le tunnel du Fréjus.

● Préfabrication par – 10 °C

Le tablier est constitué de voussoirs préfabriqués en béton, mis en place à l'aide d'une poutre de lancement selon la technique des encorbellements successifs. Pour rester "manœuvrable", chacun de ces éléments ne pouvait excéder un poids

de 125 t. D'où la division du tablier en 350 sections d'une longueur de 2,20 m ou de 2,78 m en fonction du calepinage des travées. Seuls les voussoirs sur piles et ceux qui leur sont adjacents affichent une longueur de 1,80 m. Même chose pour les voussoirs installés sur les culées, dont le poids propre a imposé un bétonnage en place. Le poids limité des voussoirs a conduit à la mise en œuvre d'un béton à hautes performances. "Compte tenu des caractéristiques du viaduc et des conditions climatiques dans la vallée de la Maurienne, le béton devait être insensible aux cycles de gel-dégel, ne pas contenir d'entraîneur d'air dans sa formule, avoir une résistance de 60 MPa et enfin être maniable, explique Pierre-Loïc Veyron, ingénieur responsable de la maîtrise d'œuvre Setec TPI sur le site. Après l'essai de plusieurs formulations différentes, la solution B 60 s'est avérée irréaliste."



3



4

En fait, le choix s'est arrêté sur un B 80 dont la densité beaucoup plus importante répondait au cahier des charges en matière de résistance, de gel-dégel et de maniabilité. En outre, la mise en œuvre d'un tel béton permettait de couler des éléments plus légers, donc plus faciles à manipuler.

Les voussoirs sont précontraints individuellement dans le sens transversal, au moyen de quatre câbles T 15 placés tous les 80 cm. Une précontrainte longitudinale est appliquée après la pose, en trois étapes. En premier lieu, des câbles permettent l'accrochage des voussoirs au fléau en équilibre sur son appui.

Intervient ensuite la précontrainte de continuité (jonction entre fléaux), réalisée avec six paires de 19 T 15 positionnées en partie inférieure, plus une paire en section supérieure. Une précontrainte dite extérieure au moyen de quatre paires de câbles 27 T 15 vient compléter ce dispositif pour relier trois fléaux entre eux.

briqués' constituait aussi une variante par rapport au projet initial, car elle permettait de gagner près de six mois de délai", conclut Pierre-Loïc Veyron. ■

TEXTE : ANTOINE VAVEL

PHOTOS : GUILLAUME MAUCUIT-LECOMTE, SFTRF/F. BATAILLARD, SFTRF/G. COTTET

TECHNIQUE

Le "petit frère" de Saint-André

Le viaduc du Freney est séparé d'à peine 135 m du viaduc Saint-André. Long de 207 m, ce "petit frère" constitue l'extrémité amont de l'auto-route de la Maurienne. Au-delà, la rampe d'accès au tunnel du Fréjus prend le relais. En fait, ce viaduc franchit successivement la bretelle de sortie du diffuseur qui se détache du viaduc Saint-André, puis l'Arc et enfin le carrefour giratoire de la RN 6. L'ouvrage est divisé en quatre travées dont la plus importante atteint 79 m. Il intègre un tablier mixte unique d'une largeur de 18,20 m. Son ossature métallique (8,80 m de large) a nécessité une préfabrication en atelier par demi-éléments. Ces demi-caissons ont été soudés ensemble sur l'aire de montage. Les tronçons ainsi reconstitués, d'un poids unitaire de 1 145 t, ont ensuite été assemblés les uns avec les autres et mis en place par lancement. La dalle en béton, d'une épaisseur de 30 cm, a été coulée en place au moyen d'un équipage mobile pour les encorbellements, et d'un coffrage perdu en bac acier nervuré pour la partie centrale.

● Préfabrication sous abri

L'usine de préfabrication était située sur l'autoport du Freney, 500 m en amont de l'ouvrage. Elle comptait deux cellules, d'une capacité de production de deux voussoirs par jour, installées dans un hangar. "Implanter l'unité de préfabrication sous abri était volontaire, pour automatiser le travail même par temps très froid", poursuit Pierre-Loïc Veyron. La justesse de cette décision s'est vérifiée en février 1999, où la production des voussoirs a pu continuer malgré l'arrêt du chantier, immobilisé par une température de -10 °C. Cette suspension de l'activité n'a pas causé de problème particulier, puisque le rythme de pose de six voussoirs par jour a rapidement absorbé le surplus. "La solution 'voussoirs préfa-



Maître d'ouvrage :
Société française du tunnel routier du Fréjus (SFTRF)

Maître d'œuvre :
Setec TPI

Architecte :
Charles Lavigne

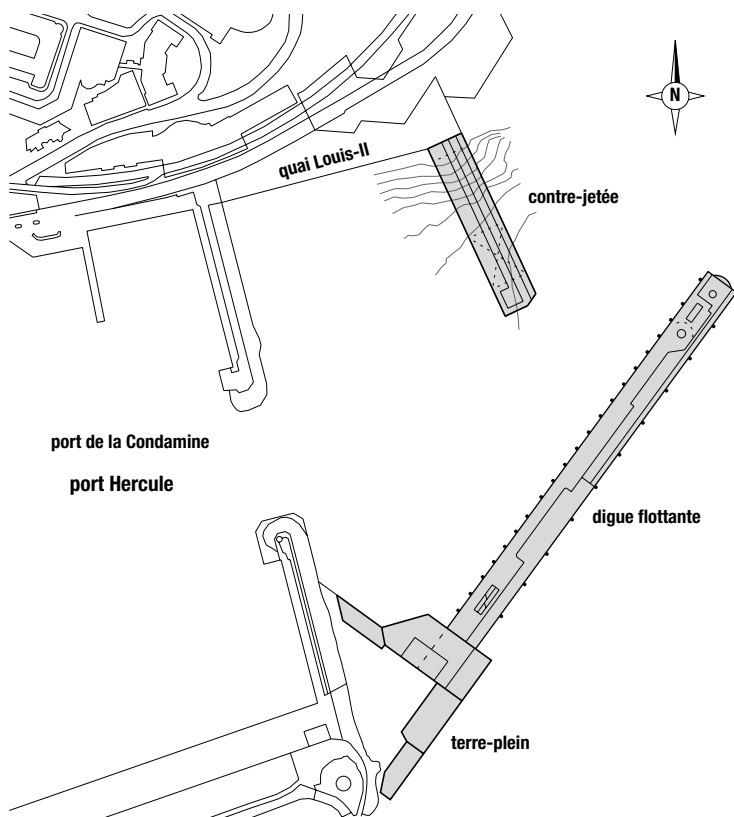
Entreprises générales :
Groupement Bouygues (mandataire), Olivia TP, GFC, Intrafor et DTP Terrassements

Coût :
30,8 M€ (202 MF)



La Méditerranée apprivoisée par l'homme

●●● RIEN NE SEMBLE POUVOIR ARRÊTER L'ÉTAT MONÉGASQUE DANS SON ENTREPRISE DE DOMESTICATION DE L'ESPACE MARITIME. L'EXTENSION DU PORT DE LA CONDAMINE, QUI DEVRAIT ÊTRE ACHÉVÉE EN 2003 APRÈS TROIS ANNÉES DE TRAVAUX MARQUÉS DU SCEAU DU GIGANTISME, APPORTE AU GÉNIE CIVIL ET À LA CONSTRUCTION OFF-SHORE DE NOUVELLES RÉFÉRENCES, DANS LA LIGNÉE DE LA BARGE N'KOSSA OU DU PONT DE L'ØRESUND. L'OPÉRATION, DONT LE COÛT S'ÉLÈVE À 1,65 MILLIARD DE FRANCS, FAIT APPEL AUX TECHNIQUES LES PLUS ABOUTIES ET LES PLUS FIABLES EN MATIÈRE DE CONSTRUCTION BÉTON.



Bien qu'il soit idéalement situé, le port de la Condamine subit les vents dominants du fait d'une orientation parallèle au Rocher des deux jetées. Seule une digue oblique pouvait le protéger de la houle, solution inapplicable du fait de la profondeur des fonds marins, supérieure à 50 m. Édifier un tel ouvrage aurait nécessité de tels volumes de remblais que le chenal en eût été obstrué ! De nombreuses solutions ont été envisagées, jusqu'à la réalisation d'un ouvrage monté sur pieux, malheureusement trop coûteuse. Assisté par les ingénieurs de Doris Engineering, René Bouchet, conseiller technique auprès du département des travaux publics de Monaco, en est finalement arrivé à la solution... d'une digue flottante. Arrimée à un terre-plein artificiel de 0,8 ha attendant au fort Antoine, cet immense paquebot de béton de plus de 350 m de long fera écho à une contre-jetée de 145 m, située

de l'autre côté du chenal, sur le quai Louis-II. Ce programme titanesque, d'un montant prévisionnel chiffré à 1,65 milliard de francs, s'inscrit dans la politique de reconquête du bord de mer initiée par l'État de Monaco, 35 ans après l'édification du terre-plein de Fontvieille. "L'extension du port de la Condamine va doubler sa capacité", explique Jacob Ward, chef de division au service des travaux publics de Monaco. *Objectif : améliorer l'accueil de la grande plaisance, et faire du port une tête de ligne pour les croisières de luxe en Méditerranée.*

● Futur centre d'activités

Outre ces fonctions portuaires, l'ouvrage devra répondre à des exigences urbaines : il permettra la réalisation d'un centre d'activités d'environ 15 000 m² et l'édification d'un parking de 360 places, tout en préservant l'environnement marin.



1



2



3

- >>> 1 2 La Ciotat : une usine de préfabrication à ciel ouvert, qui débute sur terre et se poursuit dans la darse.
- 3 Les travaux ont mobilisé 150 personnes sur le chantier.



CHIFFRES CLÉS

Lot n° 1 : terre-plein et contre-jetée

- 4 caissons pour le terre-plein.
- 3 caissons pour la contre-jetée.
- 45 000 m³ de béton.
- 12 000 tonnes d'aciers passifs, 400 tonnes de précontrainte sur la contre-jetée et la zone rotule.
- 400 000 heures de travail (ouvrages en béton).
- 200 personnes sur le chantier (en pointe).
- 1 000 000 de tonnes de granulats (remblais sous-marins).
- Montant du marché : 4 600 millions de francs hors taxes.

Lot n° 2 : digue semi-flottante

- 45 000 m³ de béton.
- 13 000 tonnes d'aciers.
- Coût de l'ouvrage : 375 millions de francs hors taxes.

Les infrastructures se décomposent en deux lots : le lot n° 1 comprend la réalisation du terre-plein et de la contre-jetée, le lot n° 2 l'exécution de la digue flottante (voir encadré). Les ouvrages de génie civil du lot n° 1 consistent en des caissons en béton préfabriqué précontraint de type B 65 (famille des BHP), d'un poids compris entre 4 000 et 37 000 tonnes, et qui constituent les infrastructures de l'extension du port. Un tel gigantisme excluait toute fabrication *in situ*, qui aurait causé des nuisances pour les habitants et l'environnement. Les éléments ont donc été remorqués depuis La Ciotat et le port autonome de Marseille où ils ont été préfabriqués. Outre une fonction d'assise, ces ouvrages doivent absorber les efforts de la houle et résister au franchissement des lames, tout en restant solidement ancrés sur le substrat. La stabilité est apportée par la présence, côté port, de compartiments à ballast, remplis avec des granulats plus lourds que l'eau. La face tournée vers le large comporte des alignements d'ouvertures (les "Jarlan") débouchant dans des cellules vides, ouvertes en partie haute, de façon que la surpression amenée par les vagues soit canalisée et

qu'elle s'échappe verticalement. "Ces bassins de dissipation servent aussi à diminuer l'énergie réfléchie vers le large, qui pourrait mettre en difficulté les petites embarcations", précise Jacob Ward. Ces dispositions expliquent la forme complexe des ouvrages, calculés au plus juste pour résister aux efforts, et pourvus de multiples réservations.

● Levées de 10 m

Constitués d'un radier, de voiles orthogonales formant les cellules organisées selon une trame carrée de 7 m ou de 10 m, surmontées d'une dalle haute, les caissons sont coulés par phases successives (13 séquences pour le caisson-pile qui supporte la contre-jetée). "Les moyens du chantier sont à l'échelle des caissons, explique Olivier Betoux, de GTM Construction, directeur de la

production et de la préfabrication du groupement d'entreprises Bouygues-GTM-Dumez. Pour couler des voiles dont certains atteignent 30 m de hauteur, nous utilisons des pompes automotrices disposant de flèches de 42 ou 52 m, du matériel extrêmement rare en Europe." Le coulage s'effectue sur une hauteur de 10 m, qui rend assez délicates les opérations de vibration nécessaires pour homogénéiser le béton et éviter les défauts de surface. "Le problème est de ménager des chemins pour les aiguilles vibrantes entre les armatures, reprend le responsable. La densité moyenne des ferrillages est de 360 kg/m³, et de 500 kg/m³ dans certaines zones devant résister aux contraintes mécaniques les plus élevées." Une raison qui a amené les ingénieurs à opter pour des armatures de 40 mm de diamètre !

- >>> **1** Un chantier placé sous le signe de la démesure, comme en témoignent les hauteurs de coulage de 10 m. **2** Les "Jarlan" sont des ouvertures qui dissipent l'énergie des vagues et de la houle. **3** Un paquebot de béton, le plus grand caisson du terre-plein : 37 000 tonnes coulées en majorité en flottaison. **4** Stabiliser les ouvrages durant la construction a demandé d'équilibrer les masses en permanence en jouant sur le remplissage des cellules en eau de mer.



TECHNIQUE

Ingénierie : des calculs très poussés

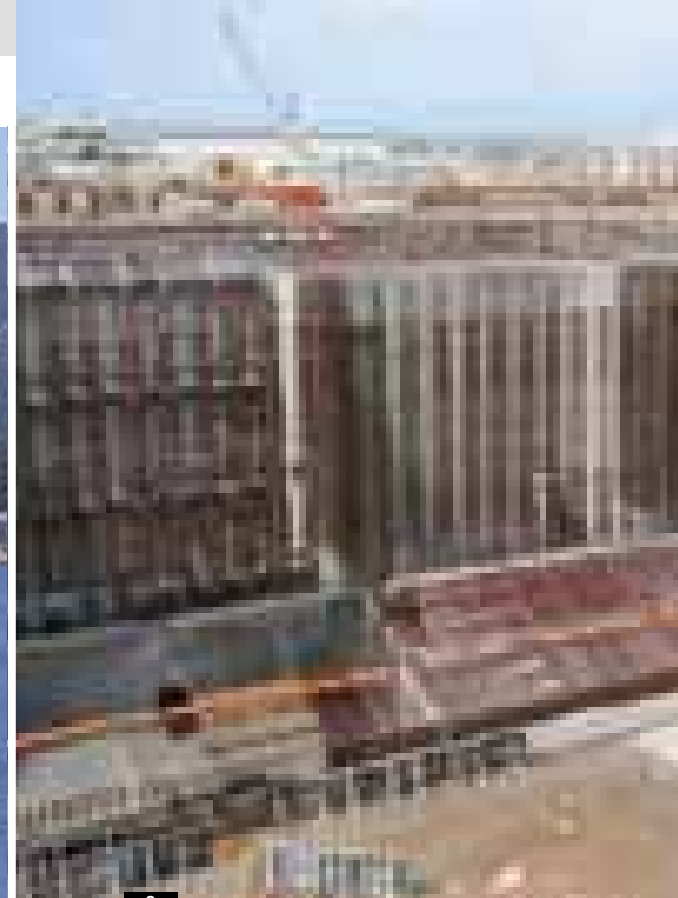
Pour un observateur extérieur, l'extension du port frappe par son gigantisme. Pour les nombreux bureaux d'études (intégrés aux entreprises ou extérieurs) mobilisés pour cette affaire, l'opération a surtout été synonyme de complexité, tant les différentes contraintes étaient difficiles à concilier. Contrairement à un ouvrage terrestre, la conception des caissons doit prendre en compte les efforts que devra supporter l'ouvrage au cours de son service (efforts qui varient en fonction de l'intensité de la houle), mais aussi les efforts engendrés pendant la phase de remorquage et lors de la mise en place de l'élément dans la zone de marnage. Sans oublier les risques sismiques, les structures devant résister à une accélération de 0,16 G. Combinées aux impératifs de durabilité des bétons, qui imposaient un enrobage minimal des armatures, ces exigences auraient *a priori* débouché sur des ouvrages extrêmement massifs... et tout simplement inconstructibles ! Des moyens de calcul très lourds ont donc été déployés pour modéliser de façon très fine les différents ouvrages, afin de les optimiser. "Le modèle de la culée comporte 25 000 nœuds, et celui de la contre-jetée, 26 000", souligne Robert Eymery, de Dumez-GTM, directeur technique du lot n° 1 et coordonnateur des études. Parallèlement, des études de sol extrêmement poussées ont été engagées pour garantir la stabilité des ouvrages sur les fonds marins compte tenu des risques de glissement et de tassement. "Ces paramètres ont entraîné une masse considérable de calculs qui ont largement dépassé ce que nous avons pu anticiper, ajoute Robert Eymery. Les études du terre-plein, commencées en mai 1999, ne se sont achevées qu'en septembre 2001."

Outre un suivi de fabrication extrêmement complet, incluant notamment un suivi du poids des ouvrages (contrôle de la répartition des ferrillages et de l'épaisseur et de la densité du béton), l'opération se distingue par son caractère itinérant, voire "mouvant". Si les radiers et les dix premiers mètres sont coulés à sec, les "levées" sont faites en eau. Quand le tirant d'eau dépasse 9,50 m, les éléments sont emmenés au port autonome de Marseille, qui permet de réaliser des hauteurs plus importantes (tirant d'eau de 16 m). "Avec le coulage du béton, l'élément s'enfonce, précise Olivier Betoux. Mais la répartition des masses n'est jamais équilibrée. Nous sommes donc obligés de corriger l'assiette du bloc en permanence, en remplissant certaines cellules, pour qu'il demeure horizontal." Une application en vraie grandeur du principe d'Archimède, que le responsable retiendra comme l'aspect le plus ludique du chantier ! Acheminés par flottaison à l'aide de remorqueurs, les ouvrages demandent quelques préparations, à commencer par un ballastage pour régler l'horizontalité, et une fermeture des nombreuses réservations, faute de quoi les éléments ris-

queraient de sombrer. Après trois jours de traversée, marqués par un contrôle bathymétrique permanent afin de détecter les éventuelles fuites ou voies d'eau, les caissons sont lentement immergés à l'aplomb de leur position définitive, sous contrôle GPS. L'assise des quatre caissons du terre-plein, qui totalise 1 ha, est constituée de 460 000 m³ de granulats extraits de la carrière du Revest, dans le Var, et transportés quotidiennement par chalands. Cette plateforme est réglée et stabilisée à l'aide de différentes techniques (vibrocompactage, injections solides, battage de pieux et réalisation de murs de soutènement), après extraction de 110 000 m³ de fond vaseux.

● Précision... centimétrique

Une telle opération de terrassement et de fondation sous-marine à grande échelle est indispensable pour éviter les tassements ultérieurs. "Les points extrêmes des caissons doivent se trouver à l'intérieur d'un rayon de 50 cm, souligne Jacob Ward. La tolérance de positionnement vertical du caisson de culée, où sera arrimée la digue flottante, a été ramenée à plus ou moins 17 cm !"



Lancés en décembre 1999, la construction et l'échouage des 7 caissons du lot n° 1 devaient s'achever en mars 2002, soit après 28 mois de travaux. Un chiffre relativement faible en regard des contraintes, de la complexité et de la dimension des ouvrages. Et si la totalité des éléments du terre-plein sont maintenant en place (à l'exception du caisson port), le caisson de culée ayant été livré en juillet, au terme de 18 mois de préfabrication, c'est à présent au tour des composantes de la contre-jetée de sortir de la forme de La Ciotat.

Depuis le mois de mai dernier, l'appui le plus volumineux, car situé au large, est en flottaison. Le caisson-pile, de quelque 17 300 tonnes, est composé d'une embase de 46 m de long, de 31 m de large et de 16 m de haut. Il est également surmonté de deux piles latérales d'une largeur de 6 m et d'une hauteur de 15 m, qui supporteront la contre-jetée encore en construction. La contre-jetée, d'une géométrie particulièrement élaborée, est l'aboutissement d'un vaste travail matérialisé par des études hydrodynamiques et des simulations informa-

>>> 1 Un chantier "itinérant" : à partir de 9,50 m de tirant d'eau, les éléments sont acheminés depuis La Ciotat jusqu'au port de Marseille.

2 La contre-jetée met en jeu des techniques d'absorption de la houle très complexes, comme ce becquet immergé côté mer qui fragmente les masses d'eau. **3** Le dispositif de stabilisation du caisson est complété côté port par un pan incliné immergé qui limite le couplage entre les eaux du port et du large (dispositif "Bybop" de Bouygues).

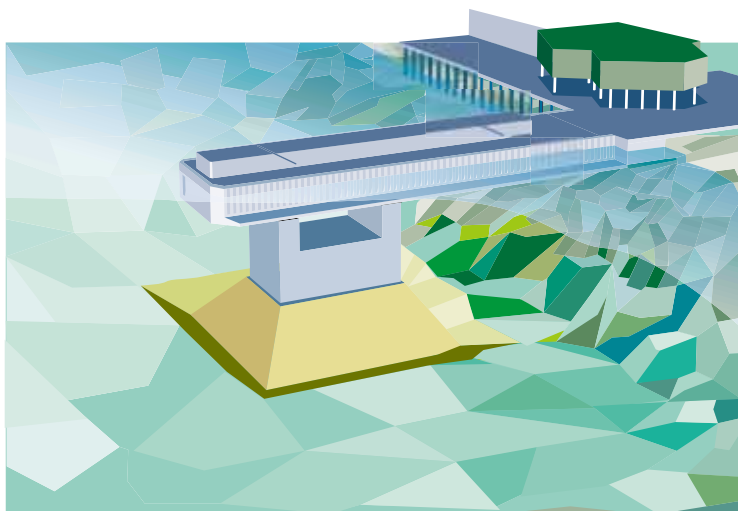
tiques. Celles-ci constituent une première application pratique du "mur d'eau fixe", procédé mis au point et breveté par les services techniques de la Principauté : côté port, un pan incliné est immergé afin de "limiter le couplage entre les masses d'eau du port et du large" (dispositif "Bybop", pour Bouygues Break Water Optimized Profile) ; côté mer, outre les perforations de type Jarlan, la contre-jetée est munie d'un becquet destiné à fragmenter les masses d'eau et à les renvoyer dans le sens opposé tout en contribuant à diminuer la force des vagues.

À cette complexité géométrique, il faut encore ajouter une contrainte structurale. Car contrairement aux caissons du terre-plein qui reposent sur toute leur base, la contre-jetée ne comporte que deux zones d'appui situées à chaque extrémité. L'importance des efforts de

torsion, accentuée par les déformations du sol, a justifié que l'ouvrage fasse l'objet d'une précontrainte longitudinale d'un seul tenant. Une gageure pour un ouvrage marin, la longueur de la contre-jetée atteignant 145 m !

● Un ouvrage public sous le signe de la sécurité

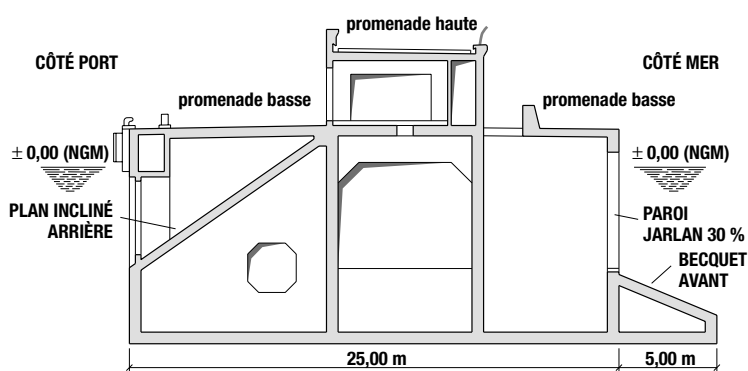
"Ce projet est exemplaire par son ampleur, mais aussi par la prise en compte de la sécurité, la vocation de ces ouvrages étant d'accueillir un large public, conclut Jacob Ward. Excepté la rotule, qui est une réelle innovation, et dont nous ne nous pouvions nous passer, toutes les techniques employées sont éprouvées, y compris les bétons à hautes performances. L'éventail complet des précautions applicables à un ouvrage maritime a été déployé." ■



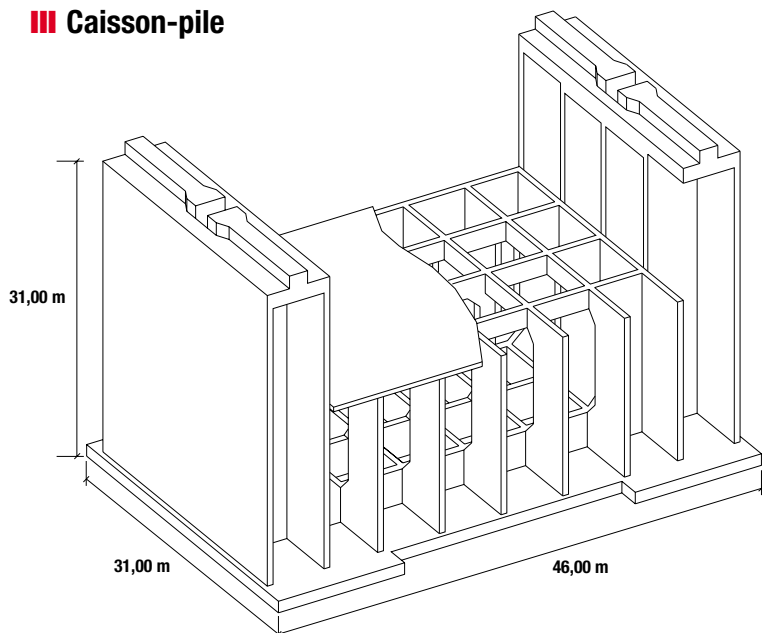


3

III Coupe sur contre-jetée



III Caisson-pile



Des bétons spéciaux pour une durée de vie d'un siècle

La durée de vie d'un béton est étroitement dépendante de sa porosité, la pénétration des produits agressifs pouvant entraîner des dommages suite à la corrosion des armatures. C'est d'autant plus vrai pour des ouvrages devant supporter une immersion permanente dans l'eau de mer pendant une durée de service fixée contractuellement à 100 ans ! Pour réaliser un béton très peu poreux, et donc très compact, le service béton de GTM Construction a optimisé la formulation à l'aide d'une batterie d'essais de pénétration pour différents éléments (ions chlorures, eau, mercure et gaz). L'ouverture des fissures a été limitée à seulement 0,2 mm pour les faces des caissons exposées au large, selon un règlement norvégien spécialisé dans les ouvrages off-shore en béton armé. Les aciers sont protégés à la fois par une épaisseur d'enrobage importante (55 mm) et par un dispositif employé pour protéger la coque des

navires, la protection sacrificielle (ou cathodique), qui met en œuvre des anodes en alliage d'aluminium activé à l'indium de 55 à 198 kg. Une première pour un ouvrage portuaire...

● Un béton compact et peu "exothermique"

La formulation, riche en éléments fins, a été adaptée aux contraintes de mise en œuvre par l'ajout d'un superplastifiant de nouvelle génération qui permet le pompage du béton et garantit sa fluidité pendant 90 min. Et pour écarter tout risque de fissuration durant la prise, la formulation du béton comprenait des cendres volantes et des fumées de silice en remplacement d'une partie du ciment : "Un dosage plus faible en ciment a permis d'abaisser à 55 °C la température de la réaction, la limite fixée étant de 70 °C, explique Olivier Betoux, de GTM Construction, directeur de la pré-fabrication. En outre, les bétons sont pro-



>>> **1** Des pompes automotrices équipées de flèches de 42 et 52 m ont permis de réaliser les voiles béton de grande hauteur. **2** L'extension du port de la Condamine : un complexe de 15 000 m² gagnés sur la mer en toute sécurité, grâce au béton.

TECHNIQUE

Le lot n° 2 : la digue semi-flottante

L'arrivée de la digue semi-flottante, attendue en 2002 après 3 semaines de navigation, sera le point d'orgue de l'opération. Cet ouvrage d'une longueur de 352 m, d'une largeur de 28 m (44 m à la base) et d'une hauteur de 19 m – dont 16 m de tirant d'eau – sera constitué d'une double coque en béton précontraint à hautes performances. L'importance du volume immergé permettra d'y loger sur une première moitié un parking de 360 places sur quatre niveaux, et sur l'autre une remise à sec pour bateaux de moins de 13 m. Les superstructures accueilleront des locaux administratifs et commerciaux, une gare maritime, ainsi qu'un phare à l'extrémité. Préfabriquée d'un seul tenant en cale sèche à Algésiras, près de Gibraltar, la digue nécessitera 44 000 m³ de béton, 10 000 t d'aciers passifs et 3 000 t d'aciers de précontrainte. Équilibré dynamiquement par des pompes reliées à des ballasts situés dans différents compartiments, l'ouvrage comportera à sa base deux ailerons stabilisateurs longitudinaux d'une largeur de 8 m destinés à atténuer roulis et tangage, et à renforcer l'effet brise-lames. Des dispositifs très efficaces, les calculs et les essais en bassin ayant montré que les déplacements latéraux à la pointe de l'ouvrage ne dépasseraient pas quelques dizaines de centimètres en cas de houle ou de tempête. Comme pour la contre-jetée, la conception des caissons brise-houle fait appel au principe du "mur d'eau fixe", un brevet développé par la principauté de Monaco. Arrimée par 8 ancres au large, la digue sera solidarisée au caisson de culée C30 du terre-plein par une liaison articulée faisant appel à une rotule métallique de 200 tonnes. "Cette articulation sera protégée par un système de fusible, explique Jacob Ward, chef de division au service des travaux publics de Monaco. Si l'effort exercé sur le terre-plein et la digue sont supérieurs à ce que peuvent reprendre les ouvrages au niveau du couplage, lors d'un séisme par exemple, l'articulation se déboîte." Un dispositif complété par deux lignes de mouillage pour maintenir la digue immobile.

tégés pendant la prise par la pulvérisation d'un agent anti-évaporant, puis d'un matelas d'eau de 5 cm d'épaisseur absorbant la chaleur." Résultat : le BHP atteint une résistance caractéristique de 78 MPa en moyenne et de 85 MPa en pointe, bien supérieure à la classe exigée par le cahier des charges (B54).

● **Durabilité : bétons spéciaux... et entretien suivi**

Mais une interrogation demeure : comment garantir une durabilité d'un siècle, sachant que le recul dont disposent les entreprises en matière d'ouvrages maritimes en béton n'est que de 30 ou 40 ans ? "Les résultats des essais de perméabilité du béton ont servi de base à des modélisations informatiques, qui ont montré que la formulation retenue assurait l'intégrité des bétons au moins pendant cette période", répond Olivier Betoux. Mais durabilité n'est pas antonyme d'entretien. "Le principe de la protection sacrificielle des armatures demande de remplacer les anodes tous les 25 ans environ, souligne Jacob Ward. Il n'est pas exclu non plus que nous ayons à faire des opérations de maintenance sur les bétons, par exemple au niveau des joints. Les ouvrages seront donc contrôlés périodiquement." ■

TEXTE : JEAN-PHILIPPE BONDY

PHOTOS : GUILLAUME MAUCUIT-LECOMTE + DR



Maître d'ouvrage :
principauté de Monaco

Maître d'œuvre :
études APS et APD :
Doris Engineering

Entreprises du lot n° 1 :
Bouygues Offshore, Bouygues TP,
Dumez GTM, GTM
Construction, Impreglio,
Serimer

Entreprises du lot n° 2 :
Dragados, Fomentos, Bec,
SMMT, Triverio,
Construction Algésiras

Études géotechniques :
Géocéan, Geodia, Ifremer, Institut
français du pétrole, Norwegian
Geotechnical Institute,
Géodynamique et structure,
Simessol

Essais hydrauliques :
Institut technique Chalmers,
SSPA, Sogreah,
Océanide

Contrôle technique :
Bureau Veritas

technologies

Bétons et architecture souterraine

●●● PARLER DE RENOUVEAU DE L'ARCHITECTURE SOUTERRAINE

N'A RIEN D'EXAGÉRÉ. LES NOUVEAUX PARKINGS ENTERRÉS, ET À PLUS

FORTE RAISON LES NOUVEAUX PÔLES D'ÉCHANGES FERROVIAIRES,

EN SONT UNE PREUVE ÉCLATANTE. L'HEURE N'EST PLUS AUX SOUS-SOLS

OBSCURS ET AUX COULOIRS LABYRINTHIQUES, MAIS PLUTÔT

À DES VOLUMES LARGEMENT OUVERTS, À DES PERSPECTIVES SANS MYSTÈRE

QUI RASSURENT ET FACILITENT L'ORIENTATION. LE BÉTON, POUR SA PART,

APPORTE TOUT ENSEMBLE SES QUALITÉS STRUCTURELLES, SA FACILITÉ

DE MISE EN ŒUVRE ET L'ÉTONNANTE DIVERSITÉ DE SES TEXTURES.



→ Métros de Lyon et de Toulouse

Le béton pour toutes ses qualités

p. 16



→ Chai à Villecroze

Une réalisation prestigieuse
en terre viticole

p. 18



→ Gare à Paris

La gare Bibliothèque-François-
Mitterrand, pôle d'échange "modèle"

p. 19



→ Gare de Monaco

Démonstration de raffinement
dans le sous-sol du Rocher

p. 20

→ Architecture souterraine : actualité en sous-sol

LES GARES SOUTERRAINES DU RÉSEAU EOUE OU DE LA LIGNE I4, À PARIS, SUFFIRAIENT À DÉMONTRER LA RICHESSE DU BÉTON EN MATIÈRE D'AMÉNAGEMENTS SOUTERRAINS. MAIS L'ÉVENTAIL EST LARGE, ET IL N'EST PAS DE CONSTRUCTION ENTERRÉE QUI NE TIRE PROFIT DES QUALITÉS DE CE MATÉRIAU "UNIVERSEL".

Les espaces souterrains sont communément considérés comme moins attractifs que les constructions à l'air libre. Ils inspirent même à certains une véritable phobie. Mais souvent nécessité fait loi, et il peut être impossible, pour des raisons locales, de réaliser en superstructure un programme donné. Parfois aussi, la décision d'enterrer un projet procède plutôt d'un parti architectural que d'une obligation. Quoi qu'il en soit, l'architecture souterraine connaît, depuis une dizaine d'années, un véritable renouveau.

Ce dossier ne prétend évidemment pas à une quelconque exhaustivité, mais les exemples évoqués illustrent quelques grandes tendances. Précisons d'emblée que la notion d'ouvrage d'art a été ici comprise dans un sens large. En effet, il y aurait peu à dire sur l'architecture d'ouvrages aussi importants que les tunnels des TGV. En revanche, on s'intéressera à la nouvelle gare de Monaco et à la gare Bibliothèque-François-Mitterrand à Paris. Un dossier sur les parkings ayant été récemment publié dans la revue, nous présenterons une réalisation atypique : la réhabilitation lourde d'un parking conçu à la fin des années soixante. Plus inattendu, le domaine des chais vinicoles enterrés donne lieu à l'émergence d'une architecture spécifique dans laquelle l'inertie thermique du béton constitue un atout appréciable. Plus traditionnelle, la tranchée couverte de la déviation de la RN 12 à Jouars-Pontchartrain permet de mesurer l'évolution des dispositifs de sécurité et de confort dans ce type d'ouvrage. De nombreux autres projets auraient pu être cités (musées, équipements sportifs, etc.), mais ce tour d'horizon révèle déjà une belle diversité de solutions béton pour l'architecture souterraine.

La première caractéristique d'une architecture souterraine réside dans la prégnance des impératifs structurels dans le parti formel, toujours largement déterminé par la prise en compte des forces en jeu : poussées latérales, charges verticales, poussées de bas en haut, etc. Dans ce contexte, la voûte s'impose comme la réponse la plus emblématique parce que la plus efficace pour soutenir le poids de la terre (ou des éventuels bâtiments). Au demeurant, la voûte n'est pas la solution unique, et l'architecte peut préférer par exemple un système poteaux-poutres ou refends-poutres. Le plus intéressant, de ce point de vue, est la richesse du vocabulaire disponible à l'intérieur même d'une option spécifique comme la voûte. Ainsi, dans les gares et les chais, on découvre des voûtes fort différentes par leurs proportions et leurs formes, selon qu'elles sont croisées ou linéaires, réalisées en plein cintre ou "posées" sur des appuis verticaux. Murs pleins ou percés, poteaux cylindriques, cruciformes ou carrés, avec chapiteau ou sans, la descente des charges verticales peut emprunter des cheminements d'aspect varié, tout en respectant des impératifs structurels rigoureux.



● Le béton à la conquête des chais souterrains du Bordelais

Pionnier de l'architecture des chais souterrains avec Château-Margaux au début des années quatre-vingt, l'Atelier des architectes Mazières, à Bordeaux, illustre depuis cette date la liberté de conception laissée à l'architecte en déclinant, de projet en projet, des variantes bien identifiées. Pour Château-Margaux, de solides piliers de section carrée portent des voûtes surbaissées à travers des chapiteaux à bords biseautés d'une belle simplicité. Peu de temps après, le même principe est repris pour Château-Yquem avec interposition de poutres plates entre les voûtes et les poteaux cruciformes. Plus récemment, au Château-Gruau-Larose, les chapiteaux ont disparu et des membrures émergeant des piles polygonales composent un ensemble d'une

>>> Les chais souterrains de Château-Margaux et leurs solides piliers de section carrée portant des voûtes surbaissées.

TECHNIQUE

Principaux avantages techniques et esthétiques du béton

Le béton s'impose par ses performances structurelles et apporte des avantages techniques et esthétiques incomparables à l'architecte désireux de construire un ouvrage souterrain.

● La plasticité

En souterrain comme à l'air libre, le béton "se moule" selon la volonté de l'architecte.

● La qualité d'aspect

Lisse ou rugueux, blanc ou gris, travaillé dans la masse ou sous forme de composants préfabriqués minces, le béton offre une grande liberté à l'architecte dans la définition des textures et des couleurs.

● La sécurité

Rassurants par leur solidité, les bétons sont également stables et résistants au feu de par leur composition même. Dans de nombreux projets, la réglementation incendie exige une stabilité au feu d'une heure ou plus, facile à atteindre avec une structure (et des parements) en béton.

● L'acoustique

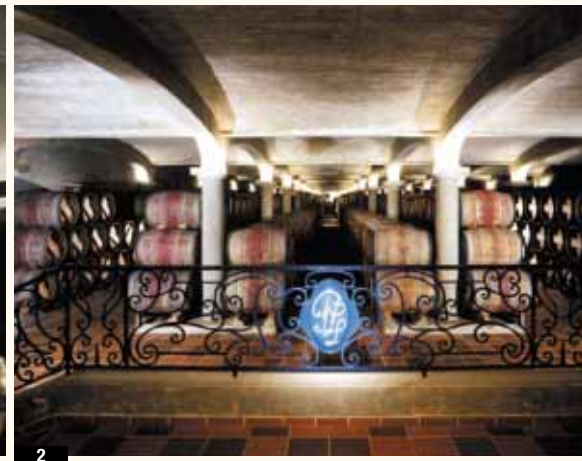
L'inertie du béton limite la transmission des vibrations. Dans le même temps, une conception géométrique appropriée et des traitements de surface spécifiques permettent de "sculpter" l'acoustique particulière d'un espace souterrain.

● L'inertie thermique

Cette qualité est appréciable pour le confort des humains. On découvre dans l'architecture des chais vinicoles souterrains qu'elle est également favorable au vieillissement du vin.

● La performance sur le chantier

Préfabriqué, coulé en place, pompé-projeté : les techniques de mise en œuvre du béton s'adaptent à tous les cas de figure. Dans le domaine des ouvrages souterrains, les procédés de fabrication évoluent constamment, élargissant d'autant le champ des possibles.



élégance remarquable. Dans les chais de Château-Latour, en cours de finition, les voûtes reposent sur d'épaisses murailles dans lesquelles se découpent de vastes arches surbaissées. Ainsi, sur un type de programme unique, le même architecte peut imaginer de subtiles variations sur un thème imposé.

La même inventivité dans la réponse apportée aux projets apparaît dans l'architecture des gares souterraines, confirmant l'irremplaçable plasticité du béton.

● La lumière, un outil privilégié des architectures enterrées

Si la volumétrie est largement conditionnée par les contraintes structurelles, l'architecture souterraine exige en parallèle un travail approfondi quant à la définition des qualités d'aspect du béton. Dans la plupart des cas, en effet, la structure est visible, même si l'on relève, sur les nouvelles lignes de métro de Lyon et de Toulouse par exemple, une certaine tendance à la recouvrir d'un doublage intérieur.

Sachant qu'un espace souterrain est peu, voire pas du tout éclairé naturellement, la perception des surfaces diffère sensiblement de ce qu'elle est à l'extérieur. Alors que le rayonnement solaire dispense une puissance lumineuse pouvant atteindre 10 000 lux, l'éclairage électrique utilisé dans les locaux enterrés ne dépasse pas 500 lux. Paradoxalement, cette situation présente un attrait pour l'architecte. En effet, si la lumière artificielle est moins intense – il s'en faut de beaucoup –, il est cependant possible, dans une large mesure, d'en définir les qualités (température de couleur notamment). Et surtout, l'architecte a le pouvoir de positionner les sources à sa guise. C'est pourquoi les projets présentés dans ce dossier montrent une mise en valeur remarquable, non seulement de la géométrie, mais

>>> **1** À Château-Yquem, des poteaux cruciformes supportent des voûtes surbaissées avec interposition de poutres plates. **2** Chais de Château-Pichon-Longueville, grand cru classé Pauillac.

aussi de la peau des structures en béton. Pour des raisons évidentes, le béton mis en œuvre est le plus souvent de couleur claire (gris ou blanc, parfois plus proche de la pierre, comme celui du musée du Louvre), et les traitements de surface peuvent être différenciés selon les lieux à l'intérieur d'un même projet. Ici, un béton lisse et brillant contribue à la luminosité ambiante et à une acoustique réverbérante ; ailleurs, des panneaux perforés de béton dense concourent à la création d'une atmosphère plus sereine et plus calme.

L'éventail des architectures souterraines est d'autant plus large que le béton peut être mis en œuvre de façon variée et qu'il peut être associé avec d'autres matériaux comme le bois, le métal ou le verre, dans des compositions esthétiques relevant à la fois, dans certains cas, de l'architecture et du design. Au demeurant, l'enjeu dépasse toujours la simple décoration, puisque les parois intérieures peuvent revendiquer la même noblesse qu'une façade extérieure. C'est pourquoi une belle architecture souterraine stimule l'imagination et suscite un dépaysement qui nous fait oublier nos éventuelles appréhensions. Dans l'entretien qu'il a bien voulu nous accorder, Jean-Marie Duthilleul – directeur de l'Agence des gares SNCF – explique les contraintes, mais aussi le caractère gratifiant d'une confrontation avec les mystères du monde de l'en dessous. ■

TEXTE : JEAN-PIERRE MÉNARD

PHOTOS : ATELIER DES ARCHITECTES MAZIÈRES



NOUVELLES LIGNES DE MÉTRO À LYON ET À TOULOUSE

→ Le béton, omniprésent

Les nouvelles lignes de métro de Lyon et de Toulouse sont implantées sous des axes existants – avenues, boulevards ou rues à grand trafic. Second point commun, les stations s'inscrivent dans des tunnels en béton de section rectangulaire. Les caractéristiques de ces enveloppes structurelles étant définies par des bureaux d'études spécialisés, le travail des architectes est centré sur les aménagements intérieurs.

Conséquence de cette démarche, une deuxième peau intérieure est souvent imposée, dissimulant plus ou moins le cadre béton. Ainsi, à Toulouse, dans la station d'interconnexion conçue par l'Atelier 13 (qui a également défini la charte architecturale de l'ensemble de la ligne), qui fait le lien entre la ligne A existante et la future ligne B, le béton struc-

tural ne sera visible que sous la forme d'un plafond caisson et de poteaux cylindriques. Pour la station Debourg, à Lyon, l'architecte Christian Drevet a imaginé une structure exceptionnelle par son expressivité et son ingéniosité technique. Au niveau symbolique, il se réfère à deux archétypes d'univers "souterrains" : la grotte et le sous-bois. La coque béton incarne une grotte dans laquelle aurait poussé une forêt métallique. Structurellement, la solution retenue – une charpente dont les membrures horizontales en acier épousent le tracé du diagramme des moments fléchissants – a permis de gagner de la hauteur en réduisant l'épaisseur du plafond, composé d'une dalle de compression de seulement 20 cm et de prédalles minces disposées en losange.

Cette structure horizontale hyperstatique optimise les performances des matériaux, le béton travaillant en compression et l'acier en traction. Le

croisement des membrures en biais assure un efficace contreventement. Verticalement, les charges sont reprises au centre de la station par une file de poteaux cylindriques en tubes d'acier pleins d'une section minimale de 20 cm.

Matériau de structure indispensable à la stabilité de l'ouvrage, notamment en cas d'incendie, le béton est également présent sous la forme plus architectonique et décorative d'un revêtement uniforme évoquant les alluvions fluviales et glaciales du site. Mat sur les murs, ce revêtement se fait lisse et brillant au sol, comme s'il avait été, de longue date, poli par les pieds des humains.

PHOTOS : © ÉRIC SAILLET

Maitre d'œuvre général de la ligne : *Semaly*

Maitrise d'œuvre : *Christian Drevet Architecture, Lyon*

Maitrise d'ouvrage : *Sytral (Syndicat des transports de l'agglomération lyonnaise)*

Ingénieur structure : *Alain Ranvier*

ENTRETIEN

Jean-Marie Duthilleul,

directeur de l'Agence des gares (service Architecture-Ingénierie de la SNCF)

Construction moderne : *Quelles sont, selon votre point de vue, les principales spécificités de l'architecture souterraine par rapport à une construction en superstructure ?*

Jean-Marie Duthilleul : Il faut bien s'entendre sur ce que l'on appelle "souterrain" ! Le "souterrain", c'est l'espace au plus profond du sol qui ne voit plus le ciel de la ville, où la lumière du jour n'entre plus. Un espace dans le noir 24 heures sur 24. Pendant longtemps, on a logé en sous-sol ce que l'on voulait cacher : les réseaux,

les réserves, etc., de sorte que le monde souterrain était connoté négativement. Notre volonté, avec les projets souterrains récemment réalisés ou encore en chantier, est de considérer le dessous comme aussi noble que le dessus. Lorsqu'on conçoit de tels espaces, on doit composer avec trois caractéristiques essentielles. La lumière, matière première de l'architecture, doit être en ces lieux totalement fabriquée, on joue avec des sources intérieures et non plus avec un astre lointain extérieur.

Ensuite on procède à une sorte de retournement spatial puisqu'il s'agit de créer un vide – l'espace de la gare par exemple – dans le plein du sol, à l'inverse donc de la création d'un plein dans le vide du ciel dans un projet traditionnel. Enfin, l'architecture souterraine induit un vocabulaire structurel spécifique, dont la voûte est la forme privilégiée parce qu'elle est la plus appropriée pour soutenir le poids énorme des terres. Mais ce qui nous guide dans la mise en place des formes des structures de la lumière,

c'est bien la perception de l'espace par les gens, bien différente dans un espace souterrain.

Construction moderne : *Pouvez-vous nous donner davantage de précisions quant à ce travail sur la perception de l'espace souterrain ?*

Jean-Marie Duthilleul : Oui, nous avons identifié quatre problèmes de perception auxquels on se trouve confronté dans un espace souterrain, bien connus des spéléologues d'ailleurs. Le premier problème est la perte de la

notion des distances et de celle de l'horizontale. Si l'on veut y remédier, il faut mettre en place de grands rythmes de structures, de volumes ou de lumière qui, en se conjuguant, créent les repères nécessaires. Citons l'exemple de Montparnasse, avec le rythme des 64 mètres entre les grandes arches supportant le jardin, accordé avec celui des 15 mètres des poutres primaires. Le deuxième point critique est la sensation d'écrasement, que l'on traite par des effets optiques qui par exemple rendent difficile l'appréhension de la



MODERNISATION D'UN PARKING À RUNGIS

→ Sécurité et luminosité

Sombre, gris, mal éclairé... : il y a peu de temps encore, ce parking réunissait tous les défauts de ses homologues construits dans les années soixante-dix. La situation était d'autant plus problématique que cinq parkings communicants constituaient un immense ensemble souterrain labyrinthique et peu rassurant. Chacun a été réorganisé à une échelle plus humaine et pourvu d'un accès et d'une sortie indépendants. L'intervention la plus notable dans cette réhabilitation lourde concerne les parkings 1 et 2, avec la création de failles au nord et au sud. De la sorte, la lumière naturelle pénètre les trois niveaux autrefois aveugles, et des circulations piétonnes à ciel ouvert ont été aménagées dans un espace végétalisé. La structure béton a été adaptée à l'endroit de la nouvelle "façade" créée sur la faille et par des découpes dans les refends. Des poteaux ont été coulés sur la trame des poutres (7,20 m) avec reprise en sous-œuvre. De plus, pour res-

pecter la réglementation incendie, des allèges ont été créées et prolongées vers le bas pour couvrir les nez de poutre. À l'intérieur, l'ambiance a été totalement transformée par l'application d'une peinture blanche sur les bétons gris d'origine et la création d'un doublage vitré et éclairé contre les voiles béton, qui guide l'usager vers la sortie principale. Par ailleurs, afin d'alléger visuellement l'espace, de larges ouvertures ont été percées à la scie cloche dans les grands refends parallèles de 20 cm d'épaisseur. Autant d'aménagements qui ont contribué à transfigurer ce parking conçu par l'agence Cuno Brullmann, en collaboration avec Jean-Luc Crochon. À l'extérieur, dans la faille, la pente est découpée en gradins au moyen de murs de soutènement en béton blanc préfabriqué selon une technique identique à celle des composants béton de la façade. Détail singulier, les passerelles piétonnes de la faille sont constituées de volées et paliers en béton ultra-minces (14 cm), mis en tension par des tubes en acier inox. Les composants béton et métal préfabriqués sont assemblés par emboîtement, comme les panneaux de soutènement. Cet exemple montre qu'il est possible de réhabiliter un parking souterrain au point de l'aligner sur les meilleurs standards du neuf, pour la sécurité comme pour la luminosité.

PHOTOS : GUILLAUME MAUCUIT-LECOMTE, ©GASTON

Maître d'ouvrage : SILIC

Maître d'œuvre : Cuno Brullmann et associés, Jean-Luc Crochon

Bureau d'études : SITAC, SF 21, Arcora

Entreprise générale : SICRA

hauteur réelle sous plafond. Ainsi, dans la gare Bibliothèque-François-Mitterrand, le dessin des voûtes et leur matière font disparaître la notion de "plafond", alors que la hauteur est de 4,15 mètres à la clé et de 2,7 mètres au sommet des piliers. Troisième écueil, les perspectives fermées entraînent une impression d'emprisonnement, d'où les jeux de "dégramage" qui élargissent l'espace en créant des perspectives ouvertes en diagonale, avec des lignes de fuite lointaines. Enfin, se pose le problème de

l'illisibilité de l'espace, qui se traduit par les difficultés d'orientation que l'on connaît. Ce qui compte, là, c'est de donner aux gens les points de repère lointains qui leur permettront d'appréhender l'espace globalement.

Construction moderne :
Comment le béton est-il utilisé dans ces architectures souterraines ?

Jean-Marie Duthilleul :
À la base d'une architecture souterraine, on trouve des volumes et de la lumière, avec entre les deux la matière. En l'occurrence, le

béton est le matériau dominant pour des raisons structurelles au départ, mais nous nous intéressons aussi beaucoup à ses qualités d'aspect, et en particulier à la manière dont il réagit à la lumière. De ce point de vue, la qualité de la peau est très importante parce que la lumière est relativement faible, quelques centaines de lux. Pendant longtemps, nous avons utilisé des ciments aux laitiers traditionnels, puis nous avons élargi la palette en utilisant dès que possible les bétons clairs ou blancs, et nous diversifions les effets

de surface. Pour Eole, par exemple, nous avons dans les passages étroits des bétons glacés, alors que sur les quais, à hauteur de l'œil, le béton est bouchardé, comme griffé, avec des reliefs mis en valeur par la lumière ; au-dessus, les voûtes sont satinées. Le principe de base reste de montrer la matière des parois et de rendre "habitable" le béton. À Monaco, dans une ville où le marbre est omniprésent, on peut dans la gare redécouvrir la beauté du béton. En sus de ce travail sur la lumière et la

matière, sur les couleurs et les textures, nous travaillons également beaucoup sur l'acoustique des lieux. Dans un espace souterrain, le son ne peut s'échapper vers l'extérieur et les sons extérieurs, eux, ne pénètrent pas, ou de façon très atténuée. Nous imaginons donc des scénarios acoustiques avec des seuils, des espaces amples, des espaces intimes. Les halls, par exemple, sont souvent assez réverbérants, alors que sur les quais le bruit des trains est absorbé par des panneaux de béton ou de bois.



CHAI VINI-VITICOLE DU DOMAINE DE THUERRY –
VILLECROZE, VAR

→ Harmonie et sérénité

Le nouveau propriétaire de ce domaine a l'ambition de produire des vins "haut de gamme" par vinification traditionnelle (process Delta Cave). Afin de répondre à un cahier des charges draconien, exigeant en particulier une température constante de 14,5 °C dans le chai de vieillissement, sans apport de frigories électriques, les architectes Xavier Leibar et Jean-Marie Seigneurin ont proposé d'enterrer les chais dans la pente vers le sud, entre les vignes et les bâtiments anciens alignés au sommet. L'objectif premier était donc de bénéficier de l'inertie du sol sur trois faces et en couverture, puisque plus de 6 000 tonnes de terre ont été rapportées sur l'infrastructure en béton.

Autre spécificité de ce projet, la hauteur sous plafond atteint 9 mètres dans les chais de vinification et de vieillissement, placés côté nord pour bénéficier d'une protection naturelle maximale. Grande hauteur et ventilation au moyen de portes de 3,5 mètres de hauteur contribuent au maintien d'une température stable. Le volume, très simple, est un parallélépipède de 70 m de longueur et d'environ 20 m de profondeur. Si la terre périphérique assure déjà une cer-

taine fraîcheur, l'inertie des 4 000 m³ de béton des parois joue également un rôle majeur dans le contrôle de la température ambiante. Le béton prescrit est dense, avec au minimum 350 kg de ciment et au maximum 180 litres d'eau par mètre cube. Un fort dosage en adjuvant superplastifiant a permis de préserver le temps d'ouvrabilité et d'améliorer les performances mécaniques du béton.

Les chais étant constitués de volumes clos juxtaposés (à l'exception de la travée centrale du porche et de la salle de dégustation vitrée en mezzanine), un soin particulier a été apporté à la qualité d'aspect des parois. À cet effet, les coffrages métalliques de grande hauteur ont été doublés intérieurement d'une peau en panneaux de contreplaqué bakélinisé formant des modules de 1,25 x 2,5 m inscrits dans un calepinage marqué par des joints creux. Ces panneaux ont été utilisés chacun une dizaine de fois au maximum, et une cire végétale a été substituée aux habituelles huiles de décoffrage minérales dans un souci de respect de l'environnement. Dans le même temps, la conception des coffrages a nécessité une étude complémentaire pour intégrer de nombreuses réservations liées à l'encastrement des appareils d'éclairage, des pivots de portes, des scellements de cuves et autres machines participant au process.

Le chai de vinification se distingue par son plafond découpé en caissons par des poutres de 18 m de portée, et percé en son centre par une goulotte tournante d'alimentation en raisin des 14 cuves inox disposées en cercle. La dalle béton de 30 cm est portée par des poutres de 55 cm de large et de 1,30 m de retombée, dessinant neuf carrés de 5,8 m de côté. En fait, seules les deux poutres longitudinales sont pleines, les deux autres incluant une âme en polystyrène. L'unique façade orientée au sud est protégée par un parement de pierre blanche en avant d'un vide d'air et de l'isolant extérieur. Le béton des murs, des sols et des plafonds, le chêne des portes, l'inox et le verre, composent finalement une harmonie sereine qui sied bien à l'épanouissement du vin.

PHOTOS : SERGE DEMAILLY

Maître d'ouvrage : SCEA Château-Thierry

Maître d'œuvre : Xavier Leibar,

Jean-Marie Seigneurin, architectes

Entreprise générale : Spada – Nicoletti

Surface totale : 1 970 m²

Montant des travaux : 30 MF HT compris process



LA GARE BIBLIOTHÈQUE-FRANÇOIS-MITERRAND

→ Un pôle d'échange à taille humaine

La gare Bibliothèque-François-Mitterrand joue un rôle stratégique dans le projet Paris-Seine-Rive-Gauche, au nord du 13^e arrondissement. La composante majeure du programme est une salle d'échange souterraine entre les lignes C du RER et la ligne 14 du métro. Cet espace s'organise sur 4 niveaux principaux, sous le nouveau sol de la ville qui reconstitue l'ancien dénivelé vers la Seine, au-dessus des voies SNCF. Cette situation a pour conséquence singulière de placer la gare en sous-sol de certains des futurs immeubles de l'avenue de France, qui constituera une partie du toit de la gare. La conception du projet est issue d'une collaboration entre l'Agence des gares de la SNCF, dirigée par Jean-Marie Duthilleul, et les architectes Antoine Grumbach et Pierre Schall, chargés de la ligne 14 du métro par la RATP. Une volonté commune de cohérence se traduit par une continuité d'aspect entre la partie SNCF de la salle d'échange et l'amphithéâtre de la RATP. Il en va de même pour la signalétique, avec une continuité de la chaîne d'information par des chartes graphiques différentes, mais bien accordées dans l'esprit.

La salle d'échange se présente comme un vaste volume aux proportions inhabituelles : longueur 90 m, largeur 75 m, et "seulement" 4,5 m de hauteur maximale. L'espace est défini par des voûtes croisées de béton clair, légèrement brillant, qui couvrent un lieu homogène et ouvert, sans couloir ni angle fermé. Cette géométrie offre aux voyageurs une perception globale des cheminements et des vues lointaines, tout en créant des salles voûtées de

16 m de côté, dont l'échelle et les proportions se montrent rassurantes pour tous ceux qui séjournent quelque temps dans la gare.

L'unité géométrique de l'ensemble dissimule la présence de deux structures porteuses dissociées, avec d'une part les poteaux supportant les voûtes du plateau des voies, et d'autre part les poteaux de descente des charges de la dalle de l'avenue de France et de ses futures constructions. Cette séparation des structures verticales évite la transmission des vibrations d'origine ferroviaire vers les immeubles. Identiques dans leur forme, les poteaux diffèrent par leur couleur selon leur fonction : béton gris clair pour les poteaux supportant uniquement une voûte et les voies, et béton blanc pour ceux qui assurent la descente des charges du quartier supérieur. Concrètement, cette distinction est assurée par des coques préfabriquées. Sur le plan acoustique, on note le recours, pour la paroi sud de la salle d'échange, à des panneaux absorbants perforés en CCV (composite ciment-verre).

À terme, la gare Bibliothèque-François-Mitterrand comportera trois sorties intégrées dans le rez-de-chaussée des immeubles à venir, à l'instar de ce que l'on connaît déjà dans les gares Haussmann-Saint-Lazare et Magenta. Cette gare illustre aussi, de façon emblématique, une architecture nouvelle imaginée pour ces lieux d'échange vitaux dans une métropole moderne.

PHOTOS : ©SNCF AP-AREP, DIDIER BOY DE LA TOUR

Maître d'ouvrage : SEMAPA – SNCF – RATP

Architecte : Agence des gares SNCF

Bureau d'études : AREP – direction de l'Ingénierie SNCF

Entreprise : Chantier Moderne



LA GARE DE MONACO

→ Raffinement ferroviaire

Cette gare s'inscrit dans un site mythique, au cœur de la principauté de Monaco. Le défi pour les concepteurs : créer un espace souterrain de 540 m de long qui ne soit pas générateur d'anxiété, mais qui, au contraire, magnifie le lieu et le programme.

La gare se compose de deux espaces principaux bien identifiés : le long tunnel des quais, selon un axe est-ouest, et perpendiculairement le bâtiment d'accueil et de service. Une passerelle relie entre eux ces deux volumes au niveau de l'accueil et permet d'accéder à la gare de plain-pied depuis un parvis. Le bâtiment voyageurs est comme tapi au fond du vallon, sous le

parking. Conçu comme un espace calme, il abrite la billetterie, les salles d'attente, les services et les commerces sous une hauteur de 5 m. Les poteaux de béton blanc composent une structure rassurante, relayée au sol par un tapis de granito clair. Point d'orgue de cette architecture, le tunnel se distingue au premier regard par sa courbe à grand rayon qui enrichit la perception de l'espace.

Les quais s'étirent sur 430 m sous une voûte en béton gris clair de 25 m d'ouverture pour 10 m de hauteur. Quelque 130 000 t de béton et 8 000 t d'acier ont été utilisées pour la réalisation de ce tunnel qui reste pour l'essentiel un espace fermé, malgré les puits de lumière au-dessus des voies et l'éclairage naturel diffusé par la façade vitrée de la

passerelle. La solution imaginée pour l'éclairage a consisté à concevoir la voûte en béton à la manière d'une voûte étoilée : des luminaires (600 lampes à induction choisies pour leur durée de vie) répartis sur sa surface allègent visuellement la voûte et créent une ambiance magique, à l'opposé du tunnel traditionnel.

L'acoustique a également fait l'objet d'une étude approfondie. Des modélisations mathématiques basées sur la volumétrie du projet et les caractéristiques des matériaux ont permis d'optimiser la sonorisation pour une bonne intelligibilité des messages. Dans le tunnel, des panneaux absorbants en bois ont été disposés sur les soubassements en béton de la voûte, au-dessus des parois verticales. Ces dernières, pour leur part, sont recouvertes de panneaux acoustiques en béton de poudres réactives.

Au final, la gare impressionne dans tous les domaines : espace, confort lumineux et acoustique, qualité des finitions, sécurité. Signalons à ce sujet la mise en place de rideaux d'eau aux extrémités du tunnel pour la dissolution des fumées en cas d'incendie. Le budget global de l'opération – gare et génie civil compris – s'élève à 1,63 milliard de francs, dont 140 millions de francs pour le second œuvre du tunnel et du bâtiment voyageurs.

PHOTOS : HENRI MUNSCHE

Maître d'ouvrage : Travaux Publics Monégasques

Architecte : Agence des gares SNCF

Entreprises : gros œuvre, groupement sous la direction de SITREN ; sol béton, Grepv ; Ductal blanc, mise au point J.-F. Picardat – Bouygues ; mise en œuvre, EPI



TRANCHÉE COUVERTE DE LA DÉVIATION DE LA RN 12

→ Tranchée high-tech

Cet ouvrage est le point fort des 10 km de la déviation de la RN 12 à Jouars-Pontchartrain. Longue de 460 m, cette tranchée couverte préserve la tranquillité et l'environnement du quartier de Chennevières. Œuvre d'ingénieur par nature, ce projet a également donné lieu à l'intervention d'un architecte, Philippe Fraleu, qui a participé au dessin des "têtes" du tunnel.

Les techniques de mise en œuvre sont traditionnelles : préterrassement jusqu'à la cote du tablier, réalisation des parois moulées, coffrage et réalisation du tablier, terrassement "en taube", puis mise en œuvre des chaussées et des équipements. La modernité de cette tranchée couverte se manifeste particulièrement dans les dispositions prises en matière de sécurité, avec un niveau d'exigence aligné sur celui des tunnels auto-



routiers. La sécurité et le confort sont également assurés par un système de ventilation à trappes automatiques et un éclairage pondéré à trois niveaux d'intensité. Preuve qu'un ouvrage modeste par la taille peut receler un contenu technologique élevé.

PHOTOS : GUILLAUME MAUCUIT-LECOMTE

Maître d'ouvrage : direction des Routes

Maître d'œuvre : DDE des Yvelines

Entreprises : Groupement Bouygues – DTP

Palette de couleurs et de parements

●●● L'USINE D'ÉPURATION DE SEINE

AVANT TRAITÉ PRÈS DES DEUX

TIERS DES EAUX USÉES DE LA RÉGION

PARISIENNE. POUR AUGMENTER

LA CAPACITÉ DE L'USINE EN

CAS D'ORAGE, UNE NOUVELLE UNITÉ

DE CLARIFLOCCULATION EST VENUE

REJOINDRE LES ÉQUIPEMENTS

EXISTANTS. L'ARCHITECTURE DE CETTE

NOUVELLE INSTALLATION SOIGNE

TEXTURES ET COULEURS POUR MIEUX

S'ACCORDER À L'ÉLÉMENT LIQUIDE.

DÉMONSTRATION DES PERFORMANCES

PHYSIQUES, TECHNIQUES

ET ESTHÉTIQUES DU BÉTON.



1



2

Installé dans une boucle de la Seine, le site d'Achères a été affecté au traitement des eaux à la fin du XIX^e siècle. Il s'est développé au fil des années par agrandissements successifs. Dans sa configuration actuelle, l'usine d'épuration Seine aval traite près des deux tiers des eaux usées de l'agglomération parisienne, ce qui représente environ 2 000 000 m³ d'eau par jour. Récemment mise en service, la nouvelle unité de clariflocculation permet de traiter une partie des eaux excédentaires par temps de pluie, grâce à un procédé physicochimique innovant. L'architecte Luc Weizmann a conçu cette usine dans un esprit d'intégration des dimensions architecturales et paysagères aux contraintes techniques du processus de traitement des eaux usées. L'inscription

harmonieuse de la nouvelle unité dans le paysage urbain et la maîtrise des pollutions sonores et olfactives se sont donc révélées primordiales.

● **Intégration soignée**

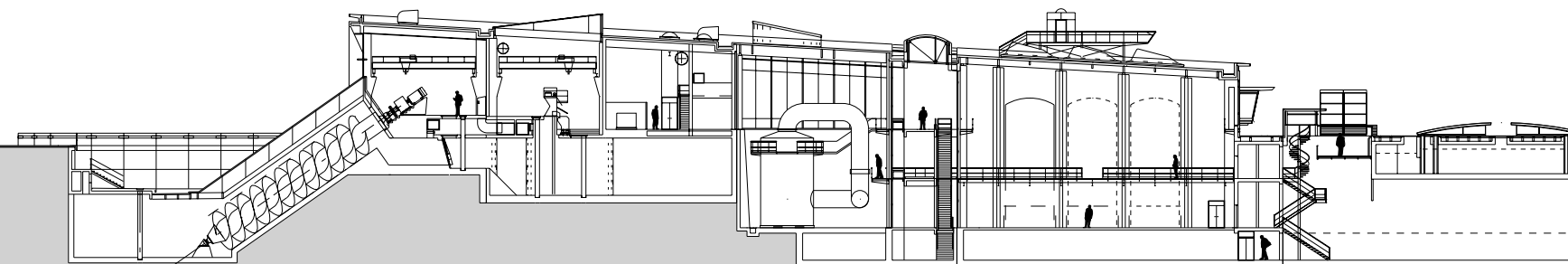
Le bâtiment est partiellement enterré pour réduire son impact sur l'environnement. Sa toiture inclinée atténue le rapport avec les coteaux urbanisés des collines de la Frette, situés en vis-à-vis. Tout le processus d'épuration des eaux usées s'effectue dans des zones fermées, si bien qu'aucun bruit ne s'échappe de l'usine, tandis que l'air nauséabond dégagé par les eaux usées et par les opérations de clariflocculation est entièrement désodorisé avant rejet dans l'atmosphère. Trois entités composent le projet : le bâtiment

technique, les décanteurs, les épaisseurs. Le bâtiment technique regroupe les fonctions de relèvement et de dégrillage des eaux avant leur acheminement vers les ouvrages de décantation. Il intègre aussi les fonctions complémentaires au traitement des eaux : dépotage et stockage des produits chimiques, ventilation-désodorisation de l'air, salles des transformateurs, salles électriques, salle de commande, locaux administratifs... Les décanteurs sont installés à l'extérieur, dans le prolongement du bâtiment technique, entre les deux canaux d'amenée des eaux. Ils sont suivis par les épaisseurs, implantés perpendiculairement. Ces équipements techniques sont pour l'essentiel enterrés. L'architecte a composé avec eux une sorte de jardin minéral mettant en scène toutes les parties émer-

gentes. Le calepinage des dalles de sol en béton, les éléments de couronnement en béton bleu poli et les coques de couverture des bassins en résine, les coffres des hydrocyclones, etc., s'inscrivent dans un dessin d'ensemble harmonieux qui confère au lieu une dimension plastique.

● **Démonstration d'esthétique industrielle**

Prolongé par un vaste parvis minéral, le bâtiment de l'usine se lit comme un volume habillé d'inox et de composite, dont la toiture inclinée vers la Seine est animée par les entrées de lumière naturelle éclairant les espaces intérieurs. Ici, tout est pensé et dessiné pour faire ressortir les qualités plastiques et esthétiques des équipements techniques et





3



4

>>> 1 Une nouvelle usine à l'échelle du paysage.

2 3 Lumière, couleurs, jeu des matières dans les galeries

latérales et les zones fonctionnelles, comme la salle des dégrilleurs.

4 Les imposantes machines qui assurent la désodorisation de l'air sont installées dans un vaste espace dont les parois de béton semblent contenir la poussée des eaux.

du process industriel. De l'autre côté, une généreuse cour anglaise met en scène le mouvement ascensionnel des volumes abritant les vis d'Archimède remontant les eaux usées dans l'usine. Entièrement traitée en béton, cette cour décline dans un même ensemble les matières et les couleurs du béton brut des parois, du béton poli bleu des garde-corps, et du béton poli ou grenailé des dalles du sol.

La qualité, la pertinence et l'originalité de la démarche architecturale s'apprécient à l'intérieur de l'édifice. Volume, espace, transparence, lumière et couleur qualifient l'ambiance dégagée par cette architecture industrielle. Le bâtiment s'organise à partir d'une galerie intérieure transversale et de deux galeries parallèles qui assurent la desserte des différents espaces et mettent en communication les trois niveaux principaux. La galerie transversale est traitée comme une véritable

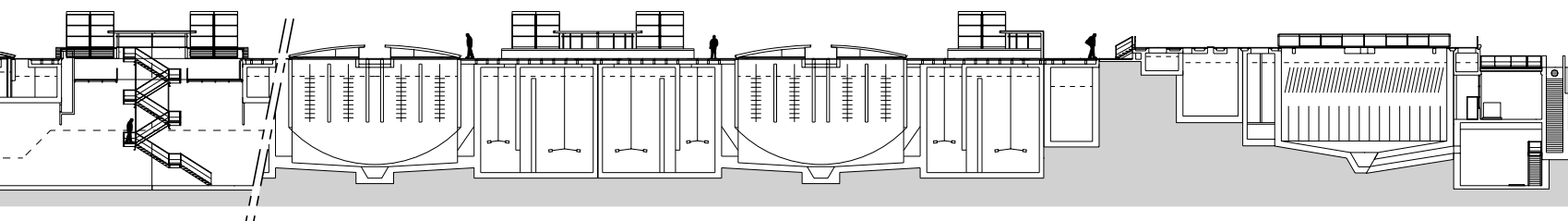
rue intérieure d'où l'on découvre toutes les zones fonctionnelles de l'usine. Développée depuis le plancher le plus bas jusqu'au toit, elle offre plusieurs angles de vue sur la désodorisation, le stockage du chlorure ferrique, les deux canaux d'amenée... Elle est bordée sur un côté par un grand mur en béton blanc brut percé de larges ouvertures circulaires, qui accompagne l'envolée verticale de l'espace sur toute sa hauteur.

● Omniprésence du béton

La diversité du traitement des bétons, très présents dans les espaces intérieurs, participe à la qualification des zones fonctionnelles et des ouvrages techniques. C'est le cas du mur tout en béton brut qui sépare la salle de désodorisation de la zone des transformateurs et du dégrillage, qui apparaît comme un véritable contrefort. Rythmé par de puissants

poteaux, il semble contenir le flux des eaux déferlantes. Dans la salle de stockage du chlorure ferrique, la trame des poteaux cruciformes en béton délimite les casiers accueillant les cuves de couleur rouge-orangé. Les parties visibles des murs des canaux d'amenée sont animées par un jeu de cannelures indiquant la hauteur d'eau circulant à l'intérieur. Ces indications donnent une idée des quantités d'eau circulant dans l'ouvrage, puisque celle-ci n'est jamais visible. Seul le bruit de son écoulement trahit sa présence. La lumière naturelle présente dans tous les espaces intérieurs met en valeur les différentes qualités de parement.

L'emploi de matériaux complémentaires tels que le lamellé-collé ou les coques en composite, accompagné par un jeu de couleurs déterminé par zones fonctionnelles, souligne la présence architecturale des structures en béton et agrément l'ambiance générale des lieux. Au final, cette nouvelle unité de clariflocculation de l'usine d'épuration Seine aval fait montre du talent de Luc Weizmann, dont l'architecture industrielle très travaillée confère à ce projet son échelle humaine et sa plasticité spécifique, issue de la volonté de donner jusque dans le détail une qualité esthétique aux contraintes techniques. ■





1



2



3

Bétons fonctionnels, bétons plastiques

A l'image de tous les équipements destinés au traitement de l'eau, l'unité de clarifloculation de l'usine d'épuration Seine aval fait largement appel aux bétons. En effet, le matériau est ici décliné sous de multiples usages et aspects qui sollicitent tout autant ses performances physiques et techniques que ses qualités esthétiques. Comme pour un iceberg dont on ne voit qu'une faible partie, le béton visible en superstructure de l'usine ne représente qu'une fraction du matériau mis en œuvre dans l'ensemble de l'usine.

● Béton résistant en milieu agressif

Parmi tous ces bétons, on peut distinguer les bétons gris fonctionnels, le béton blanc et les éléments en béton préfabriqué (panneaux, dalles, garde-corps, etc.). Tous les ouvrages qui sont

en contact avec les effluents ou soumis à l'atmosphère agressive que ces derniers induisent, tels que les galeries, les canaux d'amenée, les bassins et divers autres équipements, sont en béton. Conformément au cahier des charges techniques établi par le SIAAP (Syndicat interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne), ces ouvrages de génie civil sont réalisés avec un béton spécial qui résiste à l'agressivité des produits soufrés. Le maître d'ouvrage demande un béton à partir d'un ciment au laitier et aux cendres. Ces ouvrages en béton sont tous calculés à la fissuration très préjudiciable. Pour les parties fortement sollicitées au niveau de l'agression chimique, une épaisseur d'enrobage de 5 cm de béton entre les aciers et la paroi extérieure est imposée. Enfin, dans certaines phases du process, pour faire face à des agressions gazeuses particulièrement corrosives dues à l'hydrogène sulfureux (H₂S), un produit

TECHNIQUE

La clarifloculation en détail

En région parisienne, la majeure partie du réseau d'égout est unitaire : les eaux résiduaires urbaines et les eaux pluviales sont recueillies dans les mêmes canalisations. L'usine d'épuration Seine aval a une capacité de traitement calibrée pour le temps sec, mais elle peut supporter des surcharges consécutives à de faibles pluies. Lorsqu'il faut faire face à un afflux d'eaux usées suite à de forts orages, le traitement biologique classique ne permet pas d'épurer rapidement les effluents supplémentaires arrivant sur le site. C'est le rôle de la nouvelle unité de clarifloculation, grâce à un procédé physico-chimique innovant qui consiste principalement à rajouter du chlorure ferrique dans les eaux usées reçues. Celui-ci a la propriété de flocculer les matières organiques en suspension. Des polymères de synthèse et du sable aident à la formation de floccs lestés et contribuent à une décantation très rapide des eaux usées. Le processus d'épuration se déroule en plusieurs étapes. Les effluents subissent un prétraitement : dégrillage pour les gros éléments flottants, dessablage et déshuilage. Ils sont ensuite transportés par des galeries souterraines vers la nouvelle unité de clarifloculation, puis ils sont remontés de 8 m par une série de 6 vis d'Archimède jusqu'à des dégrilleurs de 10 mm où sont retirés les derniers éléments en suspension. Ensuite, deux canaux conduisent les eaux vers les 6 bassins de décantation accélérée. Le traitement chimique s'effectue à ce niveau. Il existe plusieurs bacs dans chaque bassin. Dans le premier, le chlorure ferrique est injecté dans l'eau usée et mélangé pour assurer la coagulation. Dans les bacs suivants, des polymères et du microsable sont ajoutés pour constituer des floccs qui seront facilement décantables. La solution obtenue est dirigée sur la décantation lamellaire. Les boues issues de la décantation sont récupérées et épaissies avant d'être dirigées sur l'usine de traitement des boues. L'eau clarifiée est rejetée dans la Seine.



4

5

>>> **1** Les poteaux cruciformes en béton délimitent les alvéoles accueillant les cuves de chlorure ferrique. **2** Des vues variées sur les zones fonctionnelles sont aménagées dans les parois de béton. **3** Jeu de cannelures animant les parois des canaux d'amenée. **4** La cour anglaise met en valeur les volumes des vis d'Archimède. **5** Longeant les épaisseurs, une faille permet d'accéder aux zones enterrées.

anti-corrosion doit être appliqué sur le béton. En dehors de celles qui sont directement en contact avec l'eau usée et ses dégagements gazeux, d'autres parties de l'usine nécessitent l'emploi d'un béton spécifique. Ainsi, au niveau des casiers accueillant les citernes de chlorure ferrique, les cuves de rétention en béton, destinées à palier d'éventuelles fuites, doivent résister au caractère particulièrement corrosif de ce produit. Il en va de même pour les cuves en béton servant au stockage des produits chimiques (acide sulfurique, soude, eau de Javel, bisulfite de sodium) utilisés par la centrale de désodorisation. Pour tous les ouvrages spécifiques comme pour la structure de l'usine, le béton mis en œuvre par l'entreprise est un B30 plastique ou très plastique fabriqué en centrale de BPE. Pour réaliser les voiles des canaux d'amenée et des bassins, toutes

les précautions ont été prises afin d'obtenir une parfaite étanchéité des coffrages. Les faces vues des canaux sont cannelées. Le calepinage des lignes de cannelures a été effectué en accord avec l'architecte, en tenant compte des lignes de serrage qui sont axées au fond des cannelures les plus larges. Ces lignes en creux sont obtenues grâce à des fourrures trapézoïdales en bois dur.

● Diversité des parements

Si le béton utilisé dans les ouvrages de génie civil et en structure représente la plus grande part du chantier, le béton blanc et les éléments préfabriqués participent à l'esthétique et à l'écriture de l'édifice. Dans la grande galerie transversale, le mur en béton blanc brut de décoffrage est entièrement coulé en place. Les couronnements des bassins

de décantation et des épaisseurs, ainsi que les garde-corps de la cour anglaise des vis, sont réalisés avec des éléments préfabriqués en béton poli de couleur bleue. Dans le cas des couronnements des épaisseurs, les architectes ont retenu un béton bleu clair, tandis que pour les couronnements des bassins de décantation, le bleu choisi est plus soutenu.

Au niveau de la salle de désodorisation et de celle des transformateurs électriques, se trouvent des panneaux préfabriqués en béton désactivé ou en béton matricié façon bois. Enfin, différents types de dalles préfabriquées sont utilisés pour les sols intérieurs et extérieurs de l'usine. Un très grand nombre de dalles de sol amovibles d'aspect grenailé (3 500 pièces) est mis en œuvre pour recouvrir les nombreuses zones techniques (canaux, galeries, gaines...) qui doivent rester accessibles. Il existe aussi des dalles à sceller de 7 cm d'épaisseur d'aspect grenailé, ainsi que des dalles à sceller de 5 cm d'épaisseur ponçées (5 meules) pour obtenir un parement brillant. ■

TEXTE : NORBERT LAURENT

PHOTOS : JEAN-MARIE MONTHIERS



Maître d'ouvrage :
Syndicat interdépartemental
pour l'assainissement de
l'agglomération parisienne
(SIAAP)

Maître d'œuvre :
direction des Grands Travaux

Architectes :
Alain Le Houedec et
Luc Weizmann

**Entreprise générale
et de génie civil :**
Léon Grosse

Préfabricants :
Delta Préfa, Queguiner

Entreprise d'équipement :
OTV/Degremont

**Montant du marché
génie civil :**
225 MF HT



La Pologne

lance trois ponts vers l'avenir

●●● AUJOURD'HUI, EN POLOGNE, AMÉLIORER LES CONDITIONS DE CIRCULATION CONSTITUE UNE PRIORITÉ ABSOLUE. AINSI LE PAYS A-T-IL LANCÉ LA CONSTRUCTION PRESQUE SIMULTANÉE DE TROIS PONTS À HAUBANS – DEUX À VARSOVIE ET UN À GDANSK. CES OUVRAGES SE CARACTÉRISENT PAR L'ADOPTION DE TECHNIQUES DE CONSTRUCTION DIFFÉRENTES QUANT À LEURS TABLIERS MIXTES : CEUX DE VARSOVIE SONT RÉALISÉS SELON LE PRINCIPE DU PONT POUSSÉ AVEC INTÉGRATION OU NON DE LA DALLE EN BÉTON, TANDIS QU'À GDANSK, C'EST L'ENCORBELLEMENT QUI A ÉTÉ PRIVILÉGIÉ. ÉTUDE DÉTAILLÉE.

TECHNIQUE

Sainte-Croix en chiffres

Pont haubané à pylône unique et tablier mixte.

- **Longueur totale : 490 m.**
- **Longueur "haubanée" : 320 m.**
- **Largeur hors tout : 30,90 m.**
- **Hauteur du pylône : 87,50 m.**
- **Fondations du pylône : 44 pieux de 1 500 mm de diamètre, ancrés à 39 m de profondeur.**

En octobre 2000, la municipalité de Varsovie, capitale de la Pologne, inaugura le pont Swietokrzyski – ou "Sainte-Croix" en français. Tout nouveau, cet ouvrage ne constitue pas pour autant une traversée supplémentaire de la Vistule, puisqu'il remplace le pont provisoire de la Sirène. Érigé en 1985, ce dernier devait durer le temps de la rénovation du pont Poniatowski, reconstruit juste après la Seconde Guerre mondiale. En fait, le pont de pontons de la Sirène vient seulement d'être démonté, après plus de quinze années de service.

Premier pont à haubans construit à Varsovie, le pont Sainte-Croix se caractérise essentiellement par son unique pylône en Y inversé qui surplombe les eaux du fleuve de près de 87,50 m. Sa construction a nécessité six mois de travaux, de novembre 1999 à avril 2000 : quatre mois jusqu'à la jonction des jambes, puis deux mois pour la tête.

Classique, la technique de construction du pylône a vu l'utilisation d'un coffrage autogrissant. L'avancement était de quatre jours par levée (4,20 m). Sur les douze premiers mètres du pylône, le coffrage n'était fermé que sur trois faces afin de permettre la réalisation des contre-piles destinées à reprendre le tablier. De section pleine, son coulage a été réalisé en deux phases afin de réduire l'effet exothermique du béton : voiles périphériques, puis partie centrale. La tête du pylône est elle aussi pleine et fortement armée (200 kg d'acier par mètre cube) du fait du croisement des câbles de haubanage dans sa section. Dans les autres parties du pylône, l'épaisseur des voiles variait de 80 à 65 cm.

La plupart des bétonnages ont été réalisés de nuit, entre 22 heures et 6 heures. Une particularité dictée non pas par des contraintes techniques, mais plutôt par des difficultés d'approvisionnement.

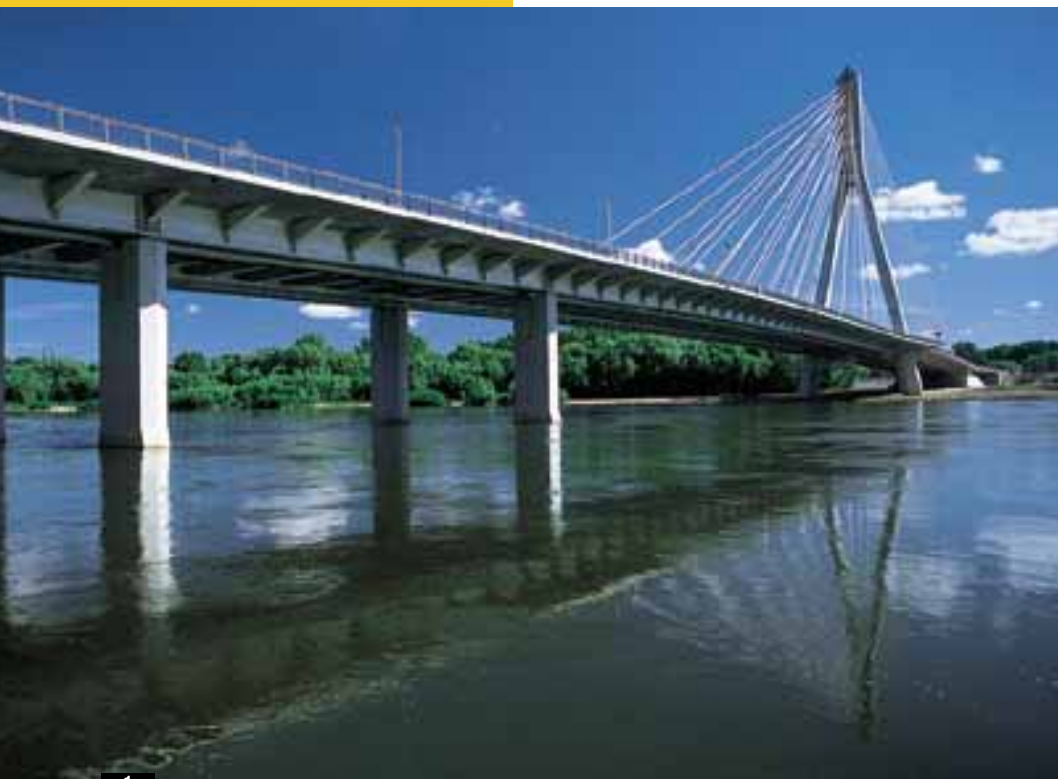


1



2

>>> Photo d'ouverture : le pont Swietokrzyski se caractérise par un pylône unique en Y inversé. **1** Les deux pylônes du pont Siekierkowski à Varsovie culminent à une hauteur de 90 m. **2** Le pont Sucharski et ses 2 x 2 voies de circulation permettront de désenclaver le port de Gdansk.



1

2

>>> **1** Le tablier du pont Swietokrzyski s'étire sur 490 m.

2 Fantaisie architecturale, le tablier s'élargit au niveau du pylône, offrant ainsi aux piétons une petite aire de repos. **3** Les haubans du pont Swietokrzyski se croisent à l'intérieur de la tête du pylône.

4 Le tablier du pont Siekierkowski est construit selon la technique du pont poussé. La pose des haubans n'intervient qu'après.

En effet, la circulation à Varsovie ne permettait pas de garantir un temps de livraison constant entre la centrale à béton et le chantier. Les volumes de béton de type B 50 PMES variaient entre 30 et 40 m³ dans les jambes, pour atteindre 60 m³ dans la tête.

● Bétonnage refroidi par eau

Excentré vers l'est par rapport à l'axe du fleuve, le pylône repose sur une semelle de 4,20 m d'épaisseur. Le volume de béton de la semelle, très important (2 150 m³), a incité Warbud à rechercher une solution pour limiter l'échauffement du béton au moment de sa prise. "Nous voulions réduire au minimum la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur du massif, explique Maciej Mackiewicz, directeur de travaux Warbud. Au moment de la prise, cette différence devait être d'environ 15 °C pour une température interne proche de 50 °C." Pour respecter cette contrainte, l'entreprise polonaise a mis au point une solution peu courante : "Nous avons intégré au cœur des armatures un système de refroidissement par circulation d'eau", précise Bogdan Dynia, ingénieur

Warbud chargé de la technique. Au total, quelque 5 km de tubes en acier de 25 mm de diamètre ont été répartis dans la semelle, reliés à des pompes. L'eau de la Vistule a servi de liquide réfrigérant. Leur tâche accomplie, les tuyaux ont ensuite été neutralisés par injection d'un coulis de ciment.

Warbud a aussi employé ce principe de refroidissement pour les premières levées du pylône et pour l'imposante pile P6 (26 m de large, 19 m de long et 7 m de haut) implantée sur la rive est. Cette pile massive est destinée à reprendre les efforts engendrés par les câbles de haubanage. En même temps, elle sert d'interface entre le tablier métallique et le petit viaduc d'accès "est", d'une longueur de 18 m seulement. Ce rôle central demandait en théorie la création d'une pile pleine. L'entreprise a proposé une variante creuse. Le transfert des efforts vers les fondations est obtenu par l'intermédiaire de tiges type Macaloy qui traversent la structure de la pile.

Supporté par l'unique pylône et par six piles secondaires, le tablier du pont se développe sur une longueur de 490 m, dont 320 m pour la section haubanée. De type mixte, il a été construit par pous-

sage depuis la rive est. Durant la phase des travaux, la charpente métallique reposait sur une série d'appuis provisoires fondés dans le lit de la Vistule. Une fois en place, Mostostal Warszawa a procédé au coulage de la dalle en béton à l'aide d'un équipage mobile.

● Des haubans prêts à poser

Du fait du choix de la technique de passage, la mise en place des haubans était indépendante de la construction du tablier métallique. Là encore, le groupement Tracé Sainte-Croix, commanditaire de l'ouvrage, a opté pour une solution originale. Contrairement aux techniques de haubanage traditionnelles, qui consistent à mettre en place les câbles brin par brin, le suisse BBR a développé son propre procédé. Il préfabrique en usine les haubans qui, prêts à poser, sont acheminés sur tourets vers le chantier. Simple et efficace. ■

Maître d'ouvrage :

groupement
Tracé Sainte-Croix, constitué de
l'arrondissement Centre de la
municipalité de Varsovie et du
consortium Elektrim SA

Conception :

bureaux d'études Baks (Varsovie)
et Mestra (Finlande)

Entreprise générale :

consortium helvético-polonais
Mostostal Warszawa, mandataire
des travaux, et BBR

Sous-traitant pylône,
pile P6, culée C9 et viaduc
d'accès "est" (18 m) :
Warbud, filiale Vinci

Pose des haubans :

BBR

Pose de la première pierre :

29 septembre 1998

Inauguration :

octobre 2000



3



4

HISTORIQUE

La genèse des ponts varsoviens

Le programme de construction des ponts Swietokrzyski (Sainte-Croix) et Siekierkowski est destiné à faciliter la circulation automobile dans Varsovie. La capitale polonaise, en effet, souffre de l'absence de boulevard périphérique. La ville, en grande partie reconstruite entre 1945 et la fin des années cinquante, occupe aujourd'hui une superficie de 495 km² et abrite environ 1,7 million d'habitants. La Vistule, principal fleuve de Pologne, traverse Varsovie sur 28 km selon un axe sud-nord. Aujourd'hui, sept ponts seulement permettent de franchir le fleuve. Trop peu au regard du développement économique de la capitale et de l'explosion de la circulation automobile.

De plus, l'essentiel de l'activité de la ville est concentré sur la rive gauche de la Vistule. Ce déséquilibre engendre chaque jour la migration de près de 300 000 personnes de l'est vers l'ouest de la capitale. C'est pourquoi la municipalité de Varsovie songe à la création d'une deuxième ligne de métro (est-ouest). La construction de la première ligne, pour partie en service, se poursuit vers le nord. Un rééquilibrage des lieux de travail est aussi en projet. Il devrait voir la création d'un complexe regroupant bureaux, habitations et équipements de service et de loisir, implanté au pied du pont Sainte-Croix. Pour ce projet d'importance, la ville s'est attaché les services de l'architecte Ricardo Bofill.

Pont Siekierkowski : le plus grand pont à haubans polonais

Quelque 250 m séparent les deux pylônes en H du pont Siekierkowski, huitième ouvrage de franchissement de la Vistule à Varsovie, qui se développe sur une longueur de 826,50 m. À terme, il supportera 2 x 3 voies de circulation. Ses dimensions en font le plus grand pont à haubans jamais construit en Pologne.

Éléments emblématiques de l'ouvrage, les deux pylônes, d'une hauteur unitaire de 90,20 m, sont en cours d'édification. Fin mai 2001, deux tiers du pylône ouest et un tiers du pylône est étaient déjà réalisés. La construction de chacune des jambes s'est décomposée en 21 levées dont 19 de section constante (6 x 3 m), réalisées à l'aide de quatre coffrages grimpants. Chaque levée, d'une hauteur moyenne de 4,20 m pour une épaisseur de voile de 87 cm, a nécessité une semaine de travail et la mise en œuvre de 60 m³ de béton. En partie supérieure, dans la zone de haubanage, le coffrage grim pant intérieur a été remplacé par un

caisson métallique. Destiné à reprendre les efforts des haubans, il a été mis en place par tronçons de 3 m. Durant la phase de construction, il faisait office de coffrage perdu.

● CEM III interdit

Les deux premières levées des pylônes (6,16 m et 3,91 m), de section variable, sont pleines. Elles ont nécessité l'utilisation d'un outil coffrant sur mesure. Pour réaliser ces parties de l'ouvrage, l'entreprise Warbud a appliqué sa technique de refroidissement par eau (*voir article "Sainte-Croix"*) afin de limiter à 10 °C la différence de température entre le cœur et les bords du massif de béton. En effet, la réglementation polonaise en matière d'ouvrages d'art interdisant l'utilisation d'un ciment à faible chaleur d'hydratation, type CEM III (CHF ou CLK), l'ensemble du pylône a été réalisé à l'aide d'un béton B 60 dosé à 400 kg/m³ de ciment CEM I 42,5...



1



2



3

TECHNIQUE

Siekierkowski en chiffres

Pont haubané à deux pylônes et tablier mixte.

- Longueur totale : 826,50 m.
- Longueur de la travée centrale : 250 m.
- Largeur hors tout : 34 m.
- Hauteur des pylônes : 92,70 m.
- Fondations des pylônes : 160 pieux de 1 500 mm de diamètre, ancrés à des profondeurs de 29 m et 30 m.
- Longueur totale des câbles de haubanage : 5 296 m.

uelque 250 m séparent les deux pylônes en H du pont Siekierkowski, huitième ouvrage de franchissement de la Vistule à Varsovie, qui se développe sur une longueur de 826,50 m. À terme, il supportera 2 x 3 voies de circulation. Ses dimensions en font le plus grand pont à haubans jamais construit en Pologne. Éléments emblématiques de l'ouvrage, les deux pylônes, d'une hauteur unitaire

de 90,20 m, sont en cours d'édification. Fin mai 2001, deux tiers du pylône ouest et un tiers du pylône est étaient déjà réalisés. La construction de chacune des jambes s'est décomposée en 21 levées dont 19 de section constante (6 x 3 m), réalisées à l'aide de quatre coffrages grimpants. Chaque levée, d'une hauteur moyenne de 4,20 m pour une épaisseur de voile de 87 cm, a nécessité une semaine de travail et la mise en œuvre de 60 m³ de béton. En partie supérieure, dans la zone de haubanage, le coffrage grimpant intérieur a été remplacé par un caisson métallique. Destiné à reprendre les efforts des haubans, il a été mis en place par tronçons de 3 m. Durant la phase de construction, il faisait office de coffrage perdu.

● CEM III interdit

Les deux premières levées des pylônes (6,16 m et 3,91 m), de section variable, sont pleines. Elles ont nécessité l'utilisation d'un outil coffrant sur mesure. Pour réaliser ces parties de l'ouvrage, l'entreprise Warbud a appliqué sa technique de refroidissement par eau (voir article "Sainte-Croix") afin de limiter à 10 °C

➤➤➤ **1** Sur la rive droite, le tablier s'élargit de 33,40 m à 55 m pour permettre l'intégration des bretelles d'accès. **2** Le tablier du pont est implanté à 16,60 m au-dessus de la Vistule. **3** La dalle en béton est divisée en segments de 8 m afin de pallier les risques de fissuration durant le poussage. **4** Pose des premiers haubans du pont Siekierkowski, le 20 août 2001. **5** Avec ses 99,89 m, le pylône du pont Sucharski constitue la plus haute construction de Gdansk. **6** Le tablier est supporté par 60 haubans.

la différence de température entre le cœur et les bords du massif de béton. En effet, la réglementation polonaise en matière d'ouvrages d'art interdisant l'utilisation d'un ciment à faible chaleur d'hydratation, type CEM III (CHF ou CLK), l'ensemble du pylône a été réalisé à l'aide d'un béton B 60 dosé à 400 kg/m³ de ciment CEM I 42,5...

Les jambes des pylônes sont reliées par deux entretoises en béton armé implantées à des hauteurs de 13 m et de 62 m. Celle du bas, précontrainte, sert de support au tablier. Véritable nœud d'armature, elle a été coulée avant la réalisation de la deuxième levée. L'entretoise haute, sans précontrainte, a été construite après dégagement des coffrages grimpants.

Le pont Siekierkowski se divise en trois segments : sur la rive gauche, le viaduc d'accès ouest (M2), d'une longueur de

251 m, ensuite le pont haubané (M1), d'une longueur de 500 m, et enfin le viaduc d'accès est (M3), d'une longueur de 75,50 m, sur la rive droite. Outre les deux pylônes, l'ouvrage est supporté par 18 doubles piles réparties en 9 files, auxquelles s'ajoutent les deux culées. Située à 16,60 m au-dessus des eaux de la Vistule, la travée centrale (M1) a été mise en place par poussage depuis la rive gauche. Durant toute la phase des travaux, elle était supportée par une série d'appuis provisoires, espacés d'environ 40 m et construits dans le lit même du fleuve. La travée a été construite en 11 jours par tronçons de 32 m, constitués chacun de deux poutres longitudinales en I, de 2 m de haut, distantes de 26 m et reliées par des entretoises de même hauteur disposées tous les 4 m. Choix original, la dalle en béton (B 45),



4



5



6

d'une épaisseur de 26 cm et d'une largeur de 32 m, a été réalisée durant cette même phase de construction. "Cette méthode a été préférée au coulage à l'aide d'un équipage mobile, car elle permettait de réduire les délais, remarque Włodzimierz Bielski, conducteur de travaux Warbud. C'est la première fois que l'on construit un pont poussé avec dalle en béton intégrée en Pologne." Pourtant, pour pallier les problèmes de fissu-

Pont Sucharski : désenclaver le premier port de Pologne

Elément majeur d'un nouveau tracé reliant la route de Varsovie au port de Gdansk, le pont Sucharski doit permettre le franchissement d'un bras mort de la Vistule. D'une longueur totale de 381 m pour une largeur de 20,31 m, il supportera 2 x 2 voies de circulation. Contrairement aux ponts haubanés varsoviens, construits par poussage sur appuis provisoires, la travée centrale a ici été réalisée en encorbellement. Sa construction a commencé une fois le viaduc d'accès sud en place. D'une longueur de 117 m, celui-ci a été monté sur cintres avec une grue mobile. Les 26 premiers mètres de la travée centrale ont été construits dans la continuité du viaduc sud, selon la même technique. L'ensemble du tablier du pont Sucharski, de type mixte, est constitué d'un bipoutre de caissons, entretoisés tous les 4 m. La travée centrale intègre 14 segments préfabriqués de 12 m de long. Chacun d'entre eux a été assemblé dans

le port de Gdansk à partir d'éléments prémontés. La dalle en béton B 60 de 23 cm d'épaisseur a été coulée à l'issue de cette phase. Une fois achevé, le segment, d'un poids d'environ 200 t, a été transporté par barge jusqu'au pied du pont. "Neuf à onze jours ont été nécessaires pour le mettre en place", précise Maciej Targowski, responsable de l'exécution pour Demathieu et Bard, entreprise mandataire du chantier. L'opération débutait par le levage et le réglage : "Nous avons utilisé un programme informatique garantissant le bon positionnement de chaque segment au moment de son montage", reprend le responsable. Le soudage effectué, l'élément était libéré et le joint de dalle coulé. Un contrôle topographique et la mise en place des haubans de l'élément posé ont achevé la manœuvre. Le système de suspente du pont Sucharski se compose de 60 haubans : 2 x 16 câbles à l'avant et 2 x 14 câbles à l'arrière. Leur longueur varie de 60 à

216 m. Chaque hauban compte 31, 37, 42 ou 55 torons de type T 15,7 galvanisés, gainés et graissés. Les haubans sont disposés de manière unitaire ou par groupes de deux ou trois. Un choix esthétique qui garantit l'uniformité du diamètre des gaines.

TECHNIQUE

Sucharski en chiffres

Pont haubané à pylône unique et tablier mixte

- **Longueur totale : 381 m.**
- **Longueur de la travée centrale haubanée : 230 m.**
- **Largeur hors tout : 20,31 m.**
- **Hauteur du pylône : 99,89 m.**
- **Fondations du pylône : 50 pieux de 1 800 mm de diamètre, ancrés à 30 m de profondeur.**

Maître d'ouvrage :
municipalité de Varsovie,
arrondissement Centre

Maîtres d'œuvre :
Progress et ZBM (bureau
d'études)

Entreprises générales :
Mostostal Warszawa (50 %, mandataire), Vinci Construction (35 %) et Warbud (15 %, filiale Vinci Construction)

Pose de la première pierre :
1^{er} mars 2000

Délai de réalisation :
30 mois

Coût :
47 M€ (308,3 MF)



La mise en œuvre des haubans, réalisée par l'entreprise VSL, a suivi un processus très précis. Les torons ont d'abord été enfilés et tendus un à un à 35 % de leur valeur nominale. L'étape suivante consistait à appliquer 100 % de la tension, toujours toron par toron, à l'aide d'un automate préprogrammé. Ce logiciel a permis de définir le raccourcissement des câbles en fonction de la position réelle et de la température de la structure, tout en tenant compte des charges provisoires.

● Longue travée centrale

L'unique pylône en Y inversé du pont Sucharski étant situé sur la berge sud, la travée centrale est beaucoup plus longue que le tablier du viaduc d'accès sud. Pour compenser l'effet de soulèvement, cette travée de rive est ancrée. L'ensemble des efforts est repris par les piles et la culée, qui travaillent toutes en arrachement. Vingt-huit tiges Macalloy de 75 mm de diamètre (1 030 MPa de résistance à la rupture) permettent de répercuter les efforts de traction sur les fondations. Haut de près de 100 m, le pylône constitue dès à présent la plus haute construction de Gdansk. Sa réalisation s'est déroulée

de mars à novembre 2000. Le pylône a nécessité 1 750 m³ de béton de type B 50 pour les jambes, et de type B 60 dans la zone d'intersection et la tête. L'entreprise Demathieu et Bard, associée à Warbud, a mis en œuvre des coffrages semi-grimpants. L'opération a été menée à bien en 25 levées : 13 levées de 4,27 m dans les jambes, 6 levées de 2,35 à 2,71 m dans la zone d'intersection, 5 levées de 5,23 à 5,03 m dans la tête, plus une dernière levée de 1,30 m. Exception faite des 5,60 premiers mètres, le pylône est creux sur toute sa hauteur. L'épaisseur des voiles varie de 80 cm dans les jambes à 1,10 m dans la tête. Dans cette même zone, une structure centrale en acier comportant les tubes d'ancrage des haubans a été insérée dans le béton à chaque levée. D'un poids maximal de 12 t, ces éléments ont dû être implantés au millimètre près. Ils ont partiellement servi de coffrage perdu au moment de la construction du pylône.

Les jambes du pylône reposent sur une énorme semelle en béton armé de forme pyramidale de 22,90 m de large et de 53,10 m de long, pour une épaisseur variable de 3,50 m en périphérie à

6,35 m en partie centrale. L'ensemble représente un volume de 5 781 m³ de béton. Pour pallier l'effet exothermique dû à la prise, le coulage des semelles et de la poutre a été divisé en quatre étapes : bétonnage de la totalité des surfaces selon des épaisseurs successives de 1 m, 80 cm et 1,40 m, puis bétonnage des parties inclinées des semelles. Les fondations du pont Sucharski sont ancrées à une profondeur comprise entre 26 et 30 m dans des terrains hétéroclites. Au nombre de 109, dont 50 pour le pylône, les pieux de 1 500 et 1 800 mm de diamètre ont été réalisés en 89 jours. Une campagne d'injection à la base de chaque pieu a permis de renforcer le pouvoir portant de chaque fondation. Des essais de chargement ou d'arrachement effectués sur les pieux des deux culées, du pylône et d'une pile en rive droite ont permis de valider ces performances. ■

>>> **1** Constitués de 31 à 55 torons, les haubans sont disposés de manière unitaire, ou par groupes de deux ou trois.

2 Le pylône du pont Sucharski est creux sur toute sa hauteur, exception faite des 5,60 premiers mètres. L'épaisseur des voiles varie de 80 cm dans les jambes à 1,10 m dans la tête.

Maître d'ouvrage :
direction générale
des Routes publiques
(GDDP)

Maître d'œuvre délégué :
Transprojekt Gdansk

Concepteur :
BPBK
(Bureau des projets
de constructions municipales)

Entreprises générales :
groupement Pont Sucharski
à Gdansk,
constitué de Demathieu
et Bard (leader) et
de Mosty Lodz

Délai de réalisation :
28 mois

Coût :
19 M€ (125 MF)

TEXTE ET PHOTOS : PIOTR ZAMEK

Plus beaux, plus longs

●●● LARGEMENT ÉVOQUÉS DANS
LE NUMÉRO SPÉCIAL OUVRAGES
D'ART 2000 DE *CONSTRUCTION*
MODERNE, LES PONTS HAUBANÉS
À DALLE MINCE LAISSENT CETTE
ANNÉE LA PLACE AUX
CONFIGURATIONS UTILISÉES POUR
LES LONGS FRANCHISSEMENTS.
AU PROGRAMME DE CE SECOND
VOLET "2001", LES PONTS
HAUBANÉS À LONGUE TRAVÉE
CENTRALE ET LES PONTS HAUBANÉS
À TRAVÉES MULTIPLES, POUR
LES FRANCHISSEMENTS "RECORDS".





A l'aube des années quatre-vingt, alors que la liaison transmanche est encore à l'état de projet, Sofresid étudie deux ponts reliant chacun une rive à un tunnel immergé situé au centre de la Manche, les deux liaisons pont-tunnel s'opérant au moyen d'une rampe hélicoïdale. Abandonnée au profit du "tout-tunnel", cette solution offrait néanmoins la particularité de faire appel à un modèle de pont encore peu répandu : le pont haubané à travées multiples.

Identique dans son principe au pont haubané classique, le pont haubané à travées multiples constitue, avec le pont haubané à tablier-caisson, la suite du dossier sur les ponts à haubans ouvert dans le numéro spécial "ouvrages d'art" 2000 de *Construction moderne*. Décrits en détail dans ce précédent numéro, les ponts à dalle mince ne seront donc pas réétudiés dans le présent article. On se bornera à rappeler que le pont haubané connaît aujourd'hui un très net essor, marqué par une évolution spectaculaire des portées franchies. La solution du pont haubané à dalle mince rencontre pour sa part un succès croissant, succès motivé par les qualités intrin-

sèques de cette solution – modernité, économie, efficacité, élégance – pour des portées modestes, comprises entre 120 et 250 m. Pour les grands franchissements, domaine qui nous intéresse aujourd'hui, et dans l'état actuel de la technique, deux configurations d'ouvrages sont possibles :

- un franchissement à une grande travée principale et des travées de rive plus modestes. C'est la solution la plus souvent retenue (et notamment pour le pont de Normandie) ;
- un franchissement avec de grandes travées successives, c'est le cas des ponts dits haubanés à travées multiples.

● Première solution : une longue travée principale

La première configuration connaît ses premières applications à la fin des années soixante. Les qualités spécifiques des ouvrages haubanés – et en premier lieu leur élégance – vont amener de nombreuses constructions dont les performances vont s'accroître progressivement. Dès la fin des années soixante-dix, en effet, le chiffre de 300 m de portée pour la travée centrale est déjà dépassé.

L'événement a lieu en 1977, sur le tracé de la Seine. Achevé en 1959, le pont de Tancarville ne suffit plus aux besoins du trafic routier, et le conseil général de Seine-Maritime envisage son doublement en amont. Les méandres du fleuve, la fréquence du brouillard et le tonnage des navires interdisent les piles en rivière, trop exposées en cas d'accident. Un franchissement en une seule portée de 320 m s'impose donc pour le pont de Brotonne, dont le projet final, dessiné par les architectes Arzac et Fraleu, atteindra 1 278 m de longueur totale. Moins coûteuse, la solution béton l'emporte sur la variante acier. La construction des pylônes, eux aussi en béton, sera le moment fort de la réalisation du pont – et pour cause, puisque ces fûts verticaux de 70 m de hauteur au-dessus du tablier doivent résister à des charges de l'ordre de 10 000 t, mais également aux efforts causés par des vents pouvant atteindre 160 km/h. Le tablier, situé à 50 m au-dessus de la surface du fleuve, est un caisson en béton précontraint de 3,80 m de hauteur et de 19,20 m de large. Dernière particularité du pont de Brotonne, son haubanage axial en semi-éventail qui lui assure une extraordinaire

légèreté visuelle, même si la position centrale des pylônes amène un élargissement du tablier par rapport à une solution à deux nappes de haubanage, et donc un surcroît de poids.

● Nouveau record en 1994

Dix-sept ans après le pont de Brotonne, en 1994, une nouvelle étape est franchie avec le pont de l'Iroise. L'ouvrage, long de 800 m, établit un nouveau record pour les ponts haubanés, avec une travée centrale de 400 m. Voisin du célèbre pont Albert-Loupe, construit par Eugène Freyssinet en 1929, le pont de l'Iroise se fait donc l'égal de son ancêtre, en montrant à son tour les qualités du béton en matière de franchissements. Là encore, l'élan naturel du pont haubané se voit magnifié par le choix d'un haubanage axial. Chacun des deux pylônes axiaux a une hauteur de 80 m au-dessus du tablier. La finesse remarquable de cet ouvrage est notamment due à une utilisation judicieuse du matériau béton : béton de granulats légers pour la travée centrale, béton de densité normale pour les travées latérales, et béton hautes performances pour les pylônes axiaux.



3



4

Remarquable par sa portée record au moment de sa conception, cet ouvrage est appelé à inspirer des franchissements plus importants, la solution du pont haubané à tablier béton demeurant compétitive pour des portées pouvant aller jusqu'à 500 m actuellement.

La seconde configuration pour les longs franchissements révèle toutes ses qualités pour des portées d'environ 400 m, distance actuellement considérée comme optimale pour les ponts haubanés à travées multiples. Le nombre des pylônes et la variété des plans de haubannage (un, deux ou trois plans) offrent ensuite au concepteur un large éventail de configurations, même si la solution du pont haubané à travées multiples impose des contraintes spécifiques.

● Maîtriser les flexions

La première de ces contraintes est la nécessaire indépendance de fonctionnement des travées entre elles, de manière à limiter la transmission en chaîne des mouvements verticaux du tablier d'une travée à l'autre. En effet, le chargement d'une travée donnée entraîne un rapprochement des têtes des pylônes adja-

cents, et consécutivement une remontée des deux travées voisines. L'indépendance dans le fonctionnement des travées sera d'autant plus grande que les pylônes seront rigides. Une telle solution impose évidemment une continuité de flexion entre la pile (située au-dessous du tablier) et le pylône lui-même. Le concept doit aussi permettre le mouvement longitudinal du tablier, sous l'action des effets thermiques notamment. Dès lors, deux grandes familles de solutions se dessinent :

- les solutions à encastrement relatif entre pile, pylône et tablier ;
- les solutions à piles et pylônes continus et tablier articulé "glissant" en tête de pile.

Dans un cas comme dans l'autre, le phénomène de flexion d'ensemble de l'ouvrage est le souci majeur auquel les concepteurs de ponts haubanés à travées multiples doivent faire face, sachant que le diagramme des moments de flexion longitudinale des pylônes sous surcharge dépend également d'autres facteurs (petites ou grandes travées latérales, nappes de haubans symétriques ou non, disposition du haubannage en éventail, en harpe ou en semi-éventail, etc.).

>>> ■ 1 En 1977, le pont de Brotonne établit un record avec une portée centrale de 320 m. ■ 2 Le pont de Tampico, au Mexique, et ses pylônes au dessin caractéristique. ■ 3 Nouvelle portée record en 1994 avec le pont de l'Iroise et son haubannage axial : les 400 m sont atteints. ■ 4 Réalisé par Jean Muller, l'impressionnant Sunshine Skyway Bridge traverse la baie de Tampa, en Floride.

Quoi qu'il en soit, on comprend que la solution d'un tablier continu auquel les pylônes seront liaisonnés de façon rigide, l'ensemble reposant sur les piles au moyen d'une simple rangée d'appuis, est totalement proscrite...

● Un exemple de liaisonnement rigide

La solution consistant à limiter la rotation des pylônes grâce à un ensemble pile-pylône continu et rigide est celle qui fut choisie pour le pont du lac Maracaibo, au Venezuela. Construit entre 1957 et 1962, ce pont dessiné par Riccardo Morandi marqua profondément son époque, et son audace technique comme la spécificité des méthodes de construction utilisées lui permettent de demeurer aujourd'hui parmi les plus grandes réalisations du xx^e siècle.

Le pont se compose dans sa partie principale de six pylônes et cinq travées de 235 m chacune. Ces pylônes, en forme de V longitudinal inversé, se caractérisent par leur extrême rigidité. On note également la présence de bracons inclinés destinés à supporter le tablier de chaque côté des pylônes. Une travée est supportée par quatre haubans concentrés accrochés à l'extrémité du fléau. Le pont du lac Maracaibo se compose ainsi de six fléaux qui sont autant de structures isostatiques, reliées entre elles par des travées de fermeture de 46 m chacune permettant une libre dilatation longitudinale du tablier. Extrêmement rigide, la solution a nécessité l'emploi d'un grand volume de béton, du fait de l'importance des éléments structurels et du grand nombre de joints de dilatation. Parmi les ouvrages modernes, une solution particulièrement efficace a été

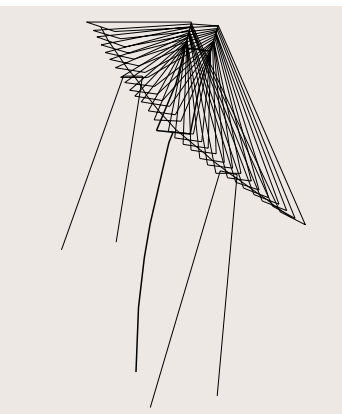


1

2

Entretien avec Alain Chauvin « **Le pont haubané est une structure *relativement simple*** »

Alain Chauvin est gérant de la société d'études Structures, spécialisée dans le domaine des grands ouvrages et des structures complexes de génie civil. Son rôle déterminant dans la conception du pont de Mezcala, au Mexique, fait de lui un interlocuteur privilégié pour cette rubrique consacrée aux ponts haubanés d'exception.



III Schéma de calcul au vent du pylône P3 en phase de construction

Construction moderne : *Le pont de Mezcala a une histoire peu ordinaire. Pouvez-vous préciser les conditions de votre intervention ?*

Alain Chauvin : Le projet originel du pont de Mezcala reposait sur le principe d'un ouvrage haubané à une travée centrale et deux travées de rive haubanées. En 1991, alors que le projet d'exécution était en cours et l'entreprise principale déjà désignée, les travaux d'excavation ont mis en évidence des conditions de sol exécrables sur l'un des côtés de l'ouvrage, nécessitant ainsi le déplacement de l'un des pylônes. Cette découverte était de nature à remettre en cause le projet initial. C'est alors que je suis intervenu, dans le cadre de ma mission de conseil auprès de la direction des Routes du Mexique.

C. M. : *Quelle conception structurelle avez-vous retenue au terme de votre étude ?*

A. C. : Mon intervention a consisté à concevoir – et à vérifier par calcul électronique – plusieurs solutions variantes, et notamment la configuration retenue par le

client, qui est la solution à trois travées haubanées finalement réalisée. Le bureau d'études a alors repris son projet d'exécution, et l'ouvrage a pu être inauguré à l'été 1993, comme prévu.

C. M. : *Dans des conditions plus faciles, soit en concevant l'ouvrage dès la première étape, auriez-vous abouti à un ouvrage différent ?*

A. C. : L'élévation de l'ouvrage réalisé est d'une grande logique, la forme du haubanage sur trois travées s'inscrivant en contrepoint du profil du fond de vallée. Pourtant, il est probable que – et peut-être par paresse intellectuelle – je n'aurais pas abouti à cette solution haubanée à travées multiples si j'avais dû réaliser le projet dès l'origine, sans contrainte particulière liée aux conditions de sol. S'agissant de la morphologie transversale de l'ouvrage, et compte tenu de l'expérience acquise lors de la construction du pont de l'Iroise, j'aurais très probablement opté pour une nappe axiale, et ce, pour des raisons esthétiques évidentes. Cette solution correspond d'ailleurs



à la première proposition faite au client, proposition abandonnée par la suite pour des questions de budget.

C. M. : *Quelles sont ces raisons esthétiques que vous évoquez ?*

A. C. : D'un point de vue esthétique, le recours à une nappe axiale s'impose pratiquement pour des ouvrages haubanés à travées multiples, parce qu'il permet d'éviter l'enchevêtrement visuel des nappes de haubans sous des angles de vue non perpendiculaires. Cependant, les conditions particulières de mon intervention dans le cas du pont de Mezcala ne m'ont pas permis de remettre aussi en question la coupe transversale de l'ouvrage : un tablier mixte ouvert sans aucune raideur en torsion, incompatible avec un haubanage axial.

C. M. : *Du fait de sa hauteur, l'ouvrage nécessitait-il une mise en œuvre particulière ? Quelle solution avez-vous retenue ?*

A. C. : Les méthodes de réalisation de l'ouvrage modifié ont été sensiblement les mêmes que celles de l'ouvrage initial. Piles et pylônes



>>> **1** Le pont de Ting Kau se distingue par son système de câbles reliant le sommet du pylône central aux pylônes latéraux à hauteur du tablier. **2** **3** Le dessin des éventails de haubans du pont de Mezcala rappelle, par symétrie, la forme de la vallée en contrebas. **4** Les deux travées principales sont équipées de déflecteurs aérodynamiques qui améliorent la stabilité du pont.

ont été construits à l'aide de coffrages grimpants. La poutraison des travées latérales a été lancée depuis les rives droite et gauche. Le pylône P3 (242 m de hauteur) a exigé des mesures spéciales afin d'assurer sa stabilité face au vent et aux risques sismiques durant la phase de construction (voir figure p. 36). Des câbles de retenue accrochés sur le double fléau central en construction ont permis de diviser par deux la réponse dynamique de la structure. Ce haubannage provisoire a été supprimé après clavage avec le reste de la structure.

C. M. : *Quel est votre regard sur les ponts haubanés, qu'ils soient à travées multiples ou plus classiques ? Privilégiez-vous cette solution ?*

A. C. : Le pont haubané est la structure qui s'impose dès que les ouvrages classiques s'avèrent inadaptés. En revanche, pour les très grandes portées, le pont haubané laisse la place aux ponts suspendus. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, le pont haubané est une structure relativement simple à réaliser, tant du point

de vue des études que des travaux de construction. L'ouvrage haubané a donc son champ d'application "naturel", même s'il a parfois été choisi abusivement en dehors de son domaine de portée, pour des raisons qui n'ont rien à voir avec la technique.

C. M. : *Considérez-vous qu'il existe une concurrence réelle entre solutions béton et solutions acier ?*

A. C. : Comme le montre le succès des ponts mixtes classiques, le béton et l'acier sont deux matériaux très complémentaires, qu'il ne convient en aucun cas d'opposer. Reste qu'il existe une concurrence sur le plan économique, les entreprises et groupes de travaux publics restant souvent très spécialisés dans la mise en œuvre de l'un ou de l'autre de ces deux matériaux. De même, certaines écoles de spécialisation continuent à enseigner dans des filières séparées la conception et le dimensionnement des structures en béton et des structures en acier. Cette situation devrait évidemment évoluer dans le futur. ■

adoptée pour le pont de Mezcala, au Mexique, achevé en 1993 [voir interview ci-contre]. Composé de trois pylônes et de deux travées principales de 312 m et 299 m, ce pont qui est le premier de sa catégorie se distingue par ses pylônes latéraux plus courts que le pylône central. Le tablier mixte acier-béton traverse librement chacun des pylônes à bras latéraux en s'appuyant simplement sur chaque tête de pile. Le tablier est donc continu mais articulé par rapport aux pylônes, et sa dilatation est permise. Ce pont est à ce jour l'un des deux seuls

exemples de grands ponts haubanés à travées multiples, le second étant le pont de Ting Kau, à Hong Kong.

● Ting Kau : pylônes axiaux et tablier double

Pour cet ouvrage, qui comprend trois pylônes et deux travées principales de 448 m et 475 m, les Allemands Jörg Schlaich et Rudolf Bergermann ont opté pour des pylônes axiaux disposés dans l'espace laissé libre par un tablier double, suspendu par quatre plans de haubans. Ce tablier est constitué de deux structures composites parallèles, composées chacune de deux poutres en double T et d'une dalle supérieure en béton, connectées à une série de pièces de pont métalliques se prolongeant en entretoise sous les tabliers. Les deux tabliers reposent sur des fléaux détachés latéralement des pylônes, la liaison tablier-fléau s'effectuant au moyen d'appuis classiques. À l'intérieur, les deux tabliers s'appuient simplement sur des corbeaux transversaux en saillie sur les pylônes, de telle sorte que les variations de longueur sont libres, limitées seulement par la friction, tandis que les

PONT DE MEZCALA (MEXIQUE)

Maître d'ouvrage :
Secretaría de Comunicaciones
y Transportes (SCT)

**Conception
et contrôle :**
Comec, EEG, Structures

**Câblage
et prétension :**
Freyssinet

Entreprise principale :
ICA – Ingenieros
Civiles Asociados



1

2

charges transférées sur les corbeaux sont relativement faibles. La résistance en flexion latérale des pylônes axiaux est renforcée par un système de haubannage transversal. L'ouvrage à haubans multiples répartis se distingue également par l'ajout d'un système de câbles de retenue reliés d'une part au sommet du pylône central, et d'autre part à chacun des pylônes latéraux au niveau du tablier. Ces câbles de forte section sont destinés à augmenter la raideur en flexion de l'ouvrage.

● Le viaduc de Millau, ouvrage d'exception

Cette étude des ponts haubanés à travées multiples et de leurs applications les plus marquantes serait incomplète si elle ne faisait mention du viaduc autoroutier de Millau. Titanesque, l'ouvrage se distingue par sa longueur exceptionnelle, 2,5 km, mais également par sa hauteur hors du commun, la chaussée se situant à quelque 270 m au-dessus du Tarn. L'ensemble se compose de sept pylônes et de six travées principales haubanées de 342 m de long, les deux piles les plus

longues atteignant 230 m de haut, valeur à laquelle il faut encore ajouter les 90 m de hauteur des pylônes.

On s'en doute, la conception d'un tel ouvrage est un travail extrêmement complexe, et la période de l'étude vient seulement de s'achever. La procédure a amené une succession d'étapes. Après l'étude d'un projet préliminaire par le SETRA, la direction des Routes organisa deux concours. Le premier, destiné à faire apparaître de nouvelles idées et de nouveaux concepts, eut lieu en 1993. Des bureaux d'études et des architectes furent consultés séparément, mais peu de solutions nouvelles furent proposées. Une seconde compétition fut organisée en 1995-1996 entre cinq équipes de bureaux d'études et d'architectes, chaque équipe étant en charge du développement d'un projet correspondant à l'une des cinq solutions retenues à l'issue de la première consultation, sachant qu'il s'agissait moins de sélectionner les équipes que les concepts. En 1996, le jury se prononça pour la solution du pont haubané à travées multiples, défendue par Sogelerg, Europe Etudes Gecti, SERF, assistés de l'architecte Sir Norman Foster. Ensuite, entre

1996 et 1998, cette équipe fut chargée de développer un projet détaillé. Deux familles de solutions furent développées, l'une à tablier en béton précontraint, et l'autre à pylône et tablier métallique orthotrope, les deux familles ayant des piles en béton.

● Le rôle de l'architecte dans la conception structurelle

Le dessin de l'ensemble fut déterminé en collaboration étroite avec l'architecte de manière à distribuer efficacement la rigidité entre les différentes parties structurelles, et en prenant soin de garantir l'élégance globale de l'ouvrage et de ses différentes composantes.

Le tablier est de forme trapézoïdale, avec un hourdis très étroit. Les pylônes, hauts de 90 m, sont situés dans l'axe du pont pour une pureté structurelle maximale. Ils sont en forme de V inversé longitudinalement, de manière à apporter la rigidité nécessaire tout en demeurant légers et transparents. Le dessin des

piles, quant à lui, a dû s'adapter pour satisfaire à des exigences contradictoires : les plus grandes doivent résister à la très forte pression du vent, tandis que les piles situées aux extrémités doivent demeurer flexibles face aux dilatactions longitudinales. Mais pour garder au projet sa cohérence, l'architecte a préféré jouer l'unité de forme pour toutes les piles, avec un caisson de forte section au bas des piles qui se divise en deux bras dans la partie supérieure, à environ 90 m de hauteur.

Pour l'heure, il est d'ores et déjà acquis que le viaduc de Millau comptera parmi les tentatives les plus audacieuses jamais réalisées, démontrant ainsi, s'il en était besoin, l'efficacité et donc l'actualité des ponts haubanés à travées multiples dans le cas des longs franchissements. Une double démonstration de force et d'élégance pour le siècle qui s'ouvre. ■

TEXTE : PHILIPPE FRANÇOIS

PHOTOS : ALBERT BERENQUIER, ALAIN CHAUVIN, PHOTOOTHÈQUE FREYSSINET – N. FARRIN/HK, PV

Livres

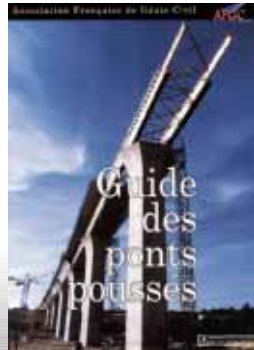


→ Les Plus Beaux Ponts de France

Serge Montens, préface d'Alain Spielmann

Invitation... Une génération nouvelle de spécialistes des ponts aime les ouvrages d'art et l'écrit. Serge Montens en fait partie. Il classe, compare, observe, réunit les données qu'il sait trouver. De très vastes patrimoines de ponts existent à travers la France. Ces mondes, Serge Montens est allé les rencontrer, les recenser. Sa récolte, il nous la livre dans ce guide qui va nous aider utilement à découvrir des constructions parfois étonnantes que nous empruntons tous les jours sans même le savoir. Se perdre à trouver quelques franchissements, voilà un bonheur à goûter. Lectures, recherches, promenades, découvertes, un cycle bien vivant qui pourra se déployer sur les territoires des multiples régions françaises saturées d'histoire, et d'histoires. Au cours des balades, le délicieux plaisir d'être ébloui en trouvant des paysages inconnus traversés par des ponts, des passerelles, des passages, des pontons, de toutes sortes de formes, matériaux, couleurs, et encore des ponts, des ponts et des ponts. Jonction entre les rives et les hommes. Abondante diversité et belle ivresse !

Éditions Bonneton



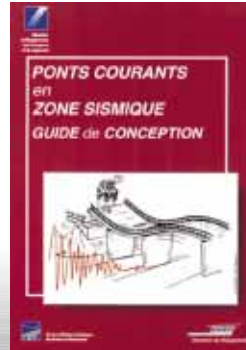
→ Guide des ponts poussés

Association française du génie civil

Particulièrement adaptée aux ouvrages de grande longueur, la technique des ponts poussés s'est largement développée ces dernières années. Les viaducs du TGV Méditerranée en sont l'un des exemples les plus marquants. Ses avantages sont nombreux : rendement et qualité des ouvrages améliorés, du fait de l'organisation quasi industrielle du chantier ; sécurité du personnel renforcée, de par la réalisation des éléments "au sol" sur l'aire de préfabrication ; indépendance totale face aux contraintes d'exploitation des voies franchies, le poussage au-dessus d'une route ou d'une voie ferrée s'effectuant sans interruption du trafic et en toute sécurité.

Ce guide s'adresse aux maîtres d'ouvrage, aux maîtres d'œuvre, aux concepteurs et aux constructeurs. Ils y trouveront les principes de construction des ponts poussés, leurs particularités, leurs domaines d'emploi, ainsi que les méthodes et technologies utilisées. À la fin de l'ouvrage figurent spécificités du calcul, règles de dimensionnement et conseils pour analyser les offres, assortis d'un exemple de prédimensionnement rapide du tablier. Des fiches descriptives de différents ouvrages récents concluent ce document.

Presses de l'École nationale des ponts et chaussées

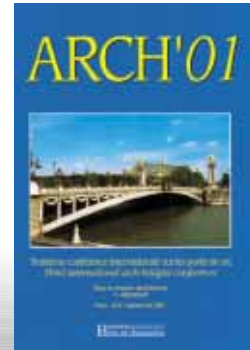


→ Ponts courants en zone sismique

SETRA

Ce guide est destiné aux ingénieurs qui ont à concevoir un ouvrage d'art en zone sismique, la prise en compte du risque sismique étant désormais obligatoire pour l'élaboration des projets d'ouvrages d'art. Les règlements, relativement récents, présentent quelques difficultés d'interprétation et d'utilisation. L'objet de ce document est d'apporter une aide en termes de conception et de justification parasismique aux concepteurs et bureaux d'études travaillant sur des ponts courants. Le contenu de ce guide s'organise conformément à la démarche logique du projeteur. Il développe les principes généraux de la conception parasismique. Il présente l'ensemble des règles de justification, les dispositions constructives, et propose un exemple numérique complet. Le guide contient, en outre, quelques rappels théoriques permettant de comprendre le fonctionnement des structures sous séisme. Il reprend aussi les textes relatifs à la protection parasismique des différentes parties des ponts courants, avec des commentaires explicatifs.

Éditions SETRA



→ Arch'01

Sous la direction de C. Abdunur

Si de nombreux ponts en arc font déjà partie de notre patrimoine, d'autres ouvrages de ce type continuent de se construire à travers le monde. Forts de leurs matériaux et de leurs procédés innovants, ils apportent des réponses performantes en termes de service, d'économie et d'intégration à l'environnement. Au cours des années quatre-vingt, en effet, et dans différents pays, des concepteurs ont réalisé des ponts en arc en béton dont les portées avoisinaient les 400 mètres. Plus récemment, des records de portée ont été battus par trois ponts en arc respectivement en pierre, en béton et en tubes d'acier remplis de béton. Une telle dynamique ne manquera pas d'inciter les ingénieurs à rechercher des formes d'arc encore plus performantes, plus audacieuses et plus élégantes. À l'occasion de la III^e Conférence internationale sur les ponts en arc, qui s'est tenue à Paris en septembre 2001, des intervenants de plus de 25 pays ont apporté des contributions majeures rappelant l'actualité et le potentiel de ce type de pont. Ces différentes contributions se trouvent ici réunies.

Presses de l'École nationale des ponts et chaussées

→ Roissy 2E : des coques préfabriquées ultraminces pour exhausser le génie architectural

Actuellement en cours de construction, la nouvelle aérogare de Roissy 2E fait largement appel au béton, matériau constitutif de l'ensemble de la coque. De par ses proportions littéralement gigantesques, un tel chantier ne va pas sans poser des difficultés techniques exceptionnelles sur le plan de la maîtrise d'œuvre. *Construction moderne* fait le point sur l'évolution des travaux avec Laurent Boutillon, ingénieur méthodes chez Vinci Construction Grands Travaux.



Laurent Boutillon
Ingénieur principal méthodes
à la direction technique
de Vinci Construction Grands Travaux

TECHNIQUE

L'enveloppe : 154 anneaux de 4 m de large et 50 m de longueur développée

Le bâtiment principal de l'aérogare 2E de Roissy est constitué d'une coque de béton de 30 cm d'épaisseur très légère, percée d'ouvertures destinées à l'éclairage, que viendra habiller une verrière extérieure. L'enveloppe en béton est construite par tronçons de 4 m de large, totalisant 50 m de longueur développée. Ces anneaux semi-elliptiques sont composés de trois éléments préfabriqués, une partie haute et deux parties latérales fortement cintrées, rigidifiées par une poutre extérieure. Pour assurer la stabilité pendant le transport, le levage, la mise en place et le clavage, les coques latérales sont renforcées provisoirement par une structure tubulaire intérieure.

Les contraintes du génie civil et du bâtiment réunies

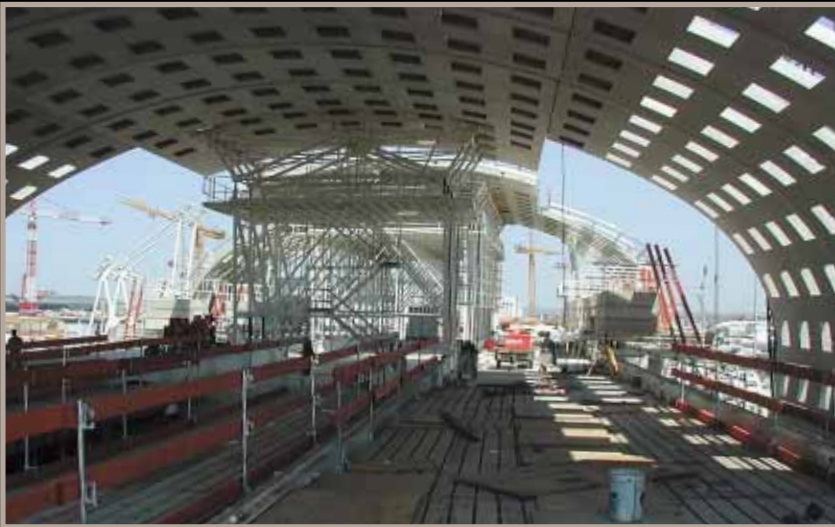
« Il est difficile d'imaginer un chantier plus compliqué, tant au niveau des études, des méthodes, de la préfabrication, que de la mise en œuvre. Aux contraintes de précision d'exécution, de délai et de qualité des parements de béton de type architectoniques, s'ajoutent les contraintes propres au génie civil entraînées par les dimensions hors normes des éléments.

Les coques de Roissy 2E font appel aux moyens de préfabrication employés pour la réalisation de voussoirs de ponts, à ceci près que les éléments, malgré leur échelle, sont très fragiles du fait de leur très faible épaisseur (30 cm), ce qui demande d'anticiper dès la conception les déformations dues au poids propre (phasage de construction) et aux charges d'exploitation ultérieures.

La fabrication des coques s'effectue en un grand nombre d'étapes (fabrication des éléments, stockage, équipement des éléments, transport, basculement, orientation et pose, clavage des éléments puis des anneaux et enfin décintrage des anneaux), qui ont chacune nécessité la fabrication d'un matériel spécifique. Une complexité illustrée par l'intégration dans les éléments béton d'inserts réglés au 1/10 de millimètre, sur lesquels viennent s'ancrer les tirants extérieurs qui rigidifient les éléments. Acheminés par convoi exceptionnel sur 3 km, les éléments sont basculés, puis levés au moyen d'une grue sur chenilles, capable de lever 65 tonnes et à 35 m de portée, afin de pouvoir opérer à distance du fait de l'exiguïté des lieux. Malgré ces nombreuses difficultés, nous parvenons à respecter un rythme de 12 éléments par semaine, soit quatre anneaux. »

PROPOS RECUEILLIS PAR JEAN-PHILIPPE BONDY

PHOTOS : DR



Un chantier digne des cathédrales du XI^e siècle... Actuellement en cours de construction, l'aérogare Roissy 2E devient réalité à mesure que s'assemblent les 154 anneaux de béton qui composent sa structure. Un défi à la mesure des qualités d'un matériau qui fait encore une fois la preuve de son universalité : le béton.



