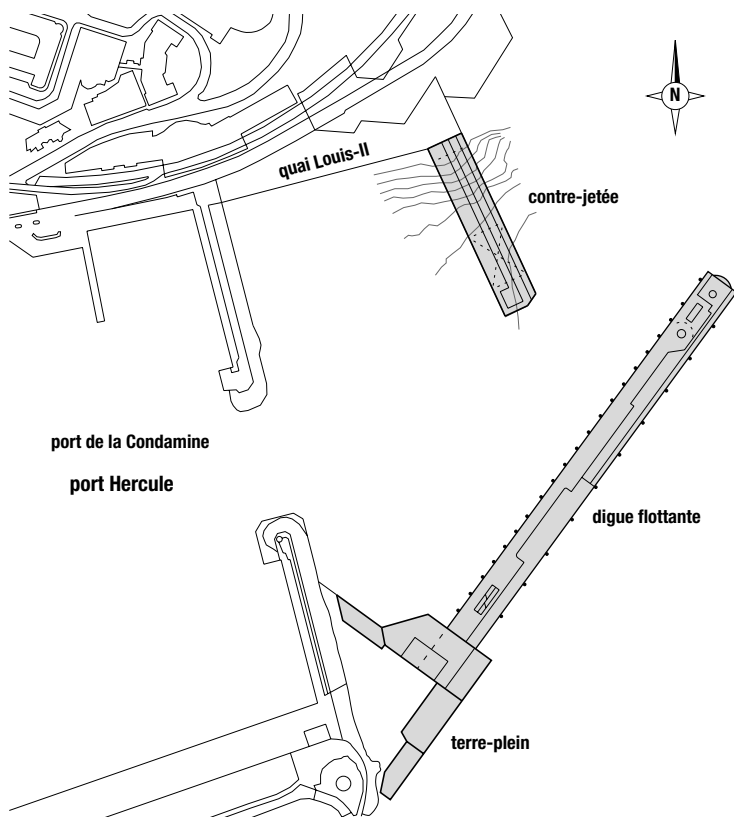




La Méditerranée apprivoisée par l'homme

●●● 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** 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

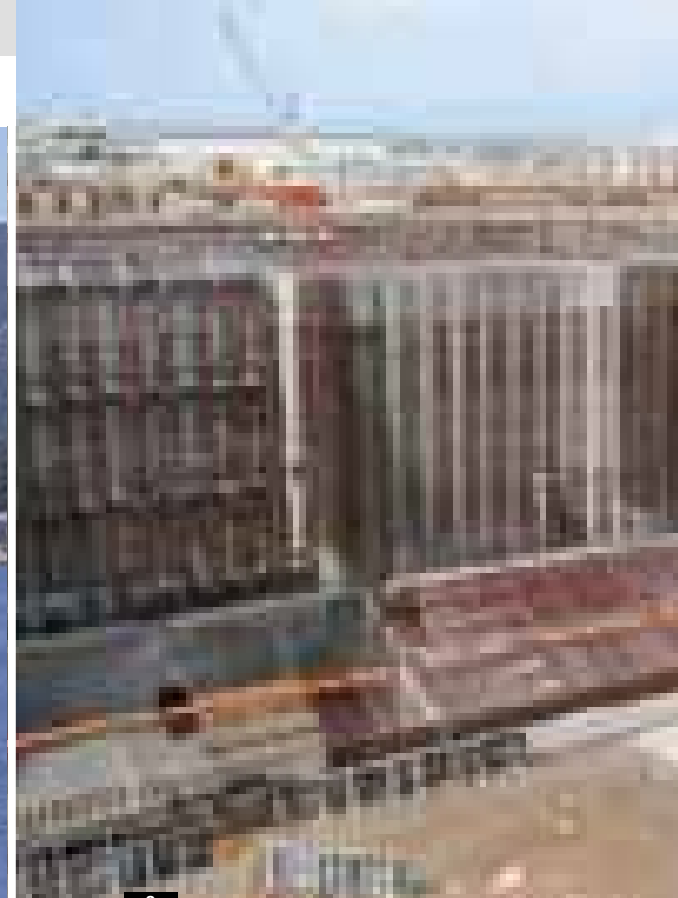
Pour un observateur extérieur, l'extension du port frappe par son gigantisme. Pour les nombreux bureaux d'études (intégrés aux entreprises ou extérieurs) mobilisés pour cette affaire, l'opération a surtout été synonyme de complexité, tant les différentes contraintes étaient difficiles à concilier. Contrairement 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 !"



1

2

>>> **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).

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-

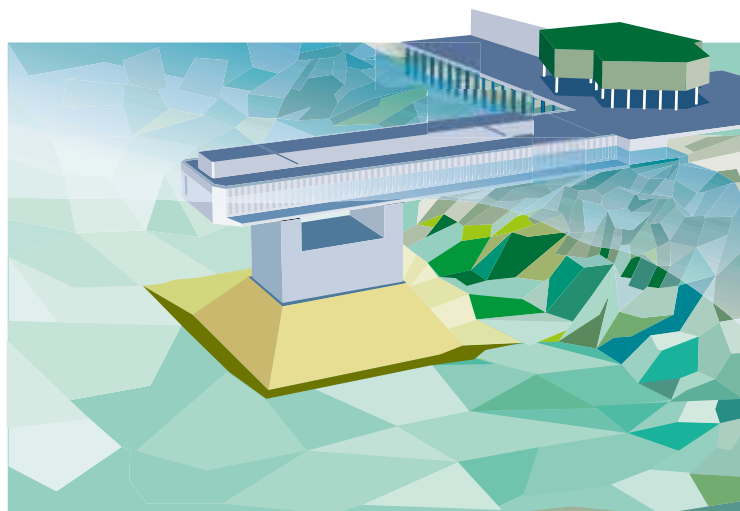
tiques. Celles-ci constituent une première application pratique du "mur d'eau fixe", procédé mis au point et breveté par les services techniques de la Principauté : côté port, un pan incliné est immergé afin de "limiter le couplage entre les masses d'eau du port et du large" (dispositif "Bybop", pour 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 structurelle. 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

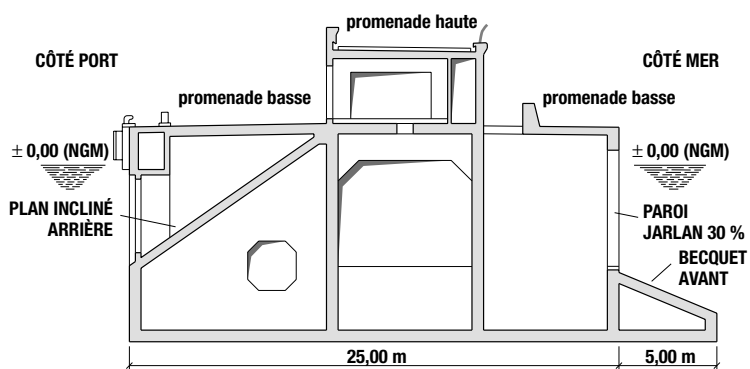
"Ce projet est exemplaire par son ampleur, mais aussi par la prise en compte de la sécurité, la vocation de ces ouvrages étant d'accueillir un large public, conclut Jacob Ward. Excepté la rotule, qui est une réelle innovation, et dont nous ne nous pouvions nous passer, toutes les techniques employées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



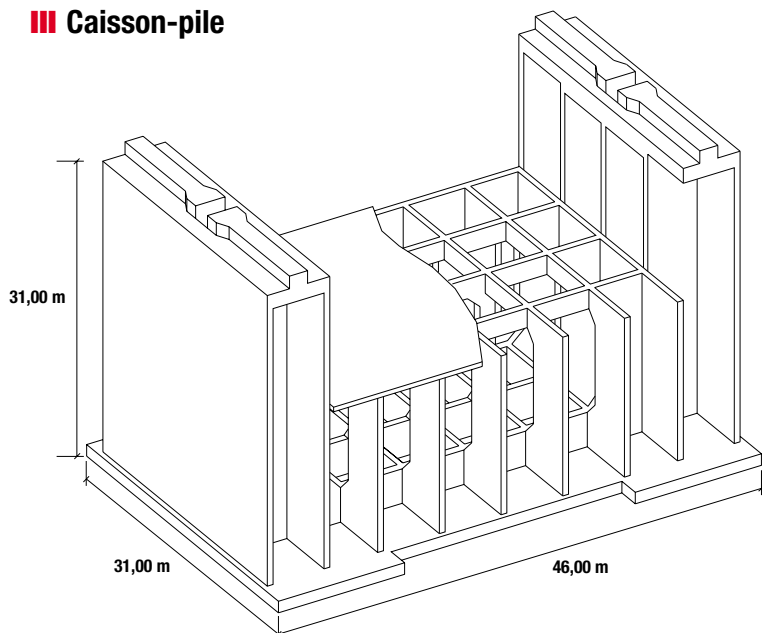


3

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



2

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 ancras 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

>>> 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.



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