

Travaux

n° 755

OFFSHORE

- Le projet Girassol : une extraordinaire aventure
- STAG CFP. Un concept original de plate-forme auto-installable

TRAVAUX MARITIMES

- Le réaménagement du secteur centre du port de Fort-de-France
- Elargissement de l'écluse du port de Dieppe. Conception et point de vue du maître d'œuvre
- Elargissement de l'écluse du port de Dieppe. La réalisation des travaux
- La protection des jetées de Port en Bessin. Chantier nautique ou terrestre ?
- Le grand bassin Vauban Est de l'arsenal de Toulon. Une réhabilitation réussie
- Le confortement du quai Carnot à Concarneau

OUVRAGES D'ART

- Le programme de développement du béton haute performance pour la construction des ouvrages d'art en Charente



Offshore et travaux maritimes

Daniel Tardy
Président
de la FNTF



Ce numéro, consacré aux travaux d'aménagement portuaires et maritimes, nous rappelle le rôle qu'ont joué les voies maritimes pour la découverte du monde, le rayonnement des civilisations et les échanges économiques internationaux. Aux tout premiers accès naturels ont succédé des ports ouverts à des bateaux de plus en plus lourds, des canaux de communications interocéans, l'exploitation offshore et le transport de fluides par le fond des mers.

Les ingénieurs de travaux publics, concepteurs et constructeurs, ont trouvé là, à travers les siècles, matière à études scientifiques, à recherches, à innovations et à constructions audacieuses. Et c'est encore le cas aujourd'hui, comme le montrent les articles du présent numéro : non seulement, il faut aménager les ports existants pour accroître leur capacité ou construire de nouveaux ports de plaisance, mais les exploitations de pétrole se situent à des profondeurs sous-marines de plus en plus grandes et mettent en œuvre des stations de traitement de production et de stockage de plus en plus importantes. On lira à ce sujet avec intérêt "l'extraordinaire aventure" (titre choisi par l'auteur) du projet Girassol.

On peut retrouver, *mutatis mutandis*, le même cheminement entre les pistes anciennes pour caravanes, qui ont permis de découvrir le monde et de faire de fructueux échanges, et les autoroutes modernes d'aujourd'hui qui contribuent à l'équipement du pays, dans l'intérêt des populations, dans l'intérêt des régions, dans l'intérêt national et dans l'intérêt de l'Europe.

Mais "y aura-t-il encore de nouvelles autoroutes en France ?", c'est la question que se pose Gilles Bridier, dans *La Tribune* du 25 juin 1999, "après le rapport incendiaire de la Cour des comptes sur leur mode de financement qui plombe le système par un endettement colossal".

Et l'auteur, après avoir reconnu la nécessité de construire de nouvelles autoroutes et exploré la difficulté d'en assurer le financement, débouche "sur la nécessité de créer un fonds, semblable à celui instauré par la loi Pasqua pour les infrastructures de transport et alimenté par un prélèvement sur les péages autoroutiers". Autrement dit, comme ce sont déjà les péages qui assurent seuls les ressources des sociétés concessionnaires, il faut augmenter les péages.

Avant de vouloir augmenter les péages, il serait bon de mieux éclairer la situation actuelle.

Pour des raisons sur lesquelles il serait peu convenable de s'étendre, l'Etat a obligé les sociétés concessionnaires d'autoroutes à emprunter la TVA qu'elles ont dû lui payer sur les travaux (20,6 %), et contrairement au droit commun ne les a pas autorisées à la récupérer.

L'Etat a en effet "dispensé" les sociétés autoroutières de la TVA sur les péages, mais a remplacé cette TVA par diverses taxes d'un montant total supérieur.

Le seul fait de rembourser aux sociétés d'autoroutes les fonds ainsi détournés par rapport au droit commun allégerait leur endettement de plus de 20 milliards (!) de francs et amènerait l'extinction totale de leur dette dans une douzaine d'années, alors que les recettes liées aux péages pourront durer de nombreuses décennies.

Après l'augmentation du prix de construction des autoroutes entraînée par le harcèlement textuel évoqué dans un précédent numéro⁽¹⁾, le tapage médiatique actuel sur l'endettement des sociétés d'autoroutes vise en fait à différer (voire annuler ?) les nouvelles réalisations.

Mieux vaudrait le dire clairement et entamer une vraie concertation dans le cadre par exemple de la commission nationale du débat public en vue de prendre de vraies décisions.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'D. Tardy', written in a cursive style.

(1) *Travaux* n° 750 de février 1999.



Notre couverture

**Les travaux
d'élargissement
de l'écluse du port
de Dieppe**

Photo Patrice Lefebvre

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

Roland Girardot

RÉDACTION

Roland Girardot et Henry Thonier

3, rue de Berri - 75008 Paris

Tél. : (33) 01 44 13 31 44

SECRÉTAIRE DE RÉDACTION

Françoise Godart

Tél. : (33) 02 41 35 09 95

Fax : (33) 02 41 35 09 96

E mail : Francoise.Godart@wanadoo.fr

MAQUETTE

T2B&H

8/10, rue Saint-Bernard - 75011 Paris

Tél. : (33) 01 44 64 84 20

VENTES ET ABBONNEMENTS

Colette Robert

RGRA

9, rue Magellan - 75008 Paris

Tél. : (33) 01 40 73 80 05

E mail :

revue.generale.des.routes.rgra@wanadoo.fr

France : 920 FF TTC

Etranger : 1100 FF

Prix du numéro : 115 FF (+ frais de port)

PUBLICITÉ

Régie Publicité Industrielle

61, bd de Picpus - 75012 Paris

Tél. : (33) 01 44 74 86 36

Imprimerie Chirat

Saint-Just la Pendue (Loire)

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

Tous droits de reproduction, adaptation, totale ou partielle, France et étranger, sous quelque forme que ce soit, sont expressément réservés (Copyright by Travaux). Ouvrage protégé : photocopie interdite, même partielle (loi du 11 Mars 1957), qui constituerait contrefaçon (Code pénal, article 425).

Éditions Science et Industrie S.A.

3, rue de Berri - 75008 Paris

Commission paritaire n° 57304



éditorial

Daniel Tardy

1

actualités

6

matériels

8

PRÉFACE

Jean-Luc Vermeulen

11

OFFSHORE

◆ Le projet Girassol : une extraordinaire aventure
- *The Girassol project : an extraordinary adventure*
Ch. Desforge

12

◆ STAG CPF. Un concept original de plate-forme auto-installable
- *STAG CFP. An original self-installable platform concept*
J. Tondon, J.-M. D'Ettoire

23

TRAVAUX MARITIMES

◆ Port de Fort-de-France. Le réaménagement du secteur centre
- *Port of Fort-de-France. Redesigning the centre sector*
L. Crebier, J.-Y. Coutures, H. Duplaine

28

◆ Elargissement de l'écluse du port de Dieppe. Conception et point de vue du maître d'œuvre
- *Lock widening at port of Dieppe. Design and view point of the prime contractor*
D. Etienne

32

◆ Elargissement de l'écluse du port de Dieppe. La réalisation des travaux
- *Lock widening at port of Dieppe. Execution of works*
Ph. Seitz, O. Serrano, A. Pigeon

36

◆ La protection des jetées de Port en Bessin. Chantier nautique ou terrestre ?
- *Protection of jetties of Port en Bessin. Nautical or land worksite ?*
J.-Cl. Grandchamp

44

Sommaire

juillet-août 1999

Offshore - Travaux maritimes

Dans les prochains numéros

- Terrassements**
- Autoroute A51**
- Environnement**
- International**
- Ponts**
- Routes**
- Travaux urbains**
- Réhabilitation d'ouvrages**
- Sols et fondations**
- Tunnels**



◆ Le grand bassin Vauban Est de l'arsenal de Toulon. Une réhabilitation réussie
- *The Vauban East basin of the Toulon dockyard. Successful rehabilitation*

M. Rainero, B. Chabroux

48



◆ Le confortement du quai Carnot à Concarneau
- *Strengthening of Carnot Quay in Concarneau (Finistère region)*

D. Grimont, J.-J. Gueguen, M. Le Guennic

56

OUVRAGES D'ART



◆ Le programme de développement du béton haute performance pour la construction des ouvrages d'art en Charente

- *Development programme for high-performance concrete used in the construction of bridges in the Charente region*

P.-P. Gabrielli

64

recherche

68

répertoire des fournisseurs

70

L'industrie pétrolière pour les prochaines décennies est soumise à un double défi : satisfaire une demande croissante en hydrocarbures et en même temps, se prémunir contre les fléchissements du prix du brut. L'effort de réduction de coûts consenti depuis plus de 10 ans par les compagnies pétrolières reste donc plus que jamais d'actualité pour être à même de survivre aux périodes de "basses eaux".

Un groupe pétrolier ne peut vivre sur ses seuls acquis. En permanence il lui faut au moins renouveler la quantité de réserves dont il dispose et si possible l'accroître. Pour mettre en valeur de nouvelles ressources, élargir le domaine de ses interventions mais aussi améliorer ses performances, l'industrie pétrolière imagine sans cesse de nouvelles technologies ou adapte celles développées par d'autres secteurs industriels (télécommunications, traitement de l'information, génie civil...). Ces nouvelles technologies, en améliorant l'économie des projets par la diminution des coûts et la réduction des délais, élargissent le champ d'action des compagnies pétrolières.

A l'heure actuelle, Elf est leader sur deux axes de progrès : résoudre des problèmes de plus en plus compliqués en offshore classique (de 0 à 500 m de profondeur d'eau) tels celui d'Elgin/Franklin, et explorer et développer par grande profondeur d'eau (de 500 à 2000 m et plus) avec notamment le champ de Girassol en Angola.

Elf a entrepris en 1997 le développement des gisements d'Elgin/Franklin, deux champs situés en Mer du Nord britannique à 240 kilomètres à l'Est d'Aberdeen dans le central Graben, par 92 mètres de profondeur d'eau et à plus de 5 000 m sous le fond de la mer. Ce développement constitue un défi technologique par la taille des installations mais surtout par les conditions extrêmes de température (190 °C) et de pression (1 100 bars) des roches réservoirs. C'est le plus grand projet Haute Pression/Haute Température au monde. Pour s'assurer de la faisabilité de la mise en production, un effort important de recherche et d'ingénierie a été entrepris pendant 3 ans. En raison des caractéristiques très particulières de ces gisements, les études sur le comportement et les performances des roches réservoirs ont dû être réalisées en labo-

ratoire à partir de modèle sans référence à des exemples réels comparables. La validation des équipements de forage a été minutieuse.

Le défi est relevé avec le souci de pratiquer l'innovation sans risque. Une plate-forme de type *jack-up* (TPG 500), commune aux deux champs et regroupant les installations de production, les utilitaires et les quartiers d'habitation est au cœur du dispositif. Un consortium de trois compagnies composé de Technip, Mac Dermott et Barmac, a été sélectionné pour la conception, la fabrication et l'installation de la plate-forme. Ce concept est un facteur significatif de réduction des coûts. Il a permis

de réduire l'investissement à moins de trois dollars par baril.

Au cours des dernières années, l'essor de l'offshore profond n'aurait pas été possible sans les efforts consacrés à la recherche de progrès techniques. Pour développer et produire par grandes profondeurs d'eau, la mise au point de nouvelles technologies de forage et de production était indispensable. Ce n'est qu'avec la maîtrise de ces technologies nouvelles que les coûts de développement de l'offshore profond sont devenus voisins de ceux de l'offshore classique.

Le projet Girassol est le premier développement entrepris sur le Bloc 17 en Angola. C'est un projet ambitieux en raison de la profondeur d'eau (1 350 m), de la taille du champ (725 millions de baril) et des objectifs de coût et de délai. Afin de permettre une mise en production dès l'an 2001, soit cinq ans seulement après la découverte, les travaux d'appréciation et d'ingénierie ont été

conduits en parallèle. Huit concepts de développement différents ont été envisagés pour retenir celui associant des puits sous-marins à un FPSO (*Floating production storage and offloading*) et à une bouée de chargement. Ce schéma de développement présente la plus grande flexibilité pour l'implantation des puits et la séquence de forage utilise des techniques qui ont fait leurs preuves et permet un meilleur contrôle des coûts. C'est grâce à de tels progrès technologiques que l'industrie pétrolière peut continuer à assurer sa mission d'approvisionnement énergétique des consommateurs avec une fiabilité sans cesse accrue.



■ **JEAN-LUC VERMEULEN**

**P.-D.G. d'Elf
Exploration Production
et Directeur général
Exploration Production
d'Elf**



aventure

mer et jusqu'à - 600 m de profondeur, la température de l'eau est de 4 °C. Durant sa remontée en surface, le pétrole perd 8 °C par application des règles thermodynamiques de l'enthalpie totale, incluant le terme d'énergie potentielle sur 1350 m. Par conséquent, en production, le pétrole qui s'écoule dans les canalisations au fond de la mer ne doit pas perdre plus de 1 °C par kilomètre. Enfin en cas d'arrêt de la production, l'ensemble du système doit pouvoir rester durant seize heures à une température supérieure à 20 °C.

Tout d'abord, il a été imaginé de relier chaque puits de production ou d'injection au FPSO par des conduites flexibles. En effet, ce type de liaison a déjà été mis en œuvre au Brésil dans des profondeurs d'eau comparables. Cependant, ce concept du "tout flexible" ne permet pas actuellement de respecter les contraintes d'isolation thermique. Ce n'était donc pas une solution pour le projet Girasol.

Ensuite, il fallait répondre à une demande de l'opérateur pour le nettoyage des canalisations : avoir la possibilité durant l'exploitation de faire le racleur des lignes, appelé le *Pigging*. Cette opération consiste à pousser depuis la surface avec de l'huile chaude, un racleur avec ses coupelles dans les canalisations en circuit fermé. Il faut donc grouper deux par deux les lignes de production qui transportent le pétrole depuis les puits, pour permettre le retour du racleur en surface. Il devient alors naturel de penser à envelopper les deux lignes de production dans un même isolant. On appellera ce concept le *Bundle*.

Reste le problème de la remontée depuis le fond de la mer jusqu'au FPSO. On envisage alors des *Steel Catenary Risers*, c'est-à-dire des conduites métalliques rigides qui relient l'extrémité des *bundles* au FPSO. Les mouvements d'oscillation du FPSO sont absorbés par la "souplesse" des conduites métalliques rigides sur une grande longueur. Cependant, les comportements dynamiques de dix-huit *Steel Catenary Risers* sont difficiles à gérer sur une hauteur de 1350 m. En particulier, ces conduites seront soumises à l'action des courants sous-marins. De plus, à chaque conduite de production de pétrole, il faut associer une conduite de *Gas Lift* d'un diamètre très inférieur. Le comportement dynamique de ces deux conduites couplées est encore plus compliqué à évaluer. Ainsi, le concept des *Steel Catenary Risers* est écarté du fait du trop grand nombre de lignes à mettre en œuvre.

La réponse à ces problèmes qu'apporte le groupement AMG, avec l'aide de Doris Engineering pour

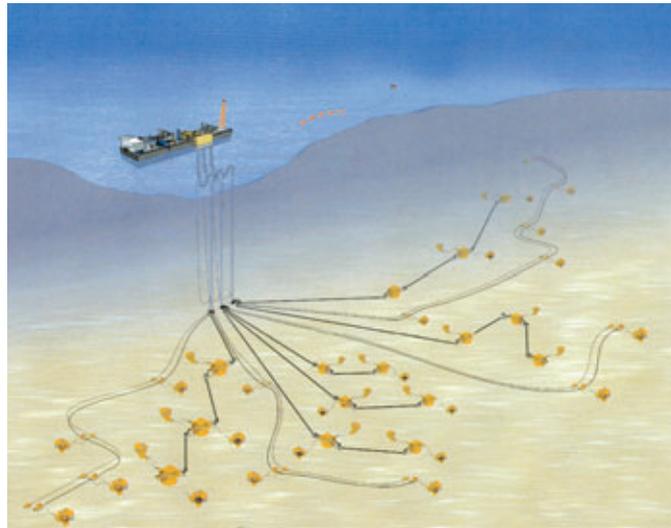


Figure 2
Schéma de principe des liaisons fond-surface, du FPSO et de la bouée de chargement (Illustration Elf Exploration Angola)

Schematic diagram of the bottom-surface links, the FPSO and the load buoy (illustration Elf Exploration Angola)

l'ingénierie de conception, est un réseau sous-marin de canalisations de transport du pétrole appelées *Production Bundles*, qui convergent vers trois tours appelées *Hybrid Riser Towers*. Ces tours ancrées au fond de la mer, contiennent les canalisations verticales qui permettent au pétrole de remonter à la surface, ainsi que les canalisations d'injection d'eau et de gaz. Toutes ces canalisations sont enveloppées d'un matériau isolant. Les tours fonctionnent comme des pendules inversés de 1300 m de long grâce à des flotteurs fixés en tête, qui maintiennent l'ensemble en tension.

C'est en fait le concept du *Bundle* qui est transposé de la position horizontale à position verticale.

La jonction sur une hauteur de 50 m, qui sépare l'extrémité haute des tours du FPSO, est assurée par des conduites flexibles, les *Flexible Jumpers*. Cette étape intermédiaire entre les conduites métalliques rigides verticales des tours et le FPSO, permet d'absorber les efforts dus aux mouvements d'oscillation du FPSO, que ce soit le tangage (le mouvement d'oscillation dans le sens de sa longueur) ou le roulis (le mouvement d'oscillation autour de son axe longitudinal) (figure 3).

L'ensemble des liaisons fond-surface (lignes de production, lignes d'injection, d'eau et de gaz, lignes de *Gas Lift* et lignes de service) soit 36 lignes en tout est donc regroupé dans trois tours. Les tours, en plus de leur très bon comportement en matière de stabilité et de résistance à la fatigue, limitent l'encombrement du champ sous-marin au minimum. Enfin, il est important de noter que contrairement au concept "tout flexible" dont la fabrication est réalisée dans des usines spécialisées en France ou au Brésil par exemple, le concept d'AMG permet d'établir dans le pays qui fournit la concession de l'exploitation du sous-sol, c'est-à-dire l'Angola, la fabrication des liaisons fond-surface.

La grande profondeur apporte aussi des problèmes



Figure 3
Représentation des trois tours et du FPSO (document AMG)

Representation of the three towers and the FPSO (document AMG)

Figure 4
Coupe
d'un "production bundle"
(document AMG)
Section
of a production bundle
(document AMG)

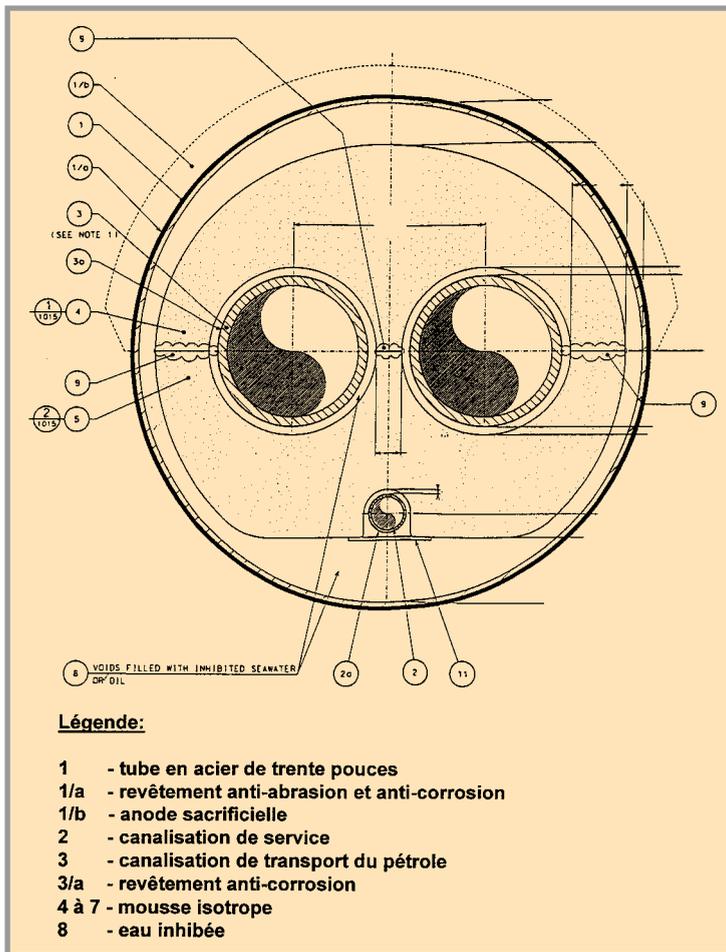
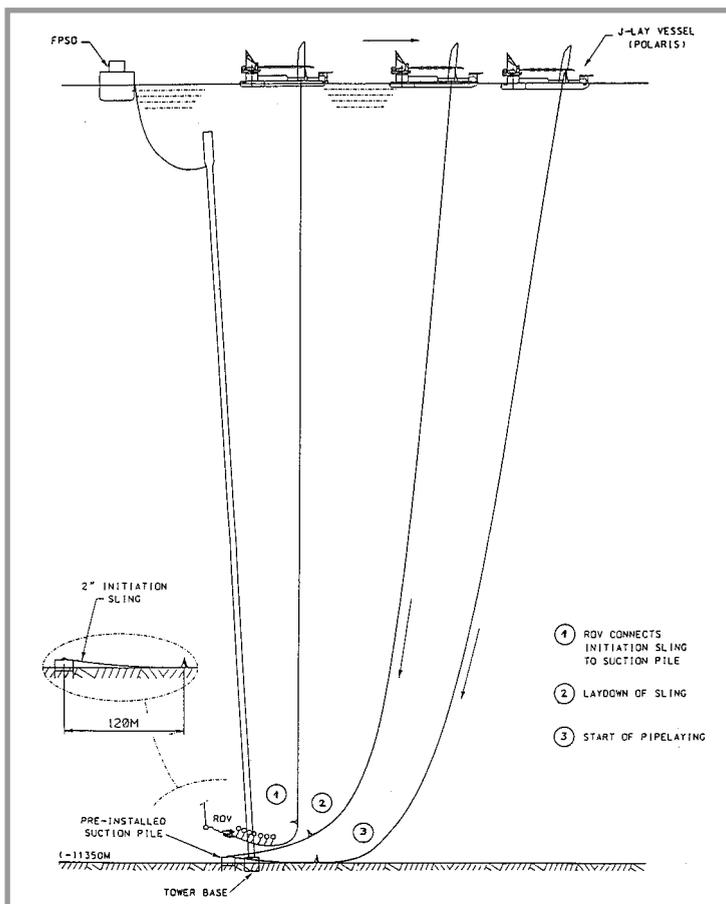


Figure 5
Schéma de principe
de la pose en "J"
des lignes d'injection
(document AMG)
Schematic diagram
of the "J" facing
of injection lines
(document AMG)



de corrosion externe qu'il faut résoudre. Jusqu'à environ 400 m, la teneur en oxygène de l'eau de mer diminue lorsque la profondeur augmente. Puis au-delà de 600 m, la tendance s'inverse et à 1350 m de profondeur, la teneur en oxygène de l'eau de mer atteint 85 % des valeurs qu'elle a en surface. Ce phénomène est dû au courant océanique sous-marin de grande profondeur qui renouvelle et ré-oxygène en permanence les eaux. Les canalisations métalliques doivent être protégées contre la corrosion pour toute la durée de vie de l'ouvrage, c'est-à-dire les 20 ans d'exploitation.

La solution de protection contre la corrosion externe choisie est double : d'une part un revêtement anticorrosion et d'autre part des anodes sacrificielles prévues pour toute la durée de l'exploitation du champ de Girassol.

Le groupement AMG utilise le savoir-faire des entreprises qui le constitue. Stolt Comex Seaway apporte son expérience dans les sous-marins ROV (Remote Operated Vehicle) et dans les travaux de construction et de connexion sous-marines. Bouygues Offshore apporte ses moyens de fabrication à terre et de construction Offshore déjà développés dans le Golf de Guinée. Et ETPM apporte non seulement ses moyens de fabrication à terre et de construction offshore développés en Afrique de l'Ouest, mais aussi son expérience dans la pose de canalisations rigides en faibles et en grandes profondeurs réalisées en Mer du Nord et en Afrique. Bouygues Offshore et ETPM ont en particulier réalisé au début des années quatre-vingt-dix, les travaux de construction et d'installation du développement du champ pétrolier de N'kossa au Congo, pour le compte de Elf Congo.

Pour l'ingénierie de conception, le groupement AMG et Doris Engineering font appel à l'Institut français du pétrole (IFP) et à 2H Offshore pour les vérifications de comportement hydrodynamique des tours. Certains problèmes de recherche fondamentale sont étudiés en liaison avec plusieurs universités et instituts de recherche dont l'université de Herriot Watt en Ecosse et le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) pour les études d'isolation thermique et les tests associés.

Les *Production Bundles* et les *Hybrid Riser Towers* sont fabriqués à terre en Angola, respectivement sur les sites de Soyo (Bouygues Offshore) et de Lobito (ETPM) et seront remorqués sur le site. Ces sociétés ont lancé de nouveaux investissements pour répondre aux besoins des travaux offshore en grande profondeur.

Bouygues Offshore a transformé en partie sa base logistique de Soyo en atelier de préfabrication de *Bundles*, et actuellement fait construire un nouveau navire, équipé d'un système de positionnement dynamique (*Dynamic Positioning* ou *DP*) et d'une rampe de pose de canalisation en "J", le *FDS (Field Development Ship)*. ETPM développe sa base de Lobito pour toutes les fabrications en eaux pro-

fondes et équipe sa barge Polaris d'un système de positionnement dynamique et d'une rampe de pose de canalisation en "J" pour l'installation des lignes d'injection de gaz et d'eau.

Les "Production Bundles"

Ils sont constitués de deux canalisations de transport du pétrole en acier de huit pouces (20,3 cm de diamètre) et d'une canalisation de service en acier de deux pouces (5,1 cm de diamètre) qui sont enveloppées dans une mousse isotrope isolante. Le tout est introduit dans un tube en acier de trente pouces (76,2 cm de diamètre) (figure 4). Il y a cinq *Production Bundles* réparties sur le gisement de Girassol, constituées d'une quinzaine de *Bundles*. Le tout représente plus de 29 km de longueur. Ils sont fabriqués à terre sur la base logistique de Soyo par Petromar, une filiale de Bouygues Offshore.

Le tube en acier de trente pouces sert de protection durant le remorquage du *Bundle*. En effet celui-ci est remorqué au fond de la mer sur environ 230 km depuis le site de fabrication jusqu'à son site d'installation. Passant ainsi de la pression atmosphérique de 1 bar à la pression du fond de la mer à 136 bars, le *Production Bundle* a priori n'est pas fermé hermétiquement de manière à éviter toute différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur du tube. Le tube en acier est recouvert d'une couche antiabrasion en polypropylène qui est destinée à réduire les effets du frottement sur le tube durant le remorquage.

La mousse isotrope non seulement sert à isoler thermiquement les canalisations de transport du pétrole, mais aussi apporte de la flottabilité pour alléger le *Bundle* durant son remorquage. En effet son poids total ne doit pas excéder 150 t et le plus long des *Bundles* mesure environ 3 km (poids au mètre linéaire immergé : 50 kg/m).

La mousse isotrope enveloppe les deux canalisations de transport du pétrole et la canalisation de service. Les vides annulaires sont remplis d'eau inhibée. Les canalisations et la mousse isotrope d'une part et le tube en acier de trente pouce d'autre part, sont assemblés séparément. La mousse isotrope est équipée d'un système de roulettes qui lui permet d'être introduite avec ses canalisations à l'intérieur du tube en acier de trente pouce.

La ligne de service sert à injecter du méthanol en tête de puits pour limiter la formation d'hydrate. Elle est située dans la section inférieure du *Bundle* de manière à abaisser le centre de gravité de l'ensemble et à apporter plus de stabilité au *Bundle* durant son remorquage.

L'itinéraire utilisé au fond de la mer pour remorquer les *Production Bundles* a été repéré au début de l'année 1999 et son relevé a permis d'identifier un couloir libre de tout obstacle. La couche de revêtement antiabrasion du tube de trente pouces a

été testée sur la route de remorquage et son épaisseur minimum en a été déterminée.

Les différents tronçons de *Production Bundles* qui auront été transportés au fond de la mer jusqu'au site d'installation seront connectés entre eux par des éléments de canalisations appelées *Spools* qui seront fabriquées sur mesure après une métrologie (un relevé) effectuée en place. Les *Spools* permettent aussi de relier l'extrémité des *Production Bundles* aux collecteurs de têtes de puits de production. Les collecteurs de têtes de puits de production sont appelés les *Manifolds*.

Les lignes d'injection

Les lignes d'injection sont des canalisations de douze pouces (30,5 cm de diamètre), revêtues d'une protection anticorrosion. Elles sont réparties en quatre lignes d'injection d'eau sur 29,5 km et une ligne d'injection de gaz de 3 km.

Ces canalisations seront installées soit en "J" depuis la surface, soit par remorquage depuis un site de fabrication à terre. Cependant, cette dernière méthode ne permet d'installer que des lignes ayant un tracé rectiligne ce qui, par conséquent, limite son application.

La pose en "J" consiste à souder en mer sur une rampe d'aboutage en position verticale, des longueurs de tube l'une après l'autre (figure 5). La pose en "J" est adaptée pour la pose de canalisations dans des grandes profondeurs. Elle s'oppose à la pose en "S" dans des profondeurs courantes allant jusqu'à 400 m, où les longueurs de tube sont soudées à l'horizontale, sur une unité flottante qui avance au fur et à mesure de la pose. Le tracé de la canalisation entre l'unité flottante où elle est assemblée et le fond de la mer où elle est posée, correspond à la forme d'un "J" ou à celle d'un "S" selon les cas.

Les tés de connexion aux têtes de puits d'injection qui sont alimentés par ces canalisations, seront installés en ligne sur les longueurs de tube.

Les "Hybrid Riser Towers"

Pour les mêmes contraintes d'isolation thermique, c'est aussi une mousse isotrope qui a été choisie pour envelopper les canalisations verticales des *Hybrid Riser Towers*.

Ces tours sont maintenues verticales selon le principe du pendule inversé : un ancrage au fond de la mer et un flotteur métallique intégré dans la structure en tête de tour. Leur hauteur est de 1.300 m, leur extrémité supérieure est donc située à 50 m au-dessous du niveau de la mer, ce qui les met à l'abri des perturbations de la houle et des courants de surface (figure 6). Le haut de chacune des tours est relié au FPSO par des tuyaux flexibles d'une longueur de 300 m. Le bas de chacune des tours est relié aux *Production Bundles* et aux lignes d'injec-

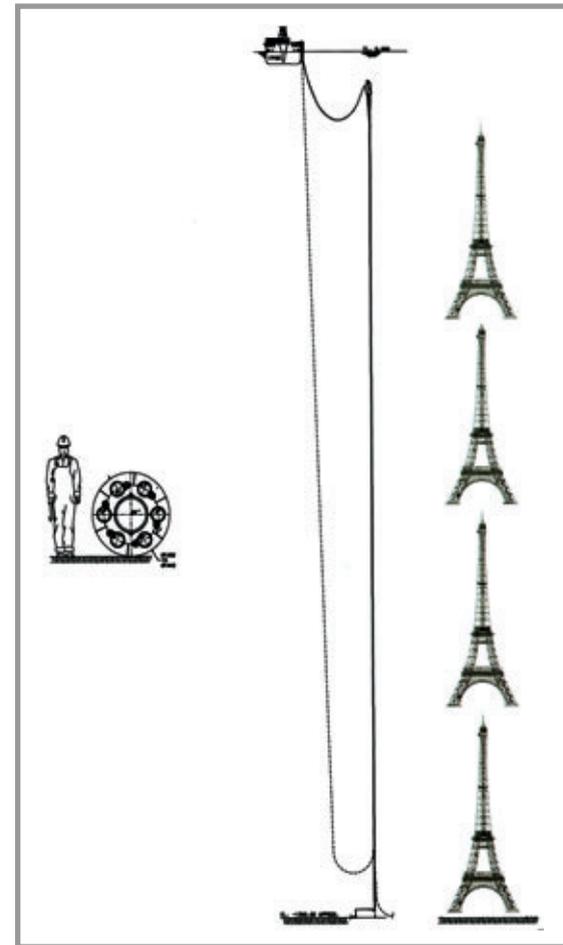


Figure 6
Elévation d'une "Hybrid riser tower"
(document AMG)
Elevation of a hybrid riser tower
(document AMG)

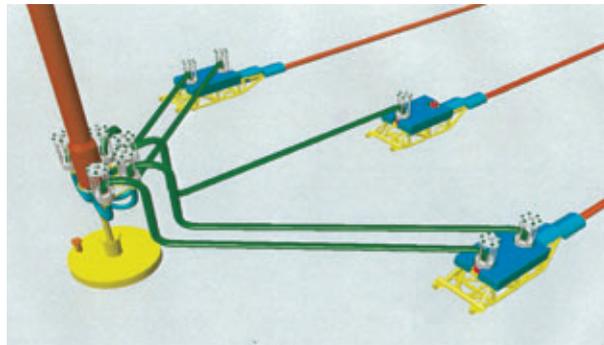


Figure 7
Représentation d'un pied de tour et connexions aux "Production bundle" (document AMG)
Representation of a tower base and connections to the production bundles (document AMG)

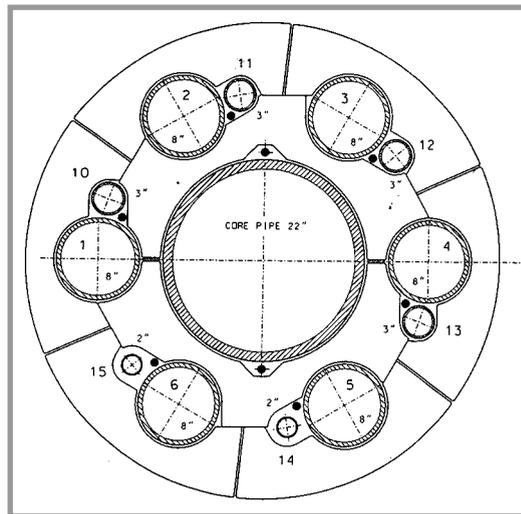


Figure 8
Section plane d'une "Hybrid riser tower" (document AMG)
Plane section of a hybrid riser tower (document AMG)

Figure 9
Coupe en 3D d'une "Hybrid riser tower" (document AMG)
3D section of a hybrid riser tower (document AMG)

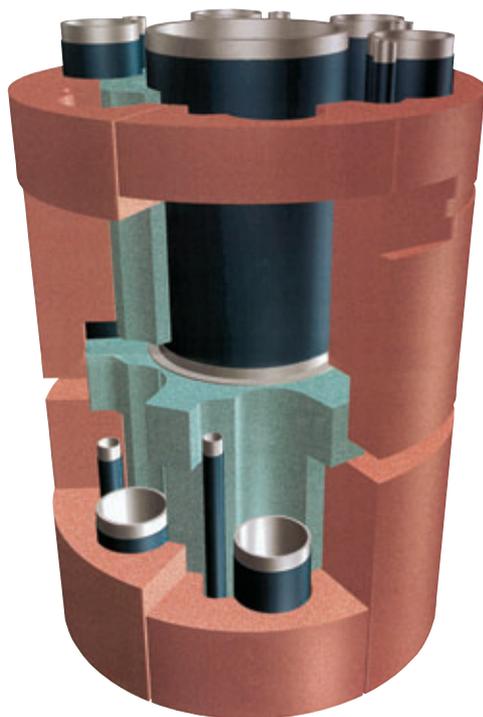
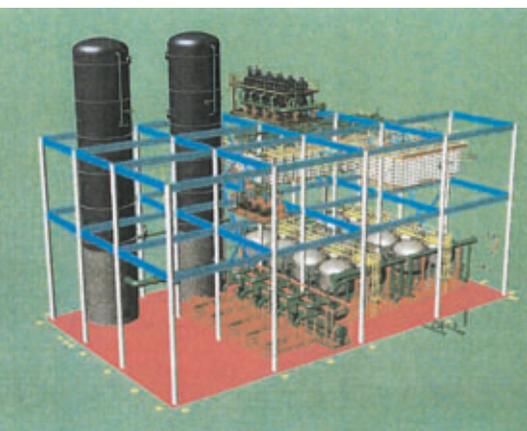


Figure 13
Représentation de l'unité de désulfatation du FPSO (document MPG)
Representation of the sulphate removal unit of the FPSO (document MPG)



tion par les *Spools* (figure 7). Tout comme pour les *Bundles*, ces derniers seront fabriqués sur mesure, après un relevé en place des positions des pieds de tour d'une part et des points de connexions des *Production Bundles* et des lignes d'injection d'autre part.

Chaque tour comporte un tube vertical de structure en acier de vingt-deux pouces (55,9 cm de diamètre) rempli d'air, autour duquel sont disposées (figure 8) :

- ◆ quatre canalisations verticales en acier de huit pouces (20,3 cm de diamètre) pour la remontée du pétrole ;
- ◆ quatre canalisations verticales en acier associées de trois pouces (7,6 cm de diamètre) pour le *Gas Lift* qui est injecté en pied de tour ;
- ◆ deux canalisations verticales en acier de huit pouces (20,3 cm de diamètre) pour l'injection d'eau ou de gaz ;
- ◆ et deux canalisations de service verticales en acier de deux pouces (5,1 cm de diamètre) qui sont reliées aux canalisations de service des *Production Bundles*.

La mousse isotrope qui isole l'ensemble de ces canalisations est au contact avec l'eau de mer (figure 9). Le diamètre extérieur de la tour varie de 1,44 m en pied de tour à 1,34 m en tête. En effet, les propriétés calorifuges de la mousse isotrope diminuent lorsque la pression augmente. Il faut donc plus de mousse isolante en pied de tour.

Les tours sont sensibles à la fatigue provoquée par les écoulements Vortex, les VIV (*Vortex Induced Vibration*) et des études spécifiques sont menées pour couvrir ce sujet. Sur 66 m en tête, l'épaisseur

du tube vertical de structure de vingt-deux pouces, est renforcée.

Les tours sont fabriquées à terre sur la base de Lobito par Sonamet, une filiale d'ETPM et de Sonangol. En position horizontale, elles flottent sur l'eau. Elles seront ensuite remorquées les unes après les autres sur une distance de 580 km jusqu'à leur site d'installation sur le gisement de Girassol. Le flotteur métallique en tête de tour est ballasté de manière à être immergé à une profondeur d'au moins 60 m durant le remorquage de la tour (figure 10). Cette disposition permet d'éviter l'influence de la houle et des courants de surface. Arrivée sur le site d'installation, le flotteur métallique est libéré de ses ballasts, puis la tour est mise en position verticale par un système de contre-poids (figure 11). Le pied de la tour est connecté à une ancre à succion préalablement installée. Les flotteurs métalliques sont ensuite remplis d'azote de manière à éviter toute corrosion durant la durée d'exploitation. Une fois que les *Hybrid Riser Towers*, les *Production Bundles* et les lignes d'injection seront installés, on viendra fixer les ombilicaux le long des tours et des *Production Bundles*. Ceux-ci assureront les alimentations en courant, les commandes et les transmissions de données des têtes de puits, et les injections de produits chimiques.

■ LE FPSO

La conception du FPSO du groupement MPG s'est faite en plusieurs étapes qui correspondaient à des choix essentiels (figure 12).

Cependant, comme les *Topsides* sont la pièce maîtresse du FPSO, il faut comprendre les fonctions principales du traitement du pétrole brut, avant d'expliquer les choix qui ont été faits.

Les principales fonctions des "Topsides"

Les installations des *Topsides* ont pour but premier de réaliser le traitement du brut par séparation de l'huile, de l'eau et du gaz.

L'huile est stabilisée en trois étages de séparation, est dessalée puis stockée dans un des douze réservoirs situés dans la cale du FPSO. Afin d'éviter la formation de paraffine, les cuves de stockage doivent être maintenues à 40 °C.

Dans une première phase, l'eau de production est rejetée à la mer après traitement aux normes environnementales les plus sévères.

Dans un souci de respect de l'environnement, l'utilisation du gaz a été optimisée de manière à réduire au strict minimum les rejets dans l'atmosphère. Une partie du gaz est utilisée pour les turbo-générateurs (trois unités de 26 MW chacune) et les turbocompresseurs du FPSO, mais l'essentiel du gaz produit est recomprimé à haute pression et injec-

té dans le réservoir de brut afin de contribuer à l'optimisation du potentiel du gisement. Ce gaz à haute pression est également utilisé pour alimenter le réseau de *Gas Lift*.

Les émissions de gaz carbonique (CO₂) sont également réduites par le choix du procédé de cogénération pour produire l'eau chaude nécessaire aux *Topsides* (deux unités de 31 MW chacune).

Parallèlement, les *Topsides* assurent toutes les fonctions de génération et distribution en énergies et en fluides nécessaires non seulement à son propre fonctionnement, mais encore à celui des liaisons fond-surface et aux têtes de puits sous-marines.

Les *Topsides* gèrent aussi les fonctions de contrôle, de sécurité et de préservation des liaisons sous-marines et des puits de production. En effet, en cas d'arrêt de production, le maintien en température dans les cuves du FPSO, la protection contre la formation d'hydrate, et dans les liaisons sous-marines, doivent être assurés sous peine de boucher des puits de production.

Au-delà de sa fonction de traitement du brut, le FPSO constitue un terminal de chargement capable de réaliser en pleine mer, la livraison de l'huile stocké dans ses cuves vers des bateaux pétroliers.

L'unité de désulfatation du FPSO

Les quantités d'eau produite dans la première phase de traitement du brut, sont insuffisantes pour pouvoir correspondre aux besoins des injections d'eau qui permettent de maintenir le gisement en pression. Il faut donc utiliser de l'eau de mer, qui doit être traitée.

Cette unité de traitement est l'un des éléments les plus remarquables des *Topsides*.

L'eau de mer qui est pompée pour être ensuite injectée dans le réservoir du gisement, doit être traitée. Il s'agit du schéma classique de chloration, filtration, désoxygénation et traitement chimique, mais pour le traitement de quantités particulièrement importantes : 400 000 barils par jour (soit 64 000 m³ par jour). Or, l'eau de gisement de Girassol contient des sels de baryum et de strontium. Le mélange entre cette eau de gisement et l'eau de mer non désulfatée provoquerait la formation de dépôts minéraux qui finiraient par boucher prématurément les puits de production. Trois solutions étaient alors possibles :

- ◆ forer à nouveau les puits dès qu'ils se boucheraient ;
- ◆ injecter des produits chimiques adaptés pour éviter la formation des dépôts minéraux ;
- ◆ ou enfin désulfater sur le FPSO les eaux d'injection.

C'est cette dernière solution qui a été retenue. La teneur de l'eau de mer est estimée à 3 000 mg de sulfate par litre alors que le contenu résiduel de sulfate admis après traitement n'est plus que de

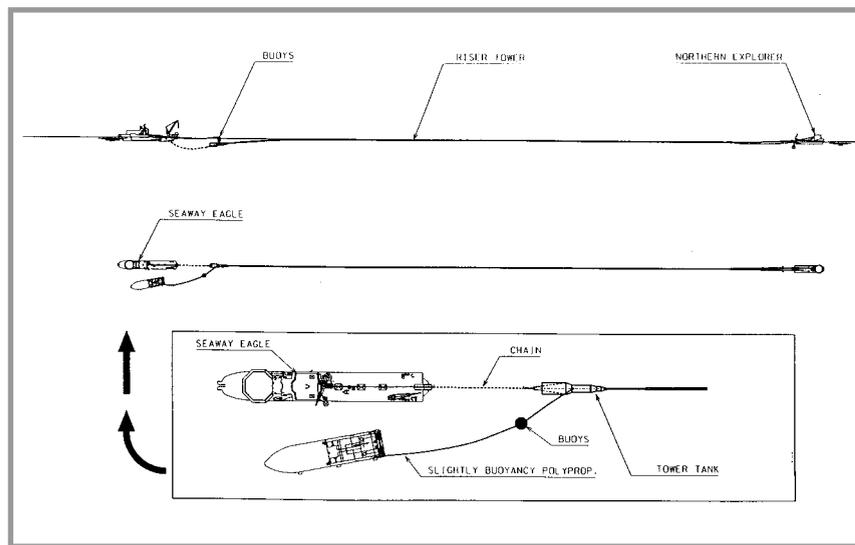


Figure 10
Schéma de principe de remorquage d'une tour (document AMG)
Schematic diagram for tower towing (document AMG)

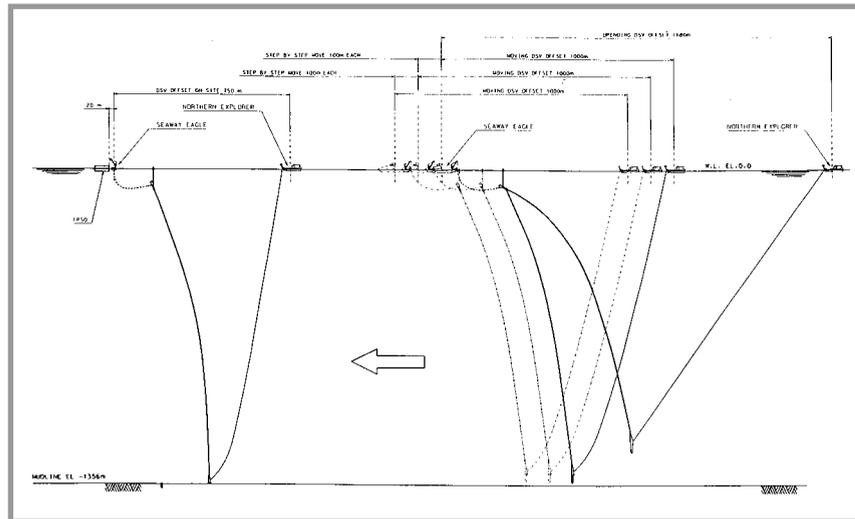


Figure 11
Schéma de principe de mise en position verticale d'une tour (document AMG)
Schematic diagram for the vertical positioning of a tower (document AMG)



Figure 12
Représentation du FPSO (document MPG)
Representation of the FPSO (document MPG)

40 mg par litre. Le procédé de désulfatation d'eau de mer fait l'objet d'une licence, et c'est la société US Filter que le groupement MPG a choisie (figure 13). L'eau doit être déchlorée puis passée dans une série de membranes qui ne conservent que 50 % de l'eau traitée. Par un système de recyclage, on arrive à augmenter le rendement du traitement à 75 %. L'eau doit ensuite être chlorée, filtrée, désoxygénée, déchlorée, puis passée dans une série de membranes de nanofiltration.

La station de traitement d'eau doit pouvoir fonctionner durant 95 % du temps. Le traitement est d'autant plus efficace, que la température de l'eau est basse. C'est donc pour augmenter encore le rendement de la désulfatation, que l'eau de mer est pompée à une profondeur de - 90 m à la verticale du FPSO.



Le choix d'une coque en acier et d'un pont intégré

Les fonctions des *Topsides* ayant été exposées, on peut maintenant expliquer les choix essentiels pour la conception du FPSO.

Tout d'abord, le choix de la coque de l'unité flottante : en acier ou en béton selon des critères de coût et de planning de réalisation, et des sites de construction possibles. Mais aussi le choix du concept de la station de traitement et de production appelée les *Topsides* : soit un pont intégré appelé *Integrated Deck* qui serait construit et assemblé sur un quai puis glissé dans son ensemble sur l'unité flottante, soit des unités préfabriquées appelées *Pre-Assembled Units (PAU)* qui correspondent chacune à une fonction du traitement et qui seraient assemblées directement sur l'unité flottante.

La solution d'une coque en béton a déjà été employée par les maisons mères des entreprises du groupement MPG, et en particulier par Bouygues sur le projet de N'kossa au Congo. Dans le cas du projet Girassol, les dimensions d'une coque en béton ne sont guère plus grandes que celles d'une coque en acier : 10 m de plus de largeur environ et quelques mètres de plus de tirant d'eau. La solution coque en béton présente des avantages principalement pour la durée de vie, la rigidité et la

Photos 1, 2 et 3
Fabrication de la coque du FPSO
en Corée (document AMG)

Manufacture of the FPSO
shell in Korea (document AMG)

LES PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DU FPSO "FLOATING PRODUCTION STORAGE & OFFLOADING"

La coque en acier

- ◆ Conçue pour rester en place sans mise en cale sèche durant toute la durée d'exploitation du champs pétrolier de Girassol, c'est-à-dire 20 ans
- ◆ Longueur : 300 m
- ◆ largeur : 60 m
- ◆ Hauteur : 30,50 m dont 23 m de tirant d'eau maximum (franc-bord)
- ◆ Capacité de stockage : 345 500 m³ dont :
 - 331 500 m³ d'huile répartis dans 12 compartiments
 - 3 000 m³ de méthanol répartis dans 2 compartiments
 - 10 000 m³ de carburant répartis dans 2 compartiments
 - 1 000 m³ d'eau traitée
- ◆ Comprend aussi les quartiers d'habitation du personnel d'exploitation pour 140 personnes
- ◆ Maintenu en place par le mouillage de 16 ancres à succion de 85 t

La station de traitement et de production ou les "Topsides"

- ◆ Longueur : 180 m
- ◆ Largeur : 60 m
- ◆ Poids à vide ou durant les opérations de glissement sur la coque : 25 000 t
- ◆ Poids en opération : 33 000 t
- ◆ Capacité de production : 200 000 barils par jour (soit 32 000 m³ par jour)
- ◆ Production d'électricité à partir de trois turbogénérateurs de 26 MW chacun, pour les besoins du traitement et le fonctionnement du FPSO, équivalente aux besoins d'une ville de 100 000 habitants
- ◆ Usine de désulfatation d'eau : 400 000 barils par jour (soit 64 000 m³ par jour)
- ◆ Chauffage de l'eau à partir de deux cogénérateurs de 31 MW chacun, qui réduisent ainsi les émissions de gaz carbonique (CO₂)

tenue au feu. Mais la construction d'une coque en béton nécessite la mobilisation d'une forme de radoub pendant toute la période de construction et une longue mise en route du chantier. Finalement, c'est la solution d'une coque en acier qui a été retenue pour des raisons de coût et de délais plus faibles. La coque du FPSO est donc actuellement en cours de construction à Ulsan en Corée du Sud, chez Hyundai Heavy Industries (HHI) (photos 1, 2 et 3). Elle sera livrée à la mi-octobre 1999.

Une troisième solution avait été étudiée : la possibilité d'utiliser une coque existante, d'un pétrolier par exemple, ou déjà en chantier de construction navale, mais il n'y avait pas de coque disponible. La solution des PAU s'est vite avérée difficile à mettre en œuvre, pour des raisons de délai de réalisation. En effet, avec ce concept, il faut attendre que la coque soit terminée et livrée avant de commencer l'assemblage des éléments préfabriqués sur le pont. Ces deux phases ne peuvent pas être simultanées.

C'est donc la solution du pont intégré qui a été choisie car cette conception permet de séparer la fabrication de la coque de construction de la station de traitement et de production (figure 14). Cette solution offre aussi le maximum de souplesse dans l'aménagement des procédés de traitement, et les équipes de MPG et de EEA peuvent s'en féliciter aujourd'hui. En effet, l'ingénierie de l'ensemble des *Topsides* doit évoluer non seulement en fonction de paramètres du gisement de Girassol, mais aussi de données du système de liaison fond-surface. Ces éléments sont amenés à varier de manière interactive, et le fait d'avoir un pont intégré permet de dimensionner ou de modifier telle ou telle unité de traitement tout en gardant un ensemble cohérent. Cela aurait été moins simple avec des PAU.

L'organisation de la construction du FPSO

Le groupement MPG, en plus de ses propres ressources en ingénierie de conception de *Topsides* provenant de chez Bouygues Offshore et ETPM, a fait appel à Technip Geoproduction (TPG) et Kvaerner Process France (KPF).

Les *Topsides* forment un ensemble complexe d'équipements et de canalisations, et constituent la partie vitale de l'exploitation du gisement de Girassol. La cohérence de cet ensemble est systématiquement vérifiée par l'équipe d'ingénierie du groupement MPG qui travaille avec les techniques de CAO (Conception assistée par ordinateur) en trois dimensions, les plus récentes.

En tout, ce sont près de 400 personnes qui ont été mobilisées en l'espace de quelques mois, pour réaliser ces études d'ingénierie.

Le FPSO fait l'objet d'une demande de classement auprès du bureau Veritas, comme une barge de production et stockage de l'huile de Girassol.

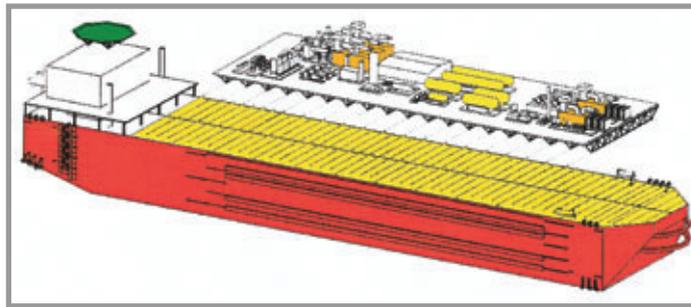


Figure 14
Schéma de principe du FPSO : la coque en acier et les *Topsides* (document MPG)

Schematic diagram of the FPSO : the steel shell and the topsides (document MPG)

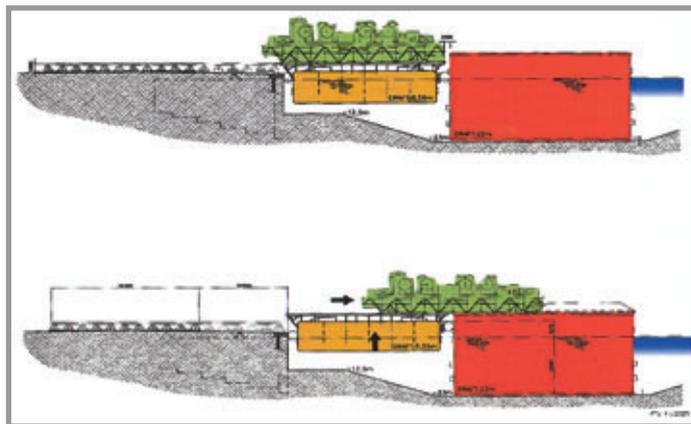


Figure 15
Schéma de principe d'intégration des "*Topsides*" sur l'unité flottante. Les "*Topsides*" sont glissés depuis le quai de construction et d'assemblage sur une barge intermédiaire, puis élevés jusqu'à la hauteur de l'unité flottante. Ils sont ensuite glissés depuis la coque intermédiaire sur la coque (document MPG)

Schematic diagram of the integration of the topsides on the floating unit. The topsides are transferred from the construction and assembly wharf on an intermediate barge and then raised up to the height of the floating unit. They are then slid from the intermediate shell onto the shell (document MPG)

La structure support principal des *Topsides* est construite aux Emirats Arabes Unis par J. Ray McDermott et sera livrée mi-1999. Le sous-traitant constructeur des *Topsides* sera connu à cette période, et cette structure métallique sera livrée sur le site de construction des *Topsides*.

Les autres éléments associés au FPSO font aussi l'objet de constructions séparées. Il s'agit :

- ◆ des supports et des protections de *Riser* qui permettent la connexion au FPSO des tuyaux flexibles, les *Flexible Jumpers*, d'une longueur de 300 m qui sont reliés aux têtes des *Hybrid Riser Towers* ;
- ◆ des supports de tuyaux de pompage d'eau d'une part pour la station de traitement d'eau, et d'autre part pour la lutte contre l'incendie ;
- ◆ des poutres de support *Topsides* ;
- ◆ et enfin de la torchère de 95 m de hauteur.

Ces éléments devraient être construits en Corée du Sud et être assemblés sur la coque dès que celle-ci sera terminée.

La coque sera alors acheminée jusqu'au site d'assemblage final où l'on chargera le pont intégré des *Topsides* depuis le quai de construction et d'assemblage. Une des méthodes étudiées est l'utilisation d'une barge intermédiaire comme un ascenseur pour élever les 25 000 t des *Topsides* jusqu'à la hauteur du pont de l'unité flottante. Le pont intégré des *Topsides* sera alors glissé depuis la barge intermédiaire sur la coque (figure 15). En effet, il est rare de trouver des installations de quai qui permettent l'accostage d'unités flottantes avec des tirants d'eau supérieurs à 12,50 m. Cette solution de "l'ascenseur de 25 000 t" permet de limiter les

| INTERVENANTS | RÔLES ET SOUS-TRAITANTS |
|---|---|
| Sonangol | Concessionnaire du bloc 17 de l' Offshore Angolais |
| Elf Exploration Angola (EEA) Filiale à 100 % d'Elf Aquitaine | Opérateur |
| <ul style="list-style-type: none"> • EEA Opérateur avec 35 % • Esso avec 20 % • BP/Amoco avec 16,67 % • Statoil avec 13,33 % • Norsk Hydro avec 10 % • Fina avec 5 % | <p>Groupe entrepreneur</p> <p>Contrat de partage de production avec le concessionnaire Sonangol</p> |
| Pride Foramer et Sedco Forex | Le forage des puits |
| Kongsberg | Les têtes de puits sous-marines |
| <p>Groupe AMG (Alto Mar Girassol) Constitué par les sociétés suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • ETPM • Bouygues Offshore • Stolt Comex Seaway <p>Chacune à hauteur de 1/3</p> | <p>Les liaisons fond-surface</p> <p>Ingénierie de conception des « <i>Production Bundles</i> » et des « <i>Hybrid Riser Towers</i> » :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Doris Engineering <p>Ingénierie de conception des « <i>Export Lines</i> » :</p> <ul style="list-style-type: none"> • ETPM |
| <p>Groupe MPG (Mar Profundo Girassol) Constitué à 50/50 par les sociétés :</p> <ul style="list-style-type: none"> • ETPM • Bouygues Offshore | <p>L'unité flottante de production et de stockage ou FPSO et la bouée de chargement de l'huile</p> <p>Ingénierie de conception :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Technip Geoproduction (TPG) • Kvaerner Process France (KPF) <p>Construction de la coque du FPSO :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hyundai Heavy Industries (HHI) en Corée du Sud <p>Construction de la structure principale des « <i>Topsides</i> » :</p> <ul style="list-style-type: none"> • J. Ray Mcdermott aux Emirats Arabes Unis. |



travaux de dragage du site d'assemblage qui sera finalement choisi.

Une fois les *Topsides* en place sur la coque, les connexions finales et les essais et réglages seront effectués dans un délai d'environ 3,5 mois.

Le FPSO ainsi assemblé pourra être remorqué jusqu'à son site d'installation au large de l'Angola. Pour cette opération, le groupe MPG fera appel aux plus puissants remorqueurs du monde (2 x 20 000 CV).

Sur le site de Girassol, le FPSO sera ancré au fond de la mer au moyen de seize ancres à succion de 85 t chacune. Ces ancres pénètrent dans le sol au fond de la mer sur une profondeur de 50 m.

■ LA LIVRAISON DE L'HUILE AUX BATEAUX PÉTROLIERS

La livraison de l'huile aux bateaux pétroliers pourra s'effectuer de deux manières. Tout d'abord, l'huile sera pompée à partir du FPSO dans deux *Export Lines*, en acier de 16 pouces (soit 40,6 cm de diamètre) avec un débit de 3 000 m³ par heure chacune, jusqu'à une bouée de chargement située à 1,9 km du FPSO, de manière à éviter tout risque de collision. Les deux *Export Lines* seront fabriquées sur le site de Lobito par Sonamet, dans le cadre du contrat du groupement d'AMG. Elles sont en forme de "W" et sont situées entre - 340 m et - 650 m sous le niveau de la mer, pour éviter toute interférence avec la navigation ou les courants en surface. La bouée de chargement est ancrée en neuf points au fond de la mer. Elle est fabriquée et mise en place dans le cadre du contrat du groupement MPG. Ce système permet de livrer de l'huile avec un débit de 6 000 m³ par heure à des bateaux pétroliers de 80 000 t à 400 000 t.

Plusieurs hypothèses ont été étudiées pour concevoir les *Export Lines*. Il n'existe pas de conduite flexible pour un diamètre aussi gros (16 pouces). Il fallait donc étudier une conduite métallique rigide.

Naturellement l'idée d'un *Steel Catenary Riser* – avec des dispositifs appropriés pour reprendre les efforts verticaux de roulis au niveau des liaisons en surface avec le FPSO et avec la bouée de chargement – est apparue. Il s'agirait d'une conduite métallique rigide qui part du FPSO, descend au fond de la mer sur une certaine longueur, puis remonte jusqu'à la bouée. Les calculs de rayon de courbure d'une telle conduite métallique pour 1 350 m de profondeur, donnent une distance minimum de 3 km entre le FPSO et la bouée. Ce concept ne permettait donc pas d'optimiser cette distance à 1,9 km. Le service ingénierie de ETPM a alors développé ce concept nouveau en forme de "W" qui permet d'absorber tous les efforts induits par les mouvements du FPSO dans la conduite, sans les transmettre à la bouée de chargement, et réciproquement. La deuxième possibilité de livraison de l'huile est réservée à des bateaux pétroliers de 200 000 t maximum et elle consiste en l'accostage d'un bateau de ce type en tandem à la proue du FPSO (en anglais, *Tandem Offloading*). La livraison de l'huile s'effectue avec un débit de chargement de 6 000 m³/h.

■ LE PLANNING DES OPÉRATIONS DE FABRICATION ET D'INSTALLATION EN MER

A la fin avril 1999, le projet Girassol était à 27 % d'avancement global (hors forage). Il entre maintenant dans sa phase de construction. La coque

du FPSO sera livrée à la mi-octobre 1999. Les fabrications en Angola des *Production Bundles* et des *Hybrid Riser Towers* débuteront fin 1999, seront livrées en 2000 et installées à la fin 2000. Les lignes d'injection de gaz et d'eau seront installées en 2000. Enfin, le FPSO arrivera sur le site de Girassol en 2001. La mise en production du champ pétrolier de Girassol démarrera en 2001.

Le forage des puits s'effectuera en deux phases. Les puits de la deuxième phase seront connectés à l'ensemble du dispositif durant la deuxième campagne d'installation prévue en 2002.

■ CONCLUSION

Le projet Girassol est une "première" pour l'opérateur EEA bien sûr, mais aussi pour les entrepreneurs des groupements AMG et MPG.

Ces derniers regroupent leurs compétences de pointe au sein du projet Girassol. Ils ont fait appel aux meilleures sociétés d'ingénierie pour concevoir leurs systèmes et utilisent au maximum leurs bases de Soyo et de Lobito en Angola.

D'une manière générale, les opérations d'installation, y compris la pose des ancrages du FPSO et de la bouée de livraison, seront exécutées par le groupement AMG qui dispose en propre des bateaux et barges suivants :

- ◆ le Seaway Eagle et le Seaway Commander de Stolt Comex Seaway;
- ◆ le Northern Explorer et le Polaris de ETPM;
- ◆ et le futur FDS de Bouygues Offshore (en construction).

Tous les moyens sont donc réunis pour réussir ces travaux gigantesques dont l'investissement est de 2,5 milliards de dollars US. Le rendez-vous est donc pris dans un peu moins de deux ans pour la première huile de ce "tournesol" exceptionnel.

■ LEXIQUE DE L'OFFSHORE EN GRANDES PROFONDEURS LE SUB-SEA

DP : Dynamic Positioning

C'est un système de propulseurs d'étrave, de poupe et de poupe, qui équipe un navire ou une barge, et permet un positionnement dynamique rapide en grande profondeur, en comparaison au positionnement classique à l'aide de plusieurs ancrages.

Export Lines

Ce sont les lignes qui permettent la livraison à haut débit de brut, depuis la station de traitement du pétrole, jusqu'à une bouée de chargement où viennent accoster les bateaux pétroliers. Le point de livraison de l'huile étant éloigné de la station de traitement, le risque de collision avec un bateau pétrolier est ainsi écarté.

Export Tanker

C'est un bateau pétrolier.

Flexible Jumpers

Ce sont les conduites flexibles qui relient les conduites des *Hybrid Riser Towers* au FPSO.

FPSO : Floating Production Storage and Offloading

C'est une unité flottante qui comporte une station de traitement et de production, et dont les cales servent de réservoir de stockage. En grande profondeur, il n'est plus question de construire une plate-forme reposant sur le fond de la mer.

Gas Lift

Cela consiste à injecter du gaz en pied de *Hybrid Riser Towers* pour "alléger" le pétrole et faciliter sa remontée depuis le fond de la mer jusqu'à la station de traitement en surface.

Hybrid Riser Towers

Ce sont des tours ancrées au fond de la mer. Chaque tour fonctionne comme un pendule inversée grâce à un flotteur fixé en tête, et contient des canalisations verticales qui permettent au pétrole de monter à la surface, ainsi que des canalisations d'injection d'eau et de gaz.

Integrated Deck

C'est un choix de conception des *Topsides* avec un pont intégré, qui est entièrement assemblé sur un quai, puis est glissé dans son ensemble sur son unité flottante. Le concept de l'*Integrated Deck* est opposé à celui des *Pre-Assembled Units* (PAU).

Manifolds

Ce sont les collecteurs placés au fond de la mer à proximité des têtes de puits de production de pétrole auxquels ils se raccordent. Ils correspondent aux limites du contrat des liaisons fond-surface.

Moorings

Ce sont les ancrages (du FPSO et de la bouée de chargement).

Offloading buoy

C'est la bouée de chargement, pour la livraison des bateaux pétroliers.

PAU ou Pre-Assembled Units

C'est un choix de conception des *Topsides* avec des unités préfabriquées qui correspondent chacune à une fonction du traitement, et qui sont assemblées directement sur son unité flottante. Le concept des PAU est opposé à celui de l'*Integrated Deck*.

Pigging

C'est le raclage des lignes de transport du pétrole. Cette opération de nettoyage consiste à pousser

LES PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES LIAISONS FOND-SURFACE OU UFL

Les "Production Bundles"

- ◆ le plus long *Bundle* : 3 km
- ◆ leur poids : 50 kg/m
- ◆ leur diamètre extérieur : 31 pouces soit 78,7 cm
- ◆ leur nombre : 5, représentant une longueur totale de plus de 29 km, et répartis en une quinzaine de *Bundles*
- ◆ la perte maximum de température du pétrole transporté : 1 °C par kilomètre
- ◆ la température minimum du pétrole qu'ils contiennent 16 heures après l'arrêt de la production : 20 °C

Les "Hybrid Riser Towers"

- ◆ leur nombre : 3
- ◆ leur hauteur : 1 300 m
- ◆ leur poids durant le remorquage : – 30 kg/m (elles flottent)
- ◆ leur flotteur métallique : 1 300 m³
- ◆ l'ancrage en pied : 400 t

Les cordons ombilicaux

- ◆ ils mesurent au total 70 km

Les "Export Lines" en acier

- ◆ leur nombre : 2
- ◆ leur longueur : 2 400 m et 2 750 m pour relier le FPSO à la bouée de chargement, distants de 1 850 m
- ◆ leur diamètre : 16 pouces (40,6 cm)
- ◆ le débit de livraison de l'huile : 3 000 m³ par heure et par *Export Lines*, soit 6 000 m³ par heure en totalité

ser depuis la surface avec de l'huile chaude, un racleur avec ses coupelles dans les canalisations en circuit fermé.

Production Bundles

Ce sont des canalisations de transport du pétrole situées au fond de la mer, et regroupées en faisceau.

ROV : Remote Operated Vehicle

C'est un petit sous-marin de poche utilisé pour réaliser, dans le fond de l'eau, soit des missions de contrôle à l'aide d'un appareil de vidéo, soit des opérations d'assemblage ou de construction.

Spools

Ce sont les connexions de canalisations soit entre deux *Bundles*, soit entre un *Bundle* ou une ligne d'injection et un collecteur de têtes de puits, soit enfin entre un *Bundle* ou une ligne d'injection et le pied d'une *Hybrid Riser Tower*. Les *Spools* sont fabriqués sur mesure après une métrologie (un relevé) en place. Ils sont installés à l'aide d'un ROV.

Steel Catenary Riser

Il s'agit d'une conduite rigide en acier qui remonte du fond de la mer jusqu'à la surface. Sous l'action de son poids, cette conduite décrit la forme d'une caténaire.

UFL : Umbilicals and Flowlines

C'est l'ensemble des liaisons fond-surface.

VIV : Vortex Induced Vibration

Ce sont les vibrations induites par les files de tourbillons alternées, qui se développent dans le sillage d'un cylindre.

Wellheads

Ce sont les têtes de puits de production.

ABSTRACT

The Girassol project : an extraordinary adventure

Ch. Desforge

The Girassol project involves the development of an oil field located in Block 17 of the Angolese offshore area at a depth of 1,350 m below sea level and about 200 km off the coast of the Luanda region.

"Girassol" in Portuguese is translated as "Sunflower". It is a beautiful robust flower whose seeds produce a quality oil. The Girassol project calls upon exceptional engineering and construction capabilities. Not only does it involve the design of the largest treatment, production and floating storage station ever built, but also the underwater installations for the collection of petroleum located 1,350 m below sea level. For economic reasons, the fastest possible rate of return must also be ensured on the investment corresponding to this undertaking : the Girassol oil field was discovered at the end of April 1996 and production is to be begin in 2001.

The Girassol project is also a prodigious source of oil production : the petroleum reserves are estimated at over 700 million barrels (about 110 million m³) to be exploited over a 20-year period. The resources used must allow a production of 200,000 barrels per day (about 32,000 m³ per day).

DEUTSCHES KURZREFERAT

Das Girassol-Projekt : ein phantastisches Abenteuer

Ch. Desforge

Das Girassol-Projekt betrifft die Entwicklung eines Erdölvorkommens im Block 17 des angolanischen Offshore, 1350 m unter dem Meeresspiegel, ca. 200 km vor der Küste der Region Luanda.

"Girassol" ist ein portugiesisches Wort und bedeutet "Sonnenblume". Aus dem Samen dieser schönen, robusten Blume wird ein ausgezeichnetes Öl gewonnen. Im Rahmen des Girassol-Projektes muß auf außergewöhnliche Sachkenntnis aus dem Engineering- und Baubereich zurückgegriffen werden. Hier wird nicht nur die größte je realisierte schwimmende Aufbereitungs-, Produktions- und Lageranlage gebaut, sondern auch Erdölförderanlagen in 1350 m Tiefe

unter dem Meeresspiegel. Zudem muß die Investition für diese Großanlage aus zwingenden wirtschaftlichen Gründen schnellstmöglich rentabilisiert werden : Das Erdölvorkommen Girassol ist Ende April 1996 entdeckt worden, und es soll im Jahre 2001 die Produktion aufnehmen. Das Girassol-Projekt ist eine fabelhafte Ölerzeugungsquelle : Die Erdölreserven werden auf über 700 Mio. Barrel (d.h. 110 Mio. Kubikmeter) geschätzt, die innerhalb von 20 Jahren zu nutzen sind. Die eingesetzten Mittel sollen eine Tagesproduktion von 200 000 Barrel (d.h. 32 000 m³ pro Tag) ermöglichen.

RESUMEN ESPAÑOL

El proyecto Girassol : una aventura extraordinaria

Ch. Desforge

El proyecto Girassol representa el desarrollo de un yacimiento de petróleo ubicado en el bloque 17 de la explotación costafuera angoleña, a 1350 m de profundidad bajo el nivel del mar y, aproximadamente, a 200 km de las costas de la región de Luanda. "Girassol" voz portuguesa que tiene la misma pronunciación en español, pero que se escribe con una sola "s", es una magnífica flor robusta, oriunda del Perú, cuyas semillas producen un aceite de calidad.

Para desarrollar el proyecto Girassol ha sido preciso recurrir a competencias excepcionales en los sectores de la ingeniería y de la construcción. No sólo se trataba de diseñar la mayor estación flotante de procesamiento, de producción y de almacenamiento jamás realizada hasta la fecha, sino también las instalaciones submarinas de colecta del petróleo, a una profundidad de 1350 m, sino también tener en cuenta los motivos económicos, para rentabilizar con la mayor rapidez posible las inversiones financieras que corresponden a este conjunto : el yacimiento petrolífero de Girassol fue descubierto hacia fines de abril de 1996 y la producción dará comienzo en 2001.

El proyecto Girassol es también una fuente prodigiosa de producción de hidrocarburos : las reservas de petróleo se han evaluado en más de 700 millones de barriles (o sea, 110 millones de m³) a extraer durante 20 años. Los medios puestos en aplicación permitirán obtener una producción de 200 000 barriles diarios (o sea, 32 000 m³ diarios).

STAG CPF

Un concept original de plate-forme auto-installable

En mai 1998 la production de pétrole débutait sur la plate-forme CPF du champs de STAG (au nord-ouest de Dampiez au large des côtes de Western Australia). Pour la réalisation de cette plate-forme, Bouygues Offshore a développé un concept original auto-installable et réutilisable tel que le souhaitait l'opérateur AEL (Apache Energy Limited).

Le concept repose sur les éléments suivants :

- barge autoélévatrice munie de six jambes et supportant les moyens de production et un quartier d'habitation situé au-dessus d'un jacket immergé, fixé au fond de la mer au moyen de piles forées et cimentées;
- le transport et la mise à l'eau du pont du jacket au moyen d'une barge submersible;
- la flottaison et l'auto-immersion du jacket assurées par deux pontons et contrôlées par des treuils hydrauliques.

La méthode d'installation du jacket est l'élément le plus innovant du concept.

Mené dans un délai très court (18 mois) ce projet a permis de relancer l'intérêt de l'utilisation du concept de barge Delong comme moyen d'installation autonome et réversible, particulièrement adapté à l'exploitation des champs marginaux éloignés, et dans des conditions d'environnement extrêmes.

En mai 1998, la production de pétrole débutait sur la plate-forme CPF du champ de Stag. Pour la réalisation de cette plate-forme, Bouygues Offshore a développé un concept original auto-installable et réutilisable.

LE CONTEXTE

Découvert en 1993, le champ de Stag est situé à environ 40 milles au nord-ouest de Dampier, au large des côtes de Western Australia (figure 1), par une profondeur d'eau de 47 mètres. Il s'agit d'un champ "marginal" ou plus précisément "éloigné" (*remote field*). En effet :

- ◆ ses dimensions sont relativement modestes : les réserves récupérables sont estimées à 42 millions de barils de brut et son exploitation nécessite d'utiliser des pompes électriques immergées (ESP – Electrical Submerged Pumps) associées à des forages horizontaux;
- ◆ les conditions d'environnement y sont très sévères : le champ étant situé dans une zone cyclonique, la vague centennale atteint 22 mètres, associée à des vents de 110 nœuds, tandis que les sécrétions marines, dont la croissance est favorisée par la température de l'eau, forment une surépaisseur de 150 mm sur l'ensemble de la structure immergée, augmentant considérablement la prise à la houle et au courant;
- ◆ enfin, son éloignement des grandes infrastruc-

tures en pénalise l'exploitation non seulement pour l'expédition du produit (il n'est pas question de se raccorder à un réseau de pipelines existant), mais également dès la phase d'installation des ouvrages, les moyens d'installation lourds, tels que les barges de levage de forte capacité devant être mobilisées depuis de grandes distances pour un coût très élevé.

L'ensemble de ces contraintes a conduit le premier opérateur de la concession, BHP Petroleum, à juger son exploitation non économiquement viable et à en rétrocéder les droits à Apache Engineering Limited (AEL), opérant pour un groupement de sociétés pétrolières indépendantes.

En mars 1996, Apache Engineering Limited (AEL), lançait un appel d'offres concernant l'étude, la construction et l'installation de la plate-forme CPF (Central Production Facility) destinée à assurer l'exploitation du champ.

L'objectif pour Apache était d'obtenir de la part des compétiteurs des solutions optimisées permettant de rendre économiquement viable l'exploitation du champ.

Il s'agissait donc d'un appel d'offres très ouvert, fondé sur une spécification de performance définissant les fonctions de l'ouvrage ainsi que les interfaces avec les autres fonctions nécessaires à l'exploitation du champ :

- ◆ le forage, réalisé à partir d'un *jack-up drilling rig* (plate-forme auto-élévatrice de forage) à travers un *template* (gabarit de forage) permettant de forer les

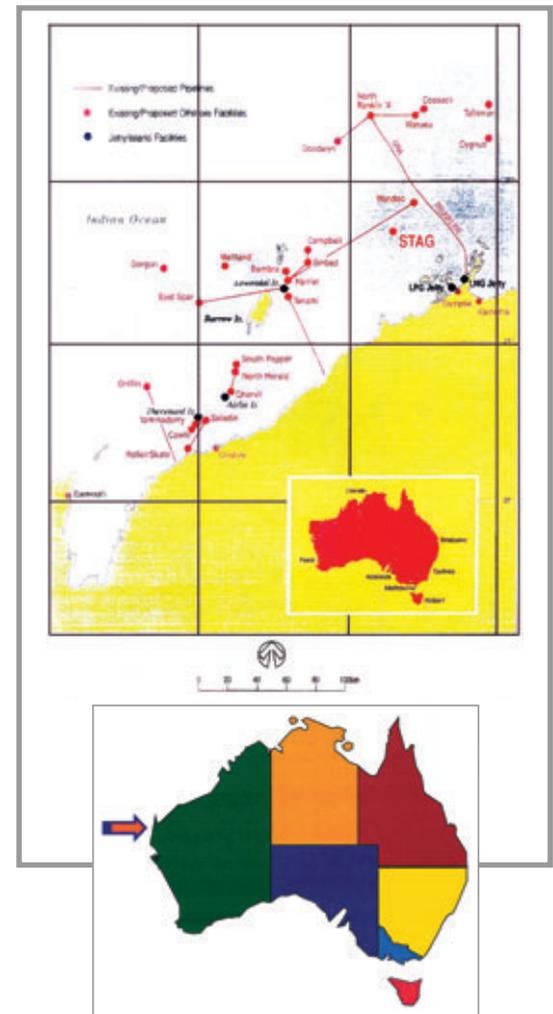


Figure 1
Plan de situation
Location

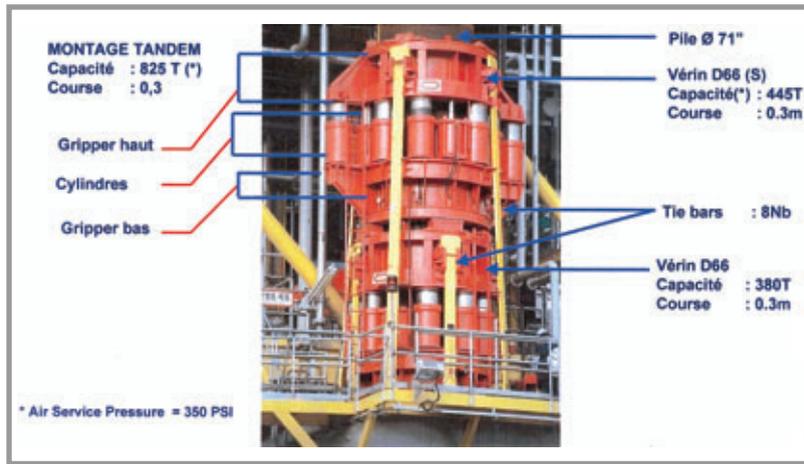


Figure 2
Vérins DeLong
DeLong jacks

- ◆ une barge auto-élevatrice munie de six jambes et supportant les moyens de production et un quartier d'habitations installé au-dessus d'un jacket immergé, fixé au fond au moyen de piles forées et cimentées ;
- ◆ le transport et la mise à l'eau du pont et du jacket au moyen d'une barge submersible ;
- ◆ la flottaison et l'auto-immersion du jacket assurées par deux pontons et contrôlées par des treuils hydrauliques.

Afin de réduire à la fois les coûts et les délais de réalisation, il convenait en premier lieu de réduire les travaux sur le site en optant pour une solution du type pont intégré. Une telle superstructure, réalisée en une seule partie, permet de réaliser sur le chantier de construction la quasi totalité des raccordements et des essais de réception.

Un pont intégré peut être mis en place sur une structure de type jacket de différentes manières :

- ◆ par levage et dépose. Dans le cas présent, une telle solution nécessitant la mobilisation d'une barge grue de capacité suffisante s'avérait d'entrée non économique ;
- ◆ par dépose, par la combinaison du ballastage de la barge de transport et le télescopage de systèmes de supportage.

Afin de satisfaire aux critères de stabilité durant le transport, cette méthode présente l'inconvénient de nécessiter une largeur de pont importante, les jambes du pont devant se situer de part et d'autre de la barge. Dans le cas présent, cet inconvénient était d'autant plus pénalisant que, du fait des conditions d'environnement particulièrement sévères, le pont est situé à une élévation de 20 mètres au-dessus du niveau de l'eau.

Ces considérations ont conduit à sélectionner un pont intégré supporté par une barge auto-élevatrice du type DeLong.

Le système d'auto-élévation DeLong est fondé sur l'utilisation de vérins pneumatiques qui, en s'agrippant sur des tubes lisses de diamètre 71", permettent de hisser des charges de 450 tonnes. Deux vérins peuvent être montés en tandem sur la même colonne, assurant ainsi une capacité de levage de 850 tonnes par colonne.

Ces dispositifs sont utilisés sur des plates-formes auto-élevatrices de travail, telles que la BOS 159 et la JUP 111 exploitées par BOS, ainsi que pour la mise en place de jetées ou de plates-formes fixes en faible profondeur.

Pour la plate-forme CPF, la coque a une longueur de 45 mètres pour une largeur de 33 mètres et un creux de 6 mètres. Le poids total à auto-élever, incluant outre la coque, les équipements de production et un quartier d'habitation, est de 4 700 tonnes.

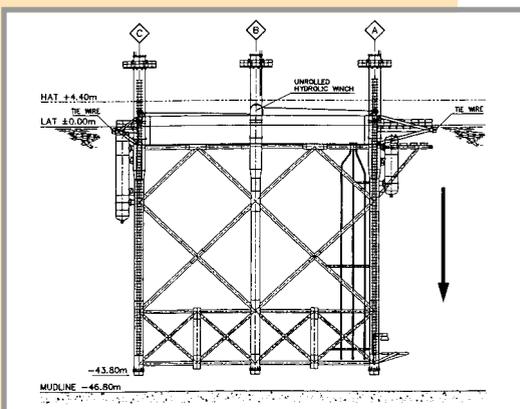
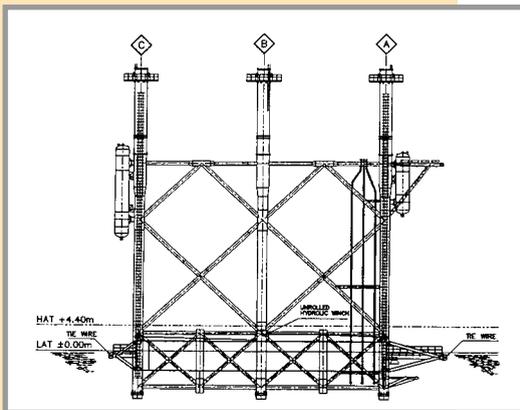
Flottant, le pont utilise ainsi pleinement sa largeur pour assurer sa stabilité en flottaison durant la phase d'installation, tandis qu'un ensemble de 12 vérins montés en tandem sur les six colonnes du pont,

Photo 1
Mise en flottaison du jacket
et du pont par la Mighty Servant 3
dont le pont est immergé de 10 m
*Floating of the jacket and bridge
by the Mighty Servant 3 whose
bridge is immersed 10 m*



Figure 3
Flottaison et descente du jacket.
A noter, les pontons et les flotteurs
supplémentaires permettant de corriger
l'assiette du jacket après séparation
des pontons

*Floating and lowering of the jacket. Note
the pontoons and the additional floats
allowing the correction of jacket position
after the pontoons have been separated*



puits avant l'installation de la plate-forme, puis d'en assurer le positionnement précis au-dessus des puits lors de sa mise en place ;

- ◆ l'expédition du produit vers le stockage flottant (FSO – Floating Storage Offloading) ancré à quelques 2000 mètres de la plate-forme.

Les seules contraintes imposées par AEL concernant le support étaient qu'il soit fixe (pour des raisons de maintenance, l'utilisation des ESP est incompatible avec un support flottant) et facilement récupérable et réutilisable, du moins partiellement, afin d'en rendre l'amortissement possible sur un autre champ.

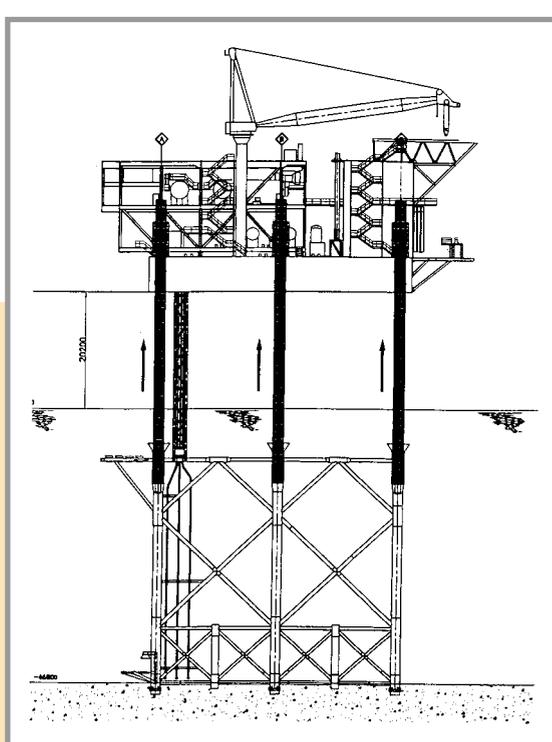
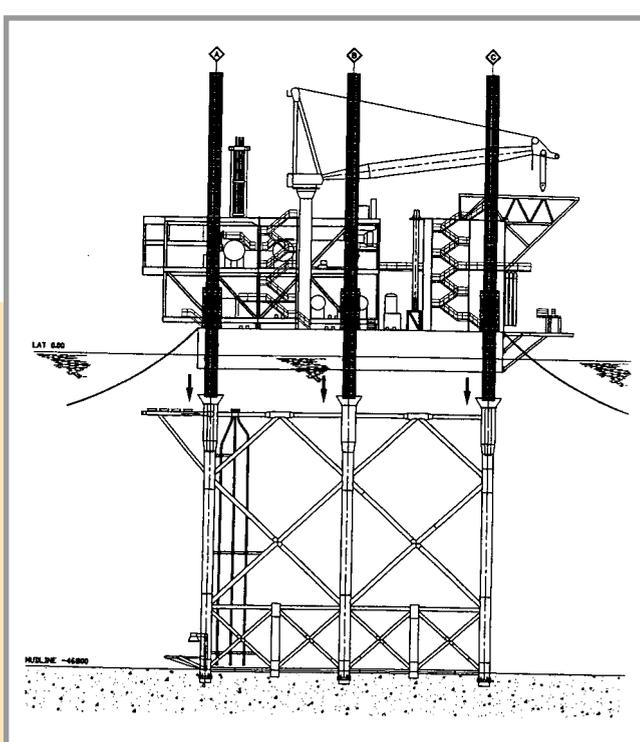
Par contre, aucune restriction n'était faite sur le type de structure qui pouvait tout aussi bien être une plate-forme neuve, fondée sur pieux ou gravitaire, ou bien un jack-up de forage reconverti.

Enfin, les délais de réalisation imposés étaient extrêmement tendus.

C'est dans ce contexte que Bouygues Offshore, saisissant l'opportunité de pénétrer le marché de l'offshore australien grâce à son expérience d'ensemblier et à ses capacités d'innovation, a développé un concept original de plate-forme particulièrement adapté à l'exploitation rationnelle de ce type de champ, ce qui lui a valu de remporter le marché.

LE CONCEPT

Il importait principalement de sélectionner un concept offrant une grande souplesse au niveau du choix du chantier de fabrication et ne nécessitant pas de moyens d'installation importants. Le concept proposé repose sur les éléments suivants (figure 2) :



Figures 4 et 5
Installation du pont
Bridge installation

représentant une capacité de levage de plus de 5 000 tonnes permettent d'assurer son auto-élévation jusqu'au niveau final (figure 2).

Du fait de ses formes peu propices à un remorquage sur une grande distance, le transit entre le chantier de fabrication et le site d'installation est effectué en *dry tow*, le pont étant chargé sur une barge "semi-submersible" permettant sa mise à l'eau à l'arrivée.

La barge utilisée, la *Mighty Servant 3*, de la société *Dockwise*, est la plus grande unité de ce type. Son pont offre une surface de chargement de 120 x 48 mètres et peut être immergé de 10 mètres (photo 1).

Les colonnes de diamètre 71" étant insuffisantes pour assurer la stabilité de la plate-forme du fait de la profondeur d'eau et des conditions d'environnement, le pont doit être installé sur une rehausse composée d'un jacket sous-marin fixé au fond au moyen de piles forées et cimentées dans le sol carbonaté.

La méthode d'installation du jacket est l'élément le plus innovant du concept.

Afin, là encore, d'éviter de recourir à des moyens de levage important et d'optimiser l'utilisation de la MS3, le jacket a été conçu pour être auto-immmergeable au moyen de deux pontons qui lui sont reliés par des câbles de haute résistance contrôlés par des treuils freins hydrauliques.

Ces pontons assurent la flottabilité du jacket lors de sa mise à l'eau avec un tirant d'eau limité à 8 mètres puis le contrôle de son immersion jusqu'à un tirant d'eau de 44 mètres à partir duquel il devient auto-flottant. Les pontons sont alors déconnectés du jacket qui est alors prêt pour l'accostage sur le *template* (gabarit de forage) et sa descente en position finale par ballastage contrôlé (figure 3). Lors de la mise à l'eau, l'ensemble, comprenant le jacket, les piles pré-installées à l'intérieur des jambes, les pontons et les flotteurs additionnels destinés à corriger l'assiette du jacket lors de son accostage sur le *template*, pèse environ 2000 tonnes.

Afin d'assurer sa stabilité lors de la fin de son im-

mersion, les jambes du jacket sont prolongées par des extensions temporaires qui assurent en outre le supportage de la foreuse utilisée pour la mise en place des piles.

Après forage à travers les jambes et les piles, les piles sont descendues dans le sol et solidarisées au sol et à la structure par l'injection d'un coulis de ciment.

Le jacket est alors prêt à recevoir le pont (figure 4). Celui-ci est positionné au dessus du jacket puis les colonnes sont descendues lentement jusqu'à s'engager dans des cônes de guidage installés au sommet des jambes du jacket. Les colonnes sont alors larguées simultanément.

Le pont est alors élevé en quelques heures au moyen des vérins *DeLong* jusqu'à son élévation finale (figure 5). Les colonnes sont ensuite solidarisées d'une part au jacket par une injection de coulis de ciment dans l'annulaire entre la partie supérieure des jambes du jacket et la colonne, et d'autre part au pont par soudage de plaques d'acier. Les vérins sont alors retirés.

Si le concept de plate-forme *DeLong* est relativement conventionnel – plusieurs plates-formes de ce type ont été installées dans le monde entier – l'installation d'une telle barge sur un jacket sous-marin est une première qui a demandé le développement d'un dispositif hydraulique spécifique d'absorption de choc, supportant l'impact des colonnes du pont lors de leur largage dans les jambes du jacket, les mouvements de pilonnement au début du vérinage du pont et un transfert progressif de la charge des colonnes sur des portées rigides permanentes, afin de décompresser le dispositif. L'opération de mise en place du pont est réversible, ce qui permettra un démontage relativement aisé à la fin de la vie du champ, estimée à une quinzaine d'années, et une réutilisation sur un autre site.

■ LE PROJET

Mené dans un délai très court de 18 mois, ce projet a nécessité une étroite coordination entre

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES ET PRINCIPALES QUANTITÉS DU DECK AUTO-INSTALLABLE

- Coque flottante équipée de cloisons étanches périphériques (4 ml de large)
- Intérieur de la coque aménagé pour recevoir des équipements de service

Dimensions

45 x 37 x 6 ml

Poids unitaires

- Coque : 1 639 t
- *Process module* : 1 673 t
- *Living quarter* : 749 t

Poids total

- Au levage : 4 780 t
- En place : 5 316 t (inclus : *rig, boat landing...*)
- En opération : 6 590 t
- Maximum : 7 530 t

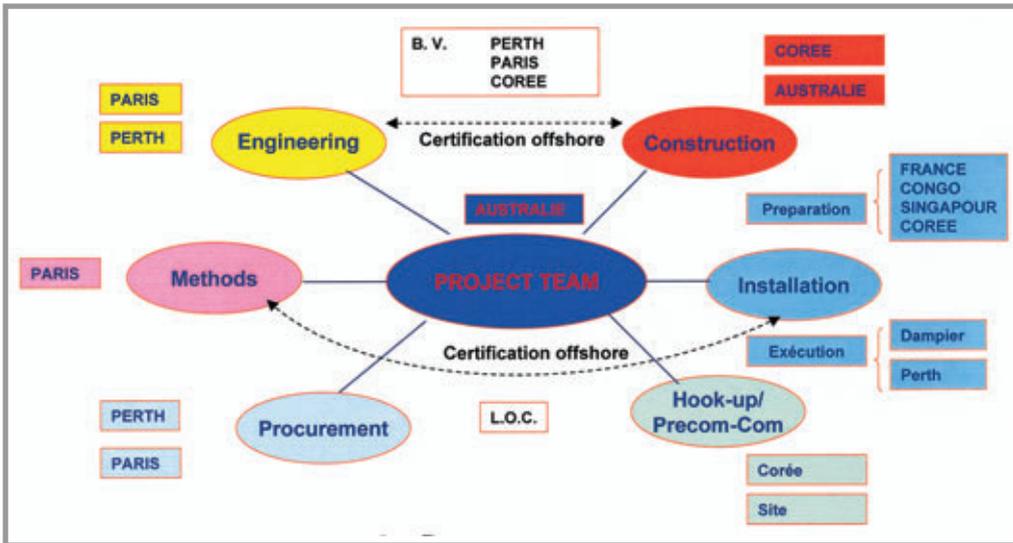


Figure 6
Organisation
du projet

Project
organisation

Tableau I
Process
Process

| | |
|---|---|
| PRODUCTION | 45.000 blpd 30.000 bopd Production sur 5 puits + 3 spares faite par des ESP en raison de la viscosité et de la densité de l'huile (18° API) |
| SEPARATION SUR 3 ETAGES | 2 séparateurs triphasiques en 1 ^{er} étage 1 séparateur triphasique en 2 ^{ème} étage 1 coalesceur électrostatique en 3 ^{ème} étage pour l'affinage |
| TRAITEMENT D'EAU DE GISEMENT | Par 2 séparateurs à plaques inclinées (CPI) Par 1 unité de flottaison à gaz induit (IFGU) |
| SYSTEME EXPORT VERS FSO | 2 pompes électriques de 220 m3/h Comptage Coriolis |
| TRAITEMENT ET INJECTION EAU DE MER | 10.000 wpd par puits (3 puits en service) + 1 spare Unité de filtration jusqu'à 5 microns 2 pompes électriques de 20.000 bwpd à 7270 Kpa |

Tableau II
Utilités
Utilities

| | |
|------------------------------|--|
| CHAUDIERE A VAPEUR | 8 MW pour réchauffage du brut au travers d'échangeurs à plaque |
| QUARTIER VIE | 50 personnes |
| GENERATION ELECTRIQUE | 3 unités de 1,75 MW (fuel) 1 unité de secours |

Tableau III
Conditions
d'environnement
process
Process environmental
conditions

| | |
|--------------------|---|
| SOL | 1 à 2 m de sable carbonaté 50 m de calcarénite cimenté et carbonaté Pas de pendage |
| WATER DEPTH | 46 m |
| HOULE | Conditions cycloniques : Vague annuelle : Hmax : 5,10M/7s Vague centennale: Hmax : 21m/13s |
| VENT | Conditions cycloniques : Vent annuel : 22 m/s Vent : 1 minute 60 m/s Direction prédominante Nord Ouest |

les différents sites impliqués (figure 6) :

- ◆ la coordination de projet ainsi que l'ingénierie des équipements et du quartier d'habitations et la fabrication d'une partie des aides à la pose ont été réalisées à Perth ;
- ◆ l'ingénierie du jacket, de la coque et des opérations marines a été effectuée au siège de Bouygues Offshore, à St-Quentin-en-Yvelines ;
- ◆ la fabrication de l'ensemble des composants de l'ouvrage a été réalisée par Samsung Heavy Industry (SHI) sur son chantier de Kojé, à l'extrême sud de la Corée ainsi que la finalisation d'une partie de l'ingénierie.

Ingénierie – Process et utilité

L'ingénierie de process et utilités a été réalisée chez un sous-traitant australien à Perth en Australie. Celui-ci a réuni dans une cellule intégrée 50 ingénieurs et techniciens en charge de la mise au point du fonctionnement de la plate-forme, sur la base des équipements reportés sur les tableaux I et II. La préparation du support naval utilisé pour l'installation s'est déroulée à Singapour. Enfin, outre l'installation sur le site proprement dite, des travaux de finition du pont ont été réalisés à Dampier, où le pont a été remorqué vers un site abrité pendant l'installation du jacket. En dépit de quelques incidents, dont en particulier

Figure 7
Impression d'artiste de la plate-forme en place
Artist's conception of the platform in place



une alerte cyclonique ayant nécessité d'abandonner le jacket pendant plus de 15 jours avec seulement une partie des piles installées, et quelques difficultés rencontrées lors du forage des piles dans le sol carbonaté hétérogène, l'installation s'est déroulée de manière très satisfaisante.

En particulier, les phases "critiques" spécifiques au concept – la mise à l'eau du jacket et du *deck* depuis la Mighty Servant en mer ouverte, l'immersion du jacket et son accostage sur le template et l'accostage et l'auto-élévation du pont – se sont avérées très fiables et en tout point conformes aux résultats des nombreuses simulations effectuées durant les études.

Ce projet a permis de relancer l'intérêt de l'utilisation du concept de barge DeLong comme moyen d'installation autonome et réversible, particulièrement adapté à l'exploitation des champs marginaux éloignés et de démontrer son adaptabilité à des conditions d'environnement extrêmes.

Ingénierie structure et installation

Ces travaux furent exécutés chez Bouygues Offshore, sur une période de 12 mois avec 35 ingénieurs et techniciens mobilisés pour répondre aux critères reportés dans le tableau III.

Construction de l'ouvrage

Les travaux sous-traités à Samsung Heavy Industries (SAI) consistaient en la fabrication du jacket et du *deck* auto-installable, pour un poids total de 7 800 t.

Ces travaux se déroulèrent sur une période "record" de 10 mois mobilisant jusqu'à 600 personnes supervisées par 20 expatriés (figure 7 et photo 2).



Photo 2
Plate-forme terminée et mise en place
Platform completed and installed

ABSTRACT

STAG CFP. An original self-installable platform concept

J. Tondon, J.-M. D'Ettorre

In May 1998, oil production began on the CFP platform of the STAG field (northwest of Dampiez off the coast of Western Australia). For the setup of this platform, Bouygues Offshore developed an original self-installable and reusable concept as desired by the operator AEL (Apache Energy Limited). The concept is based on the following elements :

- self-raising barge equipped with six legs and supporting the production equipment and living quarters located over an immersed jacket secured to the sea bottom by means of bored and cemented piers;
- transport and sinking of the jacket by submersible barge;
- floating and self-immersion of the jacket by two pontoons controlled by hydraulic winches.

The jacket installation method is the most innovative element of the concept. Completed in a very short time (18 months), this project generated renewed interest in the use of the DeLong barge concept as a means of independent and reversible installation, suited particularly to operations in remote marginal fields and under extreme environmental conditions.

DEUTSCHES KURZREFERAT

STAG CFP. Ein neuartiges Plattformkonzept mit Eigeninstallation

J. Tondon, J.-M. D'Ettorre

Im Mai 1998 hat die Erdölproduktion der CFP-Insel des STAG-Ölgebietes (nordwestlich von Dampiez vor der westaustralischen Küste) begonnen. Für die Errichtung dieser Plattform hat Bouygues Offshore entsprechend dem Wunsch des Betreibers AEL (Apache Energy Limited) ein neuartiges Konzept für die Eigeninstallation und die Wiederverwendung entwickelt. Das Konzept basiert auf den folgenden Komponenten :

- Hubplattform mit sechs Beinen zur Aufnahme der Produktions- und Wohnanlagen oberhalb eines unter dem Wasserspiegel befindlichen Jackets, das mit gebohrten und zementierten Pfeilern am Meeresgrund verankert ist;
- Transport und Wasserung des Jac-

ketdecks mit Hilfe einer Tauchplattform;

- Schwimmfähigkeit und Eintauchung des Jackets werden mittels zweier Brückenschiffe sichergestellt und über hydraulische Winden gesteuert.

Die Installationsmethode des Jackets ist das innovierendste Element des Konzeptes. Mit seiner äußerst kurzen Ausführungsfrist (18 Monate) hat dieses Projekt wieder Interesse an der Verwendung des DeLong-Plattformkonzeptes als autonome und umkehrbare Installationsmethode geweckt, die für die Ausbeutung entfernter Vorkommen in Randbereichen und unter extremen Umweltbedingungen besonders gut geeignet ist.

RESUMEN ESPAÑOL

STAG CFP. Concepto original de plataforma autoinstalable.

J. Tondon y J.-M. D'Ettorre

Durante el mes de mayo de 1998 dio comienzo la producción de petróleo en la plataforma CFP, del yacimiento STAG (ubicado al noroeste de Dampiez, frente a las costas de Western Australia). Para la ejecución de esta plataforma, Bouygues Offshore ha desarrollado un concepto original autoinstalable y reutilizable, atendiendo en ello a los deseos del operador AEL (Apache Energy Limited). Este concepto se funda en los elementos siguientes :

- embarcación de servicio autoelevadora, provista de seis patas y que soporta los medios de producción y un área de alojamiento, situada por encima de un jacket sumergido, fijado en el fondo del mar por medio de pilares perforados y cementados;
- el transporte y la botadura del puente del jacket, por medio de una embarcación de servicio sumergible;
- la flotación y la autoinmersión del jacket, obtenidas por medio de dos pontones y controladas por cabrestantes hidráulicos.

El método de instalación del jacket constituye el elemento más innovador del concepto. Este proyecto, llevado a cabo en un plazo sumamente corto (18 meses), ha permitido reactivar el interés del concepto de la embarcación de servicio DeLong, a título de medio de instalación autónomo y reversible, particularmente adaptado a la explotación de los campos marginales lejanos y en condiciones de entorno extremas.

Port de Fort-de-France Le réaménagement

Le port de Fort-de-France, un des ports principaux français dans le domaine de la croisière et des conteneurs s'est réorganisé en affectant des secteurs à chaque type d'activité. Le secteur Centre qui dans un premier temps sera dédié au commerce et à la croisière puis exclusivement à la croisière a fait l'objet de travaux importants. Ces travaux ont porté sur deux quais : le quai des Annexes et le quai des Grands cargos. Ces quais ont été remplétés et allongés à l'aide de rideaux mixtes composés de tubes ou caissons et de palplanches ancrés au moyen de micropieux inclinés à 45°. Ces rideaux ont été installés à partir d'un atelier flottant en utilisant du vibrofonçage et du battage au mouton hydraulique. La protection contre la corrosion est assurée par une protection cathodique. Des dragages ont permis de porter le tirant d'eau à 9,00 m.

LE PORT DE FORT-DE-FRANCE FACE À L'AVENIR

Fort-de-France, premier port français pour la croisière et troisième port français pour les conteneurs, véritable poumon de l'île, souffre de la mixité des espaces passagers et marchandises et d'une situation de saturation du terminal à conteneurs. Un grand projet global de port a vu le jour. Il résulte des orientations dégagées au cours des différents schémas directeurs qui se sont succédés depuis 1975.

Les objectifs de développement du port sont de créer des conditions optimales pour les activités de croisière et de commerce, d'ouvrir les activités de transport de passagers vers la ville et l'ensemble des sites de l'île et d'améliorer le rendement des activités de traitement de la marchandise.

La restructuration en cours consiste à :

- ◆ conserver deux pôles existants que sont le bassin de radoub et les surfaces d'exploitation adjacentes, et l'apportement minéralier de la pointe des Carrières;

- ◆ regrouper les autres activités en pôles spécifiques, en tenant compte des caractéristiques des quais, des terre-pleins et de leur environnement : croisière au secteur Centre, transport de passagers inter-îles au secteur ouest, commerce au secteur est et à la Pointe des Grives (conteneurs), activités de réparation pour la plaisance au fond de la baie des Tourelles et plaisance à l'étang Z'Abri-cot (figure 1).

Après 2001, année de mise en service du terminal à conteneurs de la pointe des Grives, le secteur centre aura pour vocation d'accueillir la croisière et disposera, avec les quais des Tourelles, des Annexes et des Grands Cargos d'un véritable terminal de croisière "tête de ligne". Des bâtiments de service pour les passagers seront construits et une voie piétonne d'accès à la ville réalisée.

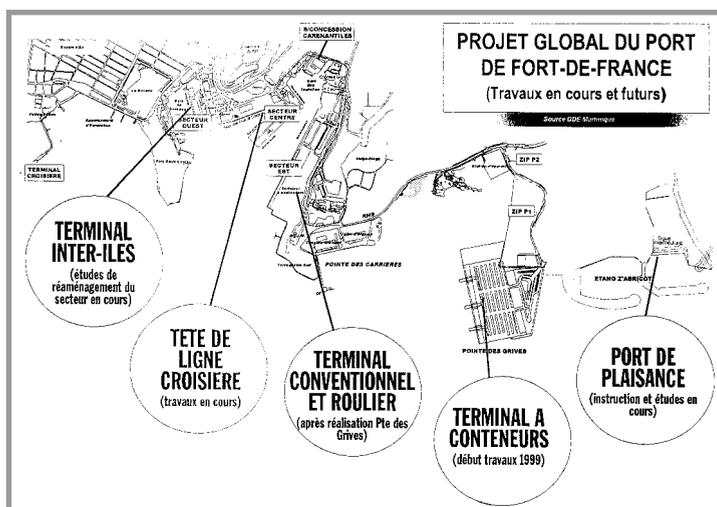


Photo 1
Vue du rideau mixte
en phase finale
de battage

View of composite
curtain in final
driving phase

Figure 1
Plan du port
de Fort de France

Plan of the port
of Fort-de-France



LE QUAI DES ANNEXES

Jusqu'en 1994 cohabitaient au secteur centre des activités de croisière et de commerce conventionnels, générant des conflits et posant des problèmes de sécurité et de qualité des services.

La restructuration avait pour but dans un premier temps de séparer physiquement ces activités : la croisière sur le quai des Tourelles et le commerce au quai des Annexes et au quai des Grands Cargos.

L'aménagement a consisté à porter à 180 m le quai des Annexes qui était en très mauvais état, à allonger le quai des Grands Cargos de 50 m et à remblayer le fond de la darse.

Les travaux ont été réalisés en deux tranches étalées sur 1994 et 1995. La deuxième tranche ne pouvant être réalisée qu'après mise en service de la première. Le coût global des travaux est de 60 millions de francs toutes tranches confondues et le financement est assuré par :

- ◆ l'Europe (financement FEDER) à hauteur de 27,9 millions;
- ◆ la Chambre de Commerce et d'Industrie de la Martinique à hauteur de 20,1 millions;
- ◆ l'Etat à hauteur de 12 millions.

Les travaux comprenaient :

- ◆ le remplètement sur 50 m de la partie sud du quai des Annexes (partie en bon état construite en 1952);

du secteur centre

Louis Crebier
SERVICE ETUDES ET TRAVAUX
PORTUAIRES
DDE Martinique

Jean-Yves Coutures
SERVICE ETUDES ET TRAVAUX
DE GÉNIE CIVIL
Port autonome de Bordeaux

Hervé Duplaine
RESPONSABLE EXPLOITATION
Balineau SA

- ◆ la réfection et le prolongement du quai des Annexes vers la darse sur 130 m;

- ◆ la fermeture et le remblaiement de la darse.

La première étape des travaux a consisté en un renforcement de la partie la plus détériorée du quai par un cloutage en micropieux verticaux.

A cette occasion, deux micropieux d'essai ont été réalisés en prévision de la réalisation ultérieure des micropieux inclinés destinés à assurer la stabilité du nouveau mur de quai.

Le rempiètement du quai des Annexes sur les 30 premiers mètres s'est fait par battage, à 3 m de l'ancien front d'accostage, d'une ligne de pieux métalliques battus de diamètre 813 mm sur lesquels repose une dalle en béton. L'ensemble est ancré à l'arrière au niveau du couronnement de l'ancien quai. Ce rempiètement permet de conserver le même alignement tout au long du nouveau quai.

La construction du quai sur les 150 m suivants s'est faite sous la forme d'un rideau mixte. Ce rideau mixte est composé de pieux métalliques de diamètre extérieur 1016 mm et de 25 mm d'épaisseur, reliés par des séries de trois palplanches de type L3S. Les palplanches s'enclenchent sur les tubes au moyen de raccord de type L11 soudés de part et d'autre de chaque tube. La photo 1 montre un morceau de rideau mixte en fin de battage.

Le battage de ces éléments a été conduit pour la majeure partie depuis une barge de travail équipée d'une grue de 120 t. Un guide de battage spécifique permettant de travailler sur trois travées à la fois a été construit et les battages ont été réalisés au moyen d'un vibrofonceur et d'un mouton hydraulique de type IHC S70.

Quelques mètres avant la fin du battage de chaque pieu, la cote du terrain à l'intérieur du pieu était vérifiée. Une hauteur de 3 m de pieu au minimum devait être armée et bétonnée pour reprendre les efforts de la poutre de couronnement. En cas de remontée d'un bouchon de sol au-delà de ces 3 m, le pieu était curé jusqu'à cette cote au moyen d'une benne à pieu.

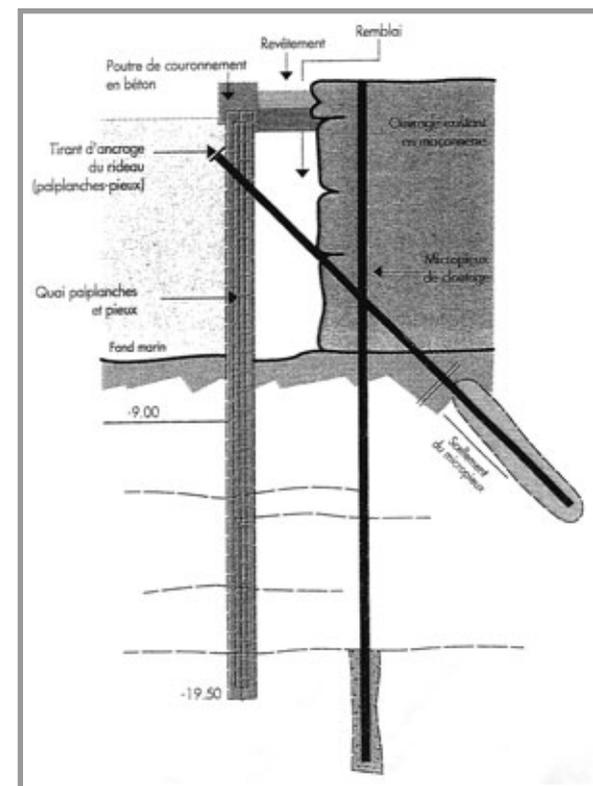
Avant la reprise du battage, un fourreau métallique de réservation incliné à 45° traversant le tube est soudé. Cette opération est nécessairement faite à ce moment là, dans la mesure où le niveau des têtes de micropieux sont sous l'eau. La photo 2 montre le battage d'un pieu au mouton hydraulique dans sa phase finale. On remarquera la réservation du micropieu.

Les pieux une fois amené à leur cote finale étaient armés et bétonnés.

Des micropieux ancrés dans la tuffite raide assu-



Photo 2
Atelier de battage
mouton hydraulique
Hydraulic pile driver



Coupe sur le quai des Annexes
Section on the Quay des Annexes

rent la stabilité du mur. Ils ont été forés à partir d'un ponton pour la tranche ferme, mais cette méthode s'étant avérée peu pratique, la suite a été réalisée à partir d'une plate-forme provisoire métallique fixe.

Les micropieux ont été forés sous boue à l'abri d'un tubage provisoire là où nécessaire. Ils ont fait l'objet d'une injection de type IRS (répétitive et sélective). Les tubes constituant les micropieux ont un diamètre extérieur de 139,7 mm et une épaisseur de 13,7 mm et sont fabriqués en nuance E760. La longueur des micropieux est de 36 m environ. Le facteur dimensionnant de ces micropieux a été le calcul au séisme.

Une fois les injections terminées, les micropieux ont été bloqués en tête au moyen d'un écrou et d'une pièce adaptée pour reprendre l'angle entre le pieu et le micropieu. Des améliorations ont été apportées sur ce point entre la tranche ferme et la tranche conditionnelle. En tranche ferme, le passage du fourreau était découpé dans le tube sur chantier au chalumeau, en tranche conditionnelle, les réservations ont été faites par oxycoupage en usine avec mise en place d'un gabarit.

Pour les chaises servant d'assise à l'écrou du micropieu, elles étaient mécano-soudées en tranche

Photo 3
Vue aérienne
du quai des Annexes
Aerial view
of Quai des Annexes



bilités du quai existant construit en partie en blocs mégalithiques sur 105 m et en palplanches sur 25 m, un débouché de ravine séparant les deux parties d'ouvrage. Le déjointement des blocs mégalithiques et des affouillements devant les blocs de fondation affectaient la stabilité du quai. Enfin le niveau de fondation du quai situé à - 7,00 m interdisait de porter le tirant d'eau à - 9,00. Il fallait donc procéder au rempiètement du quai sur 137 m afin de porter la cote de dragage à la cote - 9,00.

Cette opération de 20 millions a été financée par :

- ◆ la Chambre de Commerce et d'Industrie de la Martinique à hauteur de 9,6 millions ;
- ◆ l'Europe (financement FEDER) à hauteur de 6,4 millions ;
- ◆ le reliquat des crédits de la 1^{re} phase pour le solde.

Au droit des blocs mégalithiques le rempiètement est réalisé au moyen d'un rideau mixte constitué cette fois-ci d'une alternance de caissons en palplanches de type CU 32.2 (composés de deux palplanches PU 32) en alternance avec des séries de trois palplanches de type PU 32. Le pied des caissons est ancré dans la tuffite raide (cote - 21.5) et le pied des palplanches se trouve dans la tuffite altérée (cote - 15,5 m). La tête du rideau mixte est encastrée dans la poutre de couronnement aux cotes +1,0 pour les caissons et +0,2 pour les palplanches.

Les micropieux identiques à ceux du quai des Annexes sont positionnés différemment. Ils se trouvaient positionnés au droit des pieux de 1016 mm alors que pour le quai des Grands Cargos, ils sont distribués selon une trame qui n'est pas un multiple de l'espacement des caissons (4,5 m contre 2,4 m). Le niveau de tête de micropieu est également différent puisqu'ils ont été remontés pour être noyés dans la poutre de couronnement.

La poutre de couronnement en béton, qui fait office de lierne fait 1,1 m de large et 2 m de haut. La liaison entre la poutre de couronnement et l'ancien quai est assurée par des massifs en béton de section trapézoïdale au droit des défenses et des bollards et par une dalle de 0,3 m d'épaisseur en béton coulé en place sur la partie remblayée. La dalle est équipée de trappes pour pouvoir recharger le remblai en cas de tassement.

Au droit des anciennes palplanches, le rempiètement est réalisé en partie haute par des éléments béton préfabriqués et en partie basse par un rideau sous-marin métallique.

Les éléments préfabriqués en forme de L renversé de 2 m de large pour une épaisseur de 0,5 m sont clavetés sur des massifs en béton de 2 x 2 m au nombre de cinq, portés par des pieux de 863,6 mm de diamètre (épaisseur 20 mm) en acier de nuance E 36 espacés de 7,56 m et descendus à la cote - 21,5.

Le rideau sous-marin est un rideau mixte composé



ferme et moulées en fonderie pour la tranche conditionnelle. La photo 3 montre les travaux de la tranche ferme du quai des Annexes avec l'atelier de battage nautique, le dragage en arrière-plan et l'atelier de forage des micropieux sur la gauche.

Une protection cathodique a été mise en œuvre afin d'assurer la protection contre la corrosion du rideau mixte et des micropieux.

La poutre de couronnement a ensuite été construite en deux étapes : pose d'éléments préfabriqués suivie d'un clavage par la partie inférieure de la poutre et construction traditionnelle pour la partie supérieure, le niveau bas de la poutre étant sous l'eau.

Des micropieux inclinés à 30° et de 45 m de long ont été installés, avec une tête noyée dans la poutre de couronnement pour reprendre les efforts amenés par les bollards eux-mêmes fixés sur cette poutre. Enfin l'espace entre le rideau mixte et l'ancien quai a été remblayé en sable.

De même, le fond de darse a été remblayé avec du sable de dragage. Afin d'assurer un bon comportement au séisme ce sable a été compacté par vibration sur toute l'épaisseur du remblai. Ce compactage a été assuré par un atelier comprenant une grue permettant de manipuler une paire de palplanches soudées dos à dos et mises en vibration au moyen d'un vibrofonneur de type PTC 13H. L'évolution des caractéristiques mécaniques de ces sables a été suivie au moyen de sondages pressiométriques.

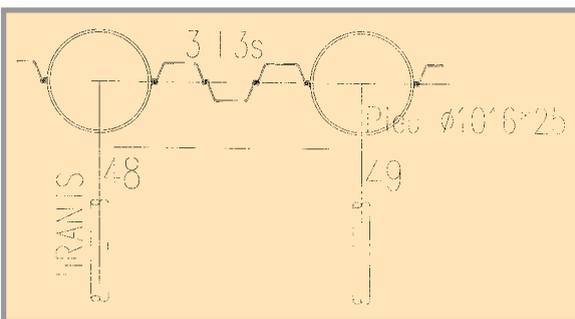
Les travaux de finition comportaient les équipements de quai : bollards de 50 t, défenses Seibu, échelles de sauvetage en inox, approvisionnement en eau et réfection des enrobés du terre-plein.

Un dragage à la cote - 9,00 a complété les travaux de génie civil pour rendre le quai opérationnel.

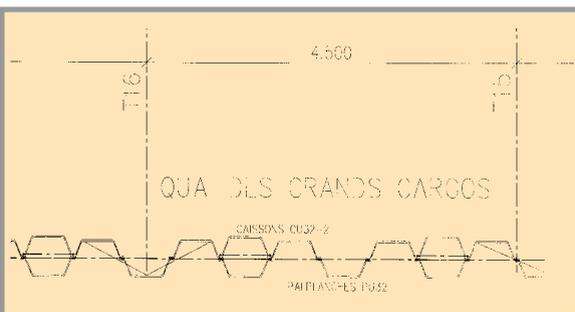
■ LE QUA DES GRANDS CARGOS

Les travaux de réparation et de rempiètement du quai des Grands Cargos permettront dans un premier temps d'accueillir des grands cargos de commerce puis, dans le futur des paquebots de grande taille (180 m).

Ils s'avéraient nécessaires par l'état et les possi-



Vue en plan du rideau mixte
du quai des Annexes
Plan view of the composite curtain
of the Quai des Annexes



Vue en plan du rideau mixte
du quai des Grands Cargos
Plan view of the composite curtain
of the Quai des Grands Cargos

de caissons et de palplanches, (cf. ci-dessus) et liaisonné aux tubes au moyen de raccords L11. La tête du rideau est à la cote - 6,0, le pied à - 21,5 pour les caissons et à - 15,5 pour les palplanches. Des enrochements de 5 à 50 kg ont été mis en place sur la risberme entre le quai en palplanches et le rideau sous-marin. La liaison avec le quai existant se fait au moyen de chevilles chimiques et tige filetée inox.

Comme pour le quai des Annexes une protection cathodique a été installée pour protéger les ouvrages métalliques y compris les micropieux contre la corrosion.

Les équipements de quai comportent également des défenses de type Seibu NW 88 H1200 N1 placées horizontalement et sept bollards de 50 t ainsi que trois échelles de sauvetage en inox. Les enrobés des terre-pleins seront refaits en fin de travaux dans cette zone.

Les travaux sont à ce jour pratiquement achevés puisque seule la tranche conditionnelle du quai des Grands Cargos reste à exécuter et il n'est pas rare de voir deux paquebots de croisière faire escale en même temps sur les quais du secteur Centre.

Une nouvelle phase de travaux vient de débuter dans le port avec le lancement des travaux du nouveau terminal conteneurs de la pointe des Grives.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitre d'ouvrage

Etat

Maitre d'œuvre

DDE Martinique - Service Ports et Aéroports

Conseil du maître d'œuvre

Port Autonome de Bordeaux

Entreprise

Balineau SA

Sous-Traitants

- Armatures de Guadeloupe (armatures)
- Joseph Rose (armatures)
- Bachy Fondaco Caraïbes (micropieux)
- Bac Bergsoe (protection cathodique)
- Technipipe (protection cathodique)
- Caraïb (enrobés)
- Sagua (dragages et fourniture sable)
- Solma (parachèvement tubes)

Principaux fournisseurs

- Batimat (béton)
- Europrofil (palplanches et caissons)
- Haine St-Pierre (bollards)
- Seibu (défenses d'accostage)
- Sumitomo (défenses d'accostage)
- Stad (tubes)

ABSTRACT

Port of Fort-de-France. Redesigning the centre sector

L. Crebier, J.-Y. Coutures, H. Duplaine

The port of Fort-de-France, one of the main French ports for cruising and container ships, was reorganised by assigning sectors to each type of activity. The centre sector which will initially be dedicated to commerce and cruising and then exclusively to cruising underwent extensive works. These works covered two quays, the "Quai des Annexes" and the "Quai des Grands cargos." These quays were strengthened at their base and extended by means of composite curtains made up of tubes or caissons or sheetpiles anchored by means of micropiles inclined 45°. These curtains were installed from a floating plant using vibration sinking and hydraulic ram driving. Erosion protection was provided by a cathodic system. Dredging made it possible to bring the draught to 9,00 m.

DEUTSCHES KURZREFERAT

Fort-de-France. Die Neugestaltung des Zentrumsbereichs

L. Crebier, J.-Y. Coutures, H. Duplaine

Der Hafen von Fort-de-France, einer größten französischen Jacht- und Containerumschlaghäfen, hat eine Neuorganisation in Form der Zuordnung von Sektoren zu den verschiedenen Tätigkeiten vorgenommen. Der zentrale Sektor wird zunächst Handels- und Jachtaktivitäten aufnehmen, um später ausschließlich für Kreuzfahrtschiffe genutzt zu werden; hier sind umfangreiche Baumaßnahmen durchgeführt worden. Die Arbeiten fanden an den zwei Kais für Nebenanlagen und für große Frachtschiffe statt: Sie sind neu gepackt und durch Kombikonstruktionen aus Rohren oder Kästen und Spundwänden, die mittels um 45° geneigten Micropiles verankert sind, verlängert worden. Diese Strukturen wurden von einer schwimmenden Werkstatt aus mit Hilfe der Vibroeintreibtechnik und einer hydraulischen Pfahlramme installiert. Der Korrosionsschutz erfolgt kathodisch. Durch Ausbaggern konnte der Tiefgang auf 9,00 m erhöht werden.

RESUMEN ESPAÑOL

Puerto de Fort-de-France. El reacondicionamiento del sector centro

L. Crebier, J.-Y. Coutures y H. Duplaine

El puerto de Fort-de-France - que es uno de los principales puertos franceses en cuanto a las actividades de viajes de crucero y de los contenedores - se ha reorganizado asignando los sectores para cada tipo de actividad. El sector Central, que se habrá de dedicar, en una etapa preliminar, al comercio y a los viajes de crucero y, más adelante, exclusivamente a esta última actividad, ha dado lugar a importantes obras.

Estas obras se han referido a dos muelles: el muelle de los Anexos y el muelle de los Grandes cargueros. Estos muelles se han reforzado en cuanto a sus cimientos y ampliados por medio de cortinas mixtas compuestas por tubos o cajones y de tablestacas ancladas por medio de micropilotes inclinados a 45°. Estas cortinas se han instalado por medio de un taller flotantes utilizando la hinca vibratoria y la hinca por percusión de un martinete hidráulico. La protección contra la corrosión se ha obtenido por aplicación de una protección catódica. Las operaciones de dragado han permitido elevar el calado a 9,00 m.

Elargissement de l'écluse

Conception et point de vue du

Les travaux d'élargissement et d'approfondissement de l'écluse du bassin de commerce du port de Dieppe ont été engagés fin 1996. Ils ont consisté à modifier profondément un ouvrage existant, pour porter la largeur de la passe d'accès au bassin de commerce du port de 23 à 28 m, et l'approfondir de 2,50 m. Ces travaux ont pratiquement été réalisés sans interrompre le trafic portuaire. Le procédé d'exécution employé résulte d'une variante technique mise au point par le groupement d'entreprises Quillery - Solétanche - Eiffel. La nouvelle écluse en service actuellement comporte deux portes métalliques roulantes fonctionnant dans un ouvrage de génie civil qui a été préfabriqué dans la forme de radoub du port, amené par flottaison et échoué juste en aval de l'ancien ouvrage.

LE PROJET

Historique de l'ouvrage

Le bassin de commerce du port de Dieppe a été creusé en 1882. Il comportait à l'origine deux parties, dont l'accès était régulé par deux ouvrages successifs : l'"écluse d'aval" ouvrant sur le bassin de mi-marée, et "l'écluse d'amont" sur le bassin de commerce proprement dit. Le bassin de mi-marée, d'un volume trop important, ne fut jamais exploité comme un sas. En 1970, l'écluse d'amont était démolie.

L'écluse d'aval offrait dans sa configuration initiale une passe de 18 m de large. D'importants travaux réalisés en 1950 portèrent sa largeur à 23 m. Un seul jeu de portes busquées, manœuvré au moyen de cabestans, permettait alors l'accès au bassin. L'écluse fut modernisée en 1972, avec la mise en service d'un jeu supplémentaire de portes busquées, manœuvré par des vérins hydrauliques. Les anciennes portes étaient conservées en secours.

L'activité commerciale du port de Dieppe portée par le trafic fruitier – 220 000 t en 1998 sur un trafic total hors transmanche de 650 000 t –, se trouvait ces dernières années menacée par l'évolution des dimensions des navires réfrigérés. Il devenait impératif de porter la largeur de la passe à 28 m et de l'approfondir de 2,50 m.

Conception du projet

La modification de l'écluse est mise à l'étude en 1995 par la Direction Départementale de l'Équipement de Seine-Maritime - Service Territorial de Dieppe, avec l'appui technique des Ports Autonomes

du Havre, pour les ouvrages mobiles, et de Rouen pour le génie civil.

Une solution de base est définie. Elle consiste à élargir l'ouvrage symétriquement par rapport à l'axe de la passe existante, et à mettre en service deux jeux de portes busquées.

L'exploitation portuaire est posée comme une contrainte forte pour la réalisation des travaux. En effet, la fermeture du bassin de commerce ne doit pas excéder deux semaines pendant toute la durée du chantier.

Suite à l'appel d'offres, c'est finalement une variante large mise au point par le groupement d'entreprises Quillery-Solétanche-Eiffel qui est retenue. La solution consiste à juxtaposer en aval de l'ouvrage existant deux portes métalliques roulantes dans un génie civil préfabriqué, et à élargir la passe du côté ouest (figure 1).

Le financement de cette opération s'élevant à 132 660 000 F TTC nécessite de recourir à des fonds d'origines multiples : Etat, Europe, Chambre de Commerce et d'Industrie de Dieppe et usagers du port, Région de Haute Normandie et Département de la Seine-Maritime, Ville de Dieppe.

DÉROULEMENT DES TRAVAUX

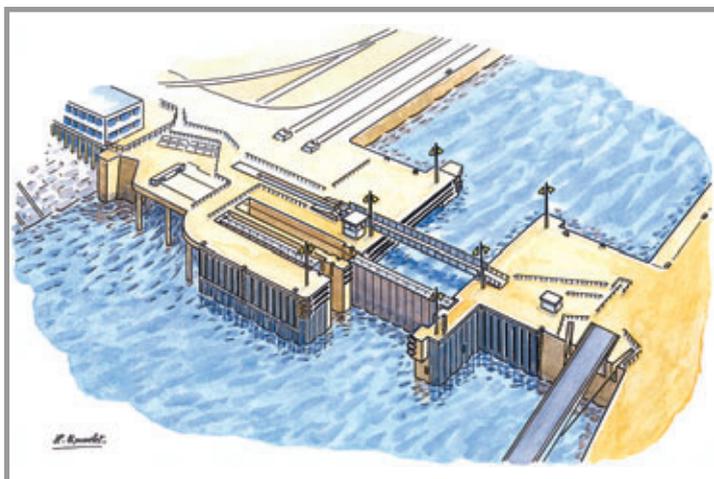
Le délai contractuel d'exécution des travaux est fixé à 21 mois. L'ordre de service est notifié aux entreprises le 12 août 1996.

Première étape

Sur le site : rempiètement des quais existants

La première étape du chantier consiste à rempiéter les quais en retour aval de l'écluse existante. En effet, la mise en place du génie civil préfabriqué nécessite de draguer une assise à la cote marine – 6,50. Or les anciens quais en retour sont fondés environ à la cote marine – 2,50. Dans un premier temps, un rideau de palplanches est battu au pied des anciens quais. Puis, afin d'assurer leur stabilité avant dragage, on doit ancrer les quais dans le terrain. Avant le démarrage des travaux, l'entreprise Solétanche Bachy France propose en définitive d'ancrer les quais aval aux quais amont de l'écluse. Pour cela, chaque forage sera exécuté depuis des plates-formes installées sur les quais amont, et devra – après avoir traversé de part en part le quai amont et le remblai existant sur une trentaine de mètres –, atteindre le quai aval à une

Figure 1
Le projet de l'écluse -
Solution variante
du groupement d'entreprises
The design of the lock -
Variant solution
of the consortium



du port de Dieppe maître d'œuvre

Dominique Etienne

RESPONSABLE
SUBDIVISION ETUDES
ET TRAVAUX MARITIMES
DDE de Seine-Maritime -
Service Territorial de Dieppe



cote précise déterminée par la résultante des efforts de poussée des terrains. Les 54 forages sont exécutés sous tubage. Chacun est contrôlé à l'inclinomètre avant la mise en place et le scellement des tirants à câble. Mais, lors de la mise en tension des premiers tirants, des déplacements anormaux sont constatés en tête. Quelques sondages exécutés dans les quais amont montrent que ces ouvrages massifs de la fin du XIX^e siècle, qui sont apparemment sains, sont en fait constitués d'un béton assez faiblement dosé en ciment, comportant des galets, et des absences locales de liant. Il est donc décidé de conforter ces anciens ouvrages au moyen de barres verticales précontraintes scellées en partie basse de quai, de façon à interdire une éventuelle amorce de rupture. De plus, afin de se prémunir contre une faiblesse structurelle localisée du quai, on exécute des longrines en béton armé qui reprennent les têtes de tirants trois par trois.

Le dragage et réglage de la couche d'assise

Après l'achèvement des rempiètements, 20 000 m³ de matériaux sont dragués à l'emplacement ultérieur du caisson préfabriqué. Puis, la couche d'assise du caisson est réalisée. Il s'agit d'une plate-forme de 74,50 m par 18,22 m constituée d'un remblai en 20/40. Ce remblai, d'une épaisseur minimale de 0,20 m doit permettre d'atteindre l'altitude de réglage de - 6,00 cote marine dans une tolérance de +/- 2 cm. Pour cela, des cadres métalliques comportant des pieds d'appui réglables (étais à vis) sont positionnés au fond, ajustés à la cote voulue, puis immobilisés par soudure. Le remblai 20/40 est approvisionné par chaland et mis en place dans les cadres à la benne preneuse. Les phases de remplissage et de réglage à la cote sont assurées avec l'assistance permanente d'une équipe de sca-phandriers.

Parallèlement, dans la forme de radoub du port : préfabrication du génie civil

Pendant que les travaux se déroulent sur le site de l'écluse, la préfabrication du caisson en béton armé destiné à accueillir les deux portes roulantes est engagée (photo 1).

L'entreprise Quillery commence en novembre 1996, après les essais de convenance sur les bétons, une première phase de préfabrication dans la forme de radoub du port. Une plate-forme de préfabrication constituée d'un béton de propreté coulé sur un remblai en grave 0/100 est établie au fond de l'ouvrage. Le génie civil de la nouvelle écluse a

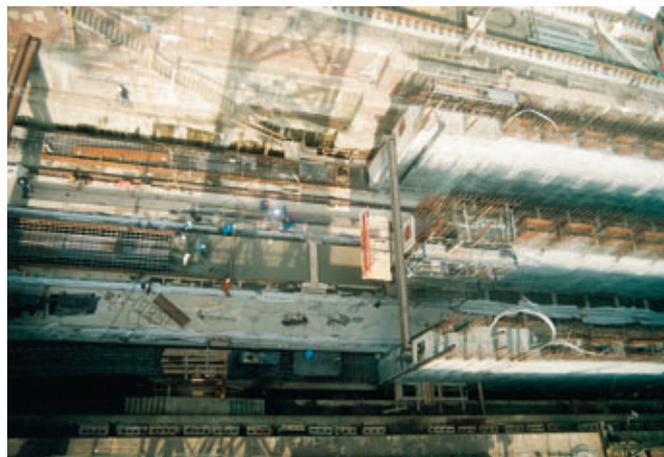


Photo 1
Le caisson en cours
de préfabrication
dans la forme de radoub

*The caisson
during prefabrication
in the dry dock*

pour dimensions en plan 73,25 m par 16,50 m. Il se compose d'un radier, qui supporte à l'est deux enclaves pour les portes roulantes, et à l'ouest la zone de passe qui sera empruntée par les navires. La tête ouest du caisson accueille par ailleurs les aqueducs des vannes qui réguleront le niveau d'eau du bassin de commerce. Les deux portes se déplaceront longitudinalement sur les rails scellés sur le radier du caisson.

En position écluse ouverte, elles se rangent dans les enclaves. Ces enclaves pourront le cas échéant être batardées et mises à sec pour des opérations de maintenance sur les portes. En position écluse fermée, l'une des deux portes prend appui dans la passe sur le caisson (tête ouest, extrémité de voile d'enclave, seuil inférieur) sous l'effet de la poussée hydrostatique. Le caisson préfabriqué est destiné à être échoué en aval de l'écluse existante à la cote marine - 6,00. La préfabrication dans la forme de radoub consiste à couler le radier, les voiles amont et aval ainsi que la tête ouest jusqu'à la cote marine de projet 4,50. Le voile Est est coulé jusqu'à la cote marine de projet 7,60 de façon à équilibrer l'ouvrage en flottaison pour son transfert. Le tirant d'eau est optimisé en créant des évidements au niveau du radier dans la zone d'enclaves ainsi que dans les voiles.

La préfabrication du caisson ne peut alors plus être poursuivie dans la forme de radoub dont le seuil limite le tirant d'eau à un maximum de 7,50 m, en fonction de l'amplitude des marées. Le caisson est alors préparé pour sa mise en flottaison : fermé au niveau de la passe par un rideau de palplanches et entièrement butonné. Deux essais de mise en eau de la forme de radoub permettent de contrôler l'étanchéité du caisson ainsi que son tirant d'eau

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Palplanches : 720 t
- Béton : 10 000 m³
- Armatures : 1 100 t
- Remblai en graves de mer : 5 200 m³
- Démolition : 5 300 m³
- Deux portes métalliques roulantes pesant chacune environ 350 t et actionnée par un treuil électrique

Photo 2
L'échouage
du caisson
*Sinking
the caisson*

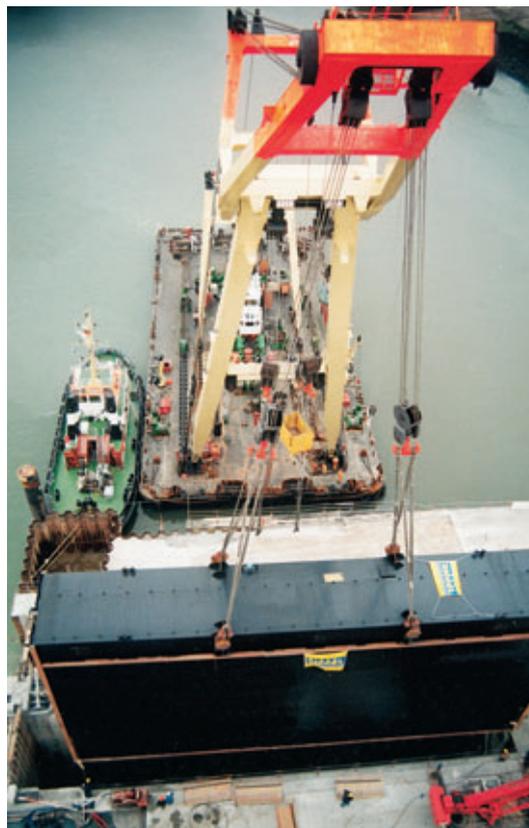
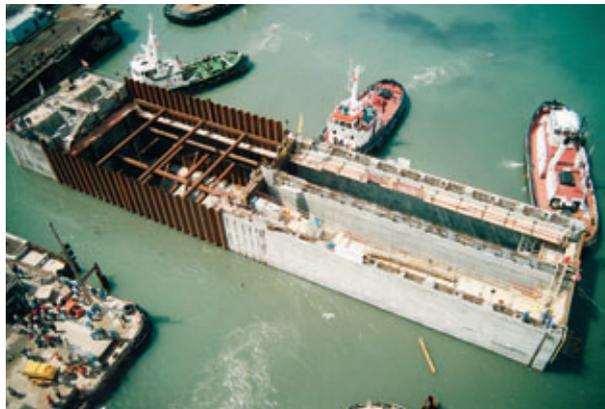


Photo 3
La mise en place des portes
Installing the doors

Photo 4
La démolition du bajoyer ouest,
à l'explosif
*Demolition of the west side-wall
by blasting*



et son assiette. Le 7 mai 1997, après quelques reprises sur l'étanchéité des palplanches, cinq remorqueurs extraient de la forme de radoub ce "navire" qui pèse 9000 t. Par mesure de sécurité, une plate-forme d'échouage a été préparée par la drague dans l'arrière-port, au cas où la manœuvre ne pourrait pas être exécutée en une seule marée. Il ne sera pas nécessaire d'y recourir puisque les remorqueurs entraînent directement, comme prévu, le caisson dans le bassin de commerce, où l'on engage la deuxième phase de préfabrication. Il faut plus d'un mois pour achever, sur le caisson maintenu en flottaison au quai de Québec, le coulage des voiles jusqu'à la cote marine de projet 9,80. Le caisson pèse environ 11 000 t, pour un tirant d'eau de 9,50 m lorsqu'il est à nouveau, le 23 juin 1997, pris en charge par les remorqueurs qui l'amènent sur son lieu d'échouage.

En atelier : fabrication des parties mobiles de l'ouvrage (portes, vannes)

Pendant ce temps, les portes métalliques roulantes, leurs mécanismes de manœuvre, ainsi que les vannes de la future écluse sont en fabrication dans les usines d'Eiffel Construction Métallique et de ses sous-traitants.

Deuxième étape : de l'échouage du caisson à l'installation des portes

La finition du réglage de la couche d'assise et les derniers contrôles ayant été opérés, le caisson préfabriqué est échoué en place à la marée descendante (photo 2).

Pendant les quinze jours suivants, l'accès au bassin de commerce est neutralisé par le chantier. Il s'agit en effet de démonter les rideaux de palplanches et les butons mis en place pour la flottaison du caisson, de remplir de béton les évidements du radier et des voiles, de monter et régler les rails des voies de roulement des portes. Avant l'ouverture de la passe, effective dès le 9 juillet 1997, deux ducs d'Albe provisoires sont battus en aval du caisson afin de le protéger au mieux pendant la suite du chantier des risques de chocs de navires. En phase définitive, le caisson sera protégé dans la zone d'enclave, par un massif de remblai main-

tenu par un rideau d'enceinte en palplanches et une défense tournante, et au niveau de la tête ouest par une autre défense tournante. Sa stabilité dans toutes les configurations de service sera assurée au moyen de 21 tirants actifs verticaux précontraints à 100 t ancrés dans le sol de fondation.

L'élargissement de la passe est réalisé du côté ouest par une paroi moulée qui découpe le bajoyer existant. Ces travaux sont exécutés alors que l'ancienne écluse est toujours en exploitation, ce qui nécessite un renforcement préalable du bajoyer au moyen de barres verticales précontraintes, et une surveillance continue de ses déplacements. Pour cela, un théodolite vise périodiquement différents points du bajoyer. Les mesures sont analysées automatiquement, et une alarme doit se déclencher lorsque les mouvements du bajoyer dépassent l'amplitude des mesures d'étalonnage (5 mm).

Du côté Est, le bajoyer est renforcé par des tirants verticaux en prévision de l'approfondissement ultérieur de la passe.

Le 21 septembre 1997, les deux portes métalliques roulantes sont amenées sur un ponton et mises en place au moyen d'une bigue flottante, directement sur leurs chariots qui ont été positionnés au fond des enclaves. Les systèmes de commande et de manœuvre de la nouvelle écluse sont ensuite installés (photo 3).

Après les essais de mise en service (portes, vannes, capteurs de niveau d'eau et superviseur), l'ouvrage est réceptionné avec réserves le 1^{er} février 1998. La prise de possession des nouvelles portes permet d'enclencher les phases suivantes du chantier.

Troisième étape : démontage de l'ancienne écluse et élargissement de la passe

Les anciennes portes sont démontées. Les tirants d'ancrage et la poutre de couronnement de la paroi moulée sont réalisés. La démolition du bajoyer ouest est exécutée au BRH pour la partie supérieure, puis par dix tirs successifs à l'explosif pour le reste (photo 4).

Quatrième étape : approfondissement de la passe

L'approfondissement de la passe est engagé au mois d'août 1998. Il s'agit de démolir sous eau le radier de l'ancienne écluse entre les cotes marines - 1,00 et - 3,50. Ce radier comporte des profilés métalliques de structure du caisson datant de 1880 en dessous de la cote marine - 2,60. C'est pourquoi les entreprises engagent en première phase la démolition jusqu'à - 2,60, avec un brise-roche hydraulique et une pelle hydraulique sur un ponton. Les finitions sont exécutées avec l'assistance de



Photo 5
L'ouvrage réalisé
en service

*The structure
in service*

plongeurs. Ces travaux sont réalisés pendant la fermeture de la passe, le matériel étant replié à chaque ouverture des portes pour permettre la circulation des navires.

■ LES TRAVAUX RESTANT À ENGAGER

Aujourd'hui, la nouvelle écluse est en service avec sa largeur définitive de 23 m. L'approfondissement de la passe à la cote - 2,60 est terminé. Il reste à engager l'approfondissement à la cote - 3,50 (photo 5).

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitre d'ouvrage

Etat

Maitre d'œuvre

Direction Départementale de l'Équipement de la Seine-Maritime - Service Territorial de Dieppe

Groupeement d'entreprises

- Société générale d'entreprises Quillery
- Solétanche Bachy France
- Eiffel Construction Métallique

Principaux sous-traitants

- Abeilles : remorquage du caisson
- ATD : démolition du bajoyer
- Borifer : protection anticorrosion des ouvrages métalliques
- Cefa : armatures du béton armé
- Draflumar : dragages
- EMCC : battage de palplanches, approfondissement de la passe
- ETHM : défenses tournantes
- Paridro : interventions plongeurs, réglage de l'assise du caisson

Fournisseurs

Unibéton : béton B40 (plastique, très plastique, colloïde)

ABSTRACT

Lock widening at port of Dieppe. Design and viewpoint of the prime contractor

D. Etienne

The works for the widening and deepening of the lock of the commercial basin of the port of Dieppe were undertaken at the end of 1996. They include the thorough modification of an existing structure, to increase the width of access paths to the port's commercial basin from 23 to 28 m, and increase its depth by 2,50 m. These works were completed practically without any interruption to port traffic. The execution process used results from a technical variant developed by the consortium of Quillery - Solétanche - Eiffel. The new lock in service at the present time has two rolling steel doors operating within structure which was prefabricated in the port's dry dock, floated and then sunk just upstream of the old structure.

DEUTSCHES KURZREFERAT

Die Verbreiterung der Schleuse des Hafens von Dieppe. Konzept und Standpunkt des Bauherrn

D. Etienne

Die Arbeiten zur Verbreiterung und Vertiefung der Schleuse des Handelsbezirks des Hafens von Dieppe sind Ende 1996 in Angriff genommen worden. Sie bestanden in einer tiefgreifenden Veränderung der bestehenden Anlagen, um die Breite der Zufahrtsrinne zum Handelsbezirk von 23 auf 28 m und den Tiefgang um 2,50 m zu erhöhen. Die Maßnahme wurde praktisch ohne Unterbrechung des Hafenverkehrs durchgeführt. Das eingesetzte Verfahren ist eine technische Variante, die von der Arbeitsgemeinschaft der Unternehmen Quillery - Solétanche - Eiffel ausgearbeitet wurde. Die inzwischen in Betrieb befindliche neue Schleuse beinhaltet zwei Stahlschütze, die in einer Bauanlage auf Rollen verfahren werden. Der Bauanteil wurde im Trockendock des Hafens vorgefertigt, schwimmend herantransportiert und genau hinter dem alten Bauwerk abgesetzt.

RESUMEN ESPAÑOL

Ensanchamiento de la esclusa del puerto de Dieppe. Concepto y punto de vista de la entidad contratante

D. Etienne

Las obras de ensanche y de profundización de la esclusa de la dársena de comercio del puerto de Dieppe fueron emprendidos hacia fines de 1996. Estas obras han consistido en modificar profundamente una estructura existente, para elevar la anchura de la puerta de acceso a la dársena de comercio del puerto de 23 a 28 m y obtener una profundidad de 2,50 m. Estas obras se han llevado a cabo, prácticamente, sin necesidad de interrumpir el tráfico portuario. El procedimiento de ejecución empleado se deriva de una variante técnica desarrollada por el grupo de empresas constructoras Quillery - Solétanche - Eiffel. La nueva esclusa, actualmente en servicio, consta de dos puertas metálicas rodantes, que funcionan en una estructura de ingeniería civil y que se han prefabricado en el dique de carenas del puerto, transportadas por flotación y varadas inmediatamente en la parte posterior de la antigua esclusa.

Elargissement de l'écluse

La réalisation des travaux

Les activités traditionnelles du port de Dieppe s'articulent essentiellement autour de deux pôles : la liaison transmanche Dieppe-Newhaven à partir de l'avant-port aménagé en 1992 et l'activité fruitière, notamment le trafic bananier.

Le port de Dieppe ne pouvant pas accueillir les quatre porte-conteneurs réfrigérés mis en service par la Compagnie Générale Maritime, le trafic bananier en provenance des Antilles a été transféré au port du Havre en 1981. Depuis cette date, et à un niveau très inférieur à ce qu'il était auparavant, le volume des trafics fruitiers a peu évolué. La mise en œuvre dans de bonnes conditions de la réforme de la manutention portuaire a permis un nouvel élan, qu'il convient de pérenniser en adaptant les équipements et les ouvrages portuaires aux caractéristiques des navires.

Les contraintes liées au tirant d'eau et surtout à la largeur de la porte d'entrée du bassin du Commerce constituent un handicap certain au développement des activités portuaires (photo 1).

Le projet d'élargissement et d'approfondissement de l'écluse vise à abaisser le seuil actuel de la cote - 1,00 m à - 3,50 m et à porter la largeur de la passe de 23 à 28 m. Cette opération a pour objectif de maintenir et de pérenniser l'activité liée au trafic fruitier dans le port de Dieppe.

Photo 1
Entrée d'un cargo
avant élargissement

Entry of a cargo
before widening



■ DESCRIPTION (figure 1)

L'ancienne écluse, datant du siècle dernier, fonctionnait au moyen de portes busquées, situées du côté amont (portes principales) et dans la passe (portes de secours).

Dans la nouvelle configuration, c'est un jeu de deux portes métalliques roulantes ① qui permet l'ouverture et la fermeture de l'écluse élargie à 28,00 m. Ces portes coulisent dans un caisson en béton armé, placé juste en aval de la passe existante.

Afin de ne pas perturber le trafic maritime, ce caisson a été préfabriqué partiellement dans la forme de radoub du port de Dieppe ② puis en flottaison dans le bassin du Commerce ② bis avant d'être échoué sur site puis terminé.

Il représente, vue de dessus, un rectangle de 73 m par 16,50 m sur lequel on distingue, d'une extrémité à l'autre :

- ◆ la zone de logement des portes composée de deux enclaves, d'une longueur de 37 m, 16,50 m de hauteur et 6,00 m de largeur chacune ;
- ◆ la zone de passe, constituée d'un radier en béton armé de 2,50 m d'épaisseur (longueur 28,00 m) ;
- ◆ le massif ouest d'appui des portes s'élevant en hauteur à 16,50 m sur une longueur de 8,00 m, dans lequel a été réalisé l'aqueduc d'une section de 4,00 m² permettant le réglage du niveau du bassin par l'intermédiaire de vannes ⑦.

En position "écluse fermée", l'une des deux portes obture la passe. En position "écluse ouverte", les deux portes sont chacune dans leur logement. Préalablement à l'échouage du caisson sur le site, il a fallu draguer les fonds à la cote - 6,50 et régler son assise avec précision, après avoir ancré, consolidé et remplié les quais au moyen de tirants et de palplanches.

Une fois le caisson positionné et échoué, un quai composé d'un rideau de palplanches en PU 32 puis remblayé en galet est mis en place pour protéger

l'ouvrage contre les chocs accidentels de navires ③ (20 000 tonnes).

Une plate-forme sur pieux au-dessus du débouché de la rivière de l'Arques, accueille les poulies et les treuils ④ permettant les manœuvres de portes. Après mise en service de la nouvelle écluse, la passe actuelle est élargie, approfondie et consolidée ⑤.

La nouvelle passe est équipée à chaque angle de défenses tournantes ⑥, une première pour un port français.

■ LE SITE ET SES CONTRAINTES

Outre le traditionnel travail à la marée pour lequel les équipes spécialisées de la SGE Quillery TP/GC sont coutumières, l'une des difficultés majeures du chantier fut d'exécuter certaines phases de travaux tout en maintenant l'exploitation portuaire, une contrainte imposée au marché. Pour surmonter cette difficulté, l'entreprise a dû adapter ses méthodes en ayant recours aux éléments préfabriqués, notamment pour les poutres de couronnement sur les bajoyers existants. Ceci afin d'écourter les travaux en place et minimiser ainsi les risques d'exposition des ouvrages en construction aux chocs éventuels de cargos de taille importante (160 m de long et 21,50 m de large) par rapport à l'écluse existante (23,00 m de longueur).

De plus, le niveau mini du bassin (+ 6,00) pour garantir la stabilité des ouvrages existants a nécessité la présence d'équipes de plongeurs pour les travaux d'aménagement des bajoyers.

Par ailleurs, ce sont à la fois les coefficients de marée (surtout) et les niveaux de seuils fixes de la forme de radoub et de l'écluse existante qui ont permis de déterminer précisément les dates de remorquage mais aussi la géométrie et le poids du caisson dans ses phases de préfabrication et, de ce fait, la programmation des autres phases de travaux. Seule, une période contractuelle de neutralisation de 15 jours du port de commerce a été réservée pour les opérations d'échouage, de lestage, de réglages des surfaces d'appui des portes sur le génie civil et de dépose des ouvrages provisoires, nécessaires aux flottaisons.

■ LES FONDATIONS

Pour la mise à la cote - 6,50 des fonds marins au droit de la souille d'échouage, il a fallu revoir la stabilité des quais existants.

du port de Dieppe

Philippe Seitz
DIRECTEUR RÉGIONAL TP
ÎLE-DE-FRANCE ET NORMANDIE
Quillery

Olivier Serrano
CONDUCTEUR DE TRAVAUX
Quillery

Alain Pigeon
DIRECTEUR TRAVAUX
Quillery

La solution retenue a consisté à exécuter 54 tirants passifs de 55 tonnes forés depuis le quai amont (nord) et scellés dans la maçonnerie du quai aval (sud), lui-même ancré à un rideau de palplanches de profil PU 32 + 3,50 à - 12,00 (photos 2 et 3). Dans la passe existante, l'élargissement à 28,00 m a pu être réalisé par l'exécution d'une paroi moulée d'épaisseur 1,00 mètre, fondée à - 14,00 CM et stabilisée par huit tirants actifs de 100 tonnes chacun côté ouest.

Du côté est, le bajoyer existant a été conservé et consolidé par 21 tirants actifs verticaux de 100 tonnes.

■ LA PRÉFABRICATION DU CAISSON

Dans la forme de radoub de Dieppe

Préalablement au démarrage de la construction du caisson, la forme de radoub a dû être préparée afin d'obtenir une surface plane de 18,00 m de largeur pour une emprise du caisson de 16,50 ml. Un remblai drainant en galet de granulométrie 20/40 sur lequel a été coulé un béton de propreté de 10 cm d'épaisseur, - perméable pour favoriser les arrivées d'eau sous le caisson au moment de sa mise en flottaison, recouvert d'un double polyane en interface avec le béton du caisson pour faciliter le décollement -, a composé l'assise de préfabrication.

Les conditions de sortie et de flottaison du caisson, à savoir un niveau de marée maximum de + 9,55 à la pleine mer, combiné à d'autres facteurs comme le tirant d'eau, le niveau du seuil de la cale, le niveau de l'assise de préfabrication, une garde "pied de pilote" et un timing de remorquage pour passer différents obstacles pendant le transfert ont limité le poids du caisson à 9000 tonnes.

Ainsi, les voiles en béton armé d'épaisseur 1,50 mètre ont été réalisés jusqu'à la cote + 4,50 CM maxi, soit 8 mètres au-dessus du radier (les 2/3 de leur hauteur en deux levées d'une seule longueur de 37,50 ml), avec la création d'évidements dans les voiles d'enclaves, radier d'enclaves et massif ouest permettant de réduire de 1500 tonnes le poids total et respecter les 9000 tonnes prévues, mais aussi d'équilibrer les moments d'une structure dissymétrique (photo 4).

La structure complète a été modélisée aux éléments finis en flottaison et en service, dans des

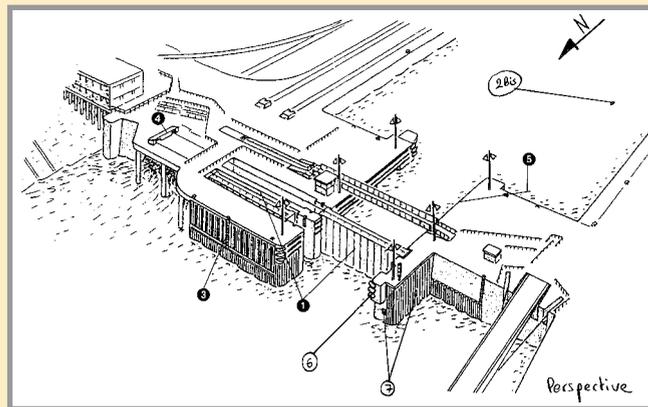


Figure 1
Plan de situation
Location

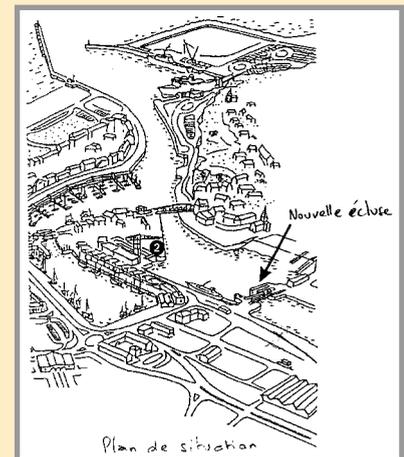


Photo 2
Exécution des tirants de rempliement de quai
Execution of quay base strengthening tie-rods

Photo Patrice Lefebvre



Photo 4
Structure du caisson évidée
Structure of empty caisson

Photo Patrice Lefebvre



Photo 3
Remplissement aval en palplanches
Upstream strengthening with sheetpiles

Photo Patrice Lefebvre



Photo Patrice Lefebvre

Photo 6
Préfabrication en flottaison du caisson amarré à quai (bassin)
Prefabrication-floating of caisson lashed at quay (basin)



Photo 5
Ferrailage d'une tête d'enclave
Reinforcement of a gate recess head

Photo Patrice Lefebvre



Photo Patrice Lefebvre

Photo 7
Transfert en flottaison
Existing passage



Photo Patrice Lefebvre

Photo 8
Passage du pertuis existant
Passage of existing sluic

Tableau I
Stabilité du caisson
Caisson stability

| Description | Ajout poids (t) | Lestage en eau (t) | | Poids | Tirant d'eau | Date | Ouverture écluse 2h av PM | | Ouverture écluse 1h av PM | |
|------------------------------------|-----------------|--------------------|------------------------------|-----------|--------------|----------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | | Eau massif ouest | Eau alvéolées radier enclave | | | | Hauteur d'eau fond à -3 | Hauteur d'eau sous caisson | Hauteur d'eau Fond à -3 | Hauteur d'eau sous caisson |
| - Sortie de la forme Arno | 9 056,80 | 0,00 | 0,00 | 9 056,80 | 7,32 | 07.05.97 | 9,80 | 2,48 | - | 2,48 |
| - Pose arm. voile central | 44,51 | 0,00 | 0,00 | 9 101,31 | 7,36 | 13.05.97 | 9,30 | 1,94 | - | 1,94 |
| - Pose coffrages ext. massif ouest | 11,50 | 0,00 | 0,00 | 9 112,81 | 7,37 | 16.05.97 | 3,20 | 1,83 | - | 1,83 |
| - Pose coffrages voile central | 34,50 | 0,00 | 0,00 | 9 147,31 | 7,40 | 20.05.97 | 9,70 | 2,30 | - | 2,30 |
| - Pose arm. voile oval | 47,88 | 48,00 | 0,00 | 9 243,19 | 7,48 | 20.05.97 | 9,70 | 2,22 | - | 2,22 |
| - Massif ouest 1ère levée | 264,10 | 0,00 | 348,00 | 9 805,29 | 7,93 | 20.05.97 | 9,70 | 1,77 | - | 1,77 |
| - Voile central 1ère levée | 527,30 | 0,00 | 0,00 | 9 968,59 | 8,08 | 21.05.97 | 9,70 | 1,62 | - | 1,62 |
| - Pose arm. voile amont | 30,76 | 2,00 | 0,00 | 10 019,35 | 8,10 | 26.05.97 | 9,60 | 1,50 | - | 1,50 |
| - Lestage béton massif ouest | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 10 117,35 | 8,18 | 30.05.97 | 9,40 | 1,22 | - | 1,22 |
| - Coulage voile aval | 494,16 | 148,00 | 0,00 | 10 758,51 | 8,70 | 30.05.97 | 9,40 | 0,70 | - | 0,70 |
| - Massif ouest 2ème levée | 264,10 | 0,00 | 190,00 | 11 065,61 | 8,95 | 04.06.97 | 9,70 | 0,75 | - | 0,75 |
| - Lestage béton massif ouest | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 10 975,61 | 8,88 | 06.06.97 | 9,70 | 0,82 | - | 0,82 |
| - Coulage voile amont | 494,16 | 0,00 | 0,00 | 11 469,77 | 9,28 | 06.06.97 | 9,70 | 0,42 | - | 0,42 |
| - Lestage béton massif ouest | 50,00 | 0,00 | 0,00 | 11 519,77 | 9,32 | 13.06.97 | 9,20 | -0,12 | 9,90 | 0,58 |
| - Voile central 2ème levée | 128,00 | 0,00 | 0,00 | 11 647,77 | 9,42 | 13.06.97 | 9,20 | -0,22 | 9,90 | 0,48 |
| - Mise en place du batardou | 40,00 | 0,00 | 0,00 | 11 687,77 | 9,45 | 13.06.97 | 9,20 | -0,25 | 9,90 | 0,45 |
| - Décoffrage massif ouest | -42,30 | 45,00 | 0,00 | 11 690,47 | 9,46 | 20.06.97 | 9,70 | 0,24 | - | 0,24 |
| - Décoffrage des voiles d'enclave | -34,50 | 0,00 | 0,00 | 11 610,97 | 9,39 | 20.06.97 | 9,70 | 0,31 | - | 0,31 |

conditions extrêmes de niveau d'eau soit - 0,50 à l'extérieur (0,00 mini avec décote de 50 cm) et - 9,50 à l'intérieur côté bassin (+ 9,00 maxi à la fermeture avec surcote de 50 cm). Ainsi, la poussée maxi de l'eau obtenue sur une porte (29,00 ml x 14,00 ml) est de 3 000 tonnes. Le moment de flexion correspondant est de 1610 t/ml obtenu sur la tête du voile central d'enclave, surépaisseur à 2,50 ml. Pour reprendre ce moment, une section d'acier de 380 cm²/ml vertical a été nécessaire (HA 56 doublé sur trois lits) (photo 5).

La qualité requise pour le béton B40 avec un rapport E/C < 0,45 (milieu agressif chimique - classe 5 C) a nécessité des études approfondies réalisées au CTG de Guerville. Pour maîtriser le E/C, des granulats de baie de Somme à 99 % de silice et un superplastifiant (1 %) sont entrés dans la composition du béton. Les calculs ont été menés en fissuration très préjudiciable.

Préparation à la flottaison

Deux rideaux de palplanches de profil PU 12 ont été mis en place pour fermer la partie ouverte de la passe (28,00 ml) ainsi que 300 tonnes de butonnage.

Les efforts en flottaison dans la passe, d'une valeur de 180 tonnes par buton, ont été repris par trois tubes diamètre 800 épaisseur 12 mm reliant les têtes de voile d'enclaves au massif ouest.

L'étanchéité des serrures des palplanches a été obtenue par application d'un joint en pâte hydrogonflante sur la face extérieure (côté pression).

Un essai de flottaison réalisé une semaine avant la sortie de cale a permis de corriger l'équilibre du caisson en terme de gîte et d'assiette.

Préfabrication en flottaison

(photo 6)

Exécution d'une levée supplémentaire de voiles dans les enclaves de + 4,50 à + 9,80. Le ferrailage a été préfabriqué par panneau de 12 ml et posé dès l'accostage à quai du caisson, dans le bassin du Commerce.

Le planning et le phasage de bétonnage des voiles a pris en compte, pour chaque jour, le niveau d'eau retenue dans le bassin (tableau I). Selon les phases, un lestage en eau a été nécessaire pour rééquilibrer le caisson en continu pendant les bétonnages.

En chiffre, une levée de voile représente 200 m³ de béton soit une charge d'environ 500 tonnes à compenser suivant les cas (tableaux II et III).

Pour éviter un échouage prématuré (avec risques de désordres sur la structure béton armé) compte tenu de la nouvelle masse et nouveau tirant d'eau du caisson dont les valeurs augmentent au fur et à mesure de sa construction, les fonds du bassin sous l'emprise du caisson ont été dragués entre 1,00 et 2,00 mètres de profondeur.

Par ailleurs, pour tenir compte des amplitudes de la marée dans le bassin, de l'ordre de 2,00 mètres entre l'ouverture (pleine mer - 2 heures) et la fermeture des portes (pleine mer + 1 heure), variant selon les coefficients, puis de l'enfoncement du caisson (augmentation du tirant d'eau) par le rajout de poids (bétonnage des voiles), il a été étudié et mis en place un système d'amarrage du caisson lui permettant d'être libre verticalement et de coulisser autour de deux pieux battus et repris en tête avec un encastrement sur la structure béton du quai existant (figure 2).

De plus, un jeu de 30 cm entre la ceinture métallique (coulisse) et le pieu permet au caisson de prendre de l'assiette ou de la gîte dans les limites du jeu admissible.

■ FLOTTAISON ET REMORQUAGE

(photos 7, 8 et 9)

Avant les deux opérations de remorquage, un devis de poids est dressé.

Dans le sens transversal, il n'y a pas eu de vérification du centre de gravité, la construction étant symétrique suivant un plan longitudinal axial.

La précision de calcul est liée à la valeur de la densité du béton ainsi qu'à la répartition du ferrailage. Une imprécision de l'ordre de 2 % influence directement la valeur du tirant d'eau et l'équilibre longitudinal en flottaison du caisson (assiette). C'est pourquoi la densité réelle du béton et le poids réel des armatures ont été pris en compte par parties d'ouvrage décomposé comme suit :

- ◆ l'about des enclaves;
- ◆ les enclaves;
- ◆ les têtes d'enclaves;
- ◆ la passe;
- ◆ le massif ouest.

Stabilité en flottaison

L'équilibre du caisson en flottaison (stabilité) est étudié dans trois configurations :

- ◆ sortie de forme théorique, caisson supposé parfaitement étanche (ou reprise instantanée du débit de fuite par pompage);
- ◆ sortie de forme avec fuites, condition limite de tirant d'eau;
- ◆ finition pour mise en place définitive.

Ces calculs sont effectués avec une densité de l'eau de mer égale à 1 par sécurité (densité réelle égale à 1,025) représentant un gain potentiel de tirant d'eau de 16 cm. Par ailleurs, une vérification à la tenue au vent est faite.

Remorquage

Ces deux opérations se sont déroulées selon deux configurations (tableau IV).

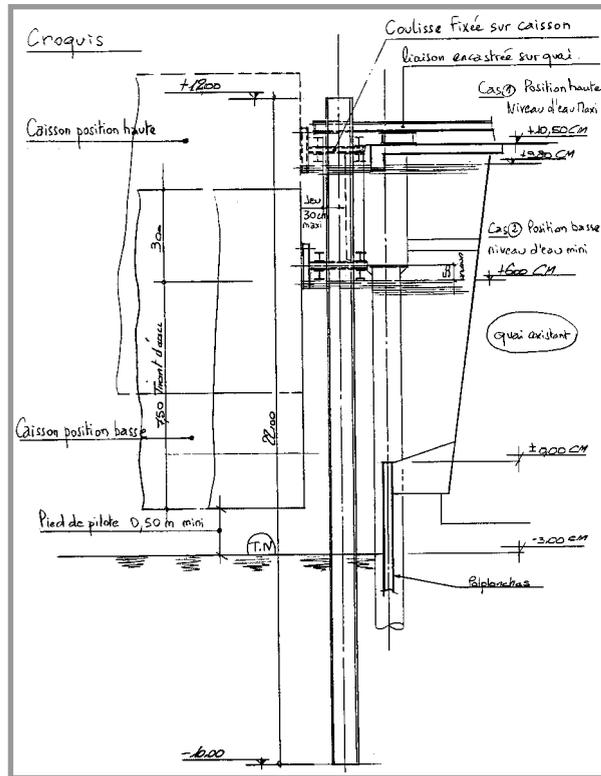


Photo 9
Manœuvre du caisson en flottaison
Manoeuvring the caisson by floating

Photo Patrice Lefebvre

Figure 2
Suite de la préfabrication en flottaison dans le bassin. Amarrage du caisson
Prefabrication-floating in the basin. Lashing of the caisson

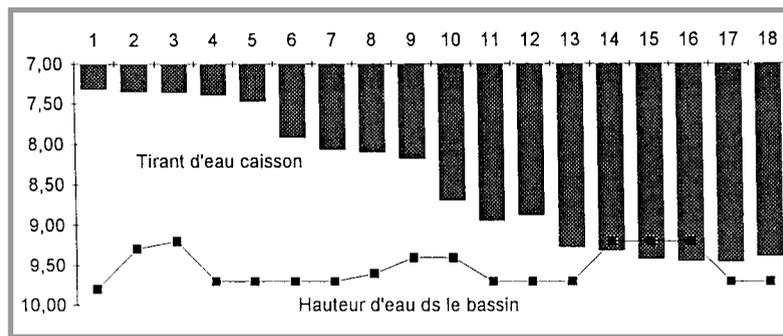


Tableau II
Suivi des tirants d'eau
Monitoring the draught

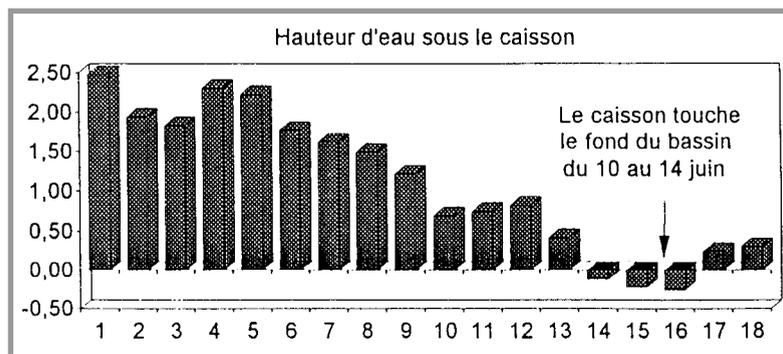
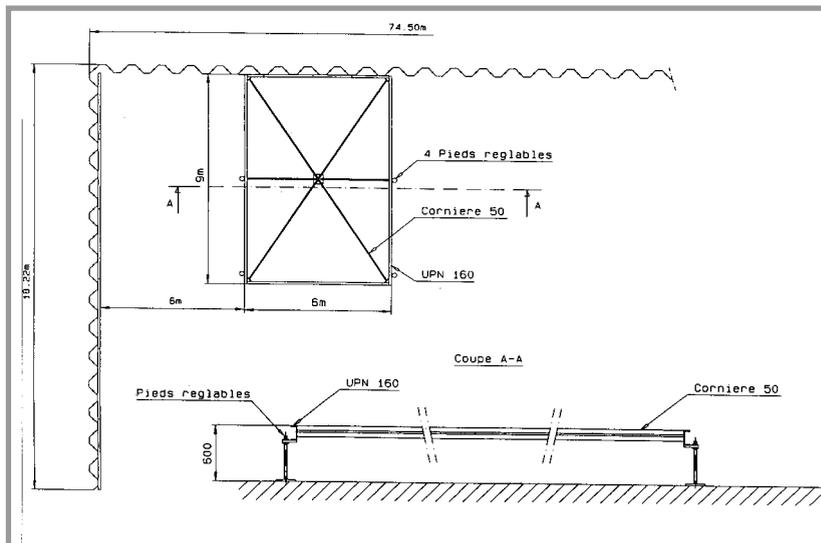


Tableau III
Suivi des tirants d'eau
Monitoring the draught

| | Forme de radoub bassin | Bassin → échouage (arrière-port) |
|---------------------|------------------------|----------------------------------|
| Poids caisson | 9 000 tonnes | 11 600 tonnes |
| Tirant d'eau | 7,50 m | 9,40 m |
| Assiette | nulle | 10 cm vers l'Est |
| Gîte | nulle | nulle |
| Étanchéité | 100 % | 100 % |
| Pied de pilote maxi | 50 cm | 50 cm |

Tableau IV
Bilan poids du caisson pour chaque cas (forme de radoub/bassin et bassin/échouage)
Weight of the caisson for each case (dry dock/basin and basin/sinking)

Figure 3
Réglage de la
plate-forme.
Mise en place
du 1^{er} cadre
Platform
adjustment. Setup
of first frame



"Timing" de remorquage

Deux points de remorquage sont installés à l'avant et à l'arrière du caisson, à deux niveaux (pour les deux opérations) pouvant reprendre 50 tonnes de traction chacun.

Les deux opérations de déhalage (d'une durée de 4 heures environ) ont nécessité la mise en place de cinq remorqueurs répartis comme suit :

- ◆ un remorqueur avant et arrière, d'une puissance 4 000 CV;
- ◆ trois remorqueurs pour le guidage latéral, d'une puissance de 2 500 à 3 000 CV.

Celles-ci, minutieusement préparées, se sont déroulées sans anicroche dans le respect des procédures et programmes établis.

■ PLATE-FORME D'ÉCHOUAGE

De la réussite de cette surface de 1 400 m², dépendait la réussite du chantier.

Le travail, par plongeurs, consiste à assembler des cadres de dimensions 9,00 m x 6,00 m en profilé UPN 160 sur un fond marin dragué à une cote théorique - 6,50 avec une tolérance de +/- 30 cm par maille de 5,00 m x 5,00 m. Chacun dispose de six pieds réglables et de deux raidisseurs (figure 3). Le réglage se fait par paires de cadre, ils sont liés et immobilisés mécaniquement.

Le premier cadre est appuyé contre le rideau de palplanches de rempiètement (74,50 m) et une lierne d'appui est posée sur le rideau en retour (18,22 m). Ces deux éléments sont réglés au millimètre et servent de base au réglage des autres cadres. Les pieds des cadres sont ajustables à l'aide d'un système à pas de vis; une platine de 300 x 300 en appui direct sur le fond permet de disposer d'une surface d'appui correcte.

Lorsque la cote est atteinte, des pieds intermédiaires sont descendus et ajustés pour éviter tout fléchissement sur la longueur de 9 mètres du cadre. Le deuxième cadre est alors immergé, il est raccordé au premier et réglé de la même manière. L'immobilisation des deux unités se fait par platines boulonnées dans l'âme des profilés.

Pour garantir l'espace entre les cadres dans le sens longitudinal, des entretoises de 6 mètres sont mises en place par brochages sur les cadres.

Les matériaux de remplissage de type galet 20/40 sont ensuite descendus à l'aide d'une pelle sur barge complétée par une benne manœuvrée depuis terre à l'aide d'une grue à tour pour les finitions et les rives de l'enceinte.

Les équipes de scaphandriers guident le déversement des matériaux qui sont ensuite tirés et réglés à la règle. Ainsi, les tolérances imposées +/- 5 cm ont pu en tout point, être tenues.

■ ÉCHOUAGE, LESTAGE ET RÉGLAGE

L'échouage du caisson s'est fait naturellement avec la baisse de la marée. Celui-ci a été approché près de la souille par les remorqueurs (photo 10) puis amené en appui contre le rideau en retour Est et le rideau para fouille en pied de quai, à l'aide de quatre treuils de 10 tonnes.

Pendant la durée de l'échouage, peu après la pleine mer, les remorqueurs sont restés au contact du caisson pour éviter que celui-ci ne se déplace par le courant créé par la baisse de la marée, jusqu'à la fermeture des portes busquées du bassin. Immédiatement après échouage, ont suivi l'opération de lestage à l'aide de 1 000 m³ de béton de structure B40 coulé en continu pendant 24 heures (remplissage des alvéoles dans voiles et radier), puis les opérations de réglage des surfaces verticales d'appuis des portes, travaux exécutés durant la fermeture du port.

Cette deuxième opération s'est déroulée avec une contrainte particulière, à savoir l'obligation de mettre en eau le caisson à partir de la cote de marée + 6,00 en marée montante, pour éviter une remise en flottaison du caisson, le temps de réaliser les 22 tirants actifs de 100 tonnes verticaux (6 semaines) dans la zone des enclaves pour ancrer définitivement le caisson et satisfaire à tous les cas de charges envisagés.

Le cycle de mise en eau - par ouverture de vannes dans les palplanches du caisson (à partir de + 6,00 marée montante) et vidange du caisson par pompage à l'aide d'une installation de capacité de 3 000 m³/heure, à partir de la pleine mer pour être à sec à + 6,00, deux fois par journée de 24 heures, - a duré 10 jours.

Ainsi, les rails de roulement des portes ont été réglés en altimétrie après relevé d'échouage et ca-

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

Fondations spéciales

- 104 tirants (100 tonnes et 50 tonnes)
- 700 m² de paroi moulée

Génie civil de l'écluse

- Béton (B 40) : 11 000 m³
- Aciers HA : 1 100 tonnes
- Palplanches : 720 tonnes - 6 500 m²
- Remblais : 5 200 m³
- Coffrage pour évidement : 4 000 m²
- Démolition : 5 200 m³
- 4 défenses tournantes d'angles (absorption 20 000 tonnes)
- Charpentes métalliques : 2 portes de 300 tonnes chacune

Délai contractuel : 21 mois

Montant des travaux : 98 millions de francs HT

lés au mortier sans retrait, les alignements étant réalisés en forme de radoub.

Les surfaces d'appui vertical côté Est (têtes d'enclaves) ont été réalisés dans la forme de radoub. Le relevé géométrique après échouage des appuis Est a été reporté à l'ouest avant de mettre en œuvre et régler celles du massif ouest et obtenir ainsi un seul et même plan permettant de garantir l'étanchéité des portes.

Les tolérances imposées sont : +/- 5 mm en verticalité, rectitude = 5 mm sous la règle de 14,00 mètres.

Des réservations ont été laissées dans les coffrages des voiles au droit des zones d'appui pour y placer des tôles en acier d'épaisseur 15 mm scellées au microbéton à cause de la très forte densité d'armatures.

Concernant les appuis horizontaux en fond de passe (buscs), les surfaces d'appui en tôle d'épaisseur 15 mm ont été exécutées en forme de radoub et mises en place avant bétonnage. Les tolérances d'étanchéité sont (photo 11) :

- ◆ parallélisme : +/- par rapport à l'axe des rails ;
 - ◆ verticalité : +/- 5 mm ;
 - ◆ rectitude : 5 mm sous la règle de 28,00 mètres.
- Le choix de l'utilisation de tôle en surface d'appui découle d'essais de frottement sur le bois en azobé (fourrures des portes) menés avec plusieurs matériaux (béton, granit, acier). Le coefficient obtenu avec l'ensemble bois/acier (K = 0,6) est de moitié inférieur aux autres couples. Par ailleurs, l'acier garantit davantage la pérennité de la structure, notamment vis-à-vis d'éventuels chocs.

■ PHASAGE ET CHRONOLOGIE DES TRAVAUX

En cale sèche à Dieppe

C'est là que se sont déroulées les opérations suivantes :

- ◆ aménagement forme de radoub ;
- ◆ préfabrication partielle de l'écluse ;
- ◆ préparation à la flottaison et au remorquage ;
- ◆ remorquage du caisson, amarrage dans le bassin bord à quai ;
- ◆ dans le bassin en flottaison, poursuite du génie civil de l'écluse (élévations).

Sur le site de l'écluse

En même temps que le travaux en cale sèche :

- ◆ arrachage des ducs d'Albe aval existants ;
- ◆ battage des palplanches de rempiètement et ancrages dans le quai ;
- ◆ tirants de rempiètement ;
- ◆ génie civil plate-forme des treuils et poulies ;
- ◆ dragage de la souille d'échouage ;
- ◆ extension quai aval ouest ;



Photo 10
Echouage du caisson
Sinking the caisson

Photo Patrice Lefebvre



Photo 11
Coffrage perdu métallique pour zones d'appui des portes
Metallic sacrifice shuttering for gate support zones

- ◆ réalisation plate-forme sous-marine pour échouage de l'écluse préfabriquée ;
- ◆ réalisation du local de commande de la nouvelle écluse (100 % informatisé) ;
- ◆ remorquage sur site, échouage et lestage (15 jours) ;
- ◆ battage ducs d'Albe aval Est de protection caisson ;
- ◆ quai de protection des enclaves ;
- ◆ massifs de défenses tournantes côté arrière-port ;
- ◆ ancrages du caisson (zone des enclaves) ;
- ◆ massifs de liaison entre quais et caisson ;
- ◆ murets de séparation des enclaves et voies de guidage supérieur ;
- ◆ gros œuvre plate-forme de liaison entre caisson et plate-forme des treuils/poulies ;
- ◆ génie civil aqueducs et vannes du massif ouest ;
- ◆ confortement bajoyer ouest et paroi moulée + tirants ;
- ◆ pose des nouvelles portes, raccordement des mécanismes et essais ;
- ◆ mise en service des nouvelles portes ;
- ◆ dépose des anciennes portes ;
- ◆ démolition bajoyer ouest (élargissement) ;
- ◆ couronnement des anciens bajoyers ;
- ◆ massifs de défenses côté bassin et rempiètement ;
- ◆ démolition du radier de l'ancienne écluse et dragage côté bassin.

Photo 12
Ensemble défenses
tournantes
*Rotating fender
system*



Photo 13
Mise en place
des portes
*Installation
of gates*



Photo Patrick Boulen

► ■ PROTECTIONS D'ANGLE DE L'ÉCLUSE

La protection des quatre angles de l'écluse est assurée, pour chaque angle, par trois défenses tournantes superposées (photo 12).

Une défense tournante est constituée d'un caisson métallique contenant une roue pneumatique de diamètre 2550 mm, montée sur un axe mobile en rotation et en translation. Lorsque la roue est

compressée, elle s'écrase par translation de son axe contre deux rouleaux situés à l'arrière qui transmettent alors les efforts à l'arrière du caisson. La libre rotation de ces éléments permet de réduire au maximum les frottements, en particulier ceux de la coque de navire contre la roue pneumatique. L'axe de translation de la roue forme un angle de 60° avec l'alignement de l'écluse afin d'optimiser les performances en particulier pour les navires entrant dans le sas.

Le calcul des protections d'angle est effectué avec un navire de 20 000 tonnes évoluant à une vitesse de 0,5 m/s. Ainsi, pour chaque élément, chaque roue, les caractéristiques sont les suivantes :

- ◆ absorption d'énergie : 440 kN ;
- ◆ réaction : 920 kN ;
- ◆ déflexion : 920 mm ;
- ◆ pression de gonflage : 6 bars.

■ PORTES ET MÉCANISMES

Les portes roulantes de dimensions impressionnantes – 29 mètres de long, 15 mètres de haut sur 4,80 mètres de large et 300 tonnes chacune –, ont été réalisées dans les usines de la société Eiffel Construction Métallique de Maizières et Lauterbourg ; les bureaux d'études de la Mécanique et Somdel ont associé leurs compétences pour mener à bien les études de structures et des mécanismes.

En place, les portes sont montées sur deux chariots inférieurs et mises en mouvement de translation par deux treuils électriques à câbles reliés aux bras de manœuvre par des poulies de renvoi. Le temps pour une manœuvre complète d'ouverture ou de fermeture d'une porte est de 5 minutes.

■ TRANSPORT ET MISE EN PLACE

Le transport sur le site de Dieppe a été réalisé en deux phases :

- ◆ par un ponton d'une capacité de 2500 t avec pousseur rhénan d'une puissance de 1500 chevaux jusqu'à Rotterdam ;

- ◆ ce ponton a été ensuite accouplé à un remorqueur de haute mer, pour le transfert maritime de Rotterdam à Dieppe, avec une puissance de 2000 chevaux et 250 chevaux de propulsion d'étrave.

Le montage des deux portes dans leur enclave respective est réalisé par la mise en œuvre d'une bigue flottante d'une capacité de levage de 1000 tonnes (photo 13).

Les deux portes ont été mises en enclave dans la même journée.

Pour cela, une grue flottante de 800 tonnes est utilisée. L'opération de mise en enclave consiste à élinguer la porte sur ses six points de levage ce qui permet le basculement de la position horizontale

de chargement à la position verticale. La porte est ensuite amenée à la verticale de son logement (enclave) et descendue progressivement pour un atterrissage en douceur sur ses chariots. Un batardeau assure la mise à sec de l'enclave malgré les mouvements de marée dans l'arrière port.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitre d'ouvrage

Etat - Ministère du logement, du transport et du Tourisme.

Maitre d'œuvre travaux

Direction départementale de l'Équipement de Dieppe (subdivision maritime)

Conception

- Société Générale des Entreprises Quillery TP/GC (génie civil)
- Eiffel CM (portes et mécanisme)

Vérification des études d'exécution

- Port Autonome de Rouen (génie civil)
- Port Autonome du Havre (portes et mécanisme)
- Direction départementale de l'Équipement (subdivision de Dieppe)

Entreprises

- SGE Quillery TP/GC (mandataire génie civil)
- Eiffel CM (portes et mécanisme)
- Solétanche Bachy (fondations)

Études techniques

- SGE Quillery
- Eiffel CM
- Solétanche Bachy

Sous-traitants

- Cefa Armatures : aciers HA
- EMCC : rempiètements de quai, dragages et démolitions
- Draflumar : dragage
- ATD : démolition
- Paridro : plate-forme sous-marine

ABSTRACT

Lock widening at port of Dieppe. Execution of works

Ph. Seitz, O. Serrano, A. Pigeon

The traditional activities of the port of Dieppe are organised essentially around two areas : the Dieppe-Newhaven trans-channel link from the port designed in 1992 and the fruit handling activity, and in particular banana traffic.

The port of Dieppe could not handle four refrigerated contained ships commissioned by Compagnie Générale Maritime, so that banana traffic coming from the Antilles was transferred to the port of Le Havre in 1981. Since that time, and at a level much lower than in the past, the volume of fruit traffic has not advanced significantly. The effective implementation of the reform of port handling operations added a new stimulus, which is to be sustained by adapting the equipment and the port structures to the characteristics of the ships. The constraints related to the draught and especially to the width of the entrance gate of the Commercial basin, constituted a definite handicap to the development of port activities. The project for the widening and deepening of the lock seeks to lower the present threshold from -1.00 m to -3.50 m and to increase the width of the paths from 23 to 28 m. this operation seeks to sustain the activity related to fruit traffic in the port.

DEUTSCHES KURZREFERAT

Die Verbreiterung der Schleuse des Hafens von Dieppe. Die Ausführung der Arbeiten

Ph. Seitz, O. Serrano, A. Pigeon

Traditionell betrifft die Aktivität des Hafens von Dieppe im wesentlichen zwei Felder : die Ärmelkanalverbindung Dieppe-Newhaven von dem 1992 eingerichteten Vorhafen aus und der Obsthandel, vor allem der Transport von Bananen. Da die von der Compagnie Générale Maritime betriebenen vier Container-Kühlschiffe nicht in den Hafen von Dieppe einlaufen können, ist der Import der Bananen aus den Antillen 1981 nach Le Havre verlegt worden. Seither ist das Obsthandelsvolumen auf einem Stand, der weit unter dem früheren liegt, nahezu konstant geblieben. Die unter günstigen Bedingungen vorgenommene Sanierung der hafentechnischen Förderanlagen hat einen neuen

Schwung vermittelt, den es durch Anpassung der Hafenanlagen und – ausrüstungen an die technischen Daten der Schiffe nachhaltig zu gestalten gilt.

Die Vorgaben in bezug auf den Tiefgang und vor allem auf die Breite der Zufahrtsrinne in den Handelsbezirk stellen eine Beschränkung bei der Entwicklung der Hafentätigkeit dar. Im Rahmen des Verbreiterungs- und Vertiefungsprojektes der Schleuse soll der derzeitige Tiefgang von – 1,00 m auf – 3,50 m erhöht und die Durchfahrtsrinne von 23 auf 28 m verbreitert werden. Ziel dieses Vorhabens ist die Aufrechterhaltung und Intensivierung der mit dem Obsthandel in Verbindung stehenden Aktivität des Hafens von Dieppe.

RESUMEN ESPAÑOL

Ensanchamiento de la esclusa del puerto de Dieppe. La ejecución de las obras

Ph. Seitz, O. Serrano, A. Pigeon

Las actividades tradicionales del puerto de Dieppe se articulan, básicamente, en torno de dos polos : el enlace transmancha Dieppe-Newhaven desde el antepuerto acondicionado en 1992 y la actividad frutera, fundamentalmente, de un tráfico de plátanos. Dado que el puerto de Dieppe no permitía recibir los cuatro portacontenedores refrigerados puestos en servicio por la Compagnie Générale Maritime, el tráfico de plátanos procedentes de las Antillas fue transferido al puerto de Le Havre. Desde esta fecha, y a un nivel muy inferior de aquello que se alcanzaba anteriormente, el volumen de los tráficos de frutas ha evolucionado muy ligeramente. La aplicación en condiciones correctas de la reforma de la manipulación de cargas portuaria ha permitido dar un nuevo impulso, que conviene perennizar adaptando los equipos y estructuras portuarias a las características de los buques. Los imperativos derivados del calado y, sobre todo, de la anchura de la puerta de entrada de la dársena de Comercio constituyen una desventaja indiscutible para el desarrollo de las actividades portuarias. El proyecto de ensanche y profundización de la esclusa tiene por propósito disminuir el umbral actual desde la cota - 1,00 m a 3,50 m y aumentar la anchura de la entrada de 23 a 28 m. Esta operación tiene por objeto mantener y hacer perdurar la actividad relacionada con el tráfico de frutas en el puerto de Dieppe.

La protection des jetées

Chantier nautique ou terrestre ?

La particularité de ce chantier, présenté à la consultation par le maître d'ouvrage comme un chantier de réalisation terrestre, a été de le concevoir comme un chantier maritime. La totalité des matériaux nécessaires à l'opération blocs, BCR et enrochement naturel a été fabriquée et rassemblée au port de Cherbourg puis transférée par moyens nautiques à Port en Bessin. Sur le site une seule grue de 100 t positionnée sur une plate-forme prenant à la fois appui sur un système de pieux et sur la jetée elle-même exécute la totalité du travail : déchargement des matériaux, mise en place et déplacement des éléments de plate-forme au fur et à mesure de l'évolution du chantier, d'une extrémité à l'autre de la digue. Cette conception permet ainsi le travail sur le site dans les conditions normales d'agitation marine.

Photo 1
Massif de protection terminé à l'enracinement Est
Protection block completed at the East groyne



■ LE SITE

Port en Bessin petite commune située à 10 km de Bayeux, est le port de pêche le plus important du département du Calvados. Il est situé par mer à 45 miles nautiques de Cherbourg, 20 miles de Caen, 35 miles du Havre.

Ce port est situé dans une échancrure entre deux falaises calcaires de grande hauteur. Il ne dispose pas de protection naturelle. Il est protégé par deux digues artificielles séparées par une passe centrale permettant l'accès des navires. Ces digues en maçonneries ont été construites vers 1860, elles sont fondées sur le socle rocheux calcaire, la cote d'implantation des ouvrages se situant entre la cote + 3 et la cote - 3 par rapport aux plus basses mer. Ces ouvrages sont soumis à de fortes attaques de houles de secteur nord-ouest à nord-est.

réalité de constituer un brise-lame devant les jetées qui aura pour fonction d'absorber l'énergie due aux déferlantes et par conséquent de limiter l'érosion (photo 1).

Le conseil général du Calvados a décidé la réalisation des travaux en 1998.

Le projet lancé en consultation consistait à établir des pistes provisoires en matériaux de carrière, en périphérie extérieure de l'ouvrage, celles-ci permettant par des moyens routiers d'accéder depuis l'enracinement des digues jusqu'aux extrémités, afin d'y mettre en place au moyen de grue ou de pelles, les enrochements de protection.

Cette façon de procéder présentait deux inconvénients majeurs :

- ◆ le premier résidait dans le fait que les matériaux mis en œuvre pour réaliser les pistes devaient être protégés pendant toute la durée des travaux puis évacués hors du site à la fin de l'opération, engendrant de ce fait un surcoût non négligeable ;
- ◆ le deuxième inconvénient consistait à faire transiter au travers de Port en Bessin, environ 100 000 t de matériaux, avec d'énormes difficultés compte tenu de l'étroitesse des voies, de la circulation importante liée à l'activité de pêche et bien sûr, de l'activité touristique pendant les mois d'été.

■ LA PROPOSITION DES ENTREPRISES

La société TPC filiale de GTM Construction a été retenue pour réaliser ces travaux, en groupement avec une entreprise spécialisée en moyens maritimes (EMCC).

Dans le cadre de la proposition variante retenue, TPC a imaginé une solution qui permettait de s'affranchir des moyens terrestres pour réaliser ces travaux avec approvisionnement de matériaux par voie maritime. Il fallait donc régler deux points extrêmement importants :

- ◆ trouver une base portuaire suffisamment proche, facile d'accès, et disposant d'atouts sur le plan économique ;
 - ◆ mettre en place sur le site de Port en Bessin, un système de reprise des matériaux et de mise en œuvre, susceptible d'être déplacé avec souplesse sans avoir les inconvénients des matériels flottants, compte tenu de la nécessité de travailler avec un certain clapot le long de l'ouvrage existant.
- Pour régler le premier problème, une étude générale a été menée sur les ports du Havre, Honfleur, Caen et Cherbourg, afin de déterminer les possi-

■ LES BESOINS, LE PROJET

Dans les années 1960 les digues maçonnées du port ont été renforcées à l'extérieur par des enrochements de granit d'un poids moyen de 12 t, mais ce travail a été exécuté uniquement sur la partie basse de l'ouvrage, la partie haute de la maçonnerie restant non protégée.

A la suite de tempêtes importantes en 1995, la partie supérieure de l'ouvrage a été en partie emportée.

Le conseil général du Calvados, propriétaire de l'ouvrage a fait réaliser une étude sur modèle réduit par la société Sogreah. Cette étude a montré que les maçonneries existantes pouvaient parfaitement être conservées en état à condition de créer un massif d'enrochements naturel ou artificiel de dimension convenable avec une pente de 4 pour 3 sur la totalité de hauteur de l'ouvrage. Il s'agit en

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Matériaux de carrière mis en œuvre : 14 000 t
- BCR mise en œuvre : 3 600 t
- Montant des travaux : 27 500 000 F HT

de Port en Bessin

Jean-Claude



Grandchamp
DIRECTEUR
COMMERCIAL
Travaux Publics du Cotentin

bilités d'accès à ces ports par petite marée, les conditions de transfert entre ces ports et Port en Bessin, en examinant notamment :

- ◆ les renverses de courant (importantes pour certains ports);
- ◆ les éventuelles écluses ou seuils à franchir;
- ◆ la proximité de carrières de matériaux de qualité relativement proches des ports pour s'affranchir de coûts d'approche terrestres importants.
- ◆ l'existence à proximité de ces ports, d'entreprises de béton prêt à l'emploi pouvant assurer la fourniture du béton demandé dans les cadences souhaitées et avec la qualité requise;
- ◆ les tarifs portuaires et les garanties de pouvoir utiliser les matériels et les grues portuaires, sans pénaliser le trafic par des arrêts dus à d'autres activités portuaires.

Le port de Cherbourg a finalement été retenu après examen de toutes ces conditions.

La variante proposée par notre groupement consistant à réaliser la digue de protection de jetées maçonnées au moyen de trois types de matériaux en couches superposées (tout venant rocheux, filtre de 1 t à 2 t, blocs bétons en carapace) selon un profil réduit au strict nécessaire et non comme initialement prévu, pour permettre l'accès aux engins. Le maître d'ouvrage a pu ainsi réaliser de substantielles économies sur les quantités des matériaux mis en œuvre (photos 2 et 3).

■ L'ORGANISATION DU CHANTIER

La base arrière

Le procédé de construction retenu par le groupement consiste à fabriquer l'ensemble des 3 500 blocs de béton cubiques rainurés (BCR) de 8 t et 10,5 t nécessaire à l'opération à proximité immédiate du port de commerce de Cherbourg (photo 4). Les BCR ont été dessinés par l'entreprise et testés par son bureau conseil en canal à houle (Hydratec).

Le chantier de fabrication s'organise autour d'une production journalière de 30 blocs.

La fabrication s'exécute à proximité immédiate de la centrale de béton prêt à l'emploi de la société Qualibéton.

Le béton est transporté par deux camions à bennes sabot spécialement adaptées au transport de ces matériaux sur une courte distance et correspondant à un volume prédéterminé.

Un système de vibration pneumatique monté sur



Photo 2
Vue générale de la digue Est en cours de réalisation

General view of the East embankment during construction



Photo 3
Massif de BCR (blocs de béton cubiques rainurés) en cours de constitution

BCR (grooved cubic concrete blocks) foundation during construction



Photo 4
Fabrication/stockage des BCR à Cherbourg

Fabrication/storage of BCRs at Cherbourg

Photo 5
Déchargement des BCR
à Port en Bessin
*Unloading of BCRs
at Port en Bessin*



Photo 6
Reprise des matériaux
de carrière à Port en Bessin
après clapage
*Reclaiming
of quarry materials
at Port En Bessin after gating*



Photo 7
Plate-forme de travail en cours de montage
Working platform during erection



une pelle permet la vibration de chaque bloc de façon satisfaisante.

La totalité des enrochements naturels, soit environ 25000 t nécessaires pour réaliser les couches inférieures viennent de la carrière de granit de Cosqueville (propriété de TPC) et sont également acheminés au port de Cherbourg. Les grues portuaires de fortes capacités (120 t), sont parfaitement adaptées au chargement des BCR. Les enrochements naturels sont chargés sur les barges de transport au moyen d'engins TPC.

Le transport

Les matériaux et les BCR sont acheminés journalièrement à Port en Bessin au moyen de deux barges automotrices fendables de 600 t, les rotations s'effectuent sans difficulté particulière en 25 heures, y compris le passage du raz de Barfleur lorsque les conditions de vent sont normales (50 km/h).

A Port en Bessin les barges de BCR pénètrent à l'intérieur du port, elles sont déchargées par la grue de chantier. Les BCR sont mis en place directement au fur et à mesure du déchargement ou stockés en attente (photo 5).

Les matériaux de carrière quant à eux sont clapés à l'intérieur du port et repris au moyen de bennes et de grappins par la grue pour être également mis en place dans le massif de protection extérieur (re-

profilage précédant la réalisation de la carapace en BCR) (photo 6).

Le chantier à Port en Bessin

Le groupement a imaginé de mettre en place, une grue chenilles à flèche treillis évoluant sur un système composé de deux plates-formes de 10 m de long reposant sur la digue pour un bord et sur des pieux foncés ancrés dans le rocher sur l'autre bord, (ceci en raison de la trop faible largeur de la digue sur laquelle aucun engin ne pouvait accéder directement).

La répartition des charges induites par la plate-forme en cours de travail sur la digue est réalisée par des dalles préfabriquées en béton ancrées dans la jetée (photo 7).

L'ensemble de l'équipage peut évoluer le long de la digue, déplacé par la grue elle-même, à la manière d'une grue sur voie déplaçant elle-même ses propres rails (méthode du voltigeur).

La plate-forme, dont l'étude a été confiée à un bureau d'études interne au groupement, a été contrôlée aussi bien pour la conception que pour l'exécution par un bureau de contrôle extérieur.

L'engin de manutention pour la mise en place des blocs est une grue treillis mobile de 100 t qui évolue sur la plate-forme précédemment décrite.

La grue est équipée d'un système de positionnement par GPS différentiel (DGPS) (qui permet de situer à chaque instant le bout de la flèche, à la verticale de la charge, avec une précision décimétrique), associé à un logiciel faisant défiler le fond du plan d'exécution sur lequel chaque bloc est répertorié précisément sur l'écran du DGPS. Ainsi le grutier visualise directement à l'écran la position de la charge sur le plan.

Enfin le décrochage de la charge est télécommandé (système de vérin pneumatique), ce qui permet au grutier, une fois la charge accrochée, de la positionner précisément à son emplacement, de la décrocher depuis sa cabine, de valider le coup de grue. La position aléatoire des BCR autour de sa position théorique, s'obtient naturellement, les grutiers ayant pour mission de ne pas "arranger" les blocs à la pose. Une sortie informatique graphique permet chaque soir de connaître précisément, les blocs mis en place et ceux restant à poser.

Les effectifs

Préfabrication

L'équipe est composée de quatre hommes : deux chauffeurs de camions bennes et un chauffeur de pelle sous la responsabilité d'un chef d'équipe.

Transport vers le port de Cherbourg

L'équipe comprend un conducteur de grue de 40 t sur le site, trois chauffeurs de semi-remorque, un conducteur de grue portuaire et deux aides.

Chargement sur les navires

Un chauffeur de grue portuaire et deux dockers sont en place.

Transport maritime

Chaque barge est armée avec trois marins.

Mise en place à Port en Bessin

Le travail s'effectue en deux postes de 8 heures, chaque équipe comprenant trois personnes.

Encadrement

Il est constitué d'un directeur de travaux et de son adjoint.

Les opérations de préfabrication ont démarré au mois de novembre 1998. Sur site de Port en Bessin les travaux ont commencé fin février 1999 et se poursuivront jusqu'à la fin du mois de septembre 1999.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitre d'ouvrage

Conseil général du Calvados. Direction des Services techniques

Maitre d'œuvre

DDE du Calvados - Subdivision de Bayeux

Entreprise

T.P.C. (filiale de GTM Construction)

Entreprise conjointe

EMCC

Sous-traitant

- Hydratec : Conception et modélisation
- Qualibéton : Fabrication des bétons
- Solma : Fabrication de la plate-forme

ABSTRACT

Protection of jetties of Port en Bessin. Nautical or land worksite ?

J.-Cl. Grandchamp

The particular feature of this project, described in the call for bids by the client as a land construction project, was its design as a maritime project. All the materials necessary for block operation, involving grooved cubic concrete blocks (BCRs) and natural riprap, were produced and grouped at the port of Cherbourg and then transferred by sea to Port en Bessin. On the site there was only one 100 t crane positioned on a platform supported by a pile system and by the jetty itself carried out all the work : unloading of materials, placing and movement of platform elements as the work advanced, from one end of the embankment to the other. This design thus allows working on the site under normal agitation conditions.

DEUTSCHES KURZREFERAT

Schutz der Mole von Port en Bessin. Eine see- oder landtechnische Baustelle ?

J.-Cl. Grandchamp

Die Besonderheit dieser Baumaßnahme, die vom Bauherrn in der Ausschreibung als landtechnische Baustelle präsentiert worden war, bestand darin, sie seetechnisch auszuführen. Sämtliche Baustoffe für den Blockanteil, die würfelförmigen Betonblocks mit Nuten und die natürliche Steinschüttung sind im Hafen von Cherbourg gefertigt und zusammengestellt, dann auf dem Seeweg nach Port en Bessin transportiert worden. Vor Ort wurde die gesamte Arbeit von einem 100 t-Kran auf einer Plattform mit einer Abstützung teils auf einem Pfeilersystem, teils auf der Mole selbst übernommen : Entladen der Baustoffe, Transport und Einordnung der Plattformelemente entsprechend dem Arbeitsfortschritt zwischen den Endpunkten des Damms. Mit dieser Konzeption kann auch bei normalem Wellengang vor Ort gearbeitet werden.

RESUMEN ESPAÑOL

La protección de los malecones de Port en Bessin. ¿ Obras en medio marítimo o terrestre ?

J.-Cl. Grandchamp

La particularidad de estas obras, presentadas para consulta por la entidad contratante como una operación de ejecución terrestre, ha sido de proyectarlas como unas obras marítimas. La totalidad de los materiales necesarios para la operación de los bloques, BCR (bloques de hormigón cúbicos ranurados) y la escollera natural se ha producido y reunido en el puerto de Cherburgo y, a continuación, transportado por medios náuticos a Port en Bessin. En el emplazamiento de operaciones, una grúa única de 100 t, instalada sobre una plataforma que toma simultáneamente apoyo sobre un sistema de pilotes y sobre el propio malecón, lleva a cabo la totalidad del trabajo : descarga de los materiales, colocación y desplazamiento de los elementos de plataforma, a medida de la evolución de las obras, desde un extremo a otro del dique. Este concepto permite ejecutar el trabajo en el emplazamiento en condiciones normales de agitación del mar.

Le grand bassin Vauban Est

Une réhabilitation réussie

La conjonction de circonstances générales liées au mode constructif des ouvrages maritimes du début du siècle et de circonstances particulières lors de la réalisation du grand bassin Vauban Est de Toulon a fragilisé prématurément cette forme de radoub. Il souffre depuis sa première mise en eau de problèmes d'étanchéité et a subi de nombreux désordres. L'eau de mer circulant dans les maçonneries a provoqué une altération chimique du béton de chaux qui a fait chuter sa résistance mécanique entraînant une auto-alimentation du mode destructif. Le programme de réhabilitation de l'ouvrage, réalisé en deux phases dans une configuration délicate, a permis de continuer l'exploitation avec une moitié de bassin pendant que les travaux se déroulaient dans l'autre partie.

Le cas du grand bassin Vauban Est montre qu'il est raisonnable de procéder à des investigations préventives sur les ouvrages en béton soumis à l'agression marine même en l'absence de désordres visibles.



Vue générale de l'îlot Vauban
General view of the Vauban island

■ HISTORIQUE

L'ouvrage

Le bassin Vauban Est est l'un des deux grands bassins, situés sur un îlot artificiel de l'arsenal de la Marine Nationale à Toulon, destinés à accueillir les navires de grande taille type porte-avions ou pétroliers ravitailleurs. Il est constitué de deux caissons métalliques lestés d'un remplissage en béton de chaux. Ses caractéristiques principales sont :

- ◆ bassin accessible par ses deux extrémités sud et nord et utilisable en deux formes indépendantes et modulables par des rainures intérieures pour un bateau-porte intermédiaire ;
- ◆ 442 m de longueur entre musoirs et 423 m de longueur utile entre les bateaux-portes d'extrémités ;
- ◆ 36 m de largeur utile au niveau du radier et 40 m au niveau du couronnement ;
- ◆ niveau du seuil d'entrée à - 12, 50 m NGF, le niveau moyen de la mer observé à Toulon étant de + 0,10 m NGF ;
- ◆ les caisses métalliques sont formées de tôles de 6 mm d'épaisseur rivetées et tous les deux mètres de poutres à treillis transversales de 5,50 m de hauteur (membrures supérieures et inférieures en forme de simple T, réunies par des montants verticaux et des diagonales, le tout étant liaisonné par rivets) ; les maçonneries des bajoyers ont une épaisseur de 8 m à leur base, celle du radier une épaisseur moyenne de 7 m.

Ce bassin le plus grand du monde à sa construction a été mis en eau pour la première fois en janvier 1921.

Sa construction

Le montage de la partie inférieure des caisses métalliques est entrepris à La Seyne en octobre 1912

et terminé en septembre 1913. Ces deux caisses sont amenées par flottaison et ancrées à leur poste en mars 1914. Les travaux de lestage sont en cours quand survient, en août 1914 la mobilisation qui oblige l'entreprise à arrêter la marche de ses chantiers. Les travaux reprennent en janvier 1919 pour une mise en eau le 22 janvier 1921.

Les deux caisses, nord (242 m) et sud (198 m), sont descendues sur le fond dragué et dressé à la cote - 21,20 m NGF ; leur hauteur totale étant ainsi de 22,70 m. Pour ce faire, les maçonneries sont commencées à sec dans les caisses encore à flot, l'échouage étant obtenu par un lest complémentaire d'eau pour permettre un relevage en cas d'implantation défectueuse. Ces deux tronçons sont échoués en laissant entre eux un intervalle de 2 m ; la jonction est réalisée par des batardeaux métalliques pour les parois verticales, le fond naturel dressé étant jugé suffisamment étanche pour permettre le pompage et l'assèchement du chantier. Les premières tentatives d'épuisement sont vaines, les entrées d'eau par le fond du joint dépassant les 1 000 m³/h ; un écran étanche capable de résister à la sous-pression est finalement obtenu par coulage sur 4,50 m d'épaisseur de béton de ciment immergé. La dernière phase consiste à terminer les maçonneries.

Les maçonneries sont composées de béton de ciment sur environ 1 m d'épaisseur au contact de la tôle, de béton de chaux pour la masse principale du bassin et d'un parement des faces vues des bajoyers par des moellons de ciment de 0,30 m d'épaisseur. Le béton de chaux est coulé en place par des "mises" (c'est-à-dire gâchées) successives de 1,6 m³ (2 x 2 x 0,4 m). Les couronnements de bajoyers et les escaliers sont en pierre de taille, les parties horizontales des banquettes et du radier sont revêtues d'un pavage en grès scellé au mortier de ciment.

Travaux de reprise

Les premiers essais en 1921 mettent en évidence des pénétrations d'eau importantes dans les maçonneries lors du remplissage du bassin ; les remèdes adoptés sont l'injection de ciment aux extrémités du bassin et l'exécution d'un enduit au ciment de 3 cm sur la partie verticale de la banquette inférieure (5 m de haut) ; l'étanchéité du bassin s'améliore notablement.

L'analyse de ces entrées d'eau met en évidence que le béton de chaux qui forme la masse de l'ouvrage est anormalement perméable ; en 1923, le



Vue générale du chantier pendant la réalisation de la tranche conditionnelle
General view of the project during the execution of the conditional section

de l'arsenal de Toulon

Michel Rainero



INGÉNIEUR DES
TRAVAUX MARITIMES
Direction des travaux maritimes
(DTM) de Toulon

Bernard Chabroux

DIRECTEUR D'EXPLOITATION
Fougerolle Borie, région PACA

laboratoire des Ponts et Chaussées mesure 6,5 % de vides.

En 1930, lors d'un assèchement rapide des deux formes sud et nord, une galerie de vidange se rompt; la voûte de cette galerie est reprise par une dalle armée pour résister aux sous-pressions d'eau. Entre 1934 et 1936, des campagnes d'injections de chaux sont réalisées dans les bajoyers et radier. En 1937, le radier nord se soulève et doit être repris par une dalle armée avec des tirants de 3 m. A nouveau des injections de ciment en 1938 et 1939; soulèvement sans travaux de reprise d'une partie du radier en 1941; reprise lourde de la partie centrale du radier (fosse à tins) sud et nord en 1968 et 1969; enfin, suite à un soulèvement du seuil d'entrée sud, réalisation d'un massif de béton armé en extrémité du radier et des bajoyers pour chaque seuil de 40 m² de section (10 m en partie horizontale et 4 m d'épaisseur).

Bilan après 70 ans de service

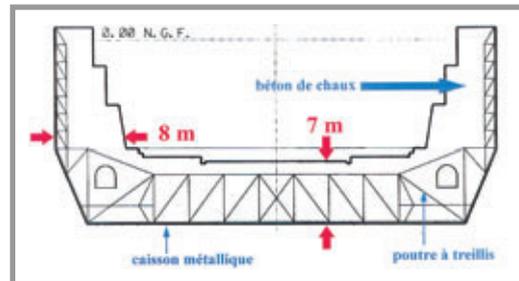
Les désordres constatés après quelques 70 ans de service sont :

- ◆ en radier, partie centrale au niveau de la fosse à tins (zone reprise dans les années 68) légèrement fissurée sans orientation préférentielle, partie latérale avec pavage d'origine soulevée de manière importante (10 à 20 cm) avec cassures de grande longueur de direction longitudinale;
- ◆ en bajoyer, décollement des banquettes et des pierres de couronnement d'autant plus important que la banquette est située en partie basse (jusqu'à 30 cm), décollement par grandes plaques des enduits d'étanchéité rapportés sur la banquette inférieure, fissures horizontales de direction longitudinale suivant les lits de moellons de parement (déplacements relatifs dans le sens vertical de l'ordre de $\Delta L/L = 1 \text{ à } 3.10^{-3}$), profondes ruptures horizontales et verticales qui affectent les angles (particulièrement au niveau des escaliers).

Etat de service

Les études effectuées ces dernières années permettent de synthétiser l'état de l'ouvrage et de traduire les désordres observés en termes de caractéristiques mécaniques et de niveau d'étanchéité.

Les altérations physiques et chimiques affectent plus la forme sud que la forme nord; la masse du matériau constitutif du bassin est altérée de manière décroissante de la face intérieure du bas-



sin vers le cœur de l'ouvrage aussi bien en radier qu'en bajoyer. Cette couche supérieure est sans cohésion (hormis la peau de parement) et est jugée sans résistance mécanique; elle a une épaisseur moyenne pour le radier de 0,80 m au nord et de 2 m au sud, pour le bajoyer de 0,70 m en tête à 1 m en pied au nord et de 1,50 m en tête à 2,5 m en pied au sud.

Aux points singuliers comme les rainures, les muoirs, les seuils, le joint entre les deux caissons métalliques, et principalement à l'encastrement des bajoyers dans le radier, cette épaisseur atteint localement des valeurs plus élevées.

La résistance à la compression n'est pas mesurable pour les matériaux de la couche dégradée; les carottes sont difficilement réalisables (uniquement au carottier triple) et les éprouvettes quasi impossibles à tailler; aux endroits les plus altérés, le liant du matériau se malaxe à la main comme de la pâte à modeler. Quand elle est mesurable, la résistance à la compression du matériau non dégradé varie entre 10 et 20 MPa. Dans une première approche pessimiste, mais illustrant simplement le degré de fatigue de l'ouvrage, qui consiste à prendre 10 MPa comme valeur moyenne actuelle caractéristique de la résistance à la compression des matériaux estimés encore sains et 20 MPa comme valeur moyenne initiale, le bassin aurait une section de béton résistante à la compression résiduelle estimée grossièrement à 35 % dans le radier sud et en pied de bajoyer.

L'étanchéité intérieure a totalement disparu; les infiltrations à travers les maçonneries sont estimées être de l'ordre de 250 m³ à l'heure. Néanmoins la vitesse d'écoulement de l'eau dans les maçonneries poreuses est faible; ainsi lors d'un cycle de vidange d'un bassin (mise en eau puis assèchement) l'essorage des maçonneries après leur saturation est progressif et lent, ce qui génère des surcharges hydrauliques de l'ordre de 2 à 3 m d'eau sur plusieurs semaines. Pour éviter des surprises importantes, le temps de vidange des bassins est allongé et porté à 24 heures.

Coupe de principe de l'ouvrage existant

Schematic section of the existing structure



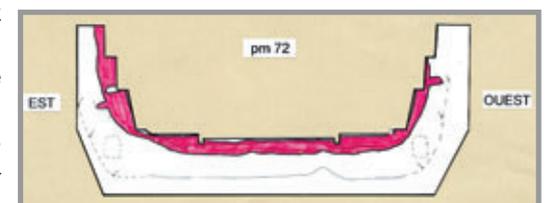
Début de la construction du caisson à La Seyne-sur-Mer

Start of caisson construction at La Seyne-sur-Mer



Détail de la structure du caisson métallique

Structural details of the metallic caisson



Masse des matériaux dégradés

Mass of degraded materials

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

Ministère de la Défense - Direction des Travaux Maritimes, Toulon Naval

Maître d'œuvre

Direction des Travaux Maritimes - Division maîtrise d'œuvre, Toulon Naval

Entreprise principale

Fougerolle Borie

Principaux sous-traitants

- Ancrages et injections : Forézienne d'Entreprises
- Armatures : Pose Armatures Mure
- Injections des fissures : Etandex
- Tuyaux à âme en tôle : Bonna
- Métallerie inox : Prestibat
- Laboratoire béton, instrumentation : Cemex



Cassure au niveau de la réduction de section au droit des escaliers

Break at the level of the section reduction by the stairs



Concrétions présentes dans les galeries de vidange

Concretions present in the drainage galleries

■ PATHOLOGIE DE L'OUVRAGE

La cause originelle des désordres réside dans la nature même des matériaux constituant la masse de l'ouvrage : aussi bien du fait de leurs composants que de leur mise en œuvre.

Cette fragilité initiale non appréciée à sa juste importance, n'est corrigée lors des travaux confortatifs successifs que du point de vue mécanique alors qu'elle est essentiellement préjudiciable par les réactions chimiques qui régissent la cinétique de son évolution.

Les facteurs de fragilité

Le liant principal des bétons est la chaux ; or, c'est la chaux qui occasionne les réactions chimiques favorisant la dégradation du béton : les produits issus des chaînes multiples de réactions n'ont généralement pas de propriété liante. La raison de ce choix est économique : la tonne de chaux coûtait 28 F en 1911 contre 58 F pour la tonne de ciment ; soit, – en prenant en compte les poids volumiques de la chaux (0,8 t/m³) et du ciment (1,2 t/m³) et en supposant qu'il faut un même volume de ces matériaux pour obtenir une compacité identique –, un rapport de 1 à 3.

Le sable utilisé pour les bétons n'a pas une courbe granulométrique continue nécessaire à l'obtention d'une forte compacité. Pour des raisons d'approvisionnement pendant la construction (à cause du conflit), la fraction sableuse du béton initialement composée de 50 % de sable de concassage et 50 % de sable de mer (fraction devant apporter les grains les plus fins) n'est assurée que par du sable de concassage.

Les bétons sont réalisés en utilisant l'eau de mer comme eau de gâchage, pratique courante de l'époque ; les sels de l'eau de mer sont particulièrement néfastes sur la cohésion du béton par les réactions chimiques lentes qu'ils créent.

Circonstances aggravantes

Le vecteur principal de dégradation est la circulation d'eau de mer dans la masse des matériaux constituant la structure du bassin. Les phénomènes sont entretenus : le vieillissement de l'ouvrage se traduit par des réseaux de fractures et de fissures qui alimentent en eau de mer le cœur des maçonneries de manière toujours plus profonde.

La dégradation physico-chimique du béton de chaux a lieu suivant deux modes principaux :

- 1 - Dissolution de la chaux hydratée $\text{Ca}(\text{OH})_2$ avec échange du calcium de la chaux et du magnésium de l'eau de mer conduisant à une précipitation de brucite avec discontinuité de la phase liante ;
- 2 - Dissolution de la calcite (cristal issu de la carbonatation de la chaux) sous l'action d'efforts mécaniques localement importants et précipitation

sous forme de boue sans cohésion de calcite recristallisée.

Ces modes d'altération du béton de chaux sont aggravés par de multiples circonstances qui accélèrent la ruine :

- ◆ les bétons de chaux ont été réalisés avec de l'eau de mer, ainsi dès le départ les agents réactifs sont présents au cœur de l'ouvrage et dans sa masse ;
- ◆ la porosité du béton, outre l'accroissement du phénomène de contraintes inter-granulaires fortes, permet le renouvellement de l'eau de mer au sein de l'ouvrage ;
- ◆ enfin, le cycle de vidange/remplissage augmente la pénétration de l'eau de mer dans la structure de l'ouvrage par l'entraînement des produits décomposés et ainsi favorise l'extension des zones réactives.

Risques évités

Une dégradation habituelle des bétons de chaux est aussi la formation de thaumasite issue de l'attaque sulfatique de l'eau de mer, engendrant des gonflements.

Dans le cas du bassin, seules des traces d'ettringite (formule structurale comparable à la thaumasite) sont observées sous forme d'oursins librement cristallisés (visibles au microscope mais indécélables en diffractométrie des rayons X) ; la conclusion retenue est qu'il n'y a pas de risque de gonflement généralisé du fait de la forme libre observée des cristaux, ceci pouvant s'expliquer par l'effet bénéfique pour ce phénomène de la grande porosité du béton qui permet une libre expansion des sels gonflants.

Une meilleure compacité du béton aurait certainement limité le développement des phénomènes observés mais aurait probablement entraîné l'apparition de désordres dus à des gonflements. La ruine de l'ouvrage aurait-elle été plus ou moins rapide ? La question reste ouverte ; la seule certitude est que la technique de réparation aurait alors dû prendre en compte les contraintes contrariées résultant de gonflements résiduels, en supposant par exemple que les travaux conduisent à bloquer le bassin dans un état donné (c'est-à-dire dans un état de confinement quasi libre) et de passer après travaux à un état de confinement quasi parfait.

■ BILAN POUR UNE RÉPARATION

Outre des données relatives à l'usage spécifique du bassin (géométrie intérieure, efforts appliqués, contraintes d'exploitation, d'équipements, etc.) le bilan des études conduit à un cahier des charges pour une réparation issue de contraintes liées à l'histoire du bassin et d'exigences pour garantir un résultat de pérennité notamment.

Contraintes

Des échecs des tentatives de reprise depuis la mise en service du bassin, il faut retenir essentiellement que l'origine du mal n'est pas traitée : si les injections ont bien pour but d'éviter l'alimentation du cœur de l'ouvrage en eau de mer il est illusoire de penser qu'elles puissent recréer un monolithisme comparable à celui d'un béton correctement formulé, d'autant que les techniques d'alors ne permettent pas d'injecter des ciments très fins et de réaliser des injections par passes sélectives ; les injections de chaux sont sans succès puisque la chaux reste à l'état pâteux et qu'elles gênent probablement les injections de ciment ultérieures.

Ainsi, le matériau actuel reste poreux et particulièrement hétérogène du fait des résidus de réactions chimiques et des multiples injections.

Le béton de chaux jugé encore sain est caractérisé aujourd'hui de manière plus quantitative par les éléments suivants :

- ◆ masse volumique : 2 118 kg/m³;
- ◆ porosité en volume : 19,4 %;
- ◆ module de déformation longitudinale : E = 8 000 MPa;
- ◆ coefficient de Poisson : n = 0,2;
- ◆ résistance caractéristique : fc = 10 MPa.

Exigences

Les objectifs majeurs de la réparation sont :

- ◆ pour la cohésion, reconstituer le caractère monolithique ou du moins cohésif des matériaux altérés de la forme au niveau des couches superficielles aussi bien en radier qu'en bajoyer ;
- ◆ pour l'étanchéité, limiter au maximum les circulations d'eau de mer dans les maçonneries ;
- ◆ pour la pérennité, donner une durée de vie nouvelle de 50 ans qui est la longévité estimée de la tôle enveloppe assurant l'étanchéité de la peau extérieure ;
- ◆ stabilité pendant les travaux et prise en compte dans la technique de réparation de l'état initial des contraintes avant travaux et de leur redistribution lors du phasage des travaux.

Procédure

Pour un budget de 130 millions de francs (soit 10 à 15 % du coût d'un ouvrage neuf), le calendrier de l'opération s'échelonne :

- ◆ depuis un programme approuvé en février 1995 ;
- ◆ un avant-projet sommaire approuvé en novembre 1995 ;
- ◆ un marché notifié en mars 1996 ;
- ◆ jusqu'à un chantier commencé en juillet 1996 et achevé en septembre 1998.

Les particularités de la procédure sont une consultation sur appel d'offres sur performances avec pu-

blicité européenne et des modalités strictes d'incitation pour la réduction des coûts.

LEÇONS À TIRER

Si les reprises effectuées depuis sa construction sont sans succès, c'est que d'une part, les connaissances théoriques concernant le vieillissement des bétons anciens sont récentes (années soixante-dix) et uniquement qualitatives ; et que d'autre part, le caractère lent des dégradations qui n'ont pas une origine mécanique pure rend celles-ci tardivement perceptibles mais potentiellement très évolutives. Ce sont autant d'incertitudes qui perdurent et obligent à retenir des solutions enveloppantes pour les techniques de réparation.

Du cas et du chantier de réparation

La porosité du béton est détectée dès 1923 et jugée préjudiciable par les venues d'eau qu'elle occasionne ; les conséquences sur la chimie du béton sont alors inconnues. Les premières analyses sur ce sujet datent de 1975 pour ce bassin. Tous les ouvrages maritimes d'une conception semblable ne cumulent pas forcément les mêmes facteurs de risques, mais ce n'est pas parce que les désordres ne sont pas aussi flagrants que des mécanismes de dégradations similaires n'existent pas. Par exemple, le grand bassin Vauban Ouest, frère jumeau du bassin Est construit immédiatement après, a bénéficié d'une formulation correcte du sable et son béton de chaux atteint une compacité normale ; mais tous les autres paramètres sont identiques et même si aucun désordre majeur n'est apparent, la prudence conduit à mener des investigations poussées.

Dans le même ordre de relativité des connaissances, il est intéressant de noter que le choix économique du béton de chaux est justifié en 1933 par le fait que "la chaux hydraulique donne dans la Méditerranée, d'au moins aussi bons résultats que le meilleur ciment Portland". L'infirmité de cette justification à la lumière des études récentes et de la naissance de la connaissance scientifique de la chimie du béton ne peut que rappeler les constructeurs actuels à une nécessaire modestie vis-à-vis du vieillissement des matériaux.

Une preuve de l'absence de recul est donnée par une déconvenue du chantier en cours de réparation de cet ouvrage. Une hypothèse de modélisation du phénomène de dégradation du béton dans l'épaisseur de l'ouvrage a consisté à supposer que la loi de dégradation était linéaire au fur et à mesure que l'on pénètre dans l'épaisseur de l'ouvrage. Cette hypothèse séduisante reflète le sens commun selon lequel le vieillissement est progressif ; cela permet par exemple de déterminer une valeur



Au premier plan : cloutage de connexion à la structure existante

In foreground : connection nailing to the existing structure

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Démolition de maçonneries : 26 000 m³
 - 8 000 clous diamètre 50 mm longueur 5 à 20 m : 58 000 ml
 - Coffrages : 15 000 m²
 - Bétons : 27 000 m³
 - Aciers : 1 600 t
 - Conduites âme tôle à joints soudés diamètre 2000 : 560 ml
- Début des travaux : juillet 1996
Fin des travaux : septembre 1998

Vue de la nouvelle coque en béton armé dans la zone de l'angle radier-bajoyer

View of the new reinforced concrete shell in the zone of the floor-sidewall corner



Mise en place des tuyaux de chemisage à âme en tôle

Installation of liner pipes with sheetmetal web



croissante de la résistance caractéristique à la compression du béton selon la profondeur, loi utile pour dimensionner l'épaisseur d'une carapace de reprise par exemple. L'expérience du chantier lors de la phase de démolition met au contraire en évidence le caractère discontinu de l'état du béton de chaux : les couches superficielles sont bien totalement dégradées avec perte de toute cohésion comme prévu dans les études, mais le béton sous-jacent est immédiatement sain avec une résistance à la compression de 10 MPa, avec une zone de transition très étroite.

La mise à nu du béton de chaux sain s'accompagne également de l'observation que la dégradation est très rapide dès qu'il n'est en quelque sorte plus protégé par le magma de matériaux dégradés. Les zones qui présentent un aspect sain à l'issue de la démolition arrêtée sur un critère de résistance des matériaux, après seulement quelques semaines de déconfinement à l'air libre, suintent de la boue blanchâtre et perdent leurs caractéristiques rhéologiques ; ce qui confirme que le phénomène d'altération défini comme lent dans les conditions de vie usuelles d'un ouvrage peut brusquement s'accélérer quand un paramètre est modifié et conduire à une ruine rapide de cet ouvrage.

Incertitudes et choix

Les questions en suspens concernent l'explication des phénomènes observés et également les incertitudes quant à l'évolution à venir des matériaux, ces dernières ayant conduit à privilégier un type de solution de réparation parmi les différentes familles de solutions possibles. Toutes consistent à créer

une carapace rapportée à l'intérieur du bassin. Une famille de solutions non retenue consiste à évacuer les sous-pressions d'eau dans la maçonnerie par un drainage au plus près de la nouvelle structure, ce qui diminue le dimensionnement de la carapace. Cette famille de solutions est licite tant que la coque métallique extérieure remplit son office d'étanchéité, les circulations d'eau ne traversant pas le cœur de l'ouvrage car l'eau ainsi drainée provient alors des infiltrations à travers la carapace non parfaitement étanche. Ceci est satisfaisant en regard du mode retenu pour la dégradation du béton de chaux et rompt la cinétique d'altération dans la mesure où le milieu de la maçonnerie n'est plus saturé. Non seulement ce type de solution est très sensible aux hypothèses retenues, mais a également le défaut de nécessiter un entretien permanent du réseau de drainage, celui-ci risquant de se colmater avec les produits de décomposition.

La solution retenue s'affranchit de l'hypothèse hautement sensible d'étanchéité de la coque métallique extérieure en réalisant une carapace intérieure aussi étanche que possible dimensionnée pour une éventuelle reprise des sous-pressions d'eau internes à la maçonnerie.

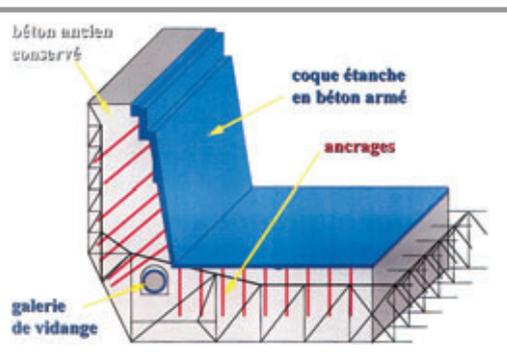
Pour conclure

Anciens ou modernes, les ouvrages maritimes en béton de chaux ou de ciment subissent l'agressivité du milieu marin, même en Méditerranée, avec des modes de dégradation probablement identiques. L'expérience du cas du grand bassin Vauban Est, bassin construit au début du siècle en béton de chaux, permet d'éclairer la connaissance du vieillissement de ce type de matériau et d'en tirer une leçon essentiellement de prudence pour des ouvrages plus jeunes même construits avec des matériaux d'aujourd'hui. Que le caractère de gravité du cas étudié provienne de causes intrinsèquement liées à l'ouvrage, la nature des phénomènes est potentiellement identique pour d'autres cas. L'observation majeure qui doit être soulignée est que l'auto-alimentation du mode destructif conduit à une accélération des désordres. Il est ainsi raisonnable de privilégier des investigations préventives sur tout type d'ouvrage en béton soumis à l'agression marine, même en l'absence de tout désordre visible.

LE CHANTIER

Les remèdes

Pour enlever l'appel d'offres, les équipes de Fougère Borie ont recherché, avec l'aide de Pierre Vezole, le meilleur compromis pour atteindre l'objectif de pérennité de 50 ans fixé dans le programme



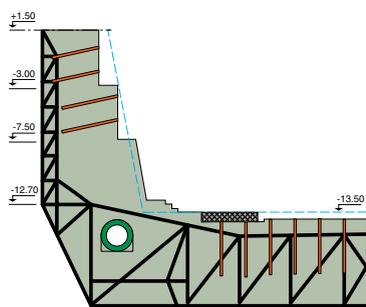
Principe de la réparation

Principle of repairs

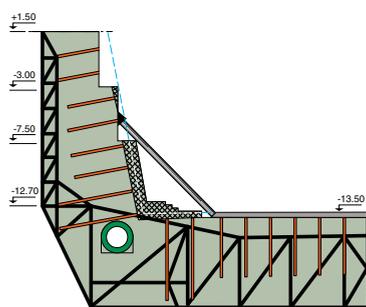
Pendant l'exécution de la tranche ferme, la deuxième partie du bassin reste en service

During the execution of the firm section, the second part of the basin remains in service

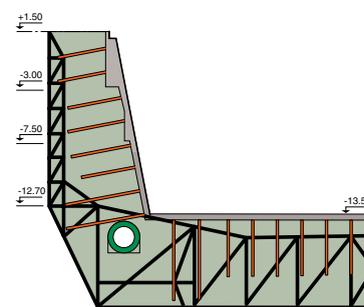




Phases a et b



Phases c à f



Phases g à l

PHASAGE D'EXÉCUTION

La cinématique des travaux s'est déroulée suivant les douze séries d'opérations ci-dessous :

- | | | |
|--|--|---|
| <p>a Démolition de la partie centrale du radier et de la partie supérieure des bajoyers sur 10 m de hauteur. Gainage des galeries de vidange existantes.</p> <p>b Ancrage de la partie centrale du radier et de la partie supérieure des bajoyers.</p> <p>c Ferrailage et bétonnage du radier central.</p> <p>d Butonnage de l'angle radier-bajoyer.</p> | <p>e Démolition de l'angle radier-bajoyer.</p> <p>f Ancrage de l'angle radier-bajoyer et finition de l'ancrage des bajoyers sur toute leur hauteur.</p> <p>g Ferrailage et bétonnage des radiers latéraux.</p> <p>h Ferrailage et bétonnage de la première levée des bajoyers (hauteur 5 m).</p> <p>i Dépose des butons d'angle radier-bajoyer.</p> | <p>j Ferrailage et bétonnage de la deuxième levée des bajoyers (hauteur 5,50 m).</p> <p>k Ferrailage et bétonnage de la troisième levée des bajoyers (hauteur 4,50 m).</p> <p>l Injection des joints Fuko incorporés dans les reprises de bétonnage.</p> |
|--|--|---|

performancier. Cette durée correspond à celle escomptée pour la coque métallique ayant servi à la construction.

La proposition répond à deux grands axes :

- ◆ arrêter les circulations d'eau de mer. Pour ce faire, le béton de chaux est enfermé afin de stopper le renouvellement de l'eau de mer. L'encapsulage comprend deux parties principales :

- une coque en béton armé étanche,

- un chemisage des galeries de vidange au moyen de tuyaux Bonna à âme en tôle ;

- ◆ assurer la résistance mécanique. La coque en béton armé est dimensionnée pour compenser la perte de résistance du béton de chaux et reprendre les efforts mécaniques supplémentaires. La poussée de l'eau sur la coque rapportée (lorsque le bassin est vide) est reprise par huit mille clous dont la longueur varie de 5 à 20 m. Ces clous sont réalisés par la Forézienne d'Entreprises en sous-traitance.

Le déroulement des travaux

Le marché prévoyait la réalisation des travaux en deux phases, la forme de radoub pouvant être divisée dans sa longueur en deux bassins susceptibles de fonctionner indépendamment. Cela permettait à la Marine Nationale de continuer l'exploitation d'une moitié de la forme pendant que les travaux se déroulaient dans l'autre partie.

Le délai global de réalisation de 15 mois se décomposait ainsi :

- ◆ 10 mois pour la tranche ferme relative à la réalisation de la partie sud d'une longueur de 250 m ;
- ◆ 5 mois pour la tranche conditionnelle relative à la réalisation de la partie nord d'une longueur de 170 m.

En fait, pour des raisons d'exploitation des bassins, le chantier s'est déroulé suivant le programme suivant :

- ◆ du 15 juillet 96 à fin août 97, soit 13,5 mois pour la tranche ferme réduite à 230 m de longueur ;

- ◆ du 1^{er} septembre 97 à mi-avril 98, soit 7,5 mois pour la tranche conditionnelle et les travaux supplémentaires de construction d'une fosse sonar ;

- ◆ de mi-avril 98 à fin juin 98, ajournement des travaux ;

- ◆ de juillet 98 à fin septembre 98, soit 3 mois pour une troisième phase concernant les 20 m de jonction entre les deux parties déjà réalisées.

Le phasage d'exécution

Ce phasage a permis d'assurer la stabilité de l'ouvrage existant en phase de travaux. En effet, le grand bassin Vauban a été construit à l'intérieur d'une coque métallique flottante dans la mer dont les dimensions en section transversale atteignaient 22,40 m de hauteur et 53 m de largeur moyenne. Il fallait d'abord s'assurer de sa stabilité vis-à-vis de la poussée d'Archimède qui est énorme en raison des dimensions de la coque et de son niveau d'assise calé à la cote - 21,20 NGF.

A l'intérieur de cette coque métallique, la construction en maçonnerie pourtant épaisse de 7 m en moyenne, empêchait tout juste l'ensemble de flotter.

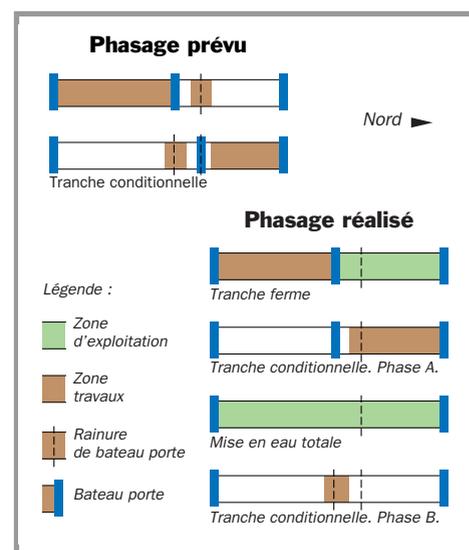
Le phasage retenu a donc permis de réduire les déficits de poids dus aux démolitions et de les compenser partiellement par la construction de la partie centrale du nouveau radier avant de démolir l'angle radier-bajoyer.

Il fallait ensuite s'assurer de tout risque de mouvement et de décompression des bajoyers existants du fait de l'affaiblissement de leur section par les démolitions.

La zone d'angle radier-bajoyer est très fortement sollicitée, notamment par la pression hydrostatique et la poussée des remblais s'exerçant sur les bajoyers. De plus, la présence au cœur de cette zone d'une galerie de vidange de 7 m² de section fragilise la maçonnerie.

Le phasage retenu a donc permis dans l'ordre :

- ◆ d'améliorer la résistance de la maçonnerie au



Phasage des travaux. Phasage prévu et phasage réalisé

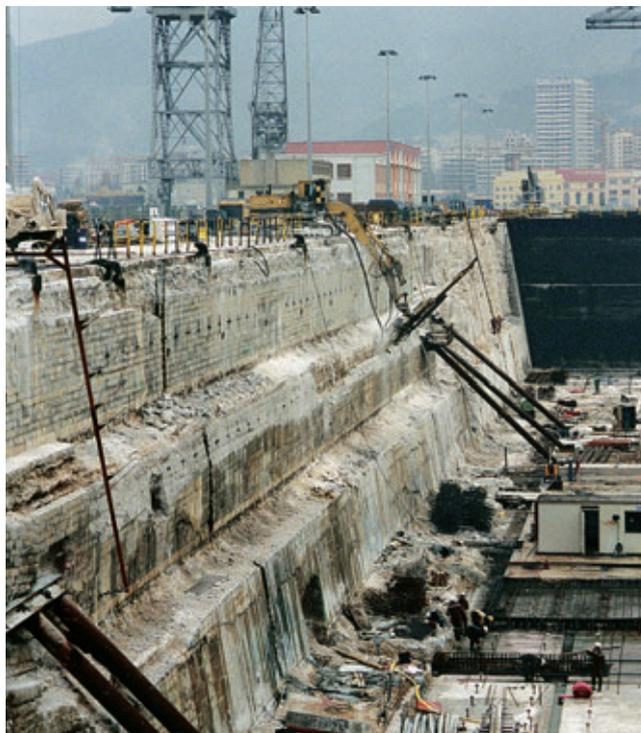
Phasing of works. Phasing planned and phasing completed



Ferrailage du radier
Floor reinforcement

La pelle Caterpillar équipée de son ensemble de foration travaillant en négatif depuis le haut du bassin

The Caterpillar shovel equipped with its drilling system working negatively from the top of the basin



Vue du bassin avec les angles radier-bajoyers en phase de bétonnage

View of the basin with the floor-sidewall corners in concreting phase



Déroctage à la fraise hydraulique

Rock breaking with the hydraulic cutter



droit de la galerie de vidange par la mise en place d'un gainage constitué d'une canalisation diamètre 2000 en béton armé et âme en tôle d'acier, bloquée au parement de l'ancienne galerie par injection de micro-béton ;

- ◆ de maintenir les contraintes initiales dans les bajoyers de la structure existante pendant les phases de démolitions, de réalisation des ancrages et de reconstruction de l'angle radier-bajoyer à l'aide d'un butonnage d'angle prenant appui sur la partie centrale du nouveau radier et sur le bajoyer au-dessus de la future première levée.

Les moyens employés

L'ensemble des moyens et matériels mis en œuvre sur un chantier aussi spécifique a fait l'objet d'une étude approfondie.

Certains outils comme les coffrages de bajoyers ont été spécialement construits pour ces travaux.

Engins de levage

Deux grues à tour pouvant translater sur rails ont été installées en fond de bassin. Sur le quai, une grue mobile pouvait se déplacer en permanence, elle était secondée par des grues d'appoint de forte capacité (200 t) pour manutentionner les engins en fond du bassin.

Travaux de démolition

Les démolitions en bajoyers ont été réalisées à l'aide d'une pelle de grande puissance équipée d'une fraise hydraulique. Cette machine a travaillé de deux manières différentes :

- ◆ soit en négatif depuis le haut du bassin jusqu'à 5 m en contrebas ;
- ◆ soit en positif depuis le fond du bassin jusqu'à 10 m de hauteur.

Les démolitions en radier ont été menées à bien à l'aide de matériels moins puissants du type brise-roche.

L'évacuation des déblais a eu lieu principalement de nuit et s'est faite par les grues à tour.

Mise en œuvre des ancrages

Au niveau des bajoyers, les forages ont été réalisés à l'aide d'une pelle spécialement équipée d'un ensemble de foration selon deux séquences sensiblement identiques à celles de la démolition (travail en négatif depuis le quai et travail en positif depuis le fond du bassin). Les forages en radier et en pieds de bajoyers ont été exécutés à l'aide de matériel classique. Les ancrages ont été mis en œuvre à l'aide de nacelles automotrices évoluant depuis le fond du bassin.

Opérations de bétonnage

Les bétons ont été approvisionnés depuis le quai par pompes à béton sur porteur munies de flèches de grande portée.

Coffrage des bajoyers

Les coffrages métalliques, d'une hauteur moyenne de 5 m ont été spécialement conçus pour ce chantier et dimensionnés pour reprendre les efforts de la pression hydrostatique du béton avec seulement un ancrage en pied et un ancrage en tête. Le coffrage de première levée fonctionne suivant le mode "autoportant" et roule sur le radier. Les coffrages des deuxième et troisième levées sont du type "grim pant".

Les principales difficultés techniques rencontrées

Outre les changements importants de la programmation des travaux déjà indiqués, nous avons rencontré les difficultés imprévues suivantes :

- ◆ le marché, issu d'un appel d'offres sur performances reprend les hypothèses et les solutions proposées par l'entreprise. Une des premières dif-



Nouvelle mise en eau en partie sud du bassin
Filling the southern part of the basin again

difficultés a donc été de valider sur le terrain lors de la première tranche des travaux et au fur et à mesure de l'avancement les théories avancées concernant les phénomènes de dégradation du bassin ;

◆ les bajoyers, qui atteignent une hauteur de quinze mètres, présentent un fruit et ont une géométrie complexe. Ils comportent un ensemble de banquettes horizontales, rainures verticales, réseaux, échelles, rainures de bateau-porte et escaliers en incrustation qui sont autant de points singuliers "cassant" le rythme d'avancement.

Cette phase de travail exécutée dans un espace à trois dimensions a nécessité la présence permanente de quatre géomètres pour assurer :

- ◆ le réglage du fond de démolition ;
- ◆ l'implantation de l'amorce des forages destinés aux ancrages et le réglage précis des têtes d'ancrages ;
- ◆ le positionnement du ferrailage qui était amarré sur les ancrages.

Ces travaux sont des travaux de rénovation d'un ouvrage âgé de plus de 70 ans, ce qui a nécessité une adaptation constante à l'existant en tenant compte notamment du degré variable de dégradation du béton de chaux du support, d'un taux d'infiltration de l'eau de mer variable et de la présence d'inclusions métalliques imprévisibles.

La configuration du chantier dans un espace confiné situé en contrebas, accessible uniquement par grue, avec les travaux des bajoyers surplombant ceux des radiers, a entraîné des difficultés d'organisation et d'interfaces dans les nombreuses phases de l'exécution. La bonne marche du chantier vis-à-vis des nouveautés rencontrées, aussi bien sur le plan technique que sur le plan des délais, a entraîné la signature d'un avenant qui a augmenté le montant du marché initial d'environ 20 %.

ABSTRACT

The Vauban East basin of the Toulon dockyard Successful rehabilitation

M. Rainero, B. Chabroux

The combination of general circumstances related to the construction of the maritime structures of the beginning of the century and special circumstances during the construction of the Vauban East basin of Toulon prematurely weakened this dry dock. It has been suffering since its commissioning from problems of waterproofing and has experienced different kinds of trouble. The seawater circulated in the masonry caused a chemical alteration of the lime concrete which reduced its mechanical strength, leading to a self-sustained destruction process. The rehabilitation programme carried out in two phases in a delicate configuration made it possible to continue operating with half of the basin while work was being carried out on the other half. The case of the Vauban East basin shows that it is effective to proceed with preventive investigations on concrete structures subject to sea aggression even in the absence of visible damage.

DEUTSCHES KURZREFERAT

Der große Werftbezirk Vauban Est in Toulon Eine erfolgreiche Sanierung

M. Rainero, B. Chabroux

Aufgrund des Zusammenfalls der allgemeinen Baubedingungen für Seeanlagen im frühen 20. Jahrhundert und der besonderen Umstände bei der Errichtung des Bezirks Vauban Est der Werft von Toulon ist dieses Trockendock vorzeitig gealtert. Seit der ersten Wasserrung gibt es Dichtheitsprobleme, und zahlreiche Störfälle waren zu verzeichnen. Das im Mauerwerk fließende Meerwasser hat den Kalkbeton chemisch verändert, so daß sich seine mechanische Festigkeit wesentlich verringert hat und die Zerstörung sich zyklusmäßig sozusagen selbst nährte.

Während des zweiphasig in einer komplizierten Konfiguration durchgezogenen Sanierungsprogramms für das Bauwerk konnte der Betrieb jeweils in einer Hälfte des Bereichs weitergehen, während die andere umgestaltet wurde. Der Fall "Vauban Est" zeigt, daß es

immer sinnvoll ist, die in einem marinen Umfeld gebauten Betonanlagen vorbeugend zu untersuchen, selbst wenn keine sichtbaren Schäden vorliegen.

RESUMEN ESPAÑOL

La gran dársena Vauban Este del arsenal de Tolón Una rehabilitación perfectamente lograda

M. Rainero y B. Chabroux

La coincidencia de circunstancias generales relacionadas con el método constructivo de las estructuras marítimas y de las circunstancias particulares al proceder a la ejecución de la gran dársena Vauban Este de Tolón, ha venido a fragilizar prematuramente este dique de carenas. Desde un principio, se han puesto de manifiesto problemas de impermeabilización y se han producido numerosos desórdenes. La circulación del agua salada en las obras de fábrica ha provocado una alteración química del hormigón de cal, que ha disminuido su resistencia mecánica, dando así lugar a una autoalimentación del modo destructivo. El programa de rehabilitación de la estructura, ejecutado en dos fases que se han presentado según una configuración delicada, ha permitido continuar el funcionamiento con una mitad de la dársena mientras que las obras se desarrollaban en la otra mitad.

El caso de la gran dársena Vauban Este demuestra que es razonable proceder a investigaciones preventivas en las estructuras de hormigón sometidas a la agresión marítima, incluso en caso de inexistencia de desórdenes visibles.

Le confortement du quai

Le quai Carnot à Concarneau présentait des désordres apparus en 1987 qui se sont accélérés jusqu'à la mise en place d'une butée provisoire en 1992 entraînant une interdiction d'accostage et neutralisation des terre-pleins.

La technique de réhabilitation retenue à l'issue de l'appel d'offres avec variantes a été celle d'un confortement par jet grouting proposé par l'entreprise Solétanche Bachy. L'originalité de cette technique innovante par la facilité de mise en œuvre à un coût concurrentiel en fait une première sur la façade atlantique.



Carottes de colonne de jet
Cores of jet column

Le port de Concarneau est un port d'Etat (pêche et commerce), dont les terre-pleins sont concédés à la Chambre de Commerce et d'Industrie de Quimper.

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

La partie ouest du quai Carnot a été construite par tranches entre 1932 et 1937. L'ouvrage est un mur poids fondé sur un matelas de matériaux pierreux arasé à la cote - 2,80 CM reposant sur un sol hétérogène constitué devant l'ancienne criée de rocher friable et dans les 120 m ouest d'arène kaolinisée.

Le mur est constitué :

- ◆ d'une infrastructure composée de deux lits superposés de blocs en béton préfabriqués entre les niveaux - 2,80 CM + 1,20 CM ;
- ◆ d'une superstructure en béton coulé en place entre les niveaux + 1,20 CM et + 5,80 CM. La tablette de quai est arasée à la cote + 6,20 CM.

Le quai a subi par endroits des effondrements lors de la deuxième guerre mondiale.

En fondation, les blocs ne sont pas toujours joints.

Le remblai du terre-plein est constitué de matériaux

sableux et vasards issus des dragages opérés lors de la construction.

Les locaux techniques du concessionnaire ainsi qu'un parc de stationnement couvert sont établis 10 m en arrière de l'arête supérieure du mur. Les bâtiments sont fondés sur pieux Franki non armés.

Etat avant travaux (quai buté)

La partie ouest du quai Carnot connaissait depuis plusieurs années des désordres importants. Une accélération des mouvements a été observée à partir du mois de novembre 1991. Ces observations ont conduit dans un premier temps les services de la DDE en accord avec la Chambre de Commerce et de l'Industrie de Quimper à interdire l'exploitation du quai et du terre-plein. Ceci a permis de limiter les surcharges importantes dues au trafic lourd des camions frigorifiques et les efforts d'accostage exercés sur l'ouvrage.

Courant février 1992 l'accélération des désordres s'est confirmée. La magistrale du quai s'étant déplacée par endroit jusqu'à 3 cm en un mois.

Afin d'enrayer ces déplacements, il a été décidé de remblayer en avant du mur jusqu'à la cote + 2,50 CM. Ces travaux ont été réalisés dans les jours qui ont précédés la grande marée du 19 mars 1992.

La butée a été mise en place sur une longueur d'ouvrage de 110 m (figure 1).

Mesures des déplacements

Parallèlement à ces mesures confortatives le quai a été équipé en janvier 1992 de trois tubes inclinométriques d'une douzaine de mètres de longueur par le LRPC de Saint-Brieuc, T1 à T3, le long de la magistrale.

La première mesure, effectuée avant que la butée soit mise en place, a mis en évidence deux comportements différents selon le profil. Ainsi, alors que le dispositif T3 n'indique aucun déplacement significatif, les dispositifs T1 et T2, au contraire, ont été l'objet de mouvements importants et similaires vers le bassin.

La partie sud-ouest du quai semblait alors subir une translation à sa base accompagnée d'une rotation d'ensemble : bien que composé de plusieurs éléments, le quai semblait se comporter comme un monolithe.

Des déplacements horizontaux de l'ordre de 30 mm en tête et de 10 mm en pied pour un mois ont été relevés en T1, qui a connu les mouvements les plus importants.

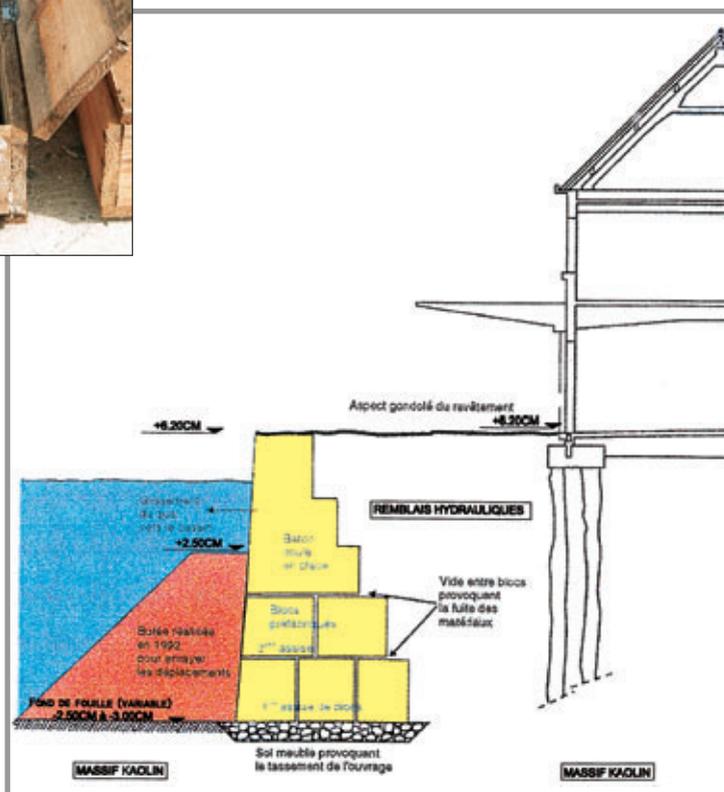


Figure 1
Profil en travers du quai
avant travaux

Cross-section of the quay
before works

Carnot à Concarneau

Damien Grimont



RESPONSABLE
ANTENNE BRETAGNE -
PAYS DE LOIRE
Solétanche Bachy

Jean-Jacques Gueguen

ITPE - RÉALISATION
DDE du Finistère

Marc Le Guennic

ITPE - ÉTUDES
DDE du Finistère

Les deux relevés suivants, effectués le premier une semaine après la mise en place de la butée, le second un mois plus tard, ont montré une diminution puis un arrêt des déplacements, démontrant ainsi l'efficacité des mesures d'urgences prises (figure 2).

■ DIAGNOSTIC ET RECHERCHE DE SOLUTIONS

En l'absence d'éléments d'information particuliers fournis par l'exploitant de l'ouvrage quant à des causes exogènes au système ouvrage poids-sol (sur dragage, surcharges d'exploitation excessives) expliquant les désordres présentés ci-avant, le maître d'œuvre et son géotechnicien (LRPC de Saint-Briec) ont été conduits à conclure à un déficit de stabilité de l'ouvrage au regard des caractéristiques à long terme du substratum kaolinisé.

Le calage d'un système d'interaction entre le mur poids et sa fondation a été réalisé en prenant un coefficient de glissement = 1 (mouvement constaté par les inclinomètres mis en place en deux points de l'ouvrage) avec une charge hydraulique de 2,25 m (+ 0,5 CM devant, + 2,75 CM derrière le mur) mise en évidence à l'arrière de l'ouvrage.

Cette situation, sans surcharge ni traction des bollards, a conduit à retenir un angle de 28° de frottement sous la base du mur, angle un peu inférieur à ceux mesurés mais qui pourrait s'expliquer par un frottement résiduel sur un plan de glissement déjà actif.

Les caractéristiques au sein du massif de kaolin ont dans un premier temps été retenues avec une cohésion à long terme nulle, et un angle de frottement d'environ 30°.

Ces valeurs ont conduit à mettre en évidence un équilibre correct en rotation et un léger déficit au poinçonnement, ainsi qu'une sécurité insuffisante en matière de grand glissement (rupture circulaire). Au regard des valeurs de déficit ainsi mises en évidence, ont été dégagées différentes propositions de confortement de l'ouvrage dont les deux solutions principales sont les suivantes : solution palplanches et micropieux de forte inertie.

Solution palplanches

L'idée de reprendre le déficit de résistance au cisaillement sous le mur par un rideau de palplanches permettant la mobilisation d'une butée supplémentaire est *a priori* séduisante, d'autant qu'en montant le rideau jusqu'au couronnement du quai, est réalisé un habillage et un renforcement du mo-

nolithisme de l'ouvrage. Par contre, au regard notamment des inconnues liées au comportement du mur à l'arrière du rideau, a été retenue l'adoption de fiches et profilés de palplanches aptes à reprendre les efforts correspondants à un système faisant abstraction du mur, pour reprendre la poussée totale du rideau.

Solution sur micropieux de forte inertie

Une autre solution consiste à reprendre les efforts sur deux lignes de pieux formant chevalet. Une ligne avant verticale et une ligne arrière inclinée à 25° sur la verticale à l'arrière du mur.

Ce procédé, outre la possibilité de reprendre un effort horizontal, peut s'opposer dans une certaine mesure au risque de rupture circulaire en jouant un rôle de clouage, à condition d'utiliser pour ces micropieux des tubes d'acier de forte inertie.

Cette solution par contre, conduit à conserver le parement actuel du mur de quai, ou à le traiter par béton projeté ou éléments préfabriqués scellés au mur actuel.



Foreuse jet. Réglage de l'inclinaison du forage

Jet drilling machine. Adjustment of drilling angle

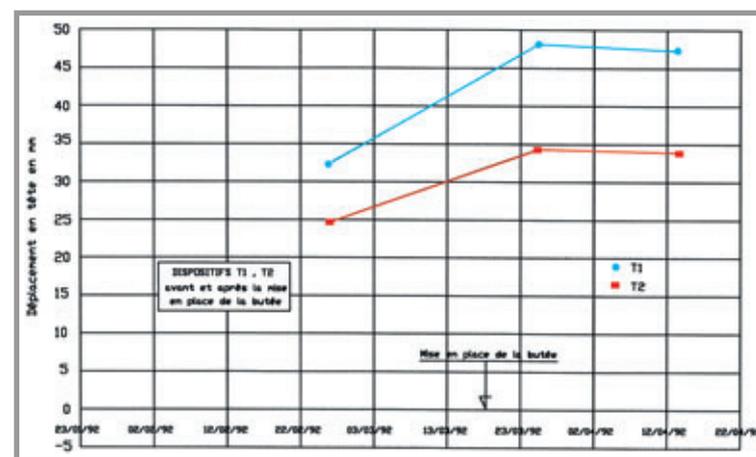


Figure 2
Déplacement en tête avant et après la mise en place de la butée
Displacement on head before and after the placing of the abutment

■ LA CONSULTATION

La procédure de consultation retenue pour le confortement de l'ouvrage a été celle de l'appel d'offres ouvert.

La solution de base prévoyait un rempiètement de l'ouvrage par un rideau de palplanches dans le souci :

- ◆ de fournir un confort plus important à l'usager, à travers un ouvrage rectiligne ;
- ◆ de réaliser une réfection complète du parement de l'ouvrage.

Les sujétions importantes liées à ce confortement de l'ouvrage étaient dans ce cas les suivantes :



Stockage du ciment
Cement storage

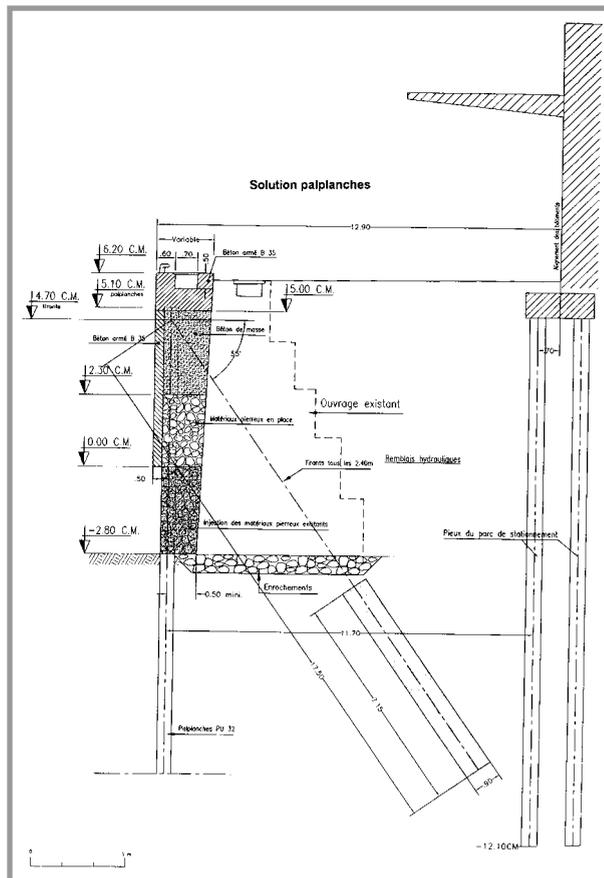


Figure 3
Profil en travers type du quai Carnot. Solution de base (palplanches)
Typical cross-section of the quay.
Basic solution (sheetpiles)



Découverte d'une colonne d'essais
Discovery of a test column

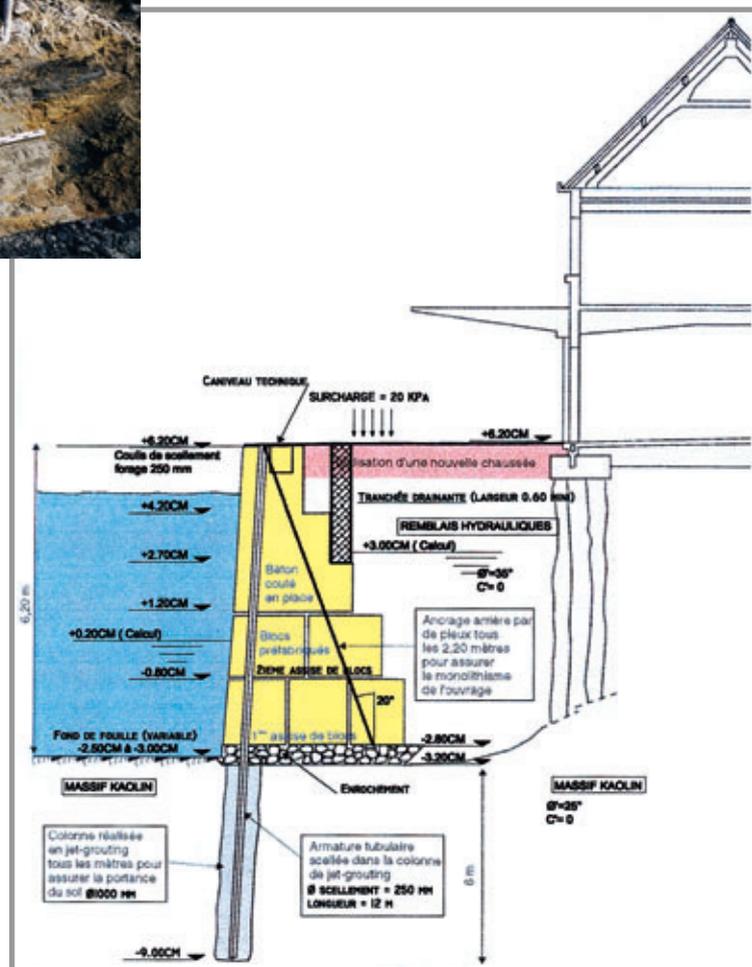


Figure 4
Profil en travers du quai Carnot après travaux
Cross-section of quay after works

- ◆ conserver un drainage correct de l'ouvrage à travers l'ensemble du dispositif créé ;
- ◆ assurer autant que possible un caractère monolithique à l'ensemble ;
- ◆ ne pas remettre en question la stabilité des bâtiments situés sur le quai et fondés sur pieux Franki non armés.

Le profil correspondant à cette solution de base est reporté sur la figure 3.

L'appel d'offres a été lancé avec variante large afin de laisser aux entreprises la possibilité de proposer des solutions innovantes et optimales au regard des sujétions visées ci-dessus. Après un appel d'offres infructueux dans lequel les entreprises se sont limitées à répondre soit à la solution de base soit à une adaptation de celle-ci, la consultation a été relancée après réalisation d'une étude géotechnique complémentaire destinée à permettre aux entreprises d'optimiser le projet.

Cette étude, a mis en évidence une très forte hétérogénéité des caractéristiques du substratum kaolinisé (sable limoneux selon la classification LCPC) tant en plan que sur une même verticale, avec présence d'une "faille géotechnique".

De cette nouvelle consultation sont sortis les deux types de solutions envisagées dans le cadre du diagnostic avec notamment une adaptation de la solution micropieux par utilisation de la technique du jet grouting et une optimisation de la reprise des efforts.

Cette dernière solution proposée par l'entreprise – dont le profil type est joint (figure 4) – a été retenue en raison :

- ◆ de son coût : elle permet en effet :
 - de conserver le parement de l'ouvrage en l'état ;
 - de réutiliser les équipements existants.
- ◆ d'une garantie de traitement de l'ouvrage en sous-œuvre ;
- ◆ d'une bonne réponse aux problèmes de stabilité de l'ouvrage examiné dans le cadre du diagnostic ;
- ◆ de la capacité d'autorégulation de la technique du jet grouting au regard de l'hétérogénéité des caractéristiques géotechniques du sol.

LES ÉTUDES D'EXÉCUTION

Les études ayant montré un déficit au niveau de la résistance au glissement de l'ouvrage alors que son facteur de sécurité à la rotation était satisfaisant, la solution du renforcement par jet grouting fut naturellement introduite. En effet, cette méthode permettait, associée à une armature de la colonne de répondre aux objectifs suivants :

- ◆ augmenter la résistance au glissement ;
- ◆ limiter les contraintes dans le sol portant ;
- ◆ créer un rideau "étanche" évitant les problèmes de renard générés par les gradients hydrauliques en pieds de mur.

De plus, afin de s'assurer du caractère monolithique

du mur, un ancrage arrière constitué d'une armature HA est mise en place afin de bloquer le mouvement des blocs constituant le mur-poids les uns par rapport aux autres.

Les hypothèses de sol et conditions de calcul sont résumées sur la figure 4. Le renforcement du quai s'est déroulé comme suit :

- ◆ exécution de colonnes tangentes en jet grouting diamètre 1 000 espacées tous les mètres et descendant à la cote - 9 cm ;
- ◆ mise en place de tube 109/127 à l'intérieur de chaque colonne assurant la résistance à l'effort horizontal ;
- ◆ mise en place de l'ancrage arrière assurant le caractère monolithique du quai ;
- ◆ exécution d'une tranchée drainante permettant de contrôler la dénivellée maximale d'eau entre la terre et le bassin.

L'ensemble de ce dispositif a permis de justifier :

- ◆ les colonnes de jet grouting en portance. Ces colonnes reprennent une partie des charges verticales apportées par le mur-poids ;
- ◆ les armatures tubulaires en flexion. Ces armatures permettent d'assurer la sécurité en translation par mise en butée du sol sous le fond de souille ;
- ◆ les ancrages arrière en traction pour le caractère monolithique du mur.

■ MISE EN ŒUVRE DU JET GROUTING

La technique de jet grouting consiste à déstructurer le sol en place par un jet de liquide à très haute énergie avec apport simultané d'un coulis de ciment qui peut être fait soit directement par le jet de fluide à haute pression, ou indirectement par un jet secondaire à faible énergie.

A Concarneau, la solution retenue est la méthode jet double, c'est-à-dire qui utilise de l'air comprimé pour enrober le jet de coulis sous haute pression. Le traitement est réalisé à partir de buses de faible diamètre fixées sur un outil de traitement à l'extrémité de tiges doubles qui sont animées d'un mouvement lent de translation et de rotation pendant l'opération de *jetting*. On obtient ainsi une colonne d'un mélange sol-ciment qui constitue un véritable béton de sol.

Cette méthode permet avec des paramètres adaptés de réaliser des colonnes de grands diamètres dont le mélange sol-ciment excédentaire est facilement évacué par le forage du traitement. Avant le commencement des travaux, un plot d'essai a été réalisé pour définir les paramètres du traitement.

Conditions géologiques

La zone à consolider est constituée :

- ◆ d'un enrochement d'environ 50 cm d'épaisseur

mis en place sur un sol argileux et sur lequel est fondé le quai ;

- ◆ puis d'une arène granitique kaolinisée parfois très argileuse avec des pressions limites moyennes d'environ 0,9 MPa.

Plot d'essai

Colonnes d'essai

Il s'agit de réaliser deux colonnes, l'une à l'arrière du quai pour déterminer la meilleure méthode d'exécution et l'autre sur le quai en extrémité du traitement pour valider les diamètres obtenus par des carottages. La réalisation de la colonne à l'arrière du quai a mis en évidence la nécessité de faire un pré-jet à l'eau sur la hauteur de la zone à traiter suivi de la phase de jet au coulis sur cette même hauteur.

En procédant ainsi, on obtient un "spoil" plus fluide et son évacuation du forage avec l'air s'en trouve facilitée.

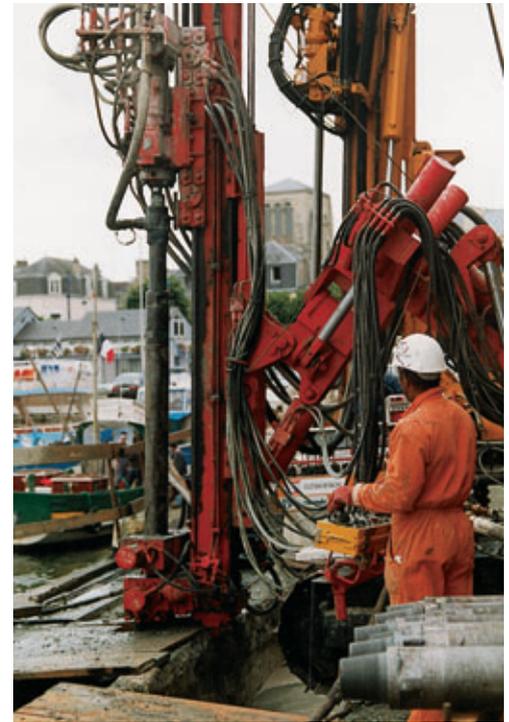
La colonne en extrémité du quai a mis en évidence un déficit de remontée du "spoil" particulièrement pendant l'opération de pré-jet à l'eau ; ceci s'explique facilement par la présence d'enrochements sous le quai et également, au droit de cette colonne, la quasi absence de la butée provisoire installée en 1992 pour enrayer les déplacements facilitant ainsi les fuites vers la mer.

Un contrôle de diamètre a été réalisé sur cette colonne. Pour cela, deux forages respectivement à 40 et 57 cm de l'axe de la colonne ont été réalisés dans la maçonnerie du quai. A partir de mesures de déviations dans le forage de la colonne et dans les forages de contrôle, on peut en déduire que les distances entre axe de colonne et axes de forages de contrôle sont de 48 et 60 cm. Les carottages effectués dans ces deux forages montrent un collage parfait de la colonne avec la partie inférieure du quai ainsi qu'un traitement un diamètre de plus de 120 cm.

De l'ensemble de ces essais, il a été décidé que le projet serait exécuté avec des colonnes de l'ordre de 1 m de diamètre exécutées avec les paramètres suivants :

- ◆ pré-jet en jet double à l'eau par pas de 3 cm de 15,20 m à 8,70 m de profondeur :
 - pression eau : 270 bars,
 - vitesse de remontée : 36 cm/mn,
 - pression d'air 6 à 8 bars ;
- ◆ jet au coulis par pas de 3 cm :
 - pression du coulis : 200 bars entre 15,20 et 10,70 m de profondeur - 280 bars entre 10,70 et 8,70 m de profondeur,
 - vitesse de remontée : 20 cm/mn,
 - pression d'air : 6 à 8 bars.

L'augmentation de pression entre 10,70 et 8,70 m de profondeur a pour but de bien réaliser le blocage directement sous le quai en particulier dans la zone d'enrochements dont les blocs constituent



Forage des micropieux
Drilling of micropiles



Les deux ateliers. A gauche : forage béton, à droite forage jet

The two plants; on the left : concrete drilling; on the right : jet drilling

Réalisation des préforages en 250 mm de diamètre à l'aide d'un marteau fond de trou

Completion of 250-mm diameter drilling by means of a downhole hammer



Tableau de pilotage des différents paramètres "jet"

Table of the control of the different "jet" parameters

Panneau jet réalisé dans les remblais de surface. Ici, longueur atteinte de 3,80 m
Jet panel completed in surface backfill. Here the length reached 3.80 m



des obstacles à la bonne exécution des colonnes ;

◆ dosage du coulis de jet :

- ciment CLK,

- C/E = 0,8.

Déroulement des travaux

La méthode de jet grouting nécessite des précautions pour ne pas endommager l'ouvrage existant. Pour cela il faut, d'une part, éviter pendant le traitement toute mise en surpression sous le quai et, d'autre part, adopter un phasage qui limite les décompressions locales.

Limitation des sous-pressions

La limitation des sous-pressions intempestives pendant le jet nécessite une parfaite remontée des "spoils", pour cela, l'espace annulaire entre les tiges et le forage doit être suffisamment grand et les déblais liquides suffisamment fluides.

Ce résultat a été obtenu en effectuant des préforages de 250 mm de diamètre au marteau fond de trou dans les 9 m de blocs constitutifs du quai et en utilisant des paramètres de jet déduits des essais de manière à obtenir des "spoils" de densité inférieure à 1,8, ce qui dans le type de sol rencontré donne des déblais avec une bonne fluidité.

Limitation des décompressions locales

Cette limitation est obtenue en écartant suffisamment deux colonnes réalisées consécutivement. Pour cela, le phasage en colonnes primaires, secondaires, tertiaires et quaternaires a été retenu. Ce type de phasage conduit, pour la phase la plus sensible du traitement (phase primaire) à un espacement entre colonnes de 8 m, soit une diminution momentanée de la surface portante d'environ 3 %.

Contrôles d'exécution

Pendant l'exécution des travaux, toutes les opérations sont contrôlées à l'aide d'un empajet qui permet un pilotage continu de la vitesse du traitement

ainsi qu'un enregistrement des divers paramètres afin de vérifier la bonne réalisation des colonnes. Sur quelques colonnes, des prélèvements de "spoil" ont été réalisés pour vérifier la résistance à la compression simple du mélange sol-ciment.

Essais de développement du procédé de jet grouting

Parallèlement à la réalisation du chantier des essais – qui s'inscrivent dans le cadre d'un approfondissement des connaissances de la technique du jet grouting –, furent menés. Ils avaient les objectifs suivants :

- ◆ réalisation de panel jet ;
- ◆ détermination du couple débit/pression pour un jet à l'eau avec diverses buses ;
- ◆ mise en œuvre d'une méthode indirecte du contrôle du diamètre des colonnes (essai EDG).

Essai de panel jet

Dans certaines circonstances, il peut être fructueux de réaliser dans le sol des coupures minces par un matériau de faible perméabilité. La méthode de jet grouting permet de réaliser ce type de travail et, il était donc instructif de connaître les possibilités dans les remblais qui constituent le sol directement à l'arrière du quai.

Ces essais ont été réalisés dans un sol sableux lâche avec une énergie de 5 MJ par mètre linéaire et une pression de jet de 200 bars. Le résultat obtenu, avec un équipement particulier mis au point par l'entreprise pour réaliser des coupures minces, est un panneau régulier d'environ 10 cm d'épaisseur sur 3,60 à 3,80 m de longueur.

Détermination du couple débit/pression avec diverses buses

On sait que l'énergie de jet mise en œuvre par mètre linéaire d'un élément (colonne, panneau...) en jet est donnée par la relation suivante :

$$E = \frac{P * Q * T}{10000}$$

avec : E en Mj/ml, P en bars, Q en l/min, T en mn/ml.

En fonction de la technologie du matériel utilisé on obtient, pour des diamètres de buse identique, des débits de jet qui peuvent être différents avec une même pression de travail.

La bonne connaissance des caractéristiques d'une buse de jet est donc essentielle pour connaître correctement l'énergie mise en œuvre par mètre linéaire de colonne exécutée et faire ainsi les combinaisons de buses les plus adaptées au travail demandé.

La figure 5 donne un exemple des résultats obtenus pour diverses buses développées par Solétanche Bachy.

Mise en œuvre d'une méthode indirecte de mesure du diamètre des colonnes

Ces travaux, soutenus par la FNTF ont été réalisés par la société EDG du 18 au 20 mai 1998, ils ont pour but de préciser la géométrie d'une colonne de jet à l'aide de la méthode du cylindre électrique. Après réalisation de la colonne d'essai, celle-ci a été reforée, puis un tubage PVC crêpiné a été mis en place dans l'axe théorique de la colonne. Ensuite, le tube PVC a été nettoyé et rempli d'eau pour permettre la mise en œuvre de la technique du cylindre électrique. Cette technique consiste à injecter un courant électrique dans le terrain autour du forage et de mesurer les différences de potentiel entre plusieurs couples d'électrodes mis en place dans le forage. On obtient ainsi une série de résistivités apparentes correspondant à l'influence des sols situés à distance croissante du forage. Un traitement mathématique de ces résistivités conduit à une pseudo-coupe résistivité-épaisseur par rapport au forage, fonction de la géométrie de la colonne. La figure 6 donne une représentation en coupe du traitement autour du forage. Les résultats montrent une très forte pénétration du jet dans la partie supérieure de la colonne. On obtient un rayon apparent de 80 cm jusqu'à 4 m de profondeur, et d'environ 60 cm de 4 à 5 m de profondeur.

Dans les zones plus profondes, l'investigation met en évidence une coupure volontaire de colonne par du jet interrompu entre 5 et 6 m de profondeur puis une colonne dont le rayon varie progressivement de 40 à 35 cm, cette zone correspond à une couche de sol plus compacte que celle existant dans la partie supérieure. On notera qu'un déterrement superficiel a mis en évidence un diamètre voisin de 160 cm, ce qui confirme dans ce type de sol la mesure indirecte réalisée.

INSTRUMENTATION

Les travaux de stabilisation du quai Carnot par jet grouting entraînent un risque d'aggravation des conditions locales, avec la possibilité de redéclenchement des mouvements de basculement du quai. Dans ce cas, il est nécessaire d'avertir en temps réel les techniciens responsables de l'injection de tout mouvement, afin de prendre au plus vite les mesures nécessaires, à commencer par l'arrêt des pompes de jet.

L'entreprise Soldata, spécialisée dans ce genre de travaux, a été retenue pour mettre en place un système de mesure et d'acquisition automatique des mouvements. Celui-ci a consisté en :

- ◆ trois fissuromètres sur la face du quai, permettant de mesurer avec une précision de 0,1 mm tout mouvement vertical relatif d'un bloc du quai par rapport à l'autre (en cas de soulèvement du quai);
- ◆ quatre inclinomètres sur le dessus du mur de

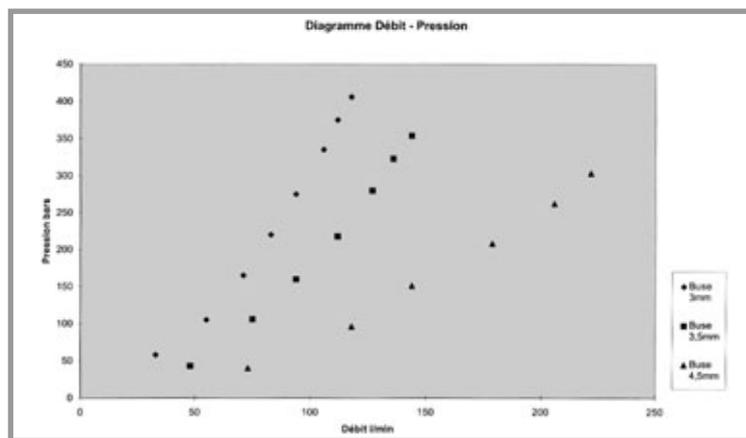


Figure 5
Diagramme débit/pression
Flow/pressure diagram

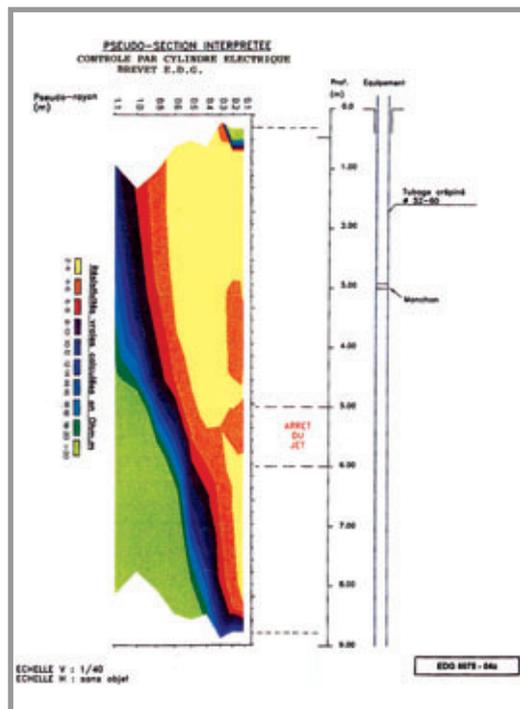


Figure 6
Pseudo-section interprétée (calculs à l'aide du logiciel RES2DINV)

Interpreted pseudo-section (calculation by means RES2DINV software)

quai, pour suivre les possibles mouvements de basculement vers la mer;

◆ quatre inclinomètres sur les bâtiments en bordure du quai, également pour suivre d'éventuels basculements (précision de chantier : 0,1 mm/m). Tous ces instruments étaient reliés par bus numérique au système d'acquisition de Soldata Géoscope. Celui-ci permet l'acquisition en continu de toutes les valeurs issues des capteurs, avec affichage graphique sur écran d'ordinateur, dans le bungalow de chantier, des résultats en temps réel, gestion d'un système d'alarmes par sirène et gyrophare en cas de dépassement de seuils prédéfinis, et enregistrement des données dans une base de donnée spécialement conçue pour les résultats d'instrumentation, pour préparation ultérieure de rapports divers.

Ce genre de système, avec un large choix de capteurs supplémentaires (surveillance de mouvements divers, mais aussi température, niveaux de pollution, contraintes...), est régulièrement mis en place par Soldata pour la surveillance d'ouvrages



Exécution de la colonne pour mesure indirecte du diamètre

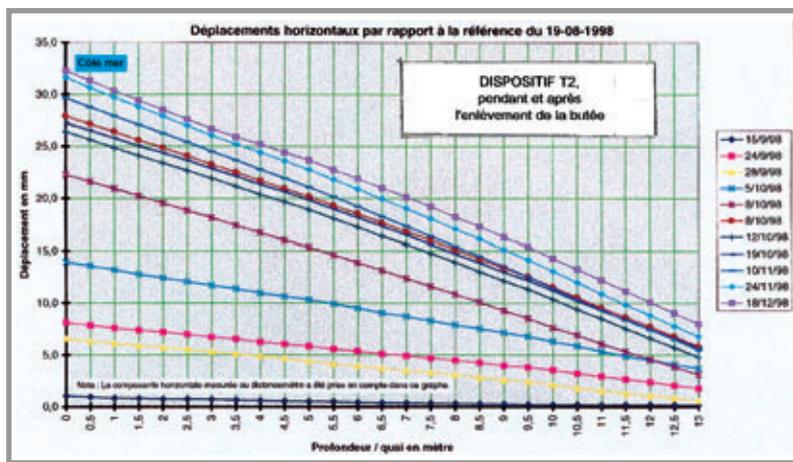
Execution of column for indirect diameter measurement



Colonne déterrée sur environ 1,50 m de profondeur avec un diamètre d'environ 160 cm

Column exposed to a depth of about 1.50 m with a diameter of about 160 cm

Figure 9
Suivi inclinométrique après enlèvement de la butée
Inclinometer survey after the placing of the abutment



travaux. Les figures 9 et 10 montrent que la suppression de la butée et les travaux de compactage des terre-pleins ont été suivis d'une nette remise en mouvement du quai. D'après les relevés inclinométrique, distançométrique et les angles relevés à la nivelle, la partie sud du quai subissait de nouveau une rotation d'ensemble à la façon d'un monolithe. Après les valeurs importantes qui ont suivi le début de l'enlèvement de la butée et les travaux de remblaiement et de compactage des terre-pleins, les relevés ont ensuite montré une stabilisation progressive de l'ouvrage.

Par ailleurs le maître d'œuvre a mis en place un contrôle des colonnes de jet grouting par le LRPC de Nantes.

Il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode fiable de contrôle non destructif de colonne de jet grouting. Par contre, dans le cas présent, où nous sommes en présence d'un rideau de colonnes de 1 m de diamètre tangentes entre elles, il peut être intéressant de rechercher des discontinuités de jonction entre colonnes, bien que le caractère continu du rideau de colonnes ne présente aucun caractère contractuel. Un contrôle a été réalisé en fin de chantier par le laboratoire du LCPC de Nantes selon le principe des mesures en transparence, schématisé sur la figure 11.

Si les colonnes ne sont pas jointives, le signal émis par la source ne parviendra pas au récepteur ou sera très atténué. Si les colonnes sont jointives, le temps du trajet entre la source et le récepteur ainsi que l'amplitude du signal reçu renseignent sur la qualité du contact.

Cette expérimentation a été réalisée sur trois couples de colonnes avec une source constituée de deux rondelles piézoélectriques excitées par une décharge de 1 000 V à intervalle régulier, et un récepteur hydrophone amplifié à 100 fois.

Le signal récepteur est enregistré sur un oscilloscope numérique Nicolet après une sommation de 10 signaux (voire 20 dans le cas où l'énergie reçue est très faible). La fréquence d'échantillonnage choisie est de 1 MHz et le nombre de points de 8 000. Pour deux couples de colonnes, un signal très énergétique est clairement perçu dans la partie jet grouting dont l'intensité diminue cependant avec la profondeur. Ceci pourrait s'expliquer :

- ◆ par l'apparition d'une zone de terrain plus ou moins remaniée entre les deux colonnes, vide entre les points source et récepteur ;
- ◆ par la diminution de la zone de recouvrement des deux colonnes ;
- ◆ ou par un remplissage du fond de forage par de la boue qui absorbe au niveau source et récepteur une partie de l'énergie.

Pour le troisième couple de colonne, est constatée une absence de signal transmis qui pourrait s'expliquer par un découplage mécanique des deux colonnes.

En effet, en raison d'une sujétion particulière de

Figure 10
Suivi au distançomètre pendant et après l'enlèvement de la butée
Distancometer survey during and after the placing of the abutment

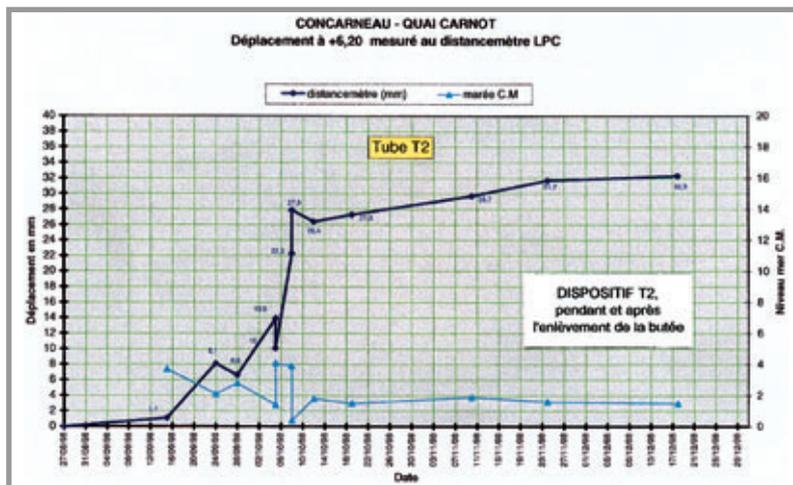


Figure 8
Suivi automatique des mouvements. Fissuromètres et inclinomètres
Automatic monitoring of movements. Fissure-meter and inclinometer

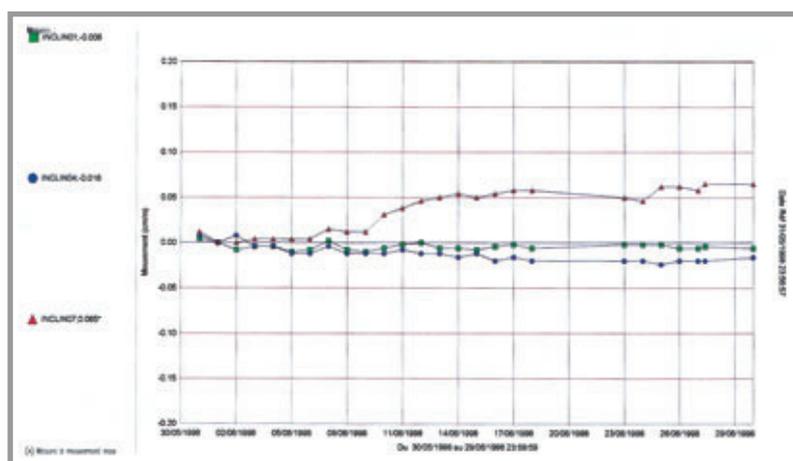
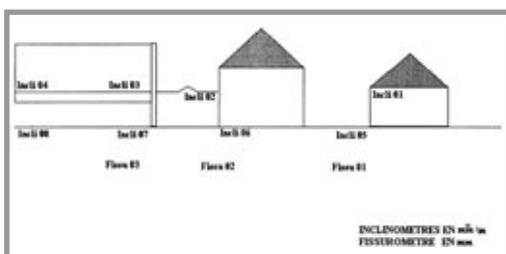


Figure 7
Schéma d'implantation des fissuromètres et inclinomètres
Fissure-meter and inclinometer installation diagram



ou de sols : monuments historiques, ouvrages en construction, barrages, tunnels, ponts, glissements de terrain...

A concarneau, sur la durée des travaux de jet, on n'a enregistré aucun mouvement significatif : les injections ont été suffisamment fines et contrôlées pour ne pas occasionner de désordre sur les ouvrages (figures 7 et 8).

LE POINT DE VUE DU MAÎTRE D'ŒUVRE

Au-delà des contrôles internes de l'entreprise, le maître d'œuvre a confié LRPC de Saint-Brieuc le suivi des mouvements de l'ouvrage durant les

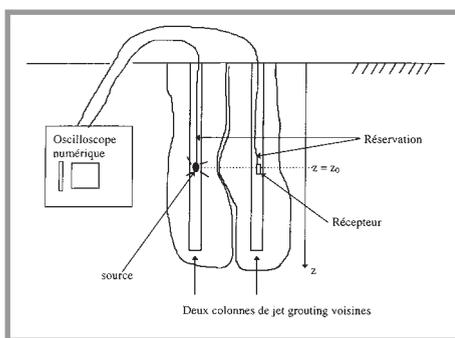


Figure 11
Principe des mesures de transparence réalisées par le LCPC de Nantes. Recherche des discontinuités entre colonnes

Principle of transparency measurements conducted by the LCPC (TR research lab) of Nantes. Search for discontinuities between columns

réalisation des travaux, (fruit variable du mur de quai) l'orientation et le positionnement des colonnes ont été modifiés au cours du chantier, et il se trouve que les deux colonnes examinées sont effectivement très probablement disjointes du fait d'orientation et positionnement différents.

CONCLUSIONS

Les méthodes adoptées ont permis de maîtriser :

- ◆ les fuites de coulis dans le corps de la butée ;
- ◆ la réalisation de la tranchée drainante située à proximité de bâtiments fondés sur pieux ;
- ◆ les profondeurs de dragages devant l'ouvrage en respectant les cotes de calcul.

La technique retenue a permis de réaliser un chantier de renforcement d'ouvrage en plein cœur d'une ville touristique sans perturber l'activité portuaire et sans causer de nuisances sensibles à l'environnement urbain. L'encombrement du chantier n'a pas pénalisé l'usage du plan d'eau ni le stationnement de 120 pêcheurs côtiers à proximité du site. Les réseaux ont été maintenus en service.

La propreté du plan d'eau n'a pas été affectée, et l'activité située dans les bâtiments sur pieux le long du quai (atelier, Chambre de Commerce et d'Industrie de Quimper) a été maintenue dans des conditions d'exploitation acceptables.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitre d'ouvrage

Etat - Ministère de l'Équipement représenté par le Directeur départemental de l'Équipement du Finistère

Maitrise d'œuvre

DDE Finistère
S.M.F.A./S.E.M.S./Subdivision de Concarneau

Assistance au maître d'œuvre

CETE de l'Ouest - Laboratoire de Saint-Brieuc

Entreprise générale

Solétanche Bachy - Bretagne/Pays de Loire

Sous-traitants

- Eurovia - Agence de Quimper
- Mab Construction Brest
- Armor - Nantes

Coordonnateur de sécurité

G. Le Saux - Brest

ABSTRACT

Strengthening of Carnot Quay in Concarneau (Finistère region)

D. Grimont, J.-J. Gueguen, M. Le Guennic

The Carnot quay in Concarneau exhibited defects appearing in 1987, and accelerating until the provision of a temporary abutment in 1992 leading to the prohibition of berthing and neutralising the platforms.

The rehabilitation technique adopted after the call for tenders with alternatives included strengthening by jet grouting proposed by the company Solétanche Bachy. The originality of this technique and its easy implementation at a competitive cost allowed its use for the first time on the Atlantic façade.

DEUTSCHES KURZREFERAT

Die Verstärkung des Carnot-Kais in Concarneau (Departement Finistère)

D. Grimont, J.-J. Gueguen, M. Le Guennic

Am Carnot-Kai in Concarneau waren 1987 Beschädigungen aufgetreten, die sich bis zur Einrichtung eines provisorischen Druckfundaments im Jahre 1992 weiter verschlimmert und ein Andockverbot und die Stilllegung der Kaiflächen veranlaßt hatten.

Im Anschluß an die Ausschreibung war als Sanierungstechnik die vom Bauunternehmen Solétanche Bachy angebotene Verstärkung mittels Jet-grouting gewählt worden. Diese durch die Vereinfachung des Einbaus bei wettbewerbsfähigen Kosten innovierende Technik wurde hierbei zum ersten Mal an der Atlantikküste eingesetzt.

RESUMEN ESPAÑOL

Consolidación del muelle Carnot, en Concarneau (Finistère - Francia)

D. Grimont, J.-J. Gueguen, M. Le Guennic

El muelle Carnot del puerto Concarneau, presentaba desórdenes que se pusieron de manifiesto en 1987, y que se han acelerado hasta el momento en que se instaló un contrafuerte provisional en 1992, que imposibilitó el

ataque y la neutralización de los terraplenes. La técnica de rehabilitación adoptada al término de una licitación con variantes, ha consistido en la consolidación por jet grouting propuesta por la empresa Solétanche Bachy. La originalidad de esta técnica innovadora ha constituido una primicia en la fachada atlántica.

Le programme de développement pour la construction des ouvrages



RN141, déviation de Taponnat. PS en B60. Bétonnage du tablier (entreprise SNGC)
 Highway RN 141, diversion of Taponnat. Overpass in B 60. Concreting of deck (contractor SNGC)



RN141, déviation de Taponnat. PS en B60. Bétonnage du tablier et lissage à règle vibrante (entreprise SNGC)
 Highway RN 141, diversion of Taponnat. Overpass in B 60. Concreting of deck and smoothing with vibrating rule (contractor SNGC)

Tableau I
 Résultats de l'étude de faisabilité du BHP en B60
 Results of feasibility study for HPC in B 60

| Formule 1 | Formule 2 | Formule 3 | | |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| CPA-CEM I 52,5 CP2 La Couronne | CPA-CEM I 52,5 CP2 La Couronne | CPA-CEM I 52,5 CP2 La Couronne | 425 kg/m ³ | D O S A G E S |
| Sable | Sable | Sable | 780 kg/m ³ | |
| 6/10 calcaire Audouin | 6/10 calcaire Mansle | 6/10 Diorite | 460 kg/m ³ | |
| 10/20 calcaire Audouin | 10/20 calcaire Mansle | 10/20 Diorite | 640 kg/m ³ | |
| Rhéobuild 2000 PF | Rhéobuild 2000 PF | Rhéobuild 2000 PF | 1,5% du poids de ciment | |
| Eau d'ajout | Eau d'ajout | Eau d'ajout | 147 l | |
| 7 | 17,5 | 15 | Consistance (cm) | |
| 61,7 | 60,1 | 62,3 | Rc 7 (MPa) | |
| 73,9 | 68,2 | 72,8 | Rc 28 (MPa) | |

Le projet National BHP 2000 fédère une cinquantaine de partenaires, représentant tous les aspects de la profession du BTP, autour d'un programme de recherche et développement. Il est soutenu par le plan Génie Civil. Je suis particulièrement heureux, au nom de BHP 2000, de soutenir la démarche entreprise par la DDE de Charente.

Cet article illustre l'engagement fort d'un maître d'œuvre public dans la logique d'emploi des BHP pour améliorer la qualité de construction de ses ouvrages et minimiser leur maintenance future. Cette logique a d'ailleurs été recommandée par Ch. Leyrit, directeur des Routes, à l'occasion de l'organisation d'une série de journées régionales d'information sur les BHP montée pour les DDE et les services techniques des conseils généraux avec l'aide de BHP 2000 et de l'Ecole Française du Béton. L'expérience de la DDE de la Charente montre la faisabilité locale, technique et économique de l'application des BHP pour des ouvrages d'art courants pourvu que les acteurs (entreprises, BPE, bureaux d'études) se soient épaulés et assurés d'une démarche pérenne de la maîtrise d'ouvrage. C'est dans ce cadre que nous ferons évoluer la technologie des BHP avec une bonne maîtrise économique.

Didier Brazillier
 DIRECTEUR TECHNIQUE DU PROJET BHP 2000

Un programme de développement des bétons à hautes performances en Charente est en cours depuis 1996. Celui-ci a pour but l'appropriation des techniques de fabrication et de mise en œuvre de BHP sur des ouvrages charentais courants dans un premier temps, puis non courants à terme. A l'origine du projet, le chef du service des Grands Travaux à la direction départementale de l'Equipement de Charente, coresponsable du groupe développement économique du projet national BHP 2000. Le maître d'ouvrage, représenté par le directeur départemental, a lui aussi montré son intérêt pour ces techniques innovantes et a accepté de légers surcoûts en contrepartie de la perspective d'obtenir des ouvrages beaucoup plus durables. Le programme tel que nous l'avons envisagé comprenait cinq étapes :

- ◆ des études de faisabilité du BHP avec les matériaux locaux ;
 - ◆ des essais de béton B 60 sur des parties cachées d'un ouvrage d'art courant ;
 - ◆ la réalisation de deux ouvrages d'art courants en B 60 avec dimensionnement traditionnel de la structure ;
 - ◆ la réalisation d'un ouvrage d'art courant en B 80 avec structure optimisée ;
 - ◆ la réalisation d'ouvrages d'art non courants en B 80 avec structure optimisée.
- Actuellement, nous avons franchi les trois premières étapes et nous abordons la quatrième.

■ ÉTUDES DE FAISABILITÉ DU BHP EN B60

Nous avons commandé en 1996 au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Bordeaux les études de faisabilité d'un B60 à partir de granulats disponibles dans le département de la Charente. Les résultats furent probants, comme le montre le tableau I.

■ PREMIERS ESSAIS IN SITU

Du BHP B60 fut coulé pour la première fois en Charente le 4 septembre 1997 sur les semelles de fondation d'un passage supérieur de la déviation des Rassats-Favrauds sur la RN141 (Route Centre Eu-

du béton haute performance d'art en Charente

Pierre-Paul Gabrielli



**SUBDIVISIONNAIRE
ETUDES ET TRAVAUX
NEUFS**
Service des Grands Travaux -
DDE Charente

rope Atlantique). La pile de ce pont fut elle aussi coulée en BHP car, recouverte d'éléments préfabriqués, il n'y avait pas d'enjeu quant à la qualité des parements.

La composition de ce béton B60 est reportée sur le tableau II.

La centrale de fabrication était Béton de l'Angoumois et l'entreprise SNGC toutes deux basées sur Angoulême. Les résultats de résistance à la compression à 28 jours donnèrent 70 MPa pour une quantité de 55 m³ de B60.

Fort de cette réussite, la DDE lança deux appels d'offres de quatre ouvrages chacun comprenant un ouvrage d'art en béton B60.

■ CAPITALISATION DE L'EXPÉRIENCE ET GÉNÉRALISATION

À l'automne 1997, les marchés ont été attribués à deux PME de la région, à savoir l'entreprise SNGC d'Angoulême pour la réalisation d'un PS en B60 et l'entreprise Laurière de Mussidan en Dordogne pour la réalisation d'un PI également en B60.

L'objectif pour la DDE était de capitaliser de l'expérience sur des ouvrages calculés pour du B35, de contribuer au développement de ce nouveau matériau et d'augmenter de manière très sensible la durabilité de ces ouvrages.

Le résultat de ces appels d'offres nous comblèrent car l'ouverture souhaitée dépassait nos espérances. Nous avons deux entreprises distinctes, qui choisissaient deux bétonniers différents (Béton de l'Angoumois pour SNGC, Viga Béton pour Laurière) avec deux cimentiers (Calcia pour Béton de l'Angoumois, Lafarge pour Viga Béton), et deux carriers. La formule retenue pour SNGC utilisait principalement des matériaux calcaires de la carrière GSM, et celle retenue pour Laurière des matériaux dioritiques de la carrière Garandeau.

Cette concurrence a permis de réduire le surcoût du BHP, à 5 % pour le PS et à 2 % pour le PI, ce qui reste très raisonnable compte tenu des gains espérés en durabilité.

La formulation SNGC est celle déjà utilisée sur la déviation des Rassats-Favrauds (cf. § "Premiers essais *in situ*"). La formulation Laurière est reportée sur le tableau III.

Les résultats des essais à la compression à 28 jours sur le PS donne une résistance moyenne de 70 MPa avec 5 MPa d'écart type. Le chantier s'étant déroulé de février à mars 1998, il n'y a pas de pro-

| Composants | Appellation | Quantité au m ³ |
|------------|------------------|----------------------------|
| Ciment | CPA/CEM 52,5 PM | 420 kg |
| Granulat | Sable 0/2 calc. | 135 kg |
| Granulat | 0/3 Bordeaux | 625 kg |
| Granulat | 3/10 ROULE | 360 kg |
| Granulat | 10/20 CALCAIRE | 650 kg |
| Adjuvant | Sikament 10 | 1,30% |
| Adjuvant | Sika retardateur | 0,20% |
| Eau | Réseau | 140 litres |

Tableau II
Formulation du béton entreprise SNGC
Mixed design of concrete, contractor SNGC

| Composants | Appellation | Quantité au m ³ |
|------------|----------------------|----------------------------|
| Ciment | CPA/CEM 52,5 PM | 425 kg |
| Granulat | Sable 0/2 calc. | 100 kg |
| Granulat | 0/3 Rancogne | 580 kg |
| Granulat | 3/10 Roule. Rancogne | 425 kg |
| Granulat | 10/20 Genouillac | 810 kg |
| Adjuvant | FF 86 | 2,44% |
| Adjuvant | Sika retardateur | 0,17% |
| Eau | Réseau | 148 litres |

Tableau III
Formulation du béton entreprise Laurière
Mixed design of concrete, contractor Laurière

blème de rhéologie. Il convient de noter l'utilisation avec succès d'une règle vibrante pour couler le tablier qui a une pente longitudinale de 4 %. Au démarrage du chantier, quelques difficultés sont apparues avec la quantité d'eau à apporter en raison de la porosité du calcaire (rapport E/C trop élevé). En saturant les matériaux d'eau et en n'apportant que le complément prévu par l'étude de formulation ce problème a été résolu.

Les résultats des essais à la compression à 28 jours sur le PI donne une résistance moyenne de 67 MPa avec un écart type de 8 MPa. Les valeurs inférieures à celles du PS s'expliquent par la période du chantier de février 1998 à juillet 1998. Jusqu'au mois de juin 1998 les résultats étaient similaires à ceux du PS, puis pendant la période estivale la baisse de résistance du béton serait due à la chute des résistances du ciment CPA de Martres. La nécessité de mieux associer le cimentier à la réalisation du BHP, principalement pendant les mois d'été, était démontrée...

Cette étape de vulgarisation du B60 va se poursuivre au cours de l'année 1999 avec la réalisation de cinq PS en BHP. Il a en effet été décidé que tous les ouvrages d'art courants en structure traditionnelle, à réaliser dans le cadre de l'aménagement de la RN10 et de la RN141, seraient réalisés en B60 dans l'attente d'une éventuelle décision de même principe, pour des structures adaptées avec du B80.



RN141, déviation de Taponnat. PI en B60.
Parement d'un piédroit (entreprise Laurière)

Highway RN 141, diversion of Taponnat.
Underpass in B 60. Lining of pier (contractor Laurière)

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

D. Pendarias - Directeur départemental de l'Équipement de la Charente

Maître d'œuvre

Paul Néron - Chef du service des Grands Travaux - DDE Charente

Entreprises

- SNGC (Société Nouvelle de Génie Civil) - L'Isle d'Espagnac
- Laurière et Fils - Mussidan

Fournisseurs

- Béton de l'Angoumois (pour le compte de SNGC)
- Viga Béton (pour le compte de Laurière)



RN 141, déviation de Taponnat. PI en B 60. Bétonnage d'un piédroit (entreprise Laurière)

Highway RN 141, diversion of Taponnat. Underpass in B 60. Concreting of pier (contractor Laurière)

■ RÉALISATION D'UN OUVRAGE D'ART AVEC STRUCTURE OPTIMISÉE EN B 80

L'étape logique suivante est de bénéficier des gains en résistance du béton pour optimiser la structure, bien que le bénéfice recherché soit avant tout la durabilité. Actuellement, le service des Grands Travaux de la DDE Charente travaille au dossier de consultation des entreprises pour un passage supérieur à structure calculée avec un B 80 à fumées de silice blanches pour conserver la teinte habituelle du béton. L'appel d'offres est prévu pour le premier trimestre 1999 et la construction de ce pont de la déviation de Chasseneuil sur la RN 141 est programmée pour le deuxième semestre 1999. Grâce à ce chantier, un palier supplémentaire en maîtrisant l'utilisation des fumées de silice, devrait être franchi.

■ DES VIADUCS EN B 80 VOIRE PLUS...

A terme nous souhaitons appliquer cette technique sur les viaducs de 150 m et de 350 m de la déviation de Jarnac sur la RN 141. Cette déviation devrait être inscrite au XII^e CPER et les études de projet sont en cours. Il pourra également en être de même pour d'autres opérations routières nécessitant des ouvrages non courants.

■ CONCLUSION

La DDE de Charente n'a pas voulu appliquer cette technique innovante du BHP ponctuellement sur un ouvrage exceptionnel. Sa démarche consiste à produire des ouvrages beaucoup plus durables donc moins coûteux à l'entretien, à des prix comparables aux ouvrages classiques grâce à la promotion locale de ces types de béton, tout en s'inscrivant dans le cadre plus général du projet national BHP 2000.

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

Béton haute performance

- 380 m³ de B 60 pour le PS réalisé par SNGC
- 755 m³ de B 60 pour le PI réalisé par Laurière

ABSTRACT

Development programme for high-performance concrete used in the construction of bridges in the Charente region

P.-P. Gabrielli

The DDE (Departmental Directorate of Infrastructures) of the Charente region undertook the development and promotion of high-performance concrete (HPC) in the past two years.

The aim is to be able to build current or non-current structures in B 60 concrete (additives) or B 80 concrete (additives + white silica fumes) with local materials and all kinds of contractors (from the small business to the national corporation).

The value for the client will be the possibility of obtaining far more durable structures requiring less maintenance.

DEUTSCHES KURZREFERAT

Das Programm zur Entwicklung von Hochleistungsbeton für die Errichtung von Ingenieurbauwerken im Departement Charente

P.-P. Gabrielli

Die departmentale Baubehörde (DDE) Charente beschäftigt sich seit zwei Jahren mit der Entwicklung und der Förderung des Hochleistungsbetons (BHP). Aufgabenstellung ist die mögliche Ausführung von geläufigen und ungewöhnlichen Bauwerken mit B 60 (Zusatzmittel) oder B 80 (Zusatzmittel + weißer Kieselerdeaer) mit Baustoffen aus dem Departement und mit allen Unternehmensgrößen (von der KMU bis zum Großunternehmen auf nationaler Ebene). Für den Bauherrn ist dabei von Interesse, daß ihm langlebigere Bauwerke, die weniger Wartung erfordern, zur Verfügung gestellt werden.

RESUMEN ESPAÑOL

El programa de desarrollo del hormigón de elevadas características para la construcción de grandes estructuras en Charente

P.-P. Gabrielli

La Dirección de Obras Públicas del departamento de Charente ha emprendido desde hace dos años el desarrollo y la promoción del Hormigón de Elevadas Características (BHP).

El objetivo consiste en poder realizar estructuras corrientes o no corrientes mediante B 60 (aditivos) o B 80 (aditivos + humos de silicio blanco) con materiales del departamento y cualquier tipo de empresas (desde las PYMES a una empresa de envergadura nacional).

El interés para la entidad contratante reside en obtener estructuras mucho más duraderas y que precisen menos mantenimiento.

recherche

Bétons Auto-plaçants Propriétés des BAP

Les BAP intéressent les entreprises de bâtiment et de travaux publics qui commencent à les utiliser sur les chantiers. Un projet national IREX est en cours de montage pour permettre une meilleure connaissance de leurs caractéristiques.

LUCIEN PLISKIN

On sait aujourd'hui fabriquer des bétons fluides qui se mettent en œuvre sans vibration. Du fait de leur grande liquidité, ces bétons autorisent le remplissage du coffrage et l'enrobage des armatures sans nécessiter des opérations de vibration et/ou de compactage.

L'examen des textes réglementaires en vigueur, tant français qu'euro-péens, conduit à conclure qu'aucune stipulation ne s'oppose à l'emploi des BAP sous réserve que, comme pour les autres bétons, les adjuvants spécifiques employés soient préalablement agréés par des organismes qualifiés.

Il reste que les conclusions tirées de l'examen des textes réglementaires s'inscrivent dans des cadres établis spécifiquement pour des bétons courants ou à hautes performances dont les propriétés à l'état frais, au jeune âge ou à long terme sont relativement bien connues.

Il semble donc nécessaire de vérifier si, comme c'est vraisemblablement le cas, les propriétés physiques et mécaniques fondamentales des bétons actuels peuvent être extrapolées aux BAP.

Bien que les propriétés rhéologiques des BAP frais soient très différentes de celles des bétons ordinaires, il est probable que les propriétés des BAP durcis restent proches de celles des bétons courants. Il convient cependant de s'assurer que les éventuelles variations de certaines propriétés n'invalident pas les approches réglementaires de conception et d'exécution des structures en béton ordinaire. L'examen ci-après a pour but de tenter de cerner les propriétés des BAP dont la connaissance demande à être précisée et/ou approfondie. Les conclusions formulées ne traduisent que l'opinion de l'auteur en l'état actuel de ses connaissances.

Propriétés physiques du béton durci

Un béton se caractérise essentiellement par

- son poids spécifique
- son coefficient de dilatation thermique
- sa perméabilité, éventuellement

En principe, ces paramètres devraient peu différer d'un béton courant à un BAP. Le poids spécifique d'un BAP devrait être légèrement supérieur à celui d'un béton courant. Son coefficient de dilatation pourrait être supérieure à 1.10^{-5} du fait de sa plus grande teneur en sables.

Sauf cas particuliers, la variabilité de ces propriétés est sans conséquences et n'appelle pas de compléments d'information.

Propriétés mécaniques du béton durci

Un béton se caractérise essentiellement par

- sa résistance à la compression à j jours, f_{cj}
- sa résistance à la traction f_{tj}
- son module de déformation longitudinale E_{ij} et son retrait p_i

Les expressions réglementaires des valeurs de f_{t28} et de E_{i28} , toutes deux fonctions de f_{c28} , restent sans doute valables. La valeur du retrait total des BAP est probablement à vérifier.

S'agissant de bétons de résistance à la compression inférieure à 30 MPa, il doit être loisible d'utiliser telles quelles ces expressions ; il semble prudent de les vérifier pour des BAP de résistance plus élevée.

Propriétés temporelles du béton durci

Quelle que soit la résistance du BAP, il convient de vérifier l'évolution des valeurs de f_{cj} , f_{tj} , E_j et p_j avec le temps, pour j compris entre 0 et 90 jours. Ce point est particulièrement important pour la valeur de f_{cj} qui conditionne directement les calendriers d'exécution.

De même, il semble prudent de s'assurer que les caractéristiques de fluage des BAP demeurent inchangées par rapport à celles des bétons courants. Ceci est particulièrement nécessaire pour autoriser l'emploi de BAP précontraints, notamment pour la réalisation de ponts en encorbellement.

Durabilité du béton durci

La durabilité du BAP, comme celle des autres bétons, est notamment fonction de sa porosité. Dans la mesure où une résistance à la compression élevée n'implique pas nécessairement une faible porosité, il peut être utile de vérifier que les BAP à hautes résistances présentent bien une porosité à pores nanométriques comme c'est le cas pour les BHP.

Propriétés du béton frais

Il importe de définir et faire entrer dans la normalisation les méthodes, les procédures et les matériels qui permettent de caractériser les propriétés rhéologiques des BAP frais.

◆1- Fluidité

A ce jour, il semble que seule la norme prEN 206-19 permette une mesure de la consistance du béton frais par des essais de fluidité (flow tests) décrits dans la norme prEN 12358. Il convient cependant de vérifier si, s'agissant de BAP, les classes de consistance F1 à F6 définies par le Tableau 6 [Art. 4.2.1 A] conservent leur pertinence.

◆2- Compactabilité

La différenciation des bétons par classe de compactage (compaction classes) du Tableau 5 [Art. 4.2.1 A] est inapplicable aux BAP. La norme prEN 12357, « Testing concrete - Determination of fresh concrete - Degree of compactability » stipule en effet que la mesure de la compactabilité s'effectue par mise en place du béton frais dans un récipient parallélépipédique (200 x 200 x 400 mm) suivie d'une compaction du béton par un vibreur interne ou par table vibrante. Le degré d'affaissement de la surface du béton après compaction mesure la compactabilité du béton. La norme

[Art. 1.3] indique que le degré de compactabilité n'est pas significatif si l'affaissement est inférieur à environ 15 mm.

◆3- Ségrégabilité

Il ne semble pas exister de procédure de mesure de la ségrégabilité. La ségrégabilité est très probablement une propriété non continue : il y a ou il n'y a pas ségrégation. Il paraît important de définir une méthode qui permet de s'assurer de la non-ségrégabilité du BAP frais par des essais effectués avant mise en place du béton dans le coffrage.

Compaction du béton lors de sa mise en place

La compaction du BAP est obtenue par l'effet de sa poussée hydrostatique. Par hypothèse, cette charge est réputée proportionnelle à la hauteur du béton pseudo-liquide.

C'est peut-être une hypothèse qu'il convient de vérifier, notamment pour les éléments de grande hauteur et de faible largeur tels que les poteaux ou les parois banchées. Plus importante est la question que soulève la réalisation de structures de faible épaisseur telles que des dalles ou des poutrelles : dans ce cas, l'effet de compaction sous une faible charge hydrostatique est-il équivalent à celui d'une vibration ?

Il convient donc de vérifier que la compacité du BAP durci obtenue par compactage du BAP frais sous l'effet de la pression hydrostatique confère au béton durci des propriétés mécaniques équivalentes à celles obtenues par un compactage mécanique par vibration d'un béton courant.

Les essais d'adhérence doivent permettre de répondre indirectement à cette question.

Plus généralement, l'arrivée des BAP devrait conduire à une clarification et à une définition plus précise de la notion de compaction, en la différenciant éventuellement de celle de vibration ou de serrage [DTU 21] et en l'élargissant aux bétons fluides de type BAP. Que mesure en fait et à quoi sert l'essai de compactabilité du béton rappelé ci-dessus sinon à s'assurer de la plus ou moins grande facilité de mise en œuvre du béton dans les coffrages ? Dans ce cas, la mesure de la compactabilité ne permet pas d'estimer le degré de compacité du béton, c'est à dire le rapport du volume des vides au volume total du béton durci.

Adhérence

Le comportement d'un élément en béton armé repose sur une propriété fondamentale : l'adhérence entre le béton et les armatures qui permet le transfert des déformations du béton à l'acier des armatures.

Ce phénomène d'adhérence, bien mal nommé puisqu'il ne met en jeu aucun effet de collage, mobilise essentiellement le frottement béton-acier et la résistance à la traction du béton.

Il semble nécessaire de vérifier, notamment pour les éléments de hauteur relativement faible, que la mise en place du BAP confère une adhérence béton-armatures équivalente à celle obtenue par compaction du béton ordinaire autour des armatures.

Si ce n'était pas le cas, cela pourrait conduire à revoir certaines dispositions constructives réglementaires concernant notamment les recouvrements d'armatures et les enrobages minimaux. Une adhérence équivalente à celle obtenue avec les bétons courants constitue une condition essentielle pour garantir, par exemple, le bon comportement des armatures supérieures de moment négatif d'une dalle de bâtiment pour laquelle on accepte couramment des enrobages relativement réduits.

Adjuvants

Il va sans dire que les adjuvants spécifiques utilisés pour la fabrication des BAP doivent répondre aux exigences des organismes d'agrément des adjuvants (notamment durée d'action, sensibilité au dosage, sensibilité à la température, ségrégation des granulats, ...). La norme EN 934-2 :1997 précise les prescriptions particulières que doivent respecter les adjuvants plastifiants, super-plastifiants et réducteurs d'eau, notamment en matière de consistance [Tableaux 2, 3.1 et 3.2]. Cette norme pourrait être utilement complétée par des prescriptions relatives à la nonségrégabilité du béton fluide.

Conclusions

A résistance à la compression donnée, les propriétés des BAP sont sans doute équivalentes ou proches de celles des bétons ordinaires.

Si les textes réglementaires ne s'opposent pas à l'emploi des BAP, certaines de leurs dispositions demandent cependant à être adaptées, notam-

ment celles relatives à la caractérisation et à la mise en œuvre du BAP frais.

Cette nécessaire actualisation des normes en vigueur appelle une action concertée auprès des autorités de normalisation afin de faire agréer des modes et des procédures de contrôle des propriétés rhéologiques des BAP frais. Il apparaît en effet, par exemple, que la plupart des modes normalisés de caractérisation des propriétés des bétons impliquent la mise en œuvre de procédures de vibration interne du béton frais, que ce soit pour des mesures de consistance ou pour la fabrication de cylindres d'essai.

Il reste que des questions se posent quant aux propriétés mécaniques des BAP durcis auxquelles il est nécessaire de répondre pour permettre la généralisation de leur emploi à tout type de structure.

C'est à ce prix que, au-delà des aspects étroitement réglementaires, les prescriptions existantes de conception et de réalisation de structures en béton pourront être étendues aux structures en BAP, valorisant ainsi le progrès technologique et architectural permis par ces nouveaux bétons.

Il convient cependant de définir et de faire adopter par les autorités de normalisation les modes et procédures de contrôle des propriétés rhéologiques des BAP frais. D'ores et déjà, en fait, la norme européenne EN 206 inclut la prise en compte de procédures adaptées à la quantification des propriétés de consistance des BAP frais.

D'un point de vue formel et légaliste, valable aussi bien pour les BAP que pour les autres bétons, il faut aussi éclaircir la notion quantifiable de compacité d'un béton en la reliant plus clairement aux opérations de compaction, opérations non clairement définies dont les effets ne se mesurent en définitive qu'à l'aune des propriétés mécaniques du béton durci.

Dans la mesure où, d'une part, la réglementation en vigueur est respectée et, d'autre part, les prescriptions concernant les propriétés mécaniques du béton durci prises en compte dans l'élaboration d'un projet d'exécution sont atteintes, les BAP doivent pouvoir être utilisés en lieu et place de bétons de mêmes caractéristiques mécaniques.

Plus généralement, la plupart des textes réglementaires appellent une actualisation qui prenne en considération les progrès réalisés en matière de conception, de fabrication et de mise en place des bétons.