

Travaux

n° 748

EUROPE

- Un projet en "partnering" : l'extension de l'aéroport d'Heathrow
- La première ligne de métro de Copenhague
- Le pont de Rion-Antirion. Un ouvrage exceptionnel à vocation européenne

PROCHE-ORIENT

- Le projet "Beirut Sea Front"

MADÈRE

- L'extension de l'aéroport de Madère. Un ouvrage d'art hors du commun pour l'atterrissage de gros porteurs

AMÉRIQUES

- Un gazoduc au Canada. Plus de 200 km entre le nord de Montréal et la frontière nord-américaine
- L'injection de compensation assistée par ordinateur. Application au projet Tren Urbano de Puerto Rico
- Le système de gestion de l'entretien des routes de Santa-Catarina au Brésil

ASIE

- Le barrage de Mengkabau au Sultanat de Brunei Darussalam

OCÉANIE

- Métro de Sydney. Dix kilomètres de ligne nouvelle entre le centre-ville et l'aéroport



International



Notre couverture

Projet "Beirut sea front"
Ligne de préfabrication des caissons

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 ABONNEMENTS

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: 900 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).

Editions Science et Industrie S.A.

3, rue de Berri - 75008 Paris

Commission paritaire n° 57304



éditorial

Daniel Tardy

actualités

matériels

PRÉFACE

Jean-Yves Perrot

EUROPE

◆ Un projet en "partnering" : l'extension de l'aéroport d'Heathrow

- A "partnering" project : the extension of Heathrow airport

J. Hervet

◆ La première ligne de métro de Copenhague

- Copenhagen's first metro line

G. Anel

◆ Le pont de Rion-Antirion. Un ouvrage exceptionnel à vocation européenne

- The Rion-Antirion bridge. An exceptional structure with a European calling

J.-P. Teyssandier, J. Combault

PROCHE-ORIENT

◆ Le projet "Beirut Sea Front"

- The "Beirut Sea Front" project

M. Weick

MADÈRE

◆ L'extension de l'aéroport de Madère. Un ouvrage d'art hors du commun pour l'atterrissage de gros porteurs

- Extension of Madere airport. Innovative engineering for the landing of jumbo jets

J. Brébant

AMÉRIQUES

◆ Un gazoduc au Canada. Plus de 200 km entre le nord de Montréal et la frontière nord-américaine

- A gas pipeline in Canada. Over 200 km between northern Montreal and the North American border

P.-V. Roussel

Sommaire

décembre 1998

International

Dans les prochains numéros

Ponts

Routes

Travaux urbains

Sols

et fondations

Tunnels

Offshore -

Travaux en mer

Environnement

Terrassements

International



◆ L'injection de compensation assistée par ordinateur. Application au projet Tren Urbano de Puerto Rico
- *Computer-assisted compensation grouting. Application to the Tren Urbano project of Puerto Rico*
S. Carayol

49



◆ Le système de gestion de l'entretien des routes de Santa-Catarina au Brésil
- *The highway maintenance management system of Santa-Catarina in Brazil*
G. Caroff, Y. Casan, R. Mesnard, P. Meurer, S. Franzoi

54



ASIE

◆ Le barrage de Mengkabau au Sultanat de Brunei Darussalam
- *The Mengkabau dam in the Sultanate of Brunei Darussalam*
B. Bouyge, G.-V. Siddall, P. Le Merrer

59



OCÉANIE

◆ Métro de Sydney. Dix kilomètres de ligne nouvelle entre le centre-ville et l'aéroport
- *Sydney metro. Ten kilometres of new line between the city centre and the airport*
D. Miller

65

économie

72

social

74

**répertoire
des fournisseurs**

75

L'activité internationale des entreprises françaises de construction s'est élevée à 82 milliards de francs en 1997, marquant ainsi une progression de plus de 9 %, en francs courants, par rapport à l'exercice précédent. Avec 65 milliards, le secteur des travaux publics contribue à ce résultat à hauteur des quatre cinquièmes. Ces chiffres, à première vue très encourageants, ne doivent cependant pas masquer l'inflexion intervenue en 1997, après quatre années de croissance soutenue. Le tassement des carnets de commande et des volumes de travaux réalisés à l'étranger pendant les premiers mois de 1998 le confirme.

La dernière enquête annuelle publiée par la revue américaine *Engineering News-Record* (ENR) tend cependant à montrer que cette inflexion résulte davantage d'une contraction du marché international, notamment en Asie et au Moyen-Orient, que d'une baisse de nos positions. La crise financière en Asie et ses effets induits ont en effet fortement grevé les investissements de construction, privés mais aussi publics, de nombreux pays émergents. Cette crise, plus durable et étendue qu'initialement prévu, conduit à un réajustement de la donne internationale. Les solides positions des entreprises françaises de construction sur certains marchés relativement épargnés, en premier lieu l'Europe mais aussi l'Afrique, sont dans un tel contexte autant d'atouts par rapport à leurs concurrents japonais et anglo-saxons.

En Europe occidentale, les entreprises françaises de construction occupent une place nettement dominante. Elles ont su tirer profit, le plus souvent par l'intermédiaire de filiales locales, de marchés dynamiques et ouverts, comme celui de la Grande-Bretagne. Notre intérêt doit également se concentrer sur les pays d'Europe centrale et orientale, notamment dans la perspective du prochain élargissement de l'Union européenne à quatre d'entre eux. Cette intégration devrait accélérer la mise à niveau de leurs grandes infrastructures.

Pour cela, ils bénéficieront, outre des moyens de financements multilatéraux habituels, d'instruments spécifiques de pré-adhésion et à terme de fonds de cohésion.

Avec près de 18 % de l'activité hors métropole et outre-mer, l'Afrique reste, de loin, le deuxième marché des entreprises françaises de travaux publics après l'Europe. Elles interviennent notamment dans le secteur routier et parapétrolier, dans un contexte concurrentiel

parfois moins tendu qu'ailleurs. Cependant, leur position dominante ne saurait être considérée comme un acquis. Alors que les possibilités de gains de parts de marchés semblent ténues sur les zones traditionnelles de présence française, le développement de nos intérêts sur ce continent doit s'orienter en particulier vers l'Afrique australe.

Bien entendu, une analyse fine et pertinente ne saurait se limiter à une approche par continent ou sous-continent. L'actualité récente a bien montré à quel point les grandes zones économiques pouvaient être interdépendantes et comment subsistaient, dans chacune d'elles et malgré des crises régionales, des îlots de prospérité. Dans

ce contexte conjoncturel agité, il convient d'éviter les effets de mode excessifs, en gardant à l'esprit quelques tendances lourdes du secteur.

La première est sûrement l'intégration géographique croissante par création ou rachat de filiales étrangères. En 1997, plus de 72 % de l'activité internationale des entreprises de travaux publics était le fait de ces filiales. Cette tendance, particulièrement marquée sur les pays riches comme ceux de la zone OCDE, permet de prendre pied durablement sur des marchés locaux solvables. Les entreprises routières illustrent parfaitement cette stratégie, complétant le plus souvent leur implantation locale par une intégration verticale en amont de filière.

Dans un contexte de baisse structurelle de l'aide bilatérale liée au profit des bailleurs de fonds multilatéraux, les maisons mères sont confrontées à une concurrence toujours plus vive sur les projets bénéficiant de financements internationaux. Parallèlement, alors que le savoir-

faire technique constitue une condition nécessaire, mais en partie insuffisante de différenciation, elles élargissent leur offre au montage financier et à l'exploitation de grandes infrastructures. Encore peu nombreuses, ces opérations en concession offrent des conditions de réalisation plus confortables que sur appel d'offres et permettent de générer des recettes récurrentes d'exploitation. Les entreprises françaises de construction bénéficient d'une expérience unique dans ce domaine, qu'elles doivent consolider avec leurs partenaires financiers, juridiques et institutionnels. Le pont Rion-Antirion, auquel un des articles de ce numéro est consacré, est tout à fait emblématique de la capacité en ce domaine du savoir-faire français.



■ **JEAN-YVES PERROT**

Directeur des affaires économiques et internationales

Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement

Un projet en "partnering"

L'extension de l'aéroport

BAA, le premier opérateur d'aéroports du monde, avec en particulier les aéroports londoniens d'Heathrow, Gatwick et Stansted, a choisi pour tous ses travaux d'aménagement et de maintenance (500 millions de livres par an, soit 5 milliards de francs) le principe du *partnering*. Il s'applique en particulier à l'extension de l'aéroport d'Heathrow, pour laquelle Dumez-GTM a été retenu comme partenaire pour les travaux souterrains. Ce nouveau mode de contrat qui se développe rapidement au Royaume-Uni vise une optimisation du projet par une suppression des conflits entre les différents acteurs de la construction. Après une brève description du projet, l'article analyse ses modalités de réalisation dans le cadre de ce processus.

■ LE PROJET

L'aéroport d'Heathrow, premier aéroport international du monde a actuellement une capacité nominale de 50 millions de passagers par an, mais en aura accueilli en 1998 près de 60 millions (pour référence, Roissy - Charles de Gaulle en accueille 30 millions). Le projet d'extension consiste à rajouter à environ 2 km à l'ouest de l'aéroport actuel une nouvelle aérogare (le Terminal 5) d'une capacité de 30 millions de passagers par an avec ses trois satellites. Le montant total de l'investissement est de près de 2 milliards de livres (soit 20 milliards de francs). Le maître d'ouvrage est BAA, société née en 1987 de la privatisation de British Airport Authorities. BAA est une société anonyme cotée à la bourse de Londres, avec un actionariat dispersé, qui a un chiffre d'affaires de 1,5 milliard de livres et une excellente rentabilité. Pour le projet du Terminal 5, le génie civil a été décomposé en quatre lots principaux : bâtiments, pistes, infrastructures, travaux souterrains. Dumez-GTM a été retenu (en groupement avec l'entreprise britannique Miller) pour le lot travaux souterrains, pour un montant total d'environ 100 millions de livres. Les travaux comprennent, sur le schéma de base :

- ◆ deux tunnels "métro" de diamètre intérieur 4,35 m, longs de 1900 m chacun (prolongement de la Piccadilly Line);
- ◆ deux tunnels "voie ferrée" de diamètre intérieur 5,70 m, de longueurs respectives 1500 et 1700 m (prolongement de la liaison rapide Heathrow Express);
- ◆ deux tunnels "routiers" réservés au trafic interne de l'aéroport entre le nouveau terminal et les terminaux existants, d'un diamètre interne de 9,40 m et 962 m de long;
- ◆ un tunnel "d'évacuation d'eaux pluviales", de 3,00 m de diamètre intérieur et de 4019 m de long.

Tous ces tunnels seront forés au tunnelier dans l'argile de Londres, matériau bien connu, en principe de bonne tenue (il a permis au métro de Londres d'être le premier métro au monde, dès 1870), mais avec une couverture faible et en partie forés sous les infrastructures existantes.

■ PARTNERING : LES PRINCIPES

"Business as usual"

La relation contractuelle traditionnelle dans les projets de construction est telle qu'elle induit des intérêts divergents entre les différents intervenants

(maître d'ouvrage - maître d'œuvre - entreprises - architecte - sous-traitants, etc.), d'où :

- ◆ des projets non optimisés;
- ◆ des conflits;
- ◆ la non résolution des problèmes;
- ◆ des surcoûts;
- ◆ des retards;
- ◆ la qualité éventuellement affectée.

In fine, tous les intervenants sont perdants.

Les objectifs

Une recherche de situation "win - win" (gagnant - gagnant) doit arriver à :

- ◆ optimiser le projet au mieux des intérêts de tous;
- ◆ réduire le coût de construction et d'exploitation (objectif = - 30 %, conformément à ce qui a été généralement constaté sur les projets développés en *partnering*);
- ◆ tenir (ou réduire) les délais;
- ◆ pour cela, optimiser la gestion des risques au mieux des intérêts du projet global.

C'est sur ces bases que s'est développé le principe du *partnering*.

Historique de la démarche

Le *partnering* (aussi appelé *alliance* outre-Atlantique) s'est d'abord développé aux USA à partir des années soixante-dix, essentiellement dans l'industrie pétrolière, puis en mer du Nord.

Devant une prise de conscience générale des dysfonctionnements résultant du schéma traditionnel, s'est créé au Royaume-Uni à la fin des années quatre-vingt, sur l'initiative de l'Institution of Civil Engineers, un New Engineering Contract Working Group, comprenant des représentants de toutes les parties concernées (maîtres d'ouvrages publics et privés, ingénieries, entreprises). Il a élaboré et édité en plusieurs phases le NEC Engineering and Construction Contract (1991-1995), qui est un modèle de contrat, comprenant de nombreuses options, pour réalisation de projets en *partnering*.

En parallèle, à la demande du gouvernement anglais, inquiet des relations de plus en plus conflictuelles entre intervenants dans les projets de construction, a été publié le "Latham Report" (Constructing the Team, par Sir Michael Latham, Chairman of the Construction Industry Board, juillet 1994), qui est devenu la "Bible" de la réalisation de projets de construction.

Le NEC Contract a été adopté ces dernières années pour de nombreux projets, essentiellement

d'Heathrow

par des maîtres d'ouvrages privés. Il s'agit essentiellement de compagnies récemment privatisées : BAA (aéroports), Railtrack (infrastructures ferroviaires) et la plupart des compagnies de distribution d'eau. Elles ont l'avantage, étant des sociétés jeunes, de ne pas subir le poids des habitudes et donc de pouvoir prendre une approche moderne et pragmatique. Il a été aussi adopté largement par des chaînes de grands magasins pour leurs nouvelles implantations (Sainsbury, etc.). Il a aussi été retenu par London & Continental Railways, société concessionnaire de la réalisation de la ligne TGV entre Londres et le Tunnel sous la Manche ; Dumez-GTM en a d'ailleurs obtenu récemment deux lots (un viaduc et un tunnel) pour un montant objectif de 107 millions de livres.

Toutefois, le secteur public (en particulier Highways Agency, la direction des Routes britannique, et plusieurs Councils, équivalent des conseils généraux) commence à y recourir. Mais il est probable que, malgré une volonté politique forte, les difficultés pour adopter cette démarche y sont plus grandes.

Les principes

Un projet de construction est un prototype. Il est donc amené à subir au long de sa réalisation des évolutions et présente des risques, qui ne peuvent être traités comme pour un produit manufacturé de série. Pour résoudre cela, dans l'intérêt global du projet, il est nécessaire de mettre en place un cadre conduisant à :

- ◆ des intérêts convergents entre les différents intervenants ;
- ◆ un management en commun du projet dès son origine ;
- ◆ une transparence totale *open book* ;
- ◆ le traitement des problèmes dès qu'ils se présentent, au niveau où ils se présentent ;
- ◆ une analyse en commun des risques avec prise en charge par ceux qui sont le mieux à même de les maîtriser.

Les principes du NEC Engineering and Construction Contract (option C : Target Contract with Activity Schedule) sont :

- ◆ *target price* (coût objectif) sur la base du dossier d'appel d'offres, avec ses sous-détails ;
- ◆ ajustement d'un commun accord du *target price* lorsque survient un *compensation event*, dans la mesure du possible par extrapolation ;
- ◆ en cas de litige, recommandation par un *adjudicator*, (puis tribunal, si l'une des parties n'est pas d'accord sur les conclusions de l'*adjudicator*) ;

- ◆ paiement qui comprend les coûts réels plus le *fee* (ce dernier couvrant les frais généraux, suivant un listing précis, et le profit) ;

- ◆ en fin de projet, partage de l'écart (positif ou négatif) entre coût réel et *target révisé* suivant des règles à fixer pour chaque projet.

On peut souligner les points pratiques importants :

- ◆ *optimisation* en commun du projet dès son origine ;
- ◆ *colocation* (c'est-à-dire installation de tous les intervenants dans les mêmes locaux) ;
- ◆ *team building* (formation en continu au travail en équipe).

■ APPLICATION AU PROJET DU TERMINAL 5 D'HEATHROW

La sélection des entreprises (lot travaux souterrains)

Celle-ci s'est faite en quatre phases :

- ◆ Phase 1 : après appel à candidatures 22 entreprises sont en concurrence ;
- ◆ Phase 2 : sélection sur dossier (références et capacité financière). Treize entreprises sont retenues ;
- ◆ Phase 3 : après un questionnaire et une présentation orale, quatre entreprises sont sélectionnées selon les critères suivants : capacité à l'innovation, esprit de l'entreprise conforme au *partnering*, management des hommes (motivation, formation, sécurité).

La notation est établie par un jury d'une dizaine de personnes sur une grille (connue des concurrents uniquement au *debriefing* après sélection) ;

- ◆ La phase 4 comprend :
 - une proposition sur le *Base Case* (avant-projet) : organisation du projet (liste personnel et matériels, méthodes, programme), rendements, prix unitaires personnels et matériels, *fee*,
 - une visite par les membres du jury de chantiers en cours, pour vérifier sur le tas la mise en pratique des critères de la phase 3.

Ces visites se sont faites en compagnie des principaux responsables proposés pour mener le chantier, ce qui permet par la même occasion à BAA de juger de leurs aptitudes non seulement techniques mais aussi de comportement. La sélection se fait sur le même principe de notation par un jury (grille non connue des candidats) de laquelle découle le choix du *Preferred Contractor*.

Le cas échéant, le choix débouche sur un *Frame-*

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

BAA

Ingénierie "Tunnels"

Mott McDonald

Entreprises "Tunnels"

- Miller
- Dumez-GTM

work Agreement (accord cadre) à travers lequel le *contractor* réalise tous les travaux de cette spécialité pour BAA sur n'importe lequel de ses sept aéroports pendant 5 ans. Par un travail en commun de planification et d'optimisation continue - produit, cela conduit à des économies très substantielles (exemple très intéressant des pistes). Parallèlement à la sélection des entreprises, BAA a choisi, sur le même principe et suivant le même découpage, les ingénieries correspondantes, qui, dans le cadre du travail en équipe, auront la responsabilité du *design*.

Le contrat

BAA, qui est en pointe sur le développement du *partnering* sous l'impulsion de son directeur général Sir John Egan, a choisi de ne pas utiliser le NEC Contract, mais un document mis au point spécifiquement et dénommé "Delivery Team Handbook".

Il fixe les principes généraux de fonctionnement du projet dans des termes délibérément non juridiques, en langage courant, susceptible d'être compris par tous. Il établit plus un état d'esprit qu'un lien strictement contractuel. Il est agrémenté de schémas d'organisation (figure 1) destinés à mieux faire comprendre à chacun l'organisation. Il est identique pour toutes les sociétés impliquées dans le projet, quel que soit leur rôle. Il convient de noter que, en principe, les sous-traitants et fournisseurs principaux seront soumis aux mêmes règles, dans une transparence totale vis-à-vis du maître d'ouvrage. Si l'équipe décide que cela est préférable pour le projet, ils seront intégrés dans la phase conception.

La phase conception

Au démarrage, le projet n'en est qu'au stade d'avant-projet (qui sert de base en parallèle pour l'enquête publique). Tous les participants (BAA, bureaux d'études, entreprises, architecte, consultants, British Airways, etc.) sont installés dans un même bâtiment réservé au projet.

Ensemble, sur la base du *brief* (définition des performances de l'ouvrage final), ils développent le projet. L'ensemble est organisé en *teams*, une équipe par sous-ensemble, éventuellement décomposée en sous-équipes. Chaque *team* est formé de personnes détachées par chacun des participants concernés par l'objet du *team*. Une même personne peut appartenir à plusieurs *teams* et une entreprise donnée intervient dans les *teams* qui sont en relation avec les travaux pour lesquels elle a été retenue (par exemple : Dumez-GTM retenu pour les travaux souterrains intervient dans le *team* terrassements, puisque les terrassements vont utiliser les produits d'excavation des tunnels). Il est intéressant de noter la présence dans l'équipe projet du client final British Airways.

Chaque *team* a un objectif de coût qui a été fixé par BAA dans le cadre de son *Business Case*,

sur l'avis de ses consultants ingénierie et en accord avec les entreprises concernées, comme étant ce qui correspond à une exécution en *Best Practice* du projet de base. Les gains obtenus pendant la phase conception donnent lieu à un bonus qui sera partagé entre tous les membres du *team*, sous réserve d'être confirmés par la réalisation.

Les entreprises sont rémunérées pendant cette phase conception sur la base du coût réel justifié de chaque collaborateur, majoré d'un coefficient de frais généraux, calculé à partir des comptes de l'entreprise et d'un pourcentage de profit (seul élément repris de l'offre).

Tous les participants partagent la totalité de l'information sur le projet, essentiellement à partir d'un réseau informatique auquel tous sont reliés.

La réalisation

Compte tenu de la durée de l'enquête publique qui se poursuit en parallèle de la phase *design*, le démarrage des travaux n'est prévu qu'à l'été 2000. Les règles de détails ne sont donc pas encore totalement figées et feront l'objet de mise au point pendant la phase conception.

Les points suivants seront toutefois en vigueur :

- ◆ les équipes de réalisation intégreront, de manière opérationnelle, des représentants du maître d'ouvrage ;
- ◆ la totalité de l'information sera partagée ;
- ◆ la rémunération de l'entreprise consistera en un remboursement des dépenses réelles, relevées dans un compte bancaire spécifique au projet auquel le maître d'ouvrage aura un accès total, augmenté du *fee* en pourcentage uniquement sur les dépenses dont elle a la maîtrise : personnel, matériels propres (et donc en excluant les fournitures et sous-traitants) ;
- ◆ ce *fee* est composé d'une partie frais généraux calculée chaque année à partir des comptes de l'entreprise et d'une partie profit, qui a été fixée au départ ;
- ◆ le bonus sera un pourcentage du gain par rapport au *target* fixé à l'origine par BAA, d'une part au niveau de chaque *team*, d'autre part au niveau de l'ensemble du projet ;
- ◆ de la même manière ce bonus pourra être réduit en cas de retard, d'une part aux travaux dont le *team* a la charge et d'autre part, pour l'ensemble du projet ;
- ◆ BAA demande qu'une partie de ce bonus soit reversée au personnel.

Les difficultés

Le système n'a pas encore vécu l'expérience du temps, hormis dans l'offshore, où il semble avoir donné de bons résultats, et dans le cadre des *Framework Agreements* de BAA (pistes, ascenseurs, etc.). On peut noter que, dans ces derniers cas,

Taking an holistic approach

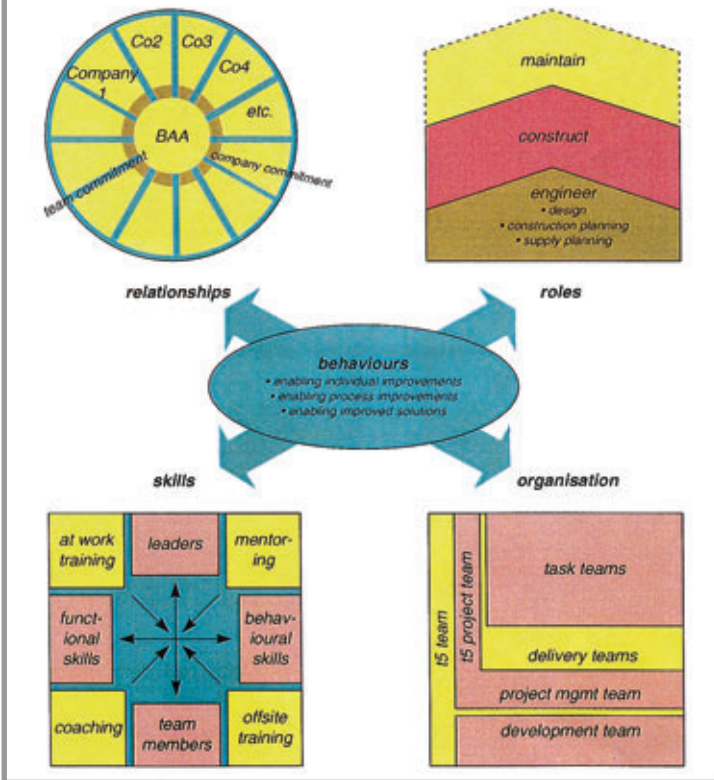


Figure 1
Exemple
de schémas
d'organisation

Example
of organisation
charts

BAA a constaté une baisse significative des coûts et une meilleure adaptation des prestations à ses besoins.

La réussite du système repose sur la qualité des hommes en charge du projet et, surtout, sur la qualité des relations qu'ils entretiennent entre eux, d'où la nécessité d'une sélection sur des critères humains et d'une formation forte de tous les intervenants, en particulier sous forme de *Team Building*. Le système, où tout est basé sur une prise de décision par accord commun des différentes parties concernées, peut être lourd et conduire à des lenteurs. Là aussi, tout dépend de la qualité relationnelle des hommes. Assez curieusement, certaines entreprises qui ont commencé à pratiquer le *partnering* ont signalé des difficultés avec certains de leurs cadres qui ne pouvaient supporter de ne plus avoir de situations conflictuelles avec leur client ! Elles ont dû les changer.

CONCLUSION

Tous les acteurs de l'acte de construire ont tout à gagner d'une démarche de *partnering* :

- ◆ les maîtres d'ouvrage qui en retirent un projet au coût minimum, correspondant au mieux aux besoins et réalisé dans les meilleurs délais ;
- ◆ les entreprises sérieuses qui ont l'assurance d'être justement rémunérées dans la mesure où elles réalisent un travail de qualité ;
- ◆ tous les individus qui participent au projet à quelque titre que ce soit, qui en retirent une plus grande satisfaction par la disparition de situations conflictuelles stériles.

Le *partnering* est donc une démarche d'avenir, dont il faut espérer qu'elle pourra s'étendre, en particulier en France.

ABSTRACT

A "partnering" project : the extension of Heathrow airport

J. Hervet

BAA, the world's leading airport operator, in particular with the London airport of Heathrow, Gatwick and Stansted, chose the partnering principle for all its improvement and maintenance work (£500 million annually, or FF5 billion). It applies in particular to the extension of the Heathrow airport, for which Dumez-GTM was chosen as partner for the underground works. This new contracting method which is developing rapidly in the United Kingdom seeks to achieve project optimisation by eliminating conflicts between the different construction players. After a brief description of the project, the article analyses the construction phases within the framework of this process.

DEUTSCHES KURZREFERAT

Ein Projekt nach dem "Partnerschafts" Modell : die Erweiterung des Londoner Heathrow-Flughafens

J. Hervet

Für alle Gestaltungs und Wartungsarbeiten (mit einem Volumen von 500 Mio. brit. Pfund pro Jahr) hat sich BAA, der weltweit größte Flughafenbetreiber, der u.a. die Londoner Flughäfen Heathrow, Gatwick und Stansted bewirtschaftet, für das Prinzip der Partnerschaft entschieden. Es wird speziell auch für die Erweiterung des Flughafens Heathrow, bei der Dumez-GTM der Partner für die unterirdischen Arbeiten ist, eingesetzt. Diese neue Vertragsbeschaffung, die in Großbritannien zur Zeit eine schnelle Entwicklung erlebt, zielt auf eine Projektoptimierung durch Wegfall der Konflikte zwischen den einzelnen im Bau tätigen Unternehmen ab. Im Anschluß an eine Kurzbeschreibung des Vorhabens werden im vorliegenden Artikel die Abwicklungsmodalitäten im Rahmen dieses Verfahrens analysiert.

RESUMEN ESPAÑOL

Un proyecto en "partnering" : la ampliación del aeropuerto de Heathrow

J. Hervet

BAA, que es el principal operador de aeropuertos del mundo, con, básicamente, los aeropuertos londinenses de Heathrow, Gatwick y Stansted ha optado por el principio del partnering para todos sus trabajos de acondicionamiento y mantenimiento (500 millones de libras anuales, o sea, 5 000 millones de francos franceses). Fundamentalmente, este principio se aplica a la ampliación del aeropuerto de Heathrow, y para el cual la empresa Dumez-GTM ha sido seleccionado como coparticipante para las obras subterráneas. Este nuevo modo de contrato, que se está desarrollando rápidamente en el Reino Unido tiene por propósito una optimización del proyecto por una supresión de los conflictos entre los distintos protagonistas de la construcción. Tras una breve descripción del proyecto, se analizan en este artículo sus modalidades de aplicación en el marco de este procedimiento.

La première ligne de Copenhague

Les travaux de génie civil de la première ligne du métro de Copenhague sont réalisés par un groupement nommé COMET qui réunit des entreprises anglaise, française, autrichienne, italienne et danoise.

Ces travaux d'un montant de 2,7 milliards de francs, à réaliser entre octobre 1996 et juin 2000, comportent :

- deux tunnels de 7,3 km chacun et 4,90 m de diamètre intérieur, creusés à l'aide de deux tunneliers à pression de terre;

- 5 km de double voie en surface sur viaducs ou remblais;

- sept stations souterraines et six stations aériennes;

- onze tranchées couvertes ou puits à usage de service, ventilation ou issue de secours.

Les excavations doivent s'effectuer dans des terrains argileux et sablograveleux ou dans des calcaires. La nappe est omniprésente.

Situé dans le centre d'une capitale très soucieuse de son environnement (sauvegarde d'un bâti ancien de qualité, gestion de la pollution des sols et de l'eau, limitation des nuisances de chantier), sa construction doit concilier toutes ces contraintes avec des impératifs de délais très serrés.

Le 3 octobre 1996, Orestadsselskabet (client danois) a confié à un groupement d'entreprises anglaise, française, autrichienne, italienne et danoise, dénommé COMET (Copenhagen Metro Construction Group) la construction d'une première ligne d'un métro automatique à Copenhague. Le marché prévoit d'en réaliser la première phase qui reliera le centre-ville de Copenhague :

- ◆ au quartier résidentiel de Frederiksberg au nord-ouest de la ville;
- ◆ au quartier résidentiel d'Amagerbro et Lergravsparken, situé au sud-est de la ville;
- ◆ au nouveau centre urbain d'Orestad, qui reste à développer, dans la zone sud-ouest (photo 1).

LES OUVRAGES À RÉALISER

Pour un montant de 3 milliards de couronnes danoises (soit 2,65 milliards de francs), les travaux comprennent plusieurs ensembles dont le génie civil et ses sous-ensembles ainsi que les équipements mécaniques et électriques.

Le génie civil (figure 1)

Les ouvrages enterrés

Il s'agit de :

- ◆ deux tunnels unidirectionnels de 4,90 m de diamètre intérieur et de 7 300 m de longueur chacun;
- ◆ six stations profondes (- 22 m environ) réparties sur le tracé sud-est - nord-ouest : Lergravsparken - Amagerbro - Christianshavn - Kongens Nytorv - Norreport - Forum. Elles développent chacune 60 ou 80 m de long sur 20 m de large;
- ◆ neuf puits :

- quatre d'entre eux sont des issues de secours : Spaniensgade, Sotorvet, Handbohojskolen, Hustrupsvej. Ils auront une section circulaire de 6,00 m et une profondeur comprise entre 24 et 35 m,
- deux autres : Amagerfaelledvej et Stadsgraven serviront à la fois de ventilation et d'issue de secours. Ils auront une section circulaire de 10,30 m et une profondeur de 36 m chacun,

- les trois derniers sont plus importants :

- Sjaeleboderne, de section elliptique de diamètres 11 et 7 m pour une profondeur de 34 m, sera également le puits d'attaque pour la réalisation du cross-over souterrain,

- Sopavillonen de section circulaire de 14,50 m pour une profondeur de 30 m assurera aussi l'extraction des déblais et l'approvisionnement des deux tunneliers pour les 1 200 derniers mètres à excaver vers le nord-ouest,

- Havnegade, le plus grand avec 20 m de diamètre et 30 m de profondeur; il sera le lieu de 2 x 2 montages de tunnelier et permettra l'extraction des déblais et l'approvisionnement de deux tubes de 2 910 m vers le sud-est et de 2 620 m vers le nord-ouest (photo 2);

- ◆ deux tranchées couvertes d'extrémité : Strandlodsvej et Falkoner Alle de sections 100 x 16,50 m, pour une profondeur respective de 10 et 15 m; elles permettront la sortie des tunneliers à chaque extrémité de ligne et abriteront chacune un cross-over en phase d'exploitation;

- ◆ un cross-over souterrain : Sjaeleboderne, cavene de 85 m de long pour 15 m de large et 9 m de hauteur environ en clé de voûte; elle occupe une position centrale de la partie souterraine du tracé entre les stations Kongens-Nytorv et Norreport;

- ◆ deux bifurcations souterraines à la jonction entre la branche nord-ouest - sud-est et la branche sud-ouest qui se dirige vers la partie réalisée à ciel ouvert. Ce sont des excavations longues de 65 m chacune dont la largeur varie entre 7,50 et 15 m et la hauteur entre 6,50 et 9,00 m en clé de voûte;

- ◆ un couloir de liaison entre la station de métro Norreport et les quais de la ligne de chemin de fer State Railway.

Les ouvrages semi-enterrés

Depuis les bifurcations, la branche sud-ouest reste en souterrain sur 570 m avant d'atteindre les ouvrages de sortie des voies vers l'extérieur. Ces ouvrages d'une profondeur maximale de 12 m comprennent : une tranchée couverte de 140 m (le lieu de démarrage des deux tunneliers), la station d'Is-

Photo 1
Tracé général
General route



du métro

Gérard Anel

DIRECTEUR DE TRAVAUX
Borie SAE



lands Brygge (75 m de long) et une rampe de sortie de 235 m de long.

Les ouvrages extérieurs

Au-delà, la ligne de métro devient aérienne. Elle se compose d'une double voie posée soit sur remblais en terre armée, soit sur viaducs (pour une longueur totale respective remblais - viaducs de 2500 m). Six nouvelles stations sont desservies :

- ◆ trois sont à niveau sur les remblais : Sundby, Orestad Syd et Vestamager ;
- ◆ trois donnent accès aux plates-formes des viaducs : Universitet, Bella-Center et Orestad.

Le second œuvre

Il s'agit, pour les tunnels, de la première phase de béton de radier, des caniveaux et des chemins de câbles. Pour les stations et les puits, il s'agit :

- ◆ des cloisons, escaliers, plafonds, planchers, poutres, grilles, fermetures des plates-formes des quais ;
- ◆ des travaux d'isolation et d'achèvement architectural.

Les équipements mécaniques et électriques

Ils comprennent les éléments suivants :

- ◆ la ventilation du tunnel ;
- ◆ le chauffage et la climatisation des stations ;
- ◆ les ascenseurs et escaliers mécaniques ;
- ◆ les pompes ;
- ◆ le système d'extinction incendie ;
- ◆ les installations électriques de haute, moyenne et basse tension ;
- ◆ l'éclairage ;
- ◆ l'installation du système de gestion technique centralisée.

Mission de coordination

COMET est également chargé de coordonner la conception technique et la réalisation des travaux avec le marché relatif au système de transport (fourniture du matériel roulant et exploitation de la ligne) attribué à la société Ansaldo.

■ NATURE DU SOUS-SOL

Le sous-sol de Copenhague est constitué depuis la surface des ensembles suivants (photo 3) :

- ◆ une couche de remblais de 2 à 3 m ;

- ◆ un terrain quaternaire *till* sur 10 à 15 m, à dominante argileuse et sablo-graveleuse, avec présence aléatoire de gros blocs de pierre *boulders* ;
- ◆ un terrain tertiaire *limestone* sur 35 à 50 m, calcaire de Copenhague de dureté variable, tendre à



Photo 2
Vue du fond du puits
Havnegade
View of Havnegade
excavation

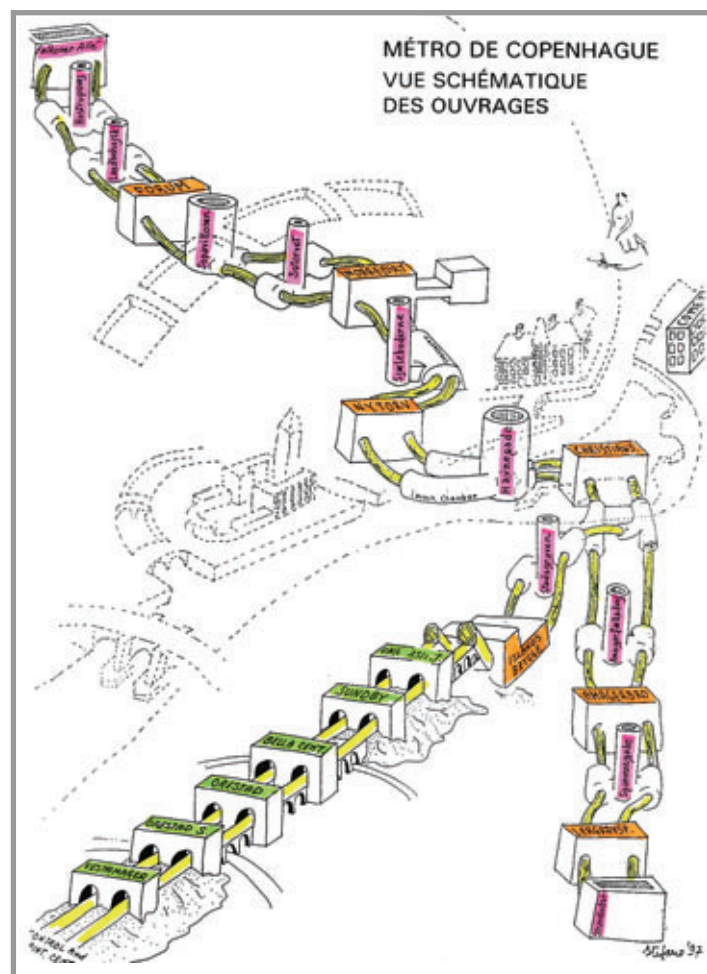


Figure 1
Vue schématique
des ouvrages
Schematic view
of the works

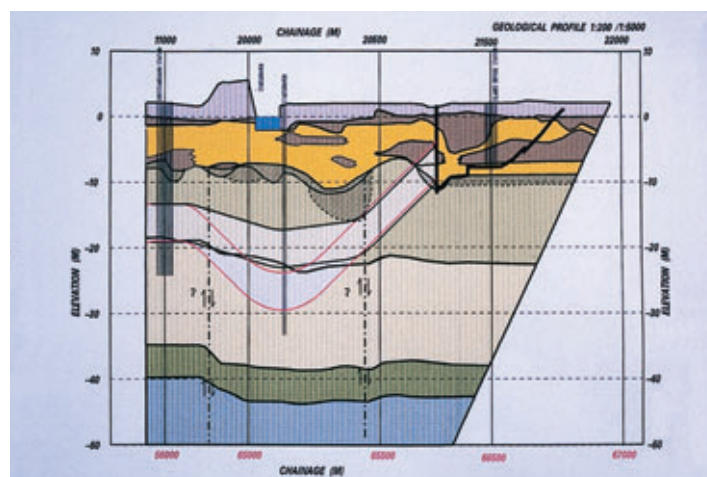


Photo 3
Coupe
géologique
Geological
section

Photo 4
Tunnelier en cours
de construction
*TBM
during construction*



Photo 5
Puits
Stadsgraven
*Stadsgraven
shaft*



Photo 6
Station
de Christianshavn.
Butonnage
en tête de fouille
*Christianshavn
station. Bracing
on excavation head*



Photo 7
Viaducs
dans le secteur
de Bella Center
*Viaducts
in the Bella Center
sector*



très dur présentant des fissures et des inclusions de bancs horizontaux de silex très abrasifs d'épaisseurs variables de 10 cm à 1 m. Copenhague étant une ville plate de bord de mer, l'eau est une constante sur tous les chantiers d'excavation. On trouve deux types de nappe : l'une dite "haute" au niveau du *till* et l'autre dite "basse" au niveau du *limestone*. Elles sont séparées par des couches d'argiles, mais peuvent être aussi en communication les unes avec les autres en raison de la fissuration. Les conditions de perméabilité peuvent varier rapidement de 10^{-4} à 10^{-7} m/s.

■ MÉTHODES D'EXÉCUTION

Celles-ci doivent impérativement répondre aux deux critères suivants :

- ◆ pas de rabattement de nappe phréatique autour des excavations, sauf de façon très limitée et provisoire dans le temps ;
- ◆ tassements sur le bâti et état d'évolution ou d'apparition de fissures négligeables.

Les tunnels

Ils sont réalisés par deux tunneliers identiques à pression de terre de type EPBM (Earth pressure balance system), de fabrication NFM, sous licence Mitsubishi. Baptisés Liva et Betty (photo 4) ils peuvent fonctionner en mode ouvert ou en mode fermé sous pression de terre et/ou sous air comprimé, de façon à gérer au mieux les infiltrations d'eau possibles en toutes zones où les problèmes de tenue de terrain dans le *till*.

Les deux tunneliers effectueront, pendant la construction, les parcours suivants avec un léger décalage de temps entre eux (figure 2) :

- ◆ Islands Brygge – Stadsgraven : 570 m ;
- ◆ Havnegade – Strandlodsvej : 2910 m ;
- ◆ Havnegade – Norreport – Falkoner Alle : 3820 m.

Les ouvrages particuliers réalisés avec la nouvelle méthode autrichienne (NATM)

Il s'agit principalement des puits, des deux bifurcations, des chambres de montage des tunneliers à Havnegade, et du *Cross Over* de Sjaele Boderne. Au préalable, des injections de terrain sont réalisées afin de limiter les arrivées d'eau en cours d'excavation et améliorer la stabilité des couches supérieures. Le niveau de la nappe supérieure sera contrôlé régulièrement au voisinage de chaque excavation. Un système de réinjection d'eau sera mis en place au départ afin de pouvoir rétablir le niveau de la nappe si le drainage des terrains dû aux excavations entraîne des rabattements.

Pour les puits, le soutènement de la partie supérieure dans le *till* est assuré par un rideau de palplanches ou de pieux sécants ancrés dans la couche

supérieure du *limestone* (photo 5). Ils sont ensuite excavés à l'aide d'un BRH (brise roche hydraulique) par tranches de 1 à 2 m ; un soutènement composé de boulons d'ancrage, treillis soudé et béton projeté est alors mis en place.

Pour les chambres souterraines l'excavation est réalisée par une machine à attaque ponctuelle par section complète ou divisée selon l'importance de la voûte. Après chaque travée de 1 à 2 m de long, le soutènement composé d'un cintre réticulé, de boulons d'ancrage, d'un treillis soudé et d'une couche de béton projeté, est immédiatement mis en place.

Les stations enterrées et les tranchées couvertes

L'excavation est prévue après pompage de l'eau, au moyen de puits disposés à l'intérieur d'un rideau étanche entourant la zone, afin de limiter l'effet de rabattement de l'eau à l'extérieur.

Le rideau étanche est composé de :

- ◆ pieux sécants ou paroi moulée, légèrement fichés sous le fond de fouille ;

- ◆ prolongation du rideau par injections, jusqu'à environ 7 m sous le niveau le plus bas à excaver.

Deux types de méthodes de construction des stations sont alors employés :

- ◆ celle dite en *top down* qui consiste à couler dans un premier temps, la dalle de couverture (complète ou partielle) afin d'assurer le butonnage définitif de la tête du soutènement vertical de l'excavation ; vient ensuite le terrassement en "taupe" par tranches correspondant aux niveaux des différents planchers à couler au plus tôt pour réaliser, à chaque étape, le butonnage définitif du soutènement avant de poursuivre avec le terrassement de la tranche inférieure suivante. Cette méthode est retenue en priorité (dans la mesure du possible) pour répondre aux recommandations du cahier des charges concernant la rigidité maximale à assurer quant au soutènement des parois verticales d'excavation proches des immeubles, afin d'en limiter les déplacements dans toutes les phases de construction ;

- ◆ et celle dite en *bottom up* qui pourra être utilisée s'il s'avère nécessaire de ménager le passage des tunneliers sur le radier d'une station au plus vite (problème de coordination des programmes d'avancement des tunneliers et des stations qu'ils doivent traverser). Ici tous les niveaux de butonnage de la boîte sont réalisés par mise en place de boutons métalliques provisoires ou par mise en place de tirants d'ancrage (photo 6).

La structure définitive en béton n'est réalisée en remontant qu'une fois l'excavation totalement terminée.

Cette méthode permet de livrer dès que possible les niveaux inférieurs de la station tout en assurant une bonne sécurité vis-à-vis de la tenue des parois verticales de l'excavation.

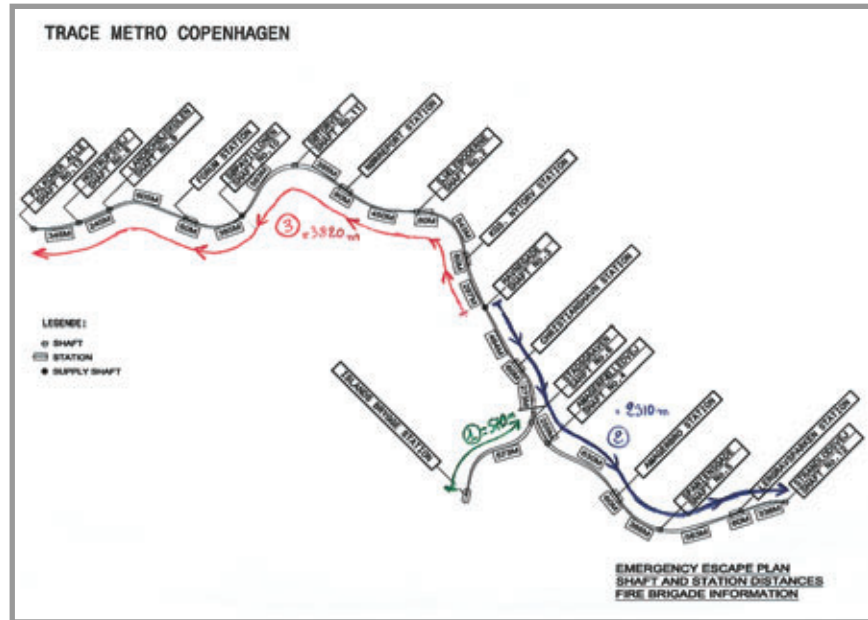


Figure 2
Parcours successifs des tunneliers
Successive paths of the TBMs

Tronçons	Mise à disposition du génie civil	Mise en service
Bifurcation vers extrémité branche extérieure sud-ouest Vestamager	31/03/1999	30/09/2000
Bifurcation vers extrémité branche souterraine sud-est Lergravsparken	30/06/1999	30/09/2000
Bifurcation vers Nørrebro sur la branche souterraine nord-ouest	30/11/1999	30/09/2000
Nørrebro vers Forum, dernier tronçon de la branche nord-ouest	30/04/2000	30/04/2001

Tableau I
Dates principales de mise à disposition du génie civil et de mise en service des tronçons

Main completion dates for civil engineering and commissioning of sections

Les situations respectives d'avancement des travaux des tunnels et des stations étant évolutives, la souplesse est de rigueur quant au choix de la méthode choisie. L'objectif, au final, restant la livraison globale des ouvrages au plus tôt.

Les travaux extérieurs

Les viaducs sont réalisés de façon très classique avec un chantier d'appuis (semelles de fondations et piles) précédant un chantier de tablier exécuté par coulage en place sur un coffrage métallique monté sur échafaudage roulant (photo 7). Aucune préfabrication n'a été autorisée par les architectes du maître d'œuvre. Les remblais sont réalisés en terre armée à partir des déblais provenant au maximum des excavations des stations, tranchées couvertes ou puits.

PROGRAMME

Pour faire démarrer, au plus près de la progression du génie civil, les travaux d'installation des voies et des équipements de transport dévolus à Ansaldo, une livraison progressive de la ligne est prévue en fonction du parcours des tunneliers. Les dates principales de mise à disposition du génie civil et de mise en service des tronçons sont notifiées dans le contrat (tableau I).

LES PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES TUNNELIERS

- Diamètre d'excavation : 5,780 m
- Puissance installée : 1280 kW
- Poussée totale : 2 800 t sur 20 vérins
- Rayon minimum : 250 m

Voussoirs

Ils sont préfabriqués en Grande Bretagne par Taylor-Woodrow et sont composés de cinq éléments et d'une clé

- Diamètre intérieur : 4,90 m
- Epaisseur : 27,50 cm
- Longueur : 1,40 m
- Pincement : 40 mm

Photo 8
Capotage d'une foreuse
pour injections

*Covering of a drilling
machine for grouting*



LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Excavations : 770 000 m³ en place
- Remblais : 135 000 m³
- Bétons : 225 000 m³
- Voussoirs tunnel : 10 500 anneaux ou 65 000 m³
- Pieux sécants et paroi moulée : 35 000 m²

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

Orestadsselskabet. Administration regroupant la municipalité de Copenhague et le ministère des Finances danois

Maître d'œuvre

Cowi-Consultants

Entreprises

Regroupées dans COMET (Copenhagen Metro Construction Group) groupement composé de :

- Tarmac Construction LTD (GB) leader
- SAE International (F)
- Astaldi SpA (I)
- Bachy Solétanche LTD (GB)
- Ilbau Gesellschaft mbH (A)
- NCC – Rasmussen and schiötz Anlaeg A/D (D)

Etudes d'exécution

- Maunsel (GB)
- Ilf (A)
- Bachy Solétanche (GB)

PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT EN PHASE CHANTIER

Le contrat spécifie clairement qu'un effort considérable doit être produit pour réduire l'impact du métro sur l'environnement.

Le client a établi un document général intitulé "Environmental impact assessment" qui définit les procédures à respecter et les limites d'impact à ne pas dépasser dans divers domaines liés à l'environnement. Les objectifs fixés sont particulièrement ambitieux.

Le maître d'œuvre a mis en place un service spécifique qui contrôle exclusivement ces aspects et doit approuver les dispositions proposées par le groupement d'entreprises.

De plus, les autorités administratives danoises, telles que "Miljøcontrol" et "Copenhagen commune" doivent également recommander des mesures, approuver les propositions des entreprises et contrôler les impacts.

Impact sur le bruit

Avant démarrage de toute activité, le groupement devra présenter un calcul prévisionnel sur le bruit provoqué. S'il est supérieur aux normes, l'entrepreneur doit faire état de toutes les mesures qu'il compte prendre pour en réduire l'effet. Les mesures les plus couramment utilisées sont :

- ◆ la protection à la source sur engins (capotage) (photo 8);
- ◆ les écrans antibruit permanents ou provisoires (photo 9);
- ◆ la limitation des activités les plus bruyantes à certaines plages horaires.

Impact sur la qualité de l'air

Les émissions de CO, HC, NO_x et SO₂ sont limitées aussi bien à l'extérieur que sur le chantier. Il en est de même pour les poussières.

Les mesures spécifiques couramment adoptées sont :

- ◆ l'équipement de tous les moteurs diesel avec des pots catalytiques ou des filtres;
- ◆ la ventilation des puits et galeries avec dispositifs de filtres à poussière systématiques au niveau du rejet de l'air vicié;
- ◆ pour les postes exposés aux poussières en souterrain :

- cabines pressurisées sur les engins,
- port de masques pressurisés obligatoire.

Si dans les zones sensibles enserrées près d'immeubles (Amagerbro par exemple), les teneurs en NO₂ enregistrées sont supérieures aux normes tolérées, des périodes de cessation d'activité devront être aménagées, même si les causes sont étrangères au chantier.



Toutefois les difficultés et contraintes accumulées, à savoir :

- ◆ absence de période de préparation;
 - ◆ difficile obtention anticipée des études d'exécution approuvées pour les premiers ouvrages à réaliser;
 - ◆ modifications tardives dans la définition du projet;
 - ◆ longueur des délais d'approbation des compositions de béton;
 - ◆ nombreuses contraintes d'environnement;
- ont conduit à des retards de démarrage conséquents.

La mise en route des tunneliers fut laborieuse en raison :

- ◆ d'une part, de la difficile mise au point du mélange terre *till*, polymère, mousse qui conduit à la maîtrise de la pression de terre en mode fermé, et par là même, à la maîtrise aussi bien de l'usure des outils que du pilotage des tunneliers;
- ◆ d'autre part, de divers mouvements de grève qui ont paralysé l'avancement pendant plusieurs semaines.

Fin août 1998, le premier tunnelier "Liva" achevait toutefois son premier tronçon de 570 m avant d'être transféré au puits Havnegade. Fin septembre le second tunnelier "Betty" achevait le même parcours avec une progression finale de 18 m par jour supérieure à la moyenne générale prévue au contrat. Toutefois, à ce stade d'avancement du chantier le retard général accumulé est de 9 mois environ. En améliorant les rendements de production le groupement d'entreprises s'emploie désormais, à combler une partie de ce retard.



Photo 9

Clôture d'emprise traitée en mur antibruit en tête du puits Havnedage
Fencing consisting of a noise barrier at the head of the Havnedage shaft

Impact sur la nappe phréatique

Tout abaissement de la nappe au-delà des variations saisonnières est particulièrement surveillé afin :

- ◆ d'éviter des déplacements de nappe qui pourraient conduire des eaux contaminées ou saumâtres vers des zones propres, où elle est pompée pour la consommation ;
- ◆ d'éviter des tassements d'immeubles.

Le pompage nécessaire aux excavations sera donc prévu :

- ◆ à l'intérieur d'enceintes "étanches";
- ◆ avec modélisation pour étudier son effet sur le niveau des nappes ;
- ◆ avec des systèmes de recharge en eau non contaminée en cas de rabattement sensible ;
- ◆ avec contrôle permanent des niveaux réels de la nappe.

Tout déversement de polluants dans le sol doit être soigneusement évité. L'utilisation de produits chimiques (adjuvants pour les injections, huiles, graisses, mousse, polymères pour l'activité des tunneliers...), qui seront en contact avec le terrain ou les nappes, doit faire l'objet d'une étude particulière. Un accord formel des autorités doit être obtenu avant la mise en œuvre.

Impact sur les sols

Les sols sont classés en quatre catégories définies par leur degré de pollution (classe I pour les terrains propres, à classe IV pour les terrains hautement contaminés). La gestion des déblais devra faire l'objet d'un programme d'ensemble qui proposera des mesures pour :

- ◆ déterminer les sols contaminés et la nature de la pollution ;
- ◆ sélectionner des aires de stockage provisoires pour laisser le temps de préciser les contaminations imprévues ;
- ◆ identifier, pour chaque classe de terrain, les lieux de décharge appropriés.

Ce programme doit également être approuvé par les autorités administratives.

ABSTRACT

Copenhagen's first metro line

G. Anel

The civil engineering works for the first metro line in Copenhagen are being carried out by the COMET consortium, which brings together British, French, Austrian, Italian and Danish companies. These works, amounting to FF2.7 billion, are to be completed between October 1996 and the year 2000, and include :

- two tunnels, each of 7,3 km with an inside diameter of 4,90 m, dug by means of two earth pressure boring machines;
- five km of double-way carriageway on the surface supported by viaducts or embankments;
- seven underground stations and six overhead stations;
- eleven cut-and-cover sections or shafts designed for service, ventilation or as emergency exits.

Excavations are carried out in argillaceous and sand-gravel ground or in limestone. Groundwater is present everywhere.

Located in the centre of a very environment-conscious capital (safeguarding its fine historical buildings, managing ground and water pollution, and limiting work-site disturbances), its construction must reconcile all these constraints within very short deadlines.

DEUTSCHES KURZREFERAT

Die erste U-Bahn-Linie in Kopenhagen

G. Anel

Die Tiefbauarbeiten für die erste Kopenhagener U-Bahn-Linie werden von einer COMET genannten Arbeitsgemeinschaft durchgeführt, in der sich englische, französische, österreichische, italienische und dänische Unternehmen zusammengeschlossen haben. Diese für den Zeitraum von Oktober 1996 bis Juni 2000 geplanten Arbeiten für einen Betrag von 2,7 Mrd. franz. Francs beinhalten :

- zwei jeweils 7,3 km lange Tunnel mit einem Innenquerschnitt von 4,90 m, die von zwei Tunnelbohrmaschinen unter Erddruck gebohrt werden ;
- 5 km überirdische Doppelschienens-trecke auf Hochbrücken bzw. Aufschüttungen ;

- sieben unterirdische und sechs überirdische Bahnhöfe ;
- elf abgedeckte Einschnitte bzw. Schächte für Instandhaltungszwecke, zur Belüftung oder als Notausgang. Die Ausschachtungen erfolgen in tonigem und sandig-kiesigem Untergrund oder in Kalkböden. Grundwasser ist überall vorhanden. Dieses Bauvorhaben in einer Landeshauptstadt, die großen Wert auf Umweltbewußtsein legt (Bewahrung der vorhandenen, hochwertigen Bausubstanz, Beherrschung der Boden- und Wasserbelastung, Begrenzung der von der Baustelle ausgehenden Störeinflüsse), muß all diese Vorgaben mit einem sehr eng gefaßten Terminrahmen in Einklang bringen.

RESUMEN ESPAÑOL

La primera línea del metro de Copenhague

G. Anel

Las obras de ingeniería civil de la primera línea del metro de Copenhague se están llevando a cabo por parte de un grupo denominado COMET, que reúne a las empresas constructoras inglesa, francesa, austriaca, italiana y danesa. Estas obras, de un importe de 2 700 millones de francos franceses, que se han de llevar a cabo entre 1996 y 2000 incluyen :

- dos túneles de 7,3 km cada uno y 4,90 m de diámetro interior, excavados por medio de dos tuneleros con presión de tierra ;
- 5 km de vía doble en superficie sobre viaductos o terraplenes ;
- siete estaciones subterráneas y seis exteriores ;
- 11 trincheras cubiertas o pozos de servicio, ventilación o salidas de emergencia.

Las excavaciones se deben efectuar en terrenos arcillosos y arenosos mezclados con gravas o en terrenos de piedra caliza. El acuífero es omnipresente.

La construcción de esta línea de metro debe aunar todos estos imperativos no siendo menos importantes los requerimientos de plazos de ejecución, ya que se encuentra en el centro de una capital que tiene muy presente su medio ambiente (salvaguardia de una edificación antigua de calidad, gestión de la contaminación de los suelos y del agua, limitación de las molestias causadas a la población por las obras ejecutadas).

Le pont de Rion-Antirion

Un ouvrage exceptionnel

Le pont de Rion-Antirion, situé dans la partie ouest de la Grèce, est un ouvrage exceptionnel à plus d'un titre : par son coût d'abord (4 milliards de francs), mais aussi par son environnement physique, ses caractéristiques techniques et son montage financier enfin, car il s'agit d'un ouvrage entrepris sous forme de concession.

L'article décrit d'abord les raisons de ce projet et son montage juridique et financier.

Puis sont présentées les données fondamentales et les raisonnements qui ont peu à peu orientés le projet vers ce qu'il est aujourd'hui. Enfin, les principales caractéristiques techniques de l'ouvrage (succession de travées haubanées de 560 m de portée, fondations innovantes supportant de grosses structures de type plates-formes gravitaires en béton) sont décrites en détail.

La Grèce nourrissait un rêve séculaire : celui de relier le Péloponnèse au continent par un grand ouvrage. Cette idée avait déjà été évoquée à la fin du siècle dernier, mais il fallut attendre la fin de ce siècle pour voir ce grand projet se réaliser. Il s'agit d'un ouvrage exceptionnel à plus d'un titre :

- ◆ par son importance d'abord : les ponts d'un coût de 4 milliards de francs ne sont pas légion ;
- ◆ par les caractéristiques de son environnement : grande profondeur d'eau, sols médiocres, séismes violents ;
- ◆ par les solutions techniques qui ont dû être développées et que l'on peut caractériser comme étant le fruit d'un croisement entre l'offshore et les grandes travées haubanées ;
- ◆ par la complexité de son montage financier enfin.

tendu que des articles ultérieurs reviendront plus en détail sur les études et les techniques de construction.

■ LA CONCESSION

Pourquoi un pont ?

Le besoin d'une liaison occidentale entre la Grèce continentale et le Péloponnèse s'est toujours fait sentir, qui soit le pendant de la liaison orientale assurée par l'isthme de Corinthe (figure 1).

L'intérêt de cette liaison est d'abord régional : la Grèce continentale est en effet coupée du nord au sud par une chaîne montagneuse qui rend les liaisons est-ouest fort malaisées. Dès lors pour aller d'Athènes vers le nord-ouest la voie la plus naturelle consiste à emprunter la route Athènes-Patras puis à traverser le détroit de Rion. C'est dire que le pont assurera d'abord une mission de désenclavement de toute la région nord-ouest du pays. Mais sa mission s'étendra également aux relations internationales.

Avant la guerre en ex-Yougoslavie la quasi totalité du trafic entre la Grèce et l'Europe occidentale transitait par ce pays. Il emprunte désormais la voie maritime entre la Grèce et l'Italie au travers des ports grecs de la côte ouest. La route littorale sur laquelle se situera l'ouvrage, a donc récemment acquis une importance particulière pour les relations internationales de la Grèce avec ses partenaires européens. Tout ceci explique que le pont de Rion ait été inclus dans les quatorze projets prioritaires européens arrêtés au sommet d'Essen en 1994.

La liaison, à l'emplacement du pont, est actuellement assurée par des bacs qui peinent à offrir un niveau de service décent face à un trafic de plus en plus important (photo 1).

Le temps moyen de traversée, y compris les temps d'attente, de chargement et de déchargement, est de l'ordre de 45 minutes avec des pointes pouvant atteindre plusieurs heures les week-ends d'été, alors que la largeur du bras de mer à traverser est d'à peine 3 km. Par ailleurs la liaison peut subir des interruptions en hiver du fait des conditions atmosphériques.

Le trafic empruntant les bacs est en constante augmentation (5 % par an au cours des dix dernières années), pour atteindre actuellement 7 000 véhicules par jour en moyenne annuelle, avec de fortes disparités saisonnières. Le pourcentage élevé de



Figure 1
Plan
de situation
Location

Cet ouvrage illustre parfaitement les nouvelles tendances de l'international : avoir à financer et construire de gros "moutons à cinq pattes", qui requièrent une parfaite maîtrise de tous les aspects de l'opération, techniques, juridiques et financiers. Il est à noter que le pont de Rion-Antirion est le troisième ouvrage de cette importance que le groupe GTM entreprend au cours de cette décennie après le pont de la Severn en Grande-Bretagne et le pont de l'île du Prince Edouard (ou de la Confédération) au Canada.

Ce grand projet n'en est encore qu'à ses débuts, puisque la mise en vigueur du contrat de concession est intervenue la veille de Noël 1997. Nous en présenterons ici les grandes lignes, étant en-

à vocation européenne

Jean-Paul Teyssandier



DIRECTEUR GÉNÉRAL
Gefyra - Groupe GTM

Jacques Combault



DIRECTEUR
SCIENTIFIQUE
Dumez GTM

poids lourds (20 %) montre bien l'intérêt économique de la liaison.

Il ressort des enquêtes "origines-destinations" réalisées que l'essentiel des usagers empruntant les bacs effectue un trajet moyenne ou longue distance. Ceci est compréhensible : le trafic courte distance est découragé par les tarifs relativement élevés des bacs : 35 F pour les voitures particulières, de 45 à 150 F pour les camions suivant leur tonnage.

Il est clair que l'établissement d'un lien fixe entraînera une augmentation sensible du trafic, surtout courte distance pour peu qu'une politique tarifaire appropriée (système d'abonnements) soit mise en place. Ainsi le trafic prévu pour 2005 lors de la première année d'exploitation s'élève à 10000 véhicules par jour en moyenne annuelle, sur la base d'hypothèses prudentes en matière de trafic induit. C'est donc une recette annuelle d'un peu moins de 300 millions de francs qui devrait être générée, montant qui a servi de base aux simulations financières.

Une histoire mouvementée

Un premier appel d'offres fut lancé par l'administration grecque en 1980, sans succès. Lors d'un deuxième appel d'offres de conception-construction, trois offres furent remises en 1988, dont une par le groupe GTM qui était moins disante, mais la procédure ne fut pas poursuivie.

Un troisième appel d'offres, en concession cette fois, fut lancé en 1991. Entre-temps l'administration grecque avait fait réaliser une campagne de reconnaissance géotechnique en mer, qui se révéla fort utile pour la conclusion du contrat. Dans une concession, il est en effet essentiel que les coûts techniques soient parfaitement maîtrisés. Une bonne connaissance des sols y contribue, et fait partie des conditions indispensables à l'établissement d'une offre sérieuse.

Techniquement nous connaissons la difficulté du projet, mais c'était sans compter sur l'établissement de son montage juridique et financier. Ce projet est en effet la première concession privée d'infrastructures en Grèce. Il est toujours délicat de faire accepter à une administration n'ayant pas d'expérience en matière de concession, les dispositions nécessaires au montage financier qui reviennent de fait, à la déposséder d'une grande partie de ses prérogatives en matière de contrôle du projet.

Dès lors les négociations du contrat de concession



Photo 1
Vue
des bacs
View
of elements

furent longues et difficiles : l'offre fut remise en décembre 1993 et la signature du contrat n'intervint que deux ans plus tard, en janvier 1996. Mais le chemin était encore long : il fallut convaincre la BEI (Banque Européenne d'Investissement) d'accorder un important prêt à la société concessionnaire. Or la BEI avait une image négative du projet : trop risqué, peu rentable. L'année 1996 fut entièrement consacrée à la convaincre du contraire.

Restait enfin à boucler le financement avec un groupe de banques commerciales garantissant le prêt de la BEI. Les négociations furent là encore difficiles du fait d'un schéma inédit : alors qu'un contrat de concession classique se négocie entre trois parties (concedant, concessionnaire, banques), dans ce projet quatre entités se trouvaient autour de la table des négociations (les trois précédentes + la BEI), avec des intérêts radicalement divergents entre les banques et la BEI. Le financement fut bouclé en décembre 1997 avec mise en vigueur du contrat de concession fin 97.

Le nombre et l'épaisseur des documents signés à cette occasion (plus de 30 contrats financiers différents!) donne la mesure de la complexité du montage de la concession. Et même si le pont de Rion constitue un record à cet égard, il est malheureusement significatif d'une évolution plus profonde.

Le montage financier

La structure juridique de l'opération est classique :
◆ une société concessionnaire, Gefyra SA, est formée par les partenaires de l'opération (groupe GTM pour 53 %, six entreprises grecques pour les 47 % restants). Elle signe un contrat de concession avec l'État grec ;

◆ une JV de construction est formée par les mêmes partenaires avec les mêmes parts. Elle signe un

► contrat de conception-construction avec la société concessionnaire pour un prix forfaitaire incluant tous les aléas techniques, y compris la nature des sols.

Un tel contrat peut sembler léonin. C'est malheureusement une condition nécessaire pour le montage du financement. Une règle stricte de partage des risques entre les banques et les entreprises s'est en effet établie dans les concessions. Les premières refusent désormais de prendre le moindre risque sur le coût final de l'ouvrage, reportant entièrement sur les secondes – et sur le concédant par exemple en cas de force majeure – l'ensemble des aléas de conception et de construction. Inutile de souligner la gravité des risques ainsi assumés par les entreprises et les conséquences d'une telle situation sur la sélection des affaires et l'étude des offres.

Le coût du pont est tel, eu égard aux recettes prévues, qu'il ne peut être financé sans une aide publique significative. Cette dernière traduit bien le rôle "d'aménagement du territoire" qui est dévolu à l'ouvrage, et son montant a été déterminé à partir des emprunts qui pouvaient être gagés sur les recettes escomptées. Il est à noter que l'estimation de ces recettes a été moins délicate que dans bien d'autres projets de concession. Le trafic empruntant les bacs constitue en effet une base sérieuse pour estimer la demande de transport. Une fois l'ouvrage mis en service, il n'existera aucun itinéraire concurrent susceptible de faire peser un risque sur le niveau des recettes.

Le concessionnaire a toute latitude pour fixer les péages dans les limites d'un tarif maximal qui se situe à environ 40 % au-dessus des tarifs actuellement pratiqués par les bacs.

La durée de la concession est de 42 ans. Le contrat de concession prévoit toutefois une fin anticipée de la concession, au cas où le rendement du capital atteindrait un certain plafond. Une telle clause (ou une clause basée sur un plafond de recettes) devient de plus en plus fréquente dans des concessions portant sur un ouvrage à caractère monopolistique.

Le plan de financement est reporté sur le tableau I. Notons que le contrat de concession de Rion est en avance sur son temps : c'est très probablement le premier contrat de ce type où toutes les obligations financières de diverses parties prenantes ont été exprimées en Ecu (en attendant l'Euro).

La BEI n'acceptant pas de risques liés aux projets, il a fallu mettre en place une garantie fournie par un groupe de banques commerciales mené par Bank of America et Bank of Tokyo-Mitsubishi. C'est cette garantie qui a fait l'objet des longues tractations mentionnées plus haut.

Mais le financement est en place et le compteur tourne désormais pour mettre l'ouvrage en service en l'an 2004, date à laquelle les Jeux Olympiques reviendront dans leur pays d'origine.

■ LA CONCEPTION DE L'OUVRAGE

En 2004, le pont de Rion-Antirion franchira donc le golfe de Corinthe à proximité de la ville de Patras et reliera ainsi le Péloponnèse à la Grèce occidentale (figure 1).

L'ouvrage principal de 27,20 m de large pour 2280,40 m de long, sera raccordé aux rivages situés de part et d'autre du golfe par deux viaducs d'accès dont les longueurs seront respectivement de 377,20 m côté Rion et de 251,20 m côté Antirion.

Les données fondamentales

L'ouvrage principal est situé dans un environnement à la fois superbe et terrifiant. Il est implanté dans un profond rétrécissement du golfe de Corinthe. Le fond de la mer est constitué d'une épaisse couche d'alluvions peu résistantes, dans une région d'intense activité sismique; les mouvements tectoniques y sont relativement lents mais assez importants.

Certes, ces conditions peu engageantes ne sembleraient pas pour autant insurmontables si elles ne coexistaient pas. Mais il en est ainsi dans cette partie de la Grèce où déjà la mythologie nous a habitués à une certaine démesure.

Car c'est bien la conjonction de ces difficultés qui rend le projet audacieux. On devine que les ondes sismiques vont bousculer l'ouvrage en générant de redoutables efforts au niveau des fondations, qu'un sol trop faible ne pourra résister sans être convenablement renforcé et qu'un tel renforcement ne sera pas aisé sous plusieurs dizaines de mètres d'eau.

Le site et ses caractéristiques géotechniques

En ce site exceptionnel, la profondeur de la mer est en moyenne de 60 m. Elle atteint même localement 65 m. Le fond du détroit quant à lui est constitué d'une épaisse couche d'argile, mélangée parfois à du limon ou à des sables fins et renfermant par endroit de grosses lentilles de sables et graviers. Rien ne permet de se faire une idée précise sur la nature et la position du substratum résistant; seules quelques études géologiques nous autorisent à penser aujourd'hui qu'il se trouve approximativement à 800 m de profondeur.

Les investigations géotechniques effectuées durant l'automne 1996, puis les tests *in situ* et les essais en laboratoire, confirment bien les études préliminaires précédemment réalisées. Bien que légèrement surconsolidée en partie supérieure et généralement recouverte d'une couche de sables et graviers d'épaisseur variable, la couche d'argile ne possède pas une cohésion suffisamment élevée, sur les 20 à 30 premiers mètres, pour que l'on puisse envisager d'y implanter d'importantes

structures sans disposition particulière. En outre, quelques grosses poches de sable liquéfiable risquent d'altérer substantiellement la résistance de cette argile lors d'un tremblement de terre.

L'aléa sismique et les chocs de navire

Le séisme de calcul demeure toutefois la donnée la plus contraignante au stade de la conception de l'ouvrage et de ses fondations.

Ce séisme est caractérisé par son intensité, 6,5 sur l'échelle de Richter; par sa période de retour, 2000 ans; par sa durée, 50 secondes; et surtout par un spectre de réponse à la surface du sol (ou du fond de la mer). L'accélération maximale qui peut être ainsi générée au niveau du sol est égale à 0,48 g. L'accélération maximale que l'excitation sismique correspondante est capable d'engendrer dans une structure en élévation est égale à 1,2 g sur une bande de fréquences de vibrations propres allant de 1 à 5 Hertz.

De plus l'ouvrage doit résister à des mouvements de faille conduisant à des déplacements horizontaux et verticaux de l'ordre de 2,00 m, d'une partie de la structure par rapport à l'autre, et à de légères rotations des fondations correspondant à un réaménagement possible du sol.

Enfin, et bien que situés dans une zone de faible trafic maritime, les appuis devront résister au choc d'un navire de 180 000 t (tanker) naviguant à 16 nœuds.

Les grandes options initiales

Compte tenu de ces nombreuses difficultés, il convenait tout d'abord de choisir les portées de l'ouvrage principal en limitant au maximum le nombre des appuis exposés à des conditions aussi inhabituelles. C'est la raison pour laquelle le choix d'un ouvrage haubané, constitué d'un tablier mixte à deux poutres principales et comportant trois travées centrales de 560 m et deux travées de rive de 300 m environ (photo 2), s'imposa rapidement dans le cadre d'une optimisation économique préliminaire. Au demeurant, une structure haubanée multitravée de ce type est un record qu'il n'est pas aisé d'apprécier à sa juste valeur, mais de telles portées sont de toute évidence à la limite de ce qu'un tablier bipoutre peut supporter.

Le schéma statique de l'ouvrage principal

Restait à trouver un ensemble de concepts permettant de respecter toutes les contraintes qui étaient imposées. L'ouvrage comporte quatre pylônes qui doivent assurer la résistance de cinq grandes travées successives par l'intermédiaire du haubanage.

Contrairement à la majorité des structures haubanées construites à ce jour, ces différentes travées ne sont pas rigidifiées par les travées voisines en l'absence des pilettes latérales qui limitent ha-

Dépenses		
• Coût de construction	585	millions ECU
• Frais du concessionnaire	65	millions ECU
• Frais financiers	85	millions ECU
• Réserve	10	millions ECU
Total	745	millions ECU
Ressources		
• Capital	69	millions ECU
• Contribution publique	306	millions ECU
• Prêt BEI	370	millions ECU
Total	745	millions ECU

Tableau I
Le plan
de financement
Financing plan



Photo 2
Vue CAO
de l'ouvrage principal
CAD view
of main structure

bituellement les efforts sollicitant les pylônes et le tablier.

De plus, la hauteur totale des pylônes ne pouvait guère être inférieure à 230 m, compte tenu de la longueur des travées et de la hauteur du gabarit de navigation. Il fallait par conséquent que les pylônes soient particulièrement rigides; massifs en partie basse et peu déformables en partie haute. En l'absence d'études sophistiquées, il fut aussi prudemment décidé d'isoler ces pylônes les uns des autres. A cet effet le tablier fut tout d'abord découpé en fléaux haubanés de 510 m de longueur, raccordés les uns aux autres et aux culées par des tronçons de tablier fusibles de 50 m de portée, afin de s'affranchir de l'effet assurément défavorable des mouvements tectoniques. En libérant la structure des contraintes internes liées à tout déplacement imposé, cette disposition éliminait par la même occasion une partie des problèmes liés au déphasage inévitable des impulsions sismiques transmises à chaque fondation (et se propageant à vitesse relativement faible dans un sol de mauvaise qualité).

Malgré ces dispositions, les premières études du comportement sismique de la structure, dans le

l'interaction sol-structure et de concevoir l'ouvrage sur la base d'un schéma statique beaucoup plus sympathique.

Il fut en effet simultanément démontré, qu'une structure haubanée multitravée à tablier continu et totalement suspendu, était tout à fait apte à s'accommoder d'inclinaisons et de déplacements horizontaux ou verticaux non négligeables des pylônes, sans que le tablier en souffre. Le tablier, suspendu aux pylônes par l'intermédiaire du haubanage et reposant simplement à ses extrémités sur les piles de transition avec les viaducs d'accès, choisit alors de lui-même un profil en long et un tracé en plan qui demeurent parfaitement acceptables. Il est en outre loisible de procéder à des ajustements ou à des réglages, qui permettent de libérer les forces internes engendrées par des déformations tectoniques que l'on jugerait trop élevées, afin de garantir la pérennité de l'ouvrage. De plus, le tablier est naturellement isolé des secousses sismiques et seuls quelques ressorts-amortisseurs disposés au droit des jambes des pylônes ou des culées s'avèrent nécessaires pour réduire les efforts transmis à la tête des pylônes.

Caractéristiques techniques actuelles des ouvrages

Ces nouvelles dispositions conduisent également à rééquilibrer l'ouvrage principal en ajustant la portée des travées de rive à 286,00 m (figure 2), afin d'optimiser les quantités de charpente du tablier et de simplifier son exécution.

Les fondations de l'ouvrage principal

Les trois pylônes situés côté Rion et implantés sur le plateau sous-marin situé en moyenne à 60 m de profondeur reposeront donc sur trois massifs de sol renforcé par des inclusions métalliques rigides, de 25 à 30 m de longueur, battues à la maille de 7,00 m x 7,00 m à l'intérieur d'une surface circulaire de 130 m de diamètre (13 273 m²). La tête des inclusions situées sous l'emprise de la base des pylônes sera noyée dans une couche de ballast nivelée avec précision et soigneusement sélectionnée (photo 3).

Les inclusions n'auront aucun rôle porteur. Tout au plus contribueront-elles, en freinant le terrain en place, à mieux répartir les contraintes verticales générées par le poids propre de l'ouvrage et à limiter les tassements différentiels. Le ballast aura quant à lui plusieurs fonctions : il jouera le rôle d'un matelas répartiteur capable de transmettre les forces horizontales entraînant la structure, à la tête des inclusions et au sol en place, sans qu'aucune ligne de rupture ne puisse se développer dans l'argile ; ce sera également un fusible calibré pour limiter précisément la résultante des efforts horizontaux à une valeur compatible avec la capacité de résistance du sol renforcé.

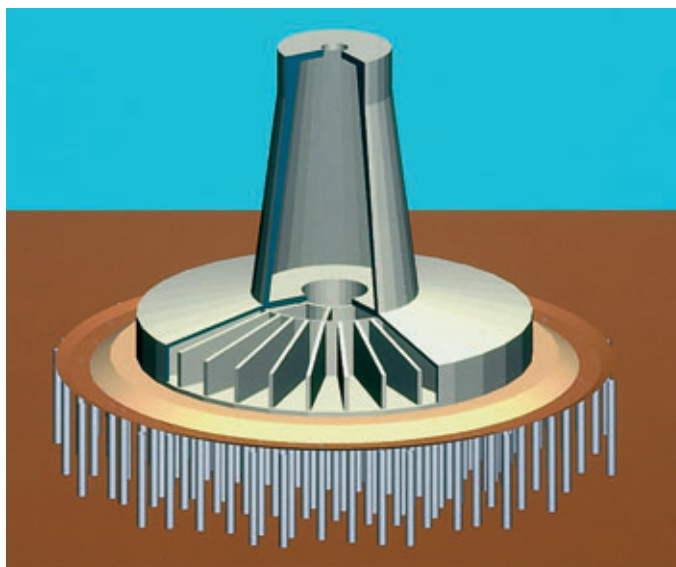


Photo 3
Vue CAO de la base
d'un pylône
et de sa fondation

CAD view
of tower base
and foundation



Photo 4
Vue CAO
de la partie supérieure
d'un pylône

CAD view
of upper part
of a tower

Les pylônes (figure 3)

Les énormes bases des pylônes en béton armé reposeront directement sur la couche de ballast. Elles se composent d'une partie tronconique de 53,00 m de hauteur, dont le diamètre varie de 37,99 m à 26,93 m, encastrée dans une structure circulaire creuse de 89,93 m de diamètre. Cette structure circulaire est en réalité une grosse semelle de 9,00 m de hauteur en périphérie et de 13,50 m de hauteur à la base du cône, qui sera amenée à supporter des charges verticales très excentrées. Elle est donc renforcée par un anneau de torsion interne et des poutres radiales.

Conçues pour émerger à 3,00 m au-dessus de l'eau, ces bases supporteront un fût octogonal, de 24,00 m de largeur et de hauteur variable, surmonté d'un chapiteau pyramidal de 19,30 m de hauteur et de 40,00 m de côté au niveau de son arase supérieure dans lequel seront encastrées les quatre jambes de la partie haute des pylônes (photo 4). Ces jambes inclinées de section carrée de 4,00 m

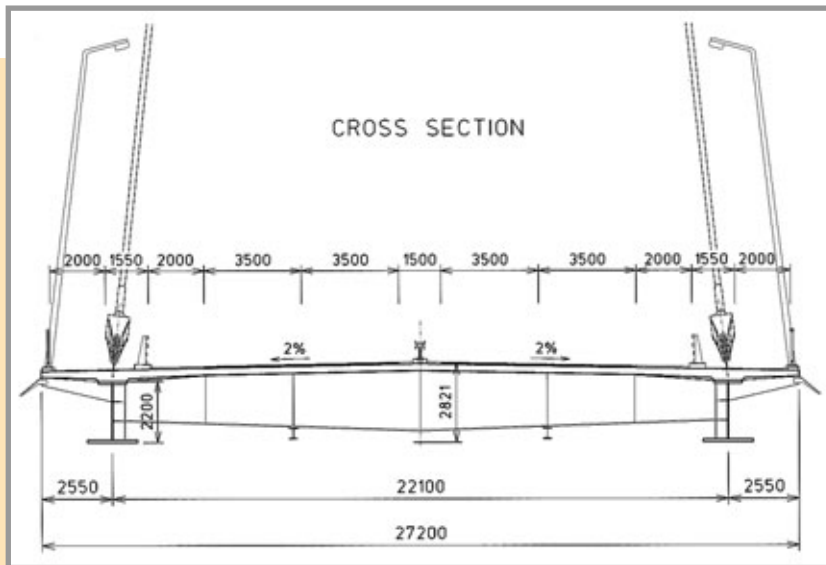


Figure 4
Coupe transversale du tablier de l'ouvrage principal
Cross-section of deck of main structure

Figure 5
Coupe longitudinale d'un fléau central
Longitudinal section of a central cantilever arm

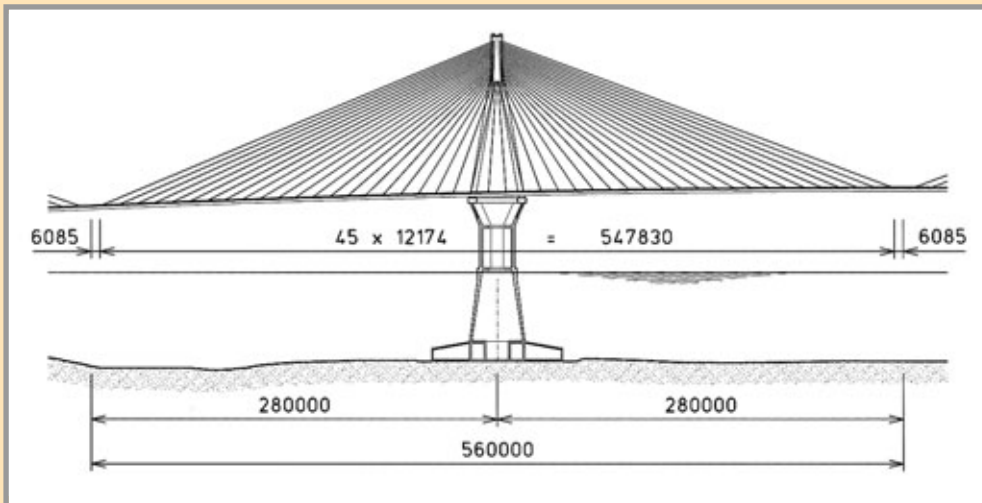
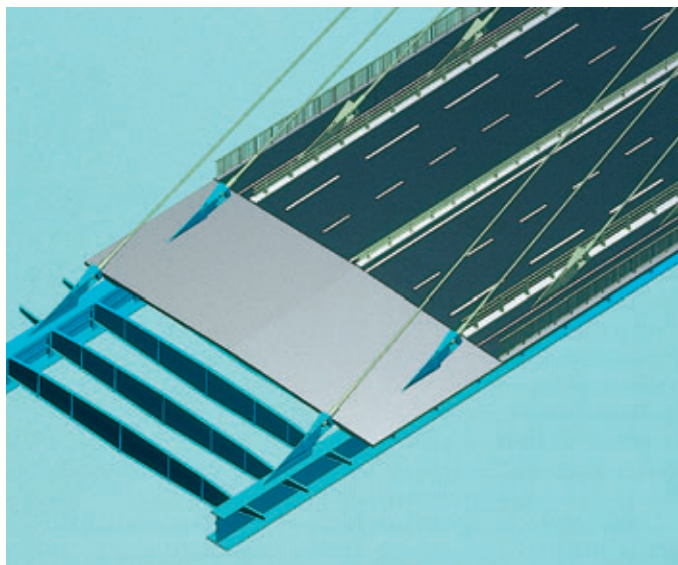


Photo 5
Simulation CAO des phases de construction du tablier haubané

CAD simulation of construction phases of cable-stayed deck



de côté en béton armé auront une hauteur de 78,00 m. Elles convergent en un point situé dans la masse de la tête des pylônes dont la hauteur est de 35,00 m. Celle-ci sera constituée de deux coques en béton armé qui lui confèrent son élégance et qui enserrant, dans le plan moyen de l'ouvrage, un noyau métallique creux sur lequel les ancrages hauts des haubans seront régulièrement répartis.

Implanté sur un petit ressaut du fond de la mer, où la profondeur de l'eau n'est que de 50 m, le pylône latéral situé côté Antirion est de conception analogue aux trois autres pylônes. Il reposera toutefois directement sur le sol en place constitué de bon gravier et densifié par un procédé qui n'est pas encore choisi. Compte tenu de sa plus faible hauteur, le diamètre de la base de ce pylône a pu être réduit à 79,89 m.

Le tablier et les haubans de l'ouvrage principal

Le tablier mixte acier-béton sera de type bipoutre (figure 4). Il se compose d'une charpente métallique constituée de deux poutres principales, hautes de 2 200 mm, régulièrement entretoisées par des poutres transversales de hauteurs variables espacées de 4,058 m. La charpente est connectée à une dalle en béton simplement armée de 27,20 m de largeur et de 24 cm d'épaisseur supportant la chaussée en forme de toit.

Avec le schéma statique adopté aujourd'hui, le tablier sera totalement suspendu aux pylônes par 8 ensembles de 23 paires de haubans uniformément réparties sur toute la longueur de l'ouvrage (figure 5) et ancrées de part et d'autre du tablier dans des chapes étriers situées dans le prolongement des poutres principales (photo 5).

Les haubans comporteront 22 à 68 torons T15 selon leur position dans l'ouvrage.

Les viaducs d'accès

Les culées, les piles courantes et les piles de transition des viaducs d'accès reposeront sur un ensemble de pieux moulés dans le sol. Dans l'état actuel du projet, les viaducs d'accès ont une portée de l'ordre de 40,00 m. Les tabliers seront constitués de poutres sous chaussée en béton armé et précontraint posées sur des appuis simples et attelées les unes aux autres par l'intermédiaire du hourdis supérieur.

CONCLUSIONS

L'étude d'un ouvrage aussi complexe passe nécessairement par une évaluation de la sensibilité de la structure à différentes hypothèses, à différents paramètres et à différents modèles. Ces études peuvent être très simples ou très fastidieuses. Elles sont dans tous les cas indispen-

sables car, elles seules, permettent de s'assurer que l'on ne sous-estime rien et que l'on ne commettra pas une erreur irréparable si, pour une raison ou pour une autre, les calculs ne correspondaient pas à la réalité de la nature.

Ces études présentent en outre l'avantage de faire progresser le concept initial et d'optimiser la structure, en termes de qualité, de faisabilité et de coût global, pour peu que l'on sache prendre le recul qui s'impose.

C'est ce qui a été fait ici, en profitant du dérapage de la date de mise en vigueur du contrat et des délais nécessaires à la réalisation d'importantes installations de chantier pour organiser les études et le contrôle du projet en conséquence.

Bien que les études détaillées ne soient pas encore dans une phase totalement opérationnelle, les méthodes d'exécution sont déjà définies dans leurs grandes lignes et prises en compte au niveau des plans-guides.



Photomontage
de l'ouvrage réalisé

Photomontage
of complete structure

ABSTRACT

The Rion-Antirion bridge An exceptional structure with a European calling

J.-P. Teyssandier, J. Combault

The Rion-Antirion bridge, located in the western part of Greece, is an exceptional structure in more ways than one : first, in its cost (FF4 billion), but also in its physical environment, its technical characteristics and its financing and, finally, because it is a facility to be operated on a concession basis.

The authors first explain the reasons for this project and its legal and financial arrangements.

They then present the basic data and the rationale, which gradually oriented the project towards what it is today. Finally, the main technical characteristics of the structure (succession of cable-stayed sections of 560-m span, innovative foundations supporting large gravity platform-type structures in concrete) are described in detail.

sowie den juristischen und finanziellen Rahmen. Dann werden die grundlegenden Gegebenheiten und die Überlegungen vorgestellt, die nach und nach dazu geführt haben, daß sich das Vorhaben auf die aktuelle Situation hin entwickelt. Zum Abschluß werden die wichtigsten technischen Daten (eine Folge von Schrägseilfeldern mit 560 m Spannweite, innovierende Gründung, auf der schwere Plattformstrukturen aus Beton aufbauen) im Einzelnen vorgestellt.

RESUMEN ESPAÑOL

El puente de Rion-Antirion Una estructura excepcional de vocación europea

J.-P. Teyssandier y J. Combault

El puente de Rion-Antirion, ubicado en el oeste de Grecia, es una estructura excepcional por diversos motivos : en primer lugar, por su coste (4 000 millones de francos), pero también por su entorno físico, sus características técnicas y sus mecanismos financieros, ya que se trata de una estructura ejecutada en forma de concesión.

En el presente artículo se describen, en primer lugar, las motivaciones de este proyecto y su desarrollo jurídico y financiero, y, acto seguido, se presentan los datos fundamentales y los razonamientos que, paso a paso, han orientado al proyecto hacia lo que es hoy en día. Finalmente, se describen detalladamente las principales características técnicas de la estructura (formada por una sucesión de tramos atirantados de 560 metros de luz, fundaciones innovadoras que constituyen el soporte de las grandes estructuras del tipo plataformas gravitatorias de hormigón).

DEUTSCHES KURZREFERAT

Die Brücke von Rion-Antirion Ein Ingenieurbauwerk ersten Ranges für Europa

J.-P. Teyssandier, J. Combault

Die in West-Griechenland gelegene Brücke Rion-Antirion ist in mehr als einer Hinsicht ein bemerkenswertes Bauwerk : zum einem vom Kostensstandpunkt her (4 Mrd. franz. Francs), dann im Hinblick auf das Umfeld, auf die technischen Daten und schließlich die Finanzstruktur, denn es handelt sich hier um ein insgesamt als Konzession vergebenes Bauwerk.

Zunächst behandelt der vorliegende Artikel die Hintergründe des Projektes

Le projet "Beirut"

Dans le cadre de la reconstruction du centre de Beyrouth, la société Solidere prévoit de gagner 45 ha sur la mer pour y créer une nouvelle marina ainsi qu'une digue promenade à base de caissons absorbants de houle. Les travaux menés par le groupement Bouygues - Bouygues Offshore ont nécessité des essais hydrauliques et des études de structures très poussées en vue de démontrer la résistance et la durabilité de tels ouvrages à la mer avec des critères sévères. La production qui a débuté début 1998 se poursuit actuellement pour un achèvement prévu le 15 avril de l'an 2000. Les moyens maritimes et terrestres mis en œuvre pour ce projet en font un chantier phare de cette fin de siècle.

■ HISTORIQUE DU PROJET

Située sur la ligne de démarcation qui divisait Beyrouth, la décharge du Normandie a servi de dépôt pendant les années de guerre. Solidere, la société privée en charge de la reconstruction du centre de Beyrouth a décidé de se servir de cette décharge pour gagner 45 ha sur la mer, ce qui implique d'une part, le traitement des débris et d'autre part, la réalisation d'une digue de protection de ce remblai face à la mer.

L'appel d'offres international basé sur le concept d'une digue constituée de caissons promenade absorbants de houle qui dégage une large vue sur la mer a été lancé fin 1994. Les offres ont été remises en juillet 1995 et le marché attribué au groupement Bouygues - Bouygues Offshore le 11 juin 1996, avec entrée en vigueur du contrat en janvier 1997.

■ DESCRIPTION GÉNÉRALE DU PROJET

Le projet "Beirut Sea Front" d'un montant forfaitaire de 229 millions de US\$ doit être livré le 15 avril de l'an 2000. Il comprend d'ouest en est les ouvrages décrits ci-après (figure 1).

Western Breakwater (figure 2)

C'est une digue en enrochements longue de 450 m qui protège la nouvelle Western Marina située au pied de l'hôtel Saint-Georges. Cette marina représentera un plan d'eau de 7 ha pour abriter de 400 à 600 navires de plaisance.

Cette digue est large de 63 m en tête. Son arase supérieure est limitée volontairement à la cote + 8,50 pour garder une vue dégagée sur la mer pour les résidents des hôtels environnants.

Le noyau est en tout venant de carrière fondé sur des fonds variant de - 5,00 à - 15,00.

Côté mer, une carapace en Accropode® de 14 ou 16 m³, soit 26 000 m³ de béton posée sur deux sous-couches en enrochements de 2 - 4 t et 0,5 - 2,0 t, protège le noyau.

La volonté de maintenir l'arase supérieure de la digue à une cote relativement basse comparée aux houles de projet, couplée à des critères de franchissement extrêmement stricts, a nécessité l'adjonction en tête d'un mur déflecteur de houle. Quoique de 3,0 m au-dessus de la carapace, ce mur nécessite une semelle de 15,50 m de large. Côté marina, les quais sur pieux prolongent le breakwater et une simple carapace en 200 - 500 kg protège le noyau (en tout venant) de l'agitation des vagues dans la marina.

Les quais de la marina

La conception et l'aménagement de la marina restent à la charge du maître d'ouvrage, Solidere. Celui-ci a toutefois chargé l'entreprise de réaliser les deux quais sur pieux en rives nord et sud soit 500 m de quai et 120 pieux. Les quais sont constitués de pieux béton Ø 762 mm coulés dans un tube métallique battu de 6 mm d'épaisseur. La longueur des fiches dans le terrain varie de 7 à 14 m maximum. Le battage se fait par le procédé dit de fond de pieu, brevet Bouygues Offshore (voir Travaux n° 727 de janvier 1997). Des poutres longitudinales et transversales préfabriquées de 10 m de portée viennent couronner ces pieux et constituent la trame support du futur platelage bois des quais.

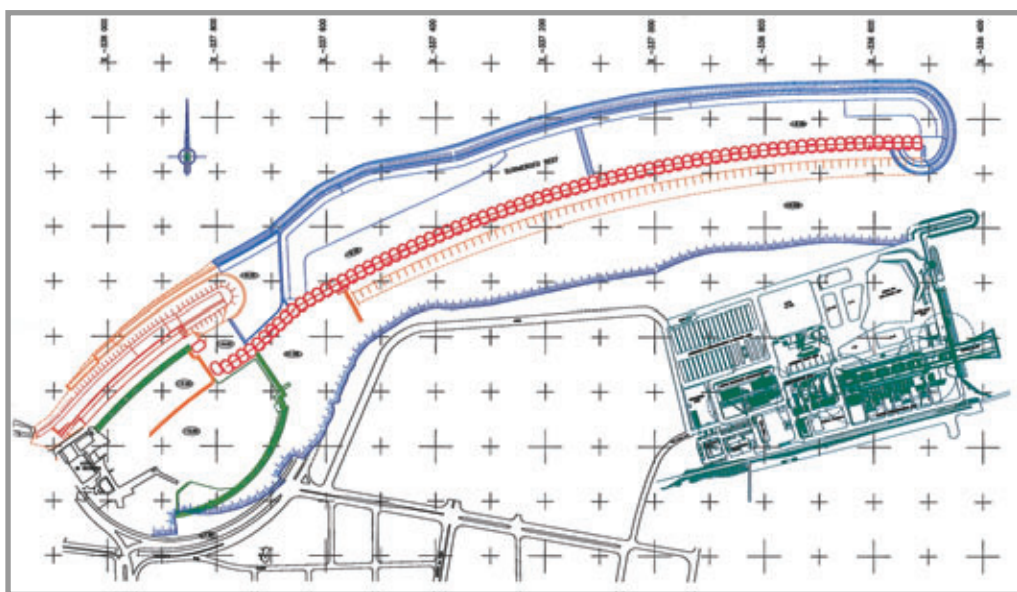
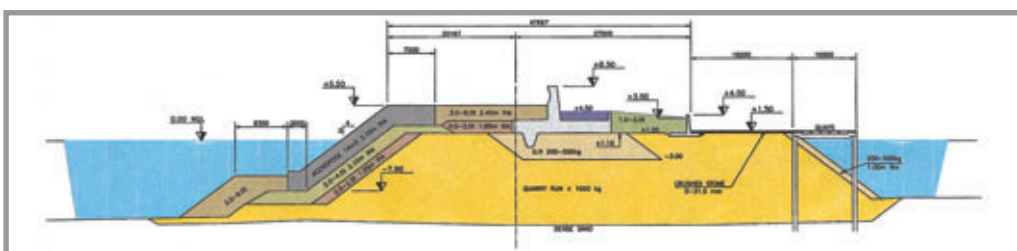


Figure 1
Vue générale du projet
General view of project

Figure 2
Coupe du Western Breakwater
Western Breakwater section



Sea Front"

Michel Weick

CHEF DE SERVICE
Bouygues Travaux Publics



Le platier (figure 3)

Exposée à des houles très importantes, la ligne de caissons est précédée face à la mer, d'une première ligne de défense, un platier sous-marin de longueur variable de 80 à 140 m.

Sa fonction consiste à briser les vagues les plus fortes et à les faire déferler avant d'atteindre les caissons. Le platier comporte trois niveaux, - 5,00 à l'est, - 6,00 et - 9,00 devant la passe d'entrée de la marina. Il est constitué d'un noyau de sable dragué et clos côté mer par une digue sous-marine en tout venant de carrière. Il est recouvert d'une carapace en enrochements de 1 - 3 t et 3 - 6 t dans les zones les plus exposées. Ces enrochements sont posés sur une sous-couche en tout venant, elle-même séparée du noyau en sable par deux couches filtres granulaires de 50 cm d'épaisseur chacune.

La digue d'encloture et la bordure du platier sont protégées par des Accropode® de 4 et 6,3 m³.

Les caissons (figure 4 et photo 1)

Le nouveau front de mer de Beyrouth comprendra une ligne de 80 caissons, soit 1 400 ml. Ces caissons en béton armé, en forme de bi-lobbes absorbeurs de houle mesurent 25,75 m x 17,56 m en plan. Ils sont fondés au niveau - 9,00 et font 13,50 m de haut. Les voiles verticales font 48 cm d'épaisseur et le radier 50 cm.

Ils sont couronnés par deux promenades décalées, l'une au niveau + 1,50 l'autre à + 4,50 qui dégagent une large vue sur la mer. Les parapets ainsi que les faces vues de ces promenades reçoivent un traitement architectural.

Pour assurer la stabilité du caisson, l'intérieur est rempli par du sable jusqu'au niveau - 4,00; ce sable étant protégé par un bouchon de béton de 1,00 m d'épaisseur.

La houle pénètre dans la chambre avant par des fentes (porosité 50 %) et se dissipe ensuite dans la chambre arrière par de nouvelles fentes (porosité 30 %). La chambre arrière étant ouverte sur la promenade à + 1,50, le résidu d'énergie peut éventuellement se dissiper sur cette promenade ou inversement les vagues qui ont déferlé sur la promenade peuvent se déverser dans la chambre arrière.

Les caissons sont préfabriqués à terre, sauf les dalles de superstructures; ils sont mis à l'eau sur un ber, remorqués et coulés à leur position définitive. La jonction entre deux caissons se fait par

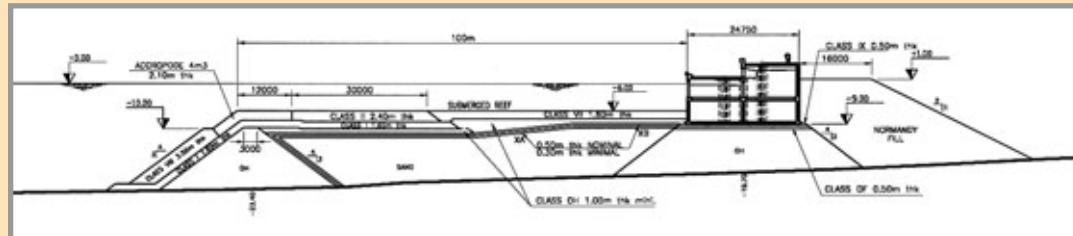


Figure 3
Coupe type du platier
Typical cross section of flat part

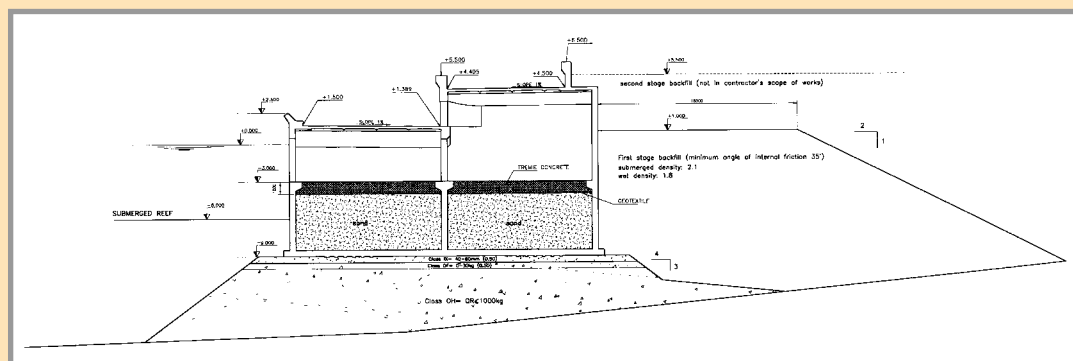


Figure 4
Coupe des caissons
Cross-section of caissons



Photo 1
Le caisson terminé avant la mise à l'eau
The treated caisson before sinking

l'intermédiaire de deux clés latérales qui servent de guidage lors de la mise en place du caisson. Ultérieurement, la clé arrière est remplie de ballast et la clé avant est bétonnée.

Les travaux de finition comprennent :

- ◆ la couverture des caissons par des prédalles de 20 cm d'épaisseur;
- ◆ le bétonnage du hourdis de 20 cm d'épaisseur, des trois parapets, des escaliers;
- ◆ la pose sur la promenade à + 1,50 d'un garde-



corps métallique côté chambre arrière, filant, appelé "miséricorde".

Les caissons sont fondés sur un massif en tout venant mis en place par clapage. La hauteur varie de 6 à 16 m maximum.

A la fin des travaux, l'entreprise vient remblayer l'arrière des caissons avec du matériau sélectionné sur une largeur de 16 m et au niveau + 1,00. Le remblaiement final au niveau + 5,50 et l'assainissement restent à la charge de Solidere.

LES MOYENS MARITIMES

- 1 drague à godets : 6 000 m³/j
- 1 drague porteuse
- 2 chalands à clapets : 2 500 t
- 6 pontons ou barges
- 7 navires de servitude

MISE AU POINT DU PROJET

Le contrat étant du type conception-construction, pendant toute l'année 1997, Bouygues et Bouygues Offshore ont réuni dans une cellule intégrée 40 ingénieurs et techniciens en charge de la mise au point du projet comprenant :

- ◆ les essais hydrauliques ;
- ◆ les reconnaissances géotechniques ;
- ◆ les études de structures ;
- ◆ les méthodes de construction offshore et on shore ;
- ◆ la planification.

Les essais hydrauliques

Types d'essais réalisés

D'avril à novembre 1997, un vaste programme d'essais et de modélisation a été entrepris pour déterminer les paramètres suivants liés à la houle :

- ◆ efforts globaux et pressions locales sur les caissons ;
- ◆ agitation dans la marina ;
- ◆ stabilité des carapaces en enrochements ;
- ◆ *overtoppings* (franchissements).

Dans ce but, plusieurs laboratoires européens ont été sollicités (tableau I).

Remarque : la modélisation numérique s'est avérée nécessaire suite à un effet de seiche détecté dans la marina au cours des essais 3D. Suite à cela, Solidere a modifié la géométrie de la passe d'entrée de la marina au cours d'essais au Danemark à l'été 1998.

Tableau II
Les valeurs maximales de pressions enregistrées lors des essais
The maximum value of pressures recorded during the tests

En kN/m ²	Dalle + 1,50	Dalle + 4,50	Face avant	Chambre avant
Houle décennale	156	155	200	128
Houle centennale	137	242	179	137

Les critères à satisfaire

Les houles déterminantes pour le projet ont été principalement celles du nord-ouest avec des périodes de 15 secondes. Trois cas principaux se présentent :

- ◆ houle décennale : Hs = 7,40 m ;
- ◆ houle cinquantennale : Hs = 8,40 m ;
- ◆ houle centennale : Hs = 9,00 m.

Les critères de franchissement volontairement très stricts du contrat étaient les suivants :

- ◆ houle décennale : pas de franchissement ;
- ◆ houle centennale : 30 l/m/s.

Ils ont déterminé la géométrie du Breakwater (largeur et mur déflecteur) et du platier (longueur, niveaux). Les débats avec le client ont essentiellement porté sur la signification du mot "franchissement". Les critères de stabilité étaient pour les enrochements :

- ◆ houle décennale : < 1 % de blocs déplacés ;
- ◆ houle cinquantennale : < 2 % de blocs déplacés ;
- ◆ houle centennale : < 5 % de blocs déplacés.

L'interprétation des résultats d'essais avec le client a, ici aussi, été très laborieuse. Ceci a conduit à prévoir des enrochements 3 - 6 t localement sur la partie ouest du platier, la plus attaquée par les vagues.

Reconnaissance géotechnique

Disposant pourtant des résultats de deux campagnes préalables, l'entreprise, avec son conseil Mecasol, a confié à Dames and Moore le soin de mener une nouvelle reconnaissance avec les objectifs suivants :

- ◆ préciser les niveaux du substratum calcaire ;
- ◆ localiser une faille orientée nord-sud à l'entrée de la marina ;
- ◆ déterminer les épaisseurs des dépôts sédimentaires de surface, leurs caractéristiques, leur sensibilité à la liquéfaction en cas de séisme ;
- ◆ confirmer ou infirmer la présence de sables carbonatés ;
- ◆ détecter d'éventuelles cavités dans le substratum rocheux.

Pour satisfaire ces objectifs, la campagne s'est déroulée de juin à novembre 1997 en trois étapes :

- ◆ établissement de la bathymétrie et campagne géophysique de sismique réfraction avec 9 000 ml de lignes ;
 - ◆ sondages *in situ* avec 33 carottages, 38 essais pénétrométriques, 7 essais au cône sismique ; tous positionnés en fonction des résultats de la géophysique ;
 - ◆ essais de laboratoire : identification et classification binoculaire, essais triaxiaux, triaxiaux cycliques, œdométriques et colonnes résonantes.
- Les recommandations tirées de cette campagne qui ont servi de base aux études sont :
- ◆ il n'y a pas de cavité dans le substratum calcaire ;

Tableau I
Les laboratoires et les problèmes traités
The laboratories and problems handled

Type	Lieu	Ouvrages	Laboratoire	Problème traité
I	Modèle 2D : canal à houle Echelle 1/46°	Sea Defence Caissons	Delft (Pays Bas)	Stabilité générale Pressions locales
		Western Breakwater: Mur déflecteur	Sogreah (France)	Stabilité générale Pressions locales
II	Modèle 3D: bassin Echelle 1/60°	Western Breakwater Marina Submerged Reef	Delft (Pays Bas)	Agitation Stabilité de la carapace Franchissements
III	Modélisation numérique	Marina	Principia (France)	Seiche

- ◆ les sédiments sont à substituer sous les caissons et sous la digue d'encloture du platier sur une épaisseur de 2 à 6 m ;
- ◆ sous le Western Breakwater, les dragages sont de 2 m en général et 6 m au niveau du musoir qui est la zone de la faille comblée par des matériaux récents ;
- ◆ la faille repérée n'est qu'une faille secondaire remplie de sédiments.

Les études de structures

Pour situer l'importance des efforts des vagues sur les caissons, le tableau II donne quelques valeurs maximales de pressions enregistrées lors des essais.

L'étude a consisté à sélectionner les efforts maxima concomitants, traiter le signal pour déterminer les effets dynamiques et les éventuels effets de résonance de la structure.

Pour l'analyse structurelle des caissons, un modèle Hercule 3D avec 1 700 nœuds et 2 000 éléments a été utilisé.

La résistance au séisme et une analyse à la fatigue de la structure ont été regardées.

Toutes les stabilités de pentes (Western Breakwater, platier, fondation des caissons) ont été vérifiées avec le logiciel TALREN de Terrasol.

La prédiction du tassement des caissons, qui fait l'objet d'un monitoring sur chantier avant coulage des superstructures constitue une difficulté supplémentaire. 15 cm d'épaisseur de dalle en recharge ont été prévus pour parer à des tassements non calculés.

Bien que la langue du contrat soit l'anglais, toutes les études ont été menées selon les codes et normes français.

Planning

Celui-ci est reporté sur le tableau III.

LES TRAVAUX ON SHORE

(figure 5 et photo 2)

Le maître d'ouvrage, Solidere, a mis à disposition de l'entreprise une plate-forme gagnée sur la mer de 15 ha, située à l'extrémité est de la digue. Ces installations comprennent :

- ◆ les bureaux, magasins et ateliers ;
- ◆ la ligne de préfabrication des caissons et le ber (châssis de mise à l'eau des caissons) ;
- ◆ un atelier de ferrailage forain ;
- ◆ la centrale à béton ;
- ◆ l'aire de préfabrication et stockage des Accropode® ;
- ◆ le stockage des enrochements ;
- ◆ les quais de chargement pour les moyens maritimes ;

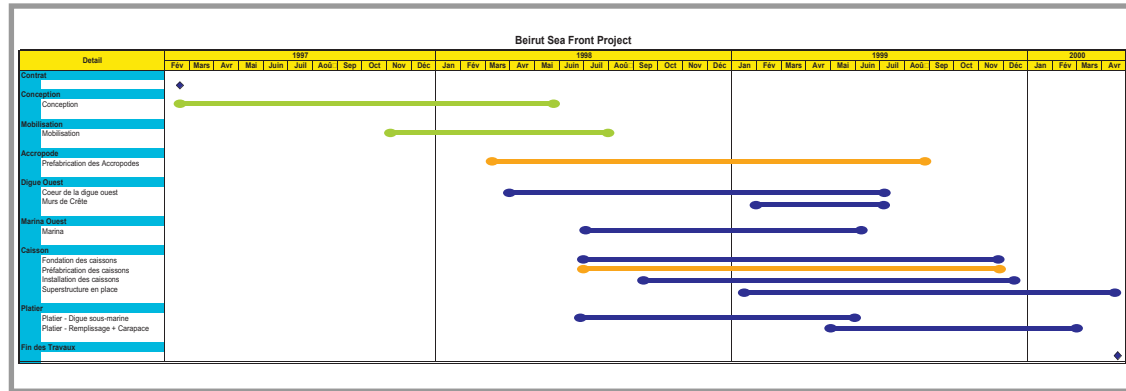


Tableau III
Le planning
The planning schedule

Figure 5
Les installations de chantier
Job-site installations

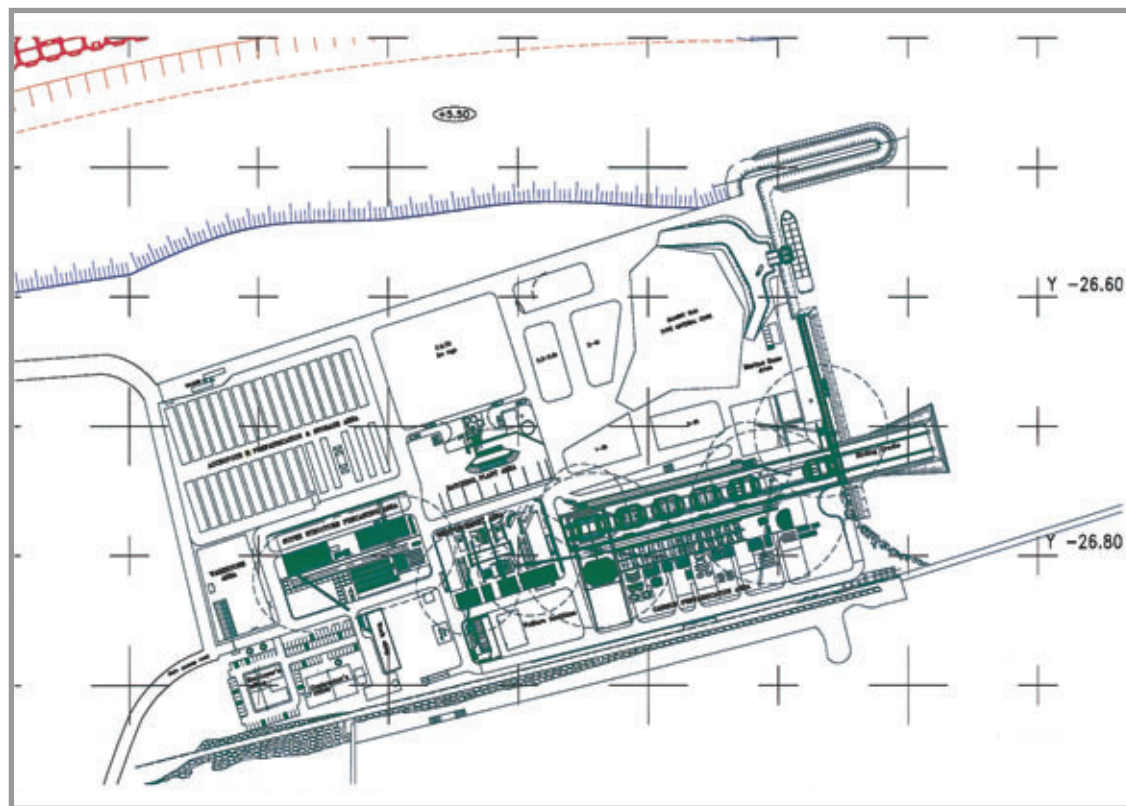


Photo 2
Les installations de chantier
Job-site installations

Photo 3
Ligne
de préfabrication
des caissons
*Caisson
prefabrication line*



Photo 4
Ligne
de préfabrication
des caissons
*Caisson
prefabrication line*



Photo 5
Caisson
en station 1
*Caisson
at station 1*

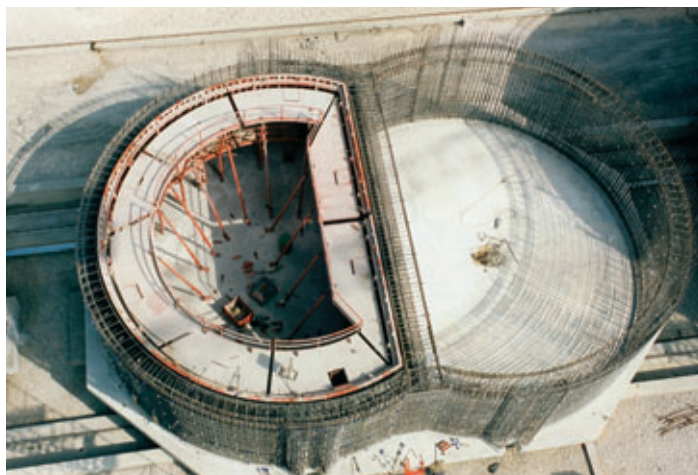


Photo 6
Caissons
en stations 3 et 4
*Caissons
at stations 3 and 4*



La ligne de préfabrication des caissons (photos 3, 4, 5, 6)

Les 80 caissons, d'un poids unitaire de 2000 t avant mise à l'eau, sont préfabriqués sur une ligne de 250 ml de long comprenant sept stations de travail :

- ◆ station 1 : bétonnage du radier (200 m³) et mise en place des cages de ferrailage des voiles - 1^{re} levée ;
- ◆ station 2 : mise en place des coffrages des voiles - 1^{re} levée ;
- ◆ station 3 : bétonnage des voiles - 1^{re} levée (250 m³) et mise en place des cages de ferrailage des voiles - 2^e levée ;
- ◆ station 4 : bétonnage des voiles - 2^e levée (170 m³) ;
- ◆ station 5 : coffrage et bétonnage des poutres de la dalle à + 1,50 ;
- ◆ station 6 : finitions ;
- ◆ station 7 : mise en place des équipements maritimes.

Toutes les manutentions sur ces sept aires sont assurées par deux grues H30/40C, une grue H20/14C et un mât de bétonnage monté sur fût de grue.

Les caissons sont translattés entre ces sept stations par des chariots équipés de vérins couplés hydrauliquement, d'une capacité globale de 2000 t. Le cycle de construction d'un caisson est de quatre jours en deux postes par jour et six jours travaillés. Au sud, sont stockés les coffrages métalliques fabriqués en Turquie ainsi que les cages d'armatures préfabriquées. Le poids de la cage du radier est de 55 t et est translattée en station 1 à l'aide d'un portique. Les cages de voile pèsent 4,8 t maximum.

La mise à l'eau des caissons

(photos 7 et 8)

Une fois arrivé en station 7, le caisson est chargé par l'intermédiaire des lorries de translation sur un ber. Ce ber, structure métallique de 300 t, glisse sur une pente à 25 % jusqu'à ce que le caisson flotte avec un tirant d'eau de 5,5 m.

Pour la descente, le ber glisse sur ses patins en polyéthylène et une tôle inox, le tout posé sur deux longrines béton sous-marines de 66 ml. Il est retenu par 62 torons T15, soit un effort de 600 t environ. La durée de l'opération est de 3 heures environ.

Atelier de ferrailage

Pour produire les 15000 t de ferrailage à partir de barres droites en longueur 12 ml, un atelier forain avec une capacité de production de 35 t quotidiennes a été installé sur 5000 m². Cet atelier compte :

- ◆ 1 banc de coupe ;
- ◆ 1 cisaille ;

- ◆ 2 cerceuses grand rayon;
- ◆ 3 cintreuses;
- ◆ tables de manutention.

La centrale à béton

C'est une centrale Imer pourvue des caractéristiques suivantes :

- ◆ capacité : 120 m³/h;
- ◆ malaxeurs : 3 m³;
- ◆ stockage agrégats : 600 m³;
- ◆ stockage ciment : 3 x 150 m³.

La taille maximale des granulats est de 60 mm. Le béton des caissons est un B35 théorique, un B50 en réalité pour pouvoir décoffrer à 18h00 les voiles de 2^e levée. Pour limiter l'exothermie du béton, une installation d'eau glacée a été prévue.

Aire de préfabrication (photo 9)

En sus des Accropode® soit 10 000 unités, sont préfabriqués et stockés les éléments suivants :

- ◆ pour les caissons :
 - 294 poutres de 23 t,
 - 3680 prédalles de 4 t,
 - 18 garde-corps d'escalier;
- ◆ pour les quais de la marina :
 - 427 poutres de 10,5 t,
 - 281 blocs de quai de 20 t.

Les moyens de manutention prévus sont :

- ◆ un chariot de manutention des Accropode®;
- ◆ un portique de portée 35 m, capacité 30 t;
- ◆ deux grues à tour de 4 t à 40 m.

La zone d'installation fait 7 500 m² + les aires de stockage.

Stockage des enrochements

(photo 10)

Tous les matériaux extraits de la carrière de Jihe au sud de Beyrouth sont transportés par route sur le site et stockés en attendant le chargement sur les barges.

La surface requise est 55 000 m². ▶

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Dragages : 750 000 m³
- Sable : 960 000 m³
- Tout venant : 2 050 000 m³
- Enrochements : 770 000 m³
- Accropode® : 10 000 u
- Béton armé : 93 000 m³
- Acier : 15 000 t



Photo 7
Le ber
The launching cradle



Photo 8
Mise à l'eau
du premier caisson
*Sinking
of first caisson*



Photo 9
Aire
de préfabrication
*Prefabrication
area*



Photo 10
Stockage
des enrochements
*Stocking
of rip-rap*

Photo 11
Poste
de chargement
des clapets
Valve loading
station



■ LES TRAVAUX MARITIMES

Construction du Western Breakwater (photo 13)

Après les dragages préliminaires, les travaux de la digue ont débuté en mars 1998. Le noyau en tout venant a été principalement mis en œuvre par voie terrestre. Pour le protéger, les enrochements en 0,5 - 2 t et 2,0 - 4,0 t suivaient avec une longueur de cœur de digue non protégée de 100 ml maximum. La pose des Accropode® est faite par une grue Demag équipée d'un dispositif de positionnement DGPS. Les plans de pose ont été préparés par Sogreah.

Les murs seront construits depuis le musoir vers l'enracinement en plots de 12 ml à partir de février 1999. Les enrochements de crête viendront couronner le tout et compléter la carapace.

Dragages – Clapage des matériaux

Les sédiments à substituer sont situés par des fonds compris entre - 12,00 et - 25,00 sur des épaisseurs variant de 2 à 6 m. Ces dragages sont à faire sous le Western Breakwater, les quais de la marina, la ligne de fondation des caissons et la digue d'encloture du platier.

Le sous-traitant retenu, la société italienne Dragomar, met en œuvre une drague à godets, de 6000 m³/jour de capacité. Cette technique est bien adaptée au dragage sur fond rocheux irrégulier. Les sédiments sont chargés sur des chalands et évacués.

Le sable constitutif du cœur du platier est dragué sur un emprunt situé au large du Damour à 20 km au sud de Beyrouth. C'est une drague porteuse de 3000 m³ qui clape directement le sable et fera trois à quatre rotations par jour.

Le tout venant pour la digue d'encloture et le massif de fondation des caissons est clapé par deux chalands de 2500 t.

Le réglage se fait au clapage ou éventuellement au ponton-grue.

Les enrochements pour la carapace du platier sont soit clapés ou mis en place au grapin pour les plus gros (3 - 6 tonnes).

Les Accropode® sont chargés sur des pontons et positionnés à la grue.

Les tolérances de nivellement sur les enrochements sont de ± 30 cm en moyenne, ± 50 cm localement. Les contrôles de géométrie des couches sont faits à l'échosondeur et par des plongeurs.

A l'issue des travaux, un relevé général de la carapace du platier au sonar ainsi que des contrôles d'implantation de blocs témoins serviront de base pour les contrôles ultérieurs; en moyenne tous les trois ans ou après une tempête exceptionnelle.



Photo 12
La carrière
de Jihe
The Jihe
quarry

Quais de chargement (photo 11)

Façade est, protégés par un épi en enrochements, on trouve :

- ◆ 120 ml de quais en blocs pour l'accostage des remorqueurs, pontons et navires de servitude;
- ◆ un poste de chargement des barges à clapets d'une capacité de 900 t/h.

■ LA CARRIÈRE (photo 12)

Les enrochements, le tout venant de carrière et les granulats pour le béton proviennent de la carrière Kojok, située à 30 km au sud de Beyrouth. La roche est un calcaire dolomitique (résistance à la compression ≥ 100 MPa). Les réserves du gisement sont de 15 millions de m³.

Cette carrière a nécessité une complète réorganisation avec :

- ◆ découverte de carrières;
- ◆ réaménagement complet des fronts pour une exploitation en gradins, technique inconnue au Liban;
- ◆ achat de matériel de foration, de camions, de pelles;
- ◆ conception de plans de tir;
- ◆ mise à niveau de la chaîne de concassage pour produire les granulats aux normes voulues.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Propriétaire

C.D.R

Maitre d'ouvrage

Solidere

Maitre d'œuvre

Christiani Nielsen – Cowi J.V.

Consultant technique

High Point Rendel

Bureau de contrôle

Socotec

Entrepreneur

Bouygues - Bouygues Offshore

Architecte

Sato et Associés – O. Pelier



Photo 13
Western
Breakwater
Western
Breakwater

Ballast sous les caissons

Les caissons sont posés sur un lit de ballast 40 - 60 mm, de 50 cm d'épaisseur. Cette granulométrie a été choisie pour avoir une perméabilité élevée et évacuer les surpressions d'eau à la pose du caisson.

Le ballast est réglé au niveleur de ballast. Cet engin est un cadre sous-marin de 17,6 x 35 m équipé d'une lame de 16 m de largeur. Le ballast est alimenté depuis un ponton en surface devant la lame par une goulotte. Cette lame mue par des moteurs hydrauliques règle la couche au niveau voulu. La précision de cette opération est essentielle pour obtenir un bon nivellement des caissons soit 0 - 6 cm.

CONCLUSION

Le projet du Beirut Sea Front, basé sur des caissons absorbeurs de houle volontairement bas face à la mer ouverte, mais précédé d'un platier sous marin est totalement novateur. Sa mise au point a fait appel aux principaux laboratoires européens d'hydraulique. La qualité requise pour une bonne durabilité des ouvrages (béton, reprises de bétonnage, enrobage des aciers, etc.) est maximale. Dans ce but Bouygues - Bouygues Offshore mettent en œuvre des moyens exceptionnels sur un site organisé en vue d'optimiser toutes les étapes de la fabrication. Fin octobre 1998, les six premiers caissons ont été mis à l'eau et positionnés.

Une dernière étape à franchir sera le bétonnage *in situ* au niveau + 1,50 des dalles et parapets face à la mer et à ses aléas. Le rendez-vous est pris pour le 15 avril 2000!

ABSTRACT

The "Beirut Sea Front" project

M. Weick

In connection with the rehabilitation of the centre of Beirut, the company Solidere plans to gain 45 ha from the sea to create a new marine as well as a walkway designed with wave absorption elements. The works carried out by the Bouygues-Bouygues Offshore consortium required very extensive hydraulic testing and structural studies in order to demonstrate the strength and durability of such structures exposed to the sea with severe criteria. The work began in 1998 and will continue until completion scheduled for 15 April of the year 2000. Maritime and land resources used for this project make it a flagship project at the close of the century.

DEUTSCHES KURZREFERAT

Das Projekt "Beirut Sea Front"

M. Weick

Im Rahmen des Wiederaufbaus des Stadtzentrums von Beirut plant die Firma Solidere, auf 45 ha aktueller Meeresfläche ein neues Hafenviertel mit Jachthafen und Strandpromenade auf dünungsabsorbierenden Senkkästen zu errichten. Für diese von der Arbeitsgemeinschaft Bouygues - Bouygues Offshore durchgeführten Arbeiten waren vorab vertiefte hydraulische Tests und Strukturstudien erforderlich, um die Festigkeit und Beständigkeit derartiger Bauwerke im Meer in bezug auf strenge Kriterien zu belegen. Die Bautätigkeit hat Anfang 1998 begonnen und wird derzeit im Hinblick auf einen für April 2000 geplanten Abschluß fortgeführt. Die bei diesem Projekt eingesetzten maritimen und terrestrischen Arbeitsmittel machen es zu einer der herausragenden Baustellen unseres zu Ende gehenden Jahrhunderts.

RESUMEN ESPAÑOL

El proyecto "Beirut Sea Front"

M. Weick

En el marco de la reconstrucción del centro de Beirut, la sociedad Solidere contempla ganar 45 ha sobre el mar y crear un nuevo puerto deportivo náutico así como un dique que constituirá el paseo marítimo, formado por cajones de absorción de la marejada. Las obras emprendidas por el grupo de empresas Bouygues - Bouygues Offshore, han precisado pruebas hidráulicas y estudios de estructuras de gran envergadura, con objeto de demostrar la resistencia y la sostenibilidad de semejantes obras, y ello según criterios sumamente estrictos. La producción, que se ha iniciado a principios de 1998, se prosigue actualmente para dar fin, según el plazo impartido, el 15 de abril del año 2000. Los medios marítimos y terrestres implementados para este proyecto, hacen de estas obras un proyecto faro de este fin de siglo.

L'extension de l'aéroport

Un ouvrage d'art hors du commun

"Atterrissage sur un ouvrage d'art hors du commun en béton" - c'est ce que penseront la plupart des passagers des vols se posant à Madère après février 2000. En fait, c'est l'aboutissement d'un projet de plus de 30 ans qui dotera Madère d'un aéroport international capable d'accueillir de gros porteurs.

Inauguré en 1964, l'aéroport de Madère et sa piste de 1600 m a très vite montré ses limites. Une première extension de 200 m réalisée de 1982 à 1986 a amélioré la sécurité opérationnelle de la piste et lui a donné sa configuration actuelle.

Le nouveau projet inclut une piste de 2800 m, réalisée, en partie, sur une structure en béton précontraint surplombant la mer à 60 m de haut suivant un axe orienté à trois degrés de l'axe existant.

Un projet spectaculaire où le groupement Zagope (Portugal), Spie Battignolles T.P. (France), Andrade Gutierrez (Brésil), Opcsa (Portugal), met en œuvre des moyens exceptionnels et valorise des expertises complémentaires.

Photo 1
Vue générale
en cours de travaux
General view
of works in progress



■ L'OUVRAGE À RÉALISER

La structure principale

L'originalité du projet imaginé par le professeur Edgar Cardoso, célèbre par ses réalisations d'ouvrages d'art au Portugal, réside dans la structure en béton hyperstatique sur laquelle repose plus d'un tiers de la piste. Située à 60 m au-dessus de la mer, sa longueur est de 1000 m et sa largeur de 180 m. Le tablier est constitué d'une dalle en béton précontraint longitudinalement et transversalement, d'une épaisseur variant de 1,70 m à la jonction avec les portiques jusqu'à 1,00 m à mi-travée (photo 1).

Les portiques en béton précontraint perpendiculaires à l'axe de la piste et espacés de 32 m sont constitués de poutres à inertie variable supportées en partie courante par six piliers espacés également de 32 m. Les poutres, en forme de I, ont une épaisseur de 3 m à la base et de 2 m à l'âme. Leur hauteur varie de 5,60 m au droit des piliers à 3,60 m à mi-travée. Les piliers, au nombre de 173, ont un diamètre de 3 m et reposent soit sur des fondations directes d'environ 100 m², soit sur huit pieux moulés en béton, de 1,50 m de diamètre ou 12 pieux moulés de 1,20 m. Entre les piliers les plus courts et les poutres sont intercalés des appareils d'appui à pot dont les plus importants ont un diamètre de 1,70 m pour une charge nominale de 53500 kN.

A ses deux extrémités, la structure s'appuie sur des murs de soutènement réalisés sur la falaise. Des joints de dilatation permettant le passage des

gros porteurs sont prévus à la jonction avec les murs et à mi-longueur de la piste. Ce dernier doit absorber des déplacements relatifs longitudinaux de 53 m et transversaux de 45 cm (photo 2).

Le revêtement de la piste

Initialement prévu en béton, il a été remplacé par un revêtement flexible sur la plus grande partie de la piste et le taxiway. Celui-ci est constitué, sur terrain naturel, de deux couches de grave concassée de 15 cm d'épaisseur chacune, supportant une couche de macadam de 10 cm, une couche de béton bitumineux de 9 cm et une couche de roulement de 8 cm. Sur la structure, ce complexe est remplacé par 20 cm de béton B25, 2 cm d'une couche antifissuration en sable et bitume-élastomère et d'une couche de roulement de 8 cm.

Le revêtement béton est conservé sur les raquettes de piste et sur l'"apron" capable de recevoir quinze avions de moyenne envergure ou douze de moyenne et deux de grande envergure. Sur terrain naturel, il est constitué d'une couche de base de 15 cm en grave ciment et d'un dallage de 42 cm. Le dallage de la raquette située sur la structure a une épaisseur de 30 cm. Les dalles non armées ont une dimension de 7,50 x 7,50 m.

Les équipements et ouvrages divers

L'ouvrage comprend l'ensemble des réseaux moyenne tension, basse tension, éclairage, balisage lumineux de la piste, eau, incendie, et assainissement. En prévision de l'agrandissement de l'aérogare sont inclus dans le projet les nouvelles voies d'accès, les parcs de stationnement, le viaduc d'accès au niveau départ et la voie rapide de desserte de l'aéroport sur une longueur de 4 km incluant deux viaducs de 300 m, un passage supérieur et un tunnel routier à deux voies de 750 m.

Le nouveau Terminal Fret et les bâtiments techniques "clés en main" sont également réalisés par le groupement.

■ LES ÉTUDES

Le projet variante des fondations

Le groupement chargé des travaux a été déclaré adjudicataire sur une variante d'exécution des fondations de la structure principale, permettant une

de Madère

pour l'atterrissage de gros porteurs

Jacques Brébant



**DIRECTEUR TECHNIQUE
DU GROUPEMENT
CONSTRUCTEUR
Spie Batignolles T.P.**

économie de 6 %. Cette variante consiste à réaliser les pieux de fondation à partir d'une plateforme en remblai protégée par une digue, et non au niveau du fond marin, ce qui aurait présenté d'énormes difficultés liées à la présence de blocs importants et au travail sous air comprimé.

Les études de la digue *berm-breakwater* ont été menées par le bureau d'études Consulmar. La digue, dont la carapace est constituée d'enrochements naturels de masse 5 kN à 40 kN, présente la particularité d'acquies sa stabilité après mise en forme de "S" par action des houles. Des tests en canal et en bassin dans les laboratoires Delft (Professeur Van der Meer) au Pays Bas ont permis d'optimiser l'épaisseur de la carapace et d'éprouver sa tenue sous des houles significatives de plus de 5,50 m correspondant à la houle cinquantenaire. Le projet de fondations indirectes par pieux de 1,50 m de diamètre, dont la longueur maximale atteint 60 m, a été également développé dans le projet variante. La détermination des paramètres géotechniques a résulté d'une série d'essais de chargement de pieux équipés d'extensomètres exécutés dans des terrains de lithographies différentes. Des essais de plaque ont également permis de mieux déterminer les caractéristiques mécaniques des terrains volcaniques, composés de basaltes plus ou moins compacts, de scories, de tuf, de cendres avec des épaisseurs très variables.

Le projet de la structure principale

Alors que les excavations débutaient, le groupement a été chargé de modéliser la structure principale en trois dimensions, et d'en réaliser l'étude en prenant en compte les normes européennes et les données sismiques.

Ces études, réalisées par le bureau d'études Segadães Tavares & Associados, ont conduit à réviser le projet initial, et à renforcer considérablement la structure.

Le projet phase 2, exécuté par le même bureau d'études directement pour le client, a été modifié sur proposition du groupement pour l'harmoniser avec l'accélération des travaux.

Les études du revêtement et du balisage de la piste

La modification des hypothèses à prendre en compte pour le calcul du revêtement, l'évolution des règlements aéronautiques et le désir du client d'agrandir

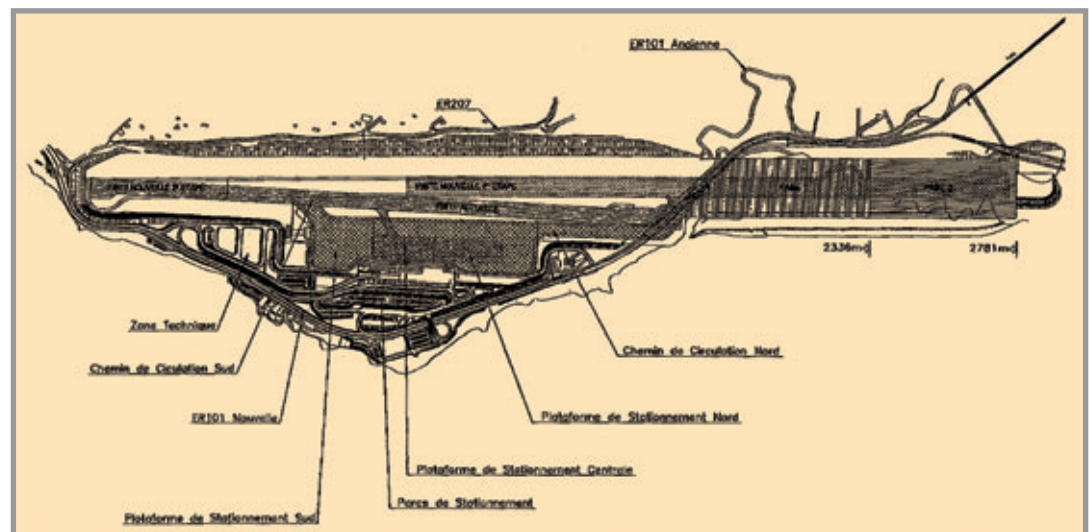


Figure 1
Vue en plan
de l'aéroport de Funchal
*Plan view
of Funchal airport*



Photo 2
Vue de la jonction
entre la structure existante
et la nouvelle
*View of junction between
existing and new structure*

la plate-forme de stationnement des avions, ont conduit à une refonte du projet en liaison étroite avec le groupement, afin de comptabiliser les mises en service partielles et le phasage d'exécution de la plate-forme. Le projet a été complété par un équipement moderne tel que réseau de distribution de carburant, dispositifs de guidage de stationnement, réseau 400 Hz.

■ PHASES DE TRAVAUX ET PROGRAMME D'EXÉCUTION

Le contrat de la 1^{re} phase d'extension de l'aéroport a été signé le 12 décembre 1994 et l'ordre de service de démarrage notifié le 6 février 1995. Cette première phase comprend les terrassements, la digue et les remblais maritimes, la structure principale sur 545 m de long afin de disposer d'une piste de 2336 m suivant le nouvel axe et le remodelage des accès routiers et parcs de stationnement (figure 1).

Photo 3
Exécution
des poutres-portiques :
vue des cintres
auto-lanceurs

Execution
of portal beams : view
of travelling segments



LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Groupement d'entreprises

Novapista, A.C.E. constitué de :

- Zagope (mandataire)
- Spie Batignolles T.P. (orientateur technique)
- Andrade Gutierrez
- OPCA

Maître d'ouvrage

- Ministère des Travaux Publics, Transports et Communications
- Gouvernement régional de Madère

Maître d'œuvre

ANAM - Aeroportos e Navegação Aérea da Madeira SA

Maître d'œuvre délégué

Consulgal - Mott Macdonald - O'Brien-Kreitzberg & Associates - Prima

Avant-projet

Hidroservice - Edgar Cardoso

Bureaux d'études

- Groupement Consulmar & Segadães Tavares Associados
- Mottconsult
- Spie Batignolles T. P

Sous-traitants

- **Armatures passives** : Varmolda (Portugal)
- **Précontrainte** : Spie Précontrainte
- **Pieux et micropieux** : HBW et Tecnasol

Fournisseurs

- **Coffrages poutres** : Roro GMBH
- **Coffrages dalles** : Cofralca
- **Appareils d'appui** : Alga et Glacier
- **Joints** : Alga



Le contrat de la 2^e phase a été signé le 4 décembre 1997 et l'ordre de service notifié le 18 décembre 1997. Cette 2^e phase comprend le prolongement de la structure sur 445 m, permettant ainsi la mise en service de la piste de 2781 m, des bâtiments techniques et l'accès par voie rapide à l'est de l'aéroport.

L'intégration des deux contrats conduisait à une mise en service provisoire de la piste du PM750 au PM2781 mi-juin 2000 et l'achèvement de la piste entre PM0 et PM750 en septembre 2001. Un avenant au contrat signé le 27 juillet 1998 permettra de ramener ces deux échéances respectivement à fin février 2000 et fin septembre 2000.

EXÉCUTION DES TRAVAUX

Les contraintes aéronautiques

La particularité du chantier vient de l'exécution des travaux dans le prolongement ou la proximité de la piste en service, ce qui a pour effet de limiter l'utilisation de matériels entrant dans le cône de sécurité et d'interdire la création de dénivellation ou d'obstacles à moins de 75 m de l'axe de la piste.

Ces contraintes conduisent à des méthodes et équipements interférant le moins possible avec le trafic aérien. Dans le cas d'opérations qui interfèrent fortement avec le cône de sécurité, elles doivent être exécutées pendant les périodes de fermeture nocturne de l'aéroport. Les opérations moins contraignantes sont soigneusement programmées et font l'objet d'un Notam diffusé aux pilotes.

Les terrassements

Le pivotement de l'axe de la nouvelle piste vers la montagne conduit à excaver 3400000 m³ de terrain volcanique, mis en remblais maritimes, en remblais terrestres pour les parcs et plate-forme de stationnement et utilisés pour réaliser la carapace

de la digue. Un plan de tir adaptable à l'hétérogénéité du basalte a été mis au point avec le consultant Nitro-Bickford, dans le but d'éviter les projections sur la piste toute proche, sans avoir recours à des protections d'une efficacité incertaine ou longue à manipuler. Les couches, minées sur une profondeur de 3 m, ont été chargées à raison de 180 à 220 g d'explosif par mètre cube de roche et les vibrations enregistrées sur les ouvrages situés à proximité. Les remblais ont été réalisés par couches de 1,60 m avec les matériaux rocheux de taille inférieure à 1 m. La granulométrie de ce remblai et l'indice des vides ont été soigneusement contrôlés par des prélèvements d'échantillons réalisés au moyen d'une excavatrice, les résultats étant comparés à ceux des planches d'essai réalisées en début des travaux.

La digue

La digue est composée d'un noyau en tout-venant et d'une carapace de blocs de 5/40 kN d'une épaisseur variant de 9 à 11 m. La qualité des matériaux mis en place est contrôlée suivant les recommandations anglaises Ciria. La roche utilisée est soumise à une série d'essais physico-chimiques et les blocs à des "tests de chute" afin de caractériser leur résilience, facteur important pour une digue façonnée par la mer.

Les pieux moulés

La présence de blocs de grande dimension sur le fond marin et la grande hétérogénéité du terrain volcanique a conduit à utiliser des matériels différents, suivant les longueurs unitaires de pieux et les couches de terrain à traverser. Pour la première phase de travaux, où les pieux ont un diamètre de 1,50 m et une longueur pouvant atteindre 60 m, trois types d'équipement ont été utilisés : un équipement Bauer, permettant le fonçage des premières chemises équipées de trousse coupante et l'excavation du terrain meuble ; les chemises étaient ensuite foncées au moyen d'oscillateur ou de tables de rotation, pendant qu'à l'intérieur deux types d'équipement étaient utilisés suivant le cas : un atelier de trépan et benne "hammergrab" ou une foreuse Wirth montée sur mât Hitachi. Cette dernière configuration permettait de faire tourner simultanément la chemise et l'outil, la table de rotation de la Wirth étant indépendante de la chemise. L'expérience a montré que les tables de rotation continues, moins efficaces que les oscillateurs dans le basalte compact et les couches profondes du fait de leur couple moindre, étaient cependant plus efficaces pour la traversée des blocs.

Les pieux de la deuxième phase, bien que plus courts, posaient un problème différent par la situation de bon nombre d'entre eux en pied de falaise. Chaque groupe de pieux était un cas particulier

nécessitant la détermination par sondage de l'épaisseur du basalte sous-jacent et, parfois, des injections de consolidation. Les pieux de 1,20 m de diamètre ont été réalisés avec des moyens classiques (trépan, benne, oscillateur) compte tenu de leur longueur unitaire inférieure à 20 m.

Chaque pieu est équipé de trois tubes d'auscultation sismique. Les cages d'armatures sont introduites par longueur maximale de 36 m, rabouées en place si nécessaire.

Le bétonnage est réalisé au moyen d'un tube tremie alimenté par pompe à béton, compte tenu de la nécessité de relever simultanément le tube et la chemise au moyen de l'oscillateur.

Les fondations indirectes dans les falaises ont été réalisées au moyen de micropieux au nombre de 120 par semelle et constitués de HEB 120 scellés dans des forages de 200 mm de diamètre.

Les piliers de la structure

Les semelles de fondation directes et les massifs sur pieux sont exécutés en deux levées de 3 m de hauteur maximum, au moyen de coffrages métalliques.

Les piliers sont réalisés par levées de 5 m avec des coffrages métalliques constitués de deux demi-coquilles. La cadence d'exécution est de une levée par jour. Les encorbellements en tête de pilier pour l'appui des cintres de poutre et le vérinage des appareils d'appui sont réalisés avec un coffrage métallique en deux parties.

Les poutres

Les poutres des portiques courants de la 1^{re} phase ont été réalisées en cinq tronçons au moyen d'un cintre auto-lanceur se déplaçant le long du portique, en prenant appui sur des consoles provisoires mises en lac à la grue Manitowoc sur l'encorbellement des piliers (photo 3).

Trois cintres d'un poids unitaire de 500 t sont utilisés. Le transport du portique "n" au portique "n + 3" est effectué sans démontage en opérant une série de rotations et translations sur les massifs situés à la base des piliers. Les manœuvres de descente et hissage sont faites au moyen d'un système de vérins hydrauliques et suspentes raboutables. Le cycle d'exécution d'un tronçon est de deux semaines et le transfert d'un portique à l'autre est réalisé en une semaine. Les armatures, préfabriquées par tronçon de 12 m, et équipées des gaines de précontrainte, sont mises en coffrage au moyen d'une grue Manitowoc 4000 équipée d'une flèche de 60 m et d'un jib de 10 m. Le bétonnage, dont le volume peut atteindre 700 m³, est réalisé en 14 heures au moyen de deux pompes et deux bras se déplaçant dans un plan horizontal pour limiter les interférences aéronautiques. Afin de réduire leur délai d'exécution, les poutres de la



Photo 4
Transfert d'un cintre auto-lanceur entre deux travées
Transfer of a travelling segment between two spans



Photo 5
Exécution de la dalle du tablier : vue des cintres-coffrants
Execution of deck slab : view of travelling segments

2^e phase sont réalisées en trois tronçons, les deux zones de clavage étant exécutées par des équipes indépendantes manutentionnées au moyen de torons TI5S et de vérins creux (photo 4).

Les dalles

Les dalles sont réalisées par plots de 30 x 32 m, de part et d'autre des portiques (1 tiers - 2 tiers). Les joints de 2 m laissés transversalement entre deux plots sont exécutés suivant un phasage rigoureux compte tenu de la précontrainte. Chaque jeu de coffrage est constitué de vingt modules de 3 x 28 m roulant sur les ailes des poutres, dix permettant de coffrer le tiers côté est de la poutre et dix permettant de coffrer les deux tiers côté ouest de la poutre. Trois jeux de coffrage sont utilisés pour la première phase et des jeux supplémentaires pour la 2^e phase, soit un total de 3 600 m² de coffrage (photo 5). Les joints sont réalisés par deux coffrages automoteurs et les finitions par un module automoteur muni d'un bras articulé. Pour la 1^{re} phase, les deux jeux progressent dans le même sens en direction de l'est. Pour optimiser le fonctionnement des quatre jeux, la 2^e phase sera exécutée à partir d'un portique intermédiaire, deux jeux

▶ progressant vers l'est et deux jeux vers l'ouest en direction de la 1^{re} phase. Afin de minimiser les interférences aéronautiques, les transferts des coffrages se font sans grue au moyen de deux poutres mobiles progressant de part et d'autre de la structure. Ces poutres sont équipées de chariots automoteurs à entraînement hydraulique réceptionnant les modules de la travée "n" et venant les réintroduire entre les poutres de la travée "n + 3". Une grue Manitowoc 4100 est utilisée pour la mise en place des consoles de la poutre mobile, fixées sous les extrémités des portiques. Le cycle de réalisation est de deux semaines par plot et le transfert d'une travée à l'autre se fait en trois jours (photo 6).

Les garde-roues et les murs barrière

Ces ouvrages, très ferrailés, car ils doivent retenir un avion sortant de la piste, sont réalisés avec des coffrages métalliques progressant sur des consoles placées à l'avance. Deux jeux de coffrage de 10 m sont utilisés, assurant un cycle par semaine.

Les viaducs

Les viaducs de la voie rapide, d'une longueur de 300 m, sont constitués de huit travées de 40 m au maximum. Ils sont coulés sur cintres reposant sur les piles et sur une palée intermédiaire. Les poutres sont coulées en première phase et précontraintes partiellement. Le tablier est ensuite coulé sur prédalles et précontraint. Le viaduc d'accès au terminal, d'une longueur de 300 m, est coulé sur tables coffrantes par travées de 16 m. Il sera réalisé en deux phases, la première devant être mise en service pour permettre la démolition de la rampe d'accès au terminal situé à l'emplacement de la 2^e phase.

Le revêtement de la piste et de la plate-forme

Le phasage d'exécution de la plate-forme de stationnement des avions a été déterminé en fonction des dates de libération des emplacements occupés par les bâtiments techniques existants, et de la nécessité de maintenir au moins huit emplacements de stationnement d'avions de moyenne envergure. Pour sa souplesse d'utilisation, la méthode de la poutre finisseuse roulant sur coffrages fixes a été préférée au *slip-form*. La couche de grave-ciment est réalisée au moyen d'une niveleuse guidée par laser et de compacteurs à rouleaux. Le dallage en béton est réalisé au moyen d'une poutre finisseuse Gomaco C650 dont la configuration et les équipements modulaires ont été définis pour s'adapter aux spécifications du chantier. Le sciage des joints transversaux de rétraction est réalisé peu après le début de prise. Le sciage et le garnissage des joints longitudinaux sont réalisés en temps masqué.

Pour exécuter le revêtement flexible, une centrale d'enrobés, d'une capacité de 150 t/h, sera installée sur le site.

Le finisseur permet une exécution de couches de 6 m de largeur maximum.

Le béton

L'économie du projet a imposé de l'adapter aux matériaux locaux :

- ◆ les ciments, importés du continent, type 1 classe 32,5R et type 2 classe 32,5, correspondent respectivement à des CPA et CPJ ;
- ◆ les agrégats ne pouvant être fournis par les carrières existantes, le groupement a dû rechercher un gisement de basalte exploitable, acquérir les terrains, ouvrir sa propre carrière et monter une installation de concassage ;
- ◆ les bétons de structure sont des B35 avec un squelette composé d'agrégats concassés de 20 mm au maximum et apport de sable de mer. Le béton de revêtement de piste a une granulométrie de

Photo 6
Transfert d'un élément de cintre coffrant entre deux travées

Transferring a travelling segment element between two spans



Photo 7
Pose des gaines de précontrainte transversale et longitudinale sur la dalle

Transverse and longitudinal pre-stressing ducts placed on slab



40 mm au maximum et un dosage en ciment de 350 kg/m²;

◆ le béton est produit sur site par une centrale à axe vertical de 80 m³/h et une centrale à deux arbres horizontaux de 40 m³/h.

La précontrainte

La précontrainte mise en œuvre fait appel aux systèmes LH et SB de Spie Précontrainte et au système MT de Tensacciai, pour une partie de la deuxième phase.

La précontrainte des poutres les plus sollicitées est réalisée par seize câbles 19T15 pour la structure phase 1 ou neuf câbles 27T15 et quatre câbles 19T15 pour la structure phase 2. La dalle est précontrainte dans les deux directions par des câbles 19T15 et 27T15, la précontrainte longitudinale faisant appel à une série de câbles de continuité couplés et deux séries de câbles de poutre à poutre franchissant deux travées (photo 7).

La structure fait largement appel à l'utilisation de coupleurs, compte tenu de la difficulté de loger des recouvrements de câbles. Des ancrages spéciaux avec compensation des rentrées de clavette ont dû être utilisés dans la zone de reprise de la précontrainte de la structure existante.

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

Excavations

3 400 000 m³

Bétons

580 000 m³

Aciers passifs

35 000 t

Aciers de précontrainte

9 000 t

Coffrages

490 000 m²

Pieux moulés

20 000 ml

Câbles électriques

150 km

Montant total estimé du projet

2 milliards de francs

ABSTRACT

Extension of Madere airport Innovative engineering for the landing of jumbo jets

J. Brébant

"Landing on an extraordinary concrete bridge" – this is what most passengers on flights landing in Madere will be thinking after February 2000. The project is the result of over 30 years of work, which will enable Madere to become an international airport capable of handling jumbo jets.

Inaugurated in 1964, the Madere airport and its 1,600 m runway very quickly showed its limits. A first extension of 200 m completed from 1982 to 1986 improved the operational safety of the runway and gave it its present configuration.

The new project includes a runway of 2,800 m designed partly on a pre-stressed concrete structure extending over the ocean at a height of 60 m on an axis oriented three degrees from the existing centreline.

This spectacular project, in which the consortium consisting of Zagope (Portugal), Spie Batignolles T.P. (France), Andrade Gutierrez (Brazil) and Opca (Portugal) brings together exceptional resources, makes the most of complementary expertise.

DEUTSCHES KURZREFERAT

Die Erweiterung des Flughafens von Madeira Ein großartiges Kunstbauwerk für die Abfertigung von Großraumverkehrsflugzeugen

J. Brébant

"Wir landen auf einem großartigen Kunstbauwerk aus Beton" werden sich viele Passagiere sagen, wenn ab Februar 2000 ihr Flugzeug in Madeira aufsetzen wird. Dann wird ein seit über 30 Jahren verfolgtes Projekt vollendet sein, das Madeira einen internationalen Flughafen beschert, auf dem auch Großraumflugzeuge landen können.

Der 1964 dem Luftverkehr übergebene Flughafen mit seiner 1 600 m langen Start- und Landebahn hatte sehr schnell seine Grenzen erreicht. 1982 bis 1986 wurde zunächst eine Verlängerung der Piste um 200 m vorgenommen, um die Betriebssicherheit zu erhöhen. In die-

ser Konfiguration wird er bis heute betrieben.

Das neue Projekt umfaßt eine 2 800 m lange Start- und Landebahn, die teilweise aus einer in 60 m Höhe über das Meer hinausragenden Spannbetonstruktur besteht, deren Mittellinie um drei Grad zur bestehenden Achse versetzt ist.

Ein spektakuläres Projekt, für das die Arbeitsgemeinschaft aus Zagope (Portugal), Spie Batignolles T.P. (Frankreich), Andrade Gutierrez (Brasilien) und Opca (Portugal) ungewöhnliche Mittel einsetzt und sich ergänzendes Fachwissen verwertet.

RESUMEN ESPAÑOL

La ampliación del aeropuerto de Madera Una estructura excepcional para el aterrizaje de aviones transatlánticos

J. Brébant

"Aterrizaje sobre una gran estructura de hormigón de características excepcionales" - es lo que pensarán la mayor parte de los pasajeros de los vuelos que tomarán tierra en Madera después del mes de febrero del año 2000. En realidad, se trata del resultado de un proyecto diseñado desde hace más de 30 años y que habrá de dotar a Madera de un aeropuerto internacional capaz de recibir los aviones más pesados.

El aeropuerto de Madera, así como su pista de 1 600 m, se vio rápidamente saturado por sus propios límites. Entre 1982 y 1986 se ejecutó una primera ampliación de 200 m, que permitió mejorar la seguridad operativa de la pista y que ha dado a ésta su configuración actual.

El nuevo proyecto incluye una pista de 2 800 m ejecutada, en parte, sobre una estructura de hormigón pretensado que domina el mar alzándose a una altura de 60 m según un eje orientado a tres grados del eje existente.

Se trata de un proyecto grandioso en el cual el grupo de empresas constructoras Zagope (Portugal), Spie Batignolles T.P. (Francia), Andrade Gutierrez (Brasil) y Opca (Portugal), han puesto en aplicación medios de acción excepcionales y valorizado su pericia y experiencia complementarias.

Un gazoduc au Canada

Plus de 200 km entre le nord nord-américaine

Entrepose réalise en association avec Janin Inc. un gazoduc de diamètre 24" (610 mm), reliant le nord de l'île de Montréal à la frontière nord-américaine, à East Hereford, destiné à alimenter la ville de Portland, aux Etats-Unis.

Il s'agit d'un contrat de type EPC (Engineering, Procurement & Construction), réalisé selon les normes ISO 9001 et 9002. Son tracé, divisé en trois sections, suit les variations du relief : il comprend plusieurs forages dirigés sous le fleuve Saint-Laurent et traverse des terres agricoles généralement plates, suivies de zones boisées et rocheuses.

L'ensemble de ces trois sites mobilise 900 personnes, en grande partie du personnel québécois placé sous la responsabilité de Janin - Entrepose, ainsi que des dizaines d'unités de terrassement, de nivellement et de pose de pipeline. Les personnels spécialisés (soudeurs, conducteurs de *side-booms*) ont reçu une formation adaptée à ce projet, principalement en matière de sécurité et d'environnement.

■ LA GENÈSE DU PROJET

En juin 1996, Janin, filiale canadienne de Dumez-GTM, sollicite l'expérience d'Entrepose dans la construction de pipelines et lui demande de valider le budget qu'elle a élaboré en vue d'obtenir un contrat de gérance pour son client québécois, Gaz Métropolitain. Il s'agit de la construction clé en main d'un gazoduc haute pression.

Le PNGTS (Projet Portland Natural Gas Transmission System) est d'abord conçu en diamètre 20" (510 mm), ouvrant d'Ouest en Est un corridor de 212 km à travers les terres agricoles, contournant Montréal pour aboutir à la frontière américano-canadienne dans les Monts Appalaches.

En novembre 1996, le maître d'ouvrage émet une lettre d'intention en faveur de Janin pour la réalisation clé en mains de l'ouvrage, non plus en tant que gérant mais en tant qu'entrepreneur général. Entrepose est alors sollicitée par Janin pour participer au volet construction de ce projet québécois, en tant que conseil et partenaire pour la mise en œuvre des moyens de construction.

Le contrat entre alors en vigueur suivant les normes ISO 9001 et 9002, garantissant pour la main d'œuvre et les organismes certificateurs la traçabilité de la documentation et des équipements.

Entre-temps, le nombre d'utilisateurs potentiels de gaz a été revu à la hausse et le donneur d'ordre demande à l'association Janin - Entrepose de lui proposer un budget pour une solution en diamètre 24" (610 mm).

En janvier 1997, la proposition de Janin - Entrepose incluant le changement de diamètre de la fourrure des tubes est acceptée, alors que les

négociations contractuelles continuent. Parallèlement, l'équipe projet se met en place et fait le "forcing" auprès des autorités fédérales et provinciales pour obtenir les autorisations nécessaires à la construction du gazoduc. Les "arpenteurs" géomètres sillonnent les terrains, optimisent le tracé et reportent sur les plans les propositions d'emplacement du gazoduc.

■ UNE DÉMARCHÉ CONSULTATIVE

Une procédure de consultation est lancée dans le cadre de l'enquête d'utilité publique exigée par ce type d'ouvrage : des réunions de communication, auxquelles les propriétaires et les parties concernées sont invités à participer, ont lieu dans chacune des communes traversées par le pipeline. Diverses associations et acteurs économiques des régions traversées interviennent également pour exprimer leurs recommandations, doléances ou encore préférences. Parmi eux, les chasseurs de cerfs et d'élan, dont les périodes de chasse à l'arc et à la carabine risquent d'être perturbées par le bruit des engins. Sur ce point un compromis a été trouvé, sous la forme d'un décret provincial spécialement promulgué, qui doit permettre à Entrepose de travailler pendant cette période de chasse.

Entrepose doit également compter avec les environnementalistes, qui veulent protéger les terriers des blaireaux ainsi que les zones de nidification ou aires de repos des bernaches, et les archéologues, qui soupçonnent la présence d'un ancien campement indien au bord de la rivière Magog...

Tous sont écoutés et leurs demandes prises en considération. Ces remarques sont consignées dans des procès-verbaux donnant lieu à des analyses et à des recommandations des différents ministères fédéraux et/ou provinciaux, avec parfois des demandes de compléments d'enquête et d'information.

Ceci a des incidences sur les études techniques et les plans de construction qui s'élaborent simultanément dans les bureaux d'études de notre sous-traitant installé dans les locaux à Boucherville (Québec), puisque de nouvelles révisions sont nécessaires pour refléter ces dispositions.

Parallèlement, les consultations avec les fournisseurs de tubes, vannes et autres accessoires se déroulent suivant le calendrier prévu. La totalité des commandes, accompagnées des spécifications techniques, sont placées dès le mois d'octobre 1997 dans l'attente de la décision finale du maître d'ou-

Mise en fouille
d'une section

Excavating
a section





de Montréal et la frontière

vrage de lancer officiellement le projet. Le lancement repose sur les autorisations nécessaires des gouvernements fédéral et provincial, ainsi que sur l'approbation du conseil d'administration représentant les actionnaires. Le contrat est finalisé et formalisé début janvier 1998, ce qui permet de passer les commandes fermes pour les tubes, les vannes et accessoires et de contacter les entrepreneurs pour la construction. La structure du contrat s'articule autour de budgets spécifiques qui déterminent le découpage des activités.

Ainsi, 10 % du montant global du contrat – 200 millions de dollars canadiens – sont consacrés aux études techniques, qui permettent d'optimiser le tracé du gazoduc et de proposer le corridor du pipeline. Ce budget englobe les demandes d'autorisation auprès des différentes autorités administratives, les droits de passage payés aux propriétaires, ainsi que la rémunération des cabinets de notaires chargés de rédiger les actes.

40 % sont alloués aux activités d'achats, consultations, comparaisons et analyses des offres et au placement des commandes de fournitures (tubes, vannes et accessoires). Le transport de ces équipements ainsi que l'inspection en usine pendant la fabrication font partie de ce budget. Les 50 % restants sont dédiés à la construction de l'ouvrage ainsi qu'à la gestion globale du projet.

En avril, la déclaration d'utilité publique aboutit enfin et l'ONE, l'Office National de l'Énergie, instance fédérale, autorise la construction du gazoduc.

■ DÉROULEMENT DU CHANTIER

L'arpentage terminé et les acquisitions des droits de passage agréés par les propriétaires permettent d'avoir accès au tracé dès le début du mois de juin pour débiter la construction du gazoduc. Pour des raisons de planning, l'ouvrage est découpé en trois lots distincts. Le premier lot, de 15 km environ, situé au nord de Montréal dans une zone semi-urbaine, comprend quatre traversées du fleuve Saint-Laurent en forage dirigé, opération sous-traitée à l'entrepreneur en charge de la construction de la station de compression à l'extrémité de la ligne.

Le second lot, sous-traité à un entrepreneur québécois, traverse sur 85 km une zone plate agricole et ne présente pas de difficultés particulières – tant que les conditions atmosphériques sont clémentes.

Le troisième lot, long de 128 km, commence dans



Traversée de la rivière
des Hurons à ciel ouvert
*Crossing the Hurons river
in the open*

une zone d'élevage – principalement des prairies – et devient rapidement accidenté dans un relief de collines formées par les contreforts des Appalaches.

La partie boisée, parsemée de lacs, est une région touristique dont la quiétude est l'une des principales priorités du maître d'œuvre.

La partie montagneuse est une succession de terres arables, de couches rocheuses affleurant le niveau naturel et d'un nombre important de marais, parfois sur plusieurs centaines de mètres, qui nécessitent la construction de pistes praticables aux camions et engins de pose.

■ LES MOYENS MOBILISÉS

Les travaux de pose, effectués de mai à décembre 1998, auront nécessité l'activité de neuf cents personnes réparties sur les trois chantiers. Deux entreprises spécialisées réalisent onze forages dirigés dont quatre, sous le fleuve Saint-Laurent, ont une longueur de 600 à 800 m.

La majorité des deux cents traversées de routes et autoroutes caractérisant le tracé a été réalisée par forage ou fonçage, éliminant ainsi les problèmes de déviation et permettant de travailler dans des conditions de sécurité maximale.

A l'exception d'une rivière dont la traversée s'est faite dans la roche, tous les cours d'eau ont été traversés à l'aide de méthodes dites sèches : soit en tranchées, avec le lit des rivières dévié, soit avec des méthodes de forage, de forage dirigé ou de fonçage.

Les tubes, longs de 24 m et revêtus FBE (Fusion Bond Epoxy) intérieur et extérieur, ont été livrés dans quatre gares jalonnant le tracé du gazoduc après un voyage de plus de 3000 km.

La dernière construction de gazoduc au Québec remontait à plusieurs années, et bien que l'enca-



En partant
du fleuve Saint-Laurent
From the Saint-Laurent river

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

Trois cirques de pose complets, totalisant :

- plus de 60 *side-booms*
- 100 pelles hydrauliques
- un effectif de 900 personnes



Installation des équipements de forage dirigé sur l'île aux Fermiers

Installation of directional drilling equipment on the Île aux Fermiers



Traversée d'une autoroute par forage horizontal

Crossing of motorway by horizontal drilling

► dremement des équipes de construction ait été assuré par des globe-trotters québécois du pipeline, les soudeurs et conducteurs de *side-booms* ont reçu une formation adaptée à ce projet. Les entreprises, les fournisseurs, les loueurs de matériel, les syndicats ainsi que des fonds gouvernementaux ont permis la formation de ces personnels spécialisés, principalement en matière de sécurité et d'environnement.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitre d'ouvrage

Société en commandite Gaz Métropolitain

Maitre d'œuvre

Janin Inc.

Entreprises

- Janin Inc
- Entrepose Inc
- Johnston-Vermette
- National State
- Construction du Saint-Laurent

Sous-traitants

- HDI (Horizontal Drilling Incorporated)
- Nella
- GAD Mécanique Inc
- DJL

Fournisseurs

IPSCO

ABSTRACT

A gas pipeline in Canada Over 200 km between northern Montreal and the North American border

P.-V. Roussel

Entrepose is working jointly with Janin Inc. on a gas pipeline of 24" (610 mm) diameter linking the north of the island of Montreal to the North-American border, at East Hereford, intended for the supply of the city of Portland, Oregon, in the United States.

What is involved is an EPC (Engineering, Procurement & Construction) type contract, completed in accordance with ISO 9001 and 9002 standards. Its route, divided into three sections, follows the variations of the relief : it includes several directional boreholes under the Saint-Laurent river and crosses generally flat agricultural land, followed by woody and rocky zones.

These three sites together mobilise 900 staff members, the majority of whom are Quebecois staff under the charge of de Janin - Entrepose, along with tens of earthmoving, grading and pipe-laying units. The specialised personnel (welders, side-boom drivers) have received training suited to the project, mainly with respect to safety and the environment.

DEUTSCHES KURZREFERAT

Eine Gasleitung in Kanada Mehr als 200 km zwischen dem Norden Montreals und der nordamerikanischen Grenze

P.-V. Roussel

In Zusammenarbeit mit Janin Inc. baut Entrepose eine 24"-Gasleitung (610 mm) zwischen dem Norden der Insel von Montreal und der nordamerikanischen Grenze in East Hereford, mit der die Versorgung der Stadt Portland (Maine, USA) sichergestellt werden soll. Dieser Vertrag ist nach dem EPC-Prinzip (Engineering, Procurement & Construction) abgeschlossen und wird gemäß den Normen ISO 9001 und 9002 abgewickelt. Die in drei Abschnitte gegliederte Streckenführung folgt dem landschaftlichen Relief : mehrere Bohrungen unter dem Sankt-Lorenz-Strom, Durchquerung von generell flachem, landwirtschaftlich genutzten Land und

schließlich bewaldete, felsige Flächen. Auf den drei Baustellen sind insgesamt 900 Beschäftigte tätig, zum Großteil Personal aus Québec, das unter der gemeinsamen Verantwortung von Janin - Entrepose steht. Desweiteren kommen einige Dutzend Erdarbeits-, Nivelierungs- und Verlegeeinheiten zum Einsatz. Das Fachpersonal (Schweißer, Rohrlegerfahrer) ist projektspezifisch geschult worden, wobei besonderes Augenmerk auf die Sicherheits- und Umweltaspekte gelegt wurde.

RESUMEN ESPAÑOL

Un gasoducto en Canadá Más de 200 km entre el norte de Montreal y la frontera estadounidense

P.-V. Roussel

Entrepose construye actualmente, en asociación con Janin Inc. un gasoducto de 24" de diámetro (610 mm), entre la isla de Montreal y la frontera estadounidense, en East Hereford, con destino a la alimentación de la ciudad de Portland, en los EE. UU.

Se trata de un contrato de tipo EPC (Engineering Procurement & Construction), acorde a las normas ISO 9001 y 9002. Su trazado, dividido en tres secciones, sigue las variaciones del relieve y consta de varias incursiones en el terreno, que pasan por debajo del río Saint Laurent y atraviesan las tierras agrícolas generalmente planas, seguidas de áreas de bosques y extensiones rocosas.

El conjunto de estos tres sitios moviliza unas 900 personas, en su mayor parte personal del Quebec que actúa bajo la responsabilidad de Janin - Entrepose, así como varias decenas de unidades de movimiento de tierras, de nivelación y de tendido del oleoducto. El personal especializado (soldadores, conductores de side-booms) han recibido una formación completa adaptada a este proyecto, principalmente orientado hacia la seguridad y el respeto del medio ambiente.

L'injection de compensation assistée par ordinateur

Application au projet Tren Urbano de Puerto Rico

Les mouvements de surface provoqués par la construction d'une station de métro à Puerto Rico sont contrôlés par un processus cyclique d'injection de compensation et de mesure des mouvements en temps réel. Cette méthode s'articule sur deux systèmes : le programme COGNAC qui définit quotidiennement un programme d'injection et le système automatique de mesures optiques CYCLOPS qui contrôle en temps réel les mouvements causés par les excavations.

L'usage de l'informatique et de l'électronique permet de définir un modèle prédictif qui est ajusté grâce à un suivi efficace des paramètres pendant le chantier.

Le développement industriel s'accompagne d'un développement important du tissu urbain, aussi bien dans les pays à fort niveau de développement (Europe, Amérique du Nord) que dans les nouveaux pays émergents : Sud-Est asiatique, Amérique du Sud, etc.

L'aménagement des métropoles fait de plus en plus appel aux travaux souterrains pour créer les nouvelles infrastructures de transport (métros, voies ferrées) ou d'assainissement.

Ces travaux souterrains se traduisent généralement en surface par des tassements extrêmement difficiles à prévoir de façon précise.

La prévision des tassements par calculs aux éléments finis ne donne que des ordres de grandeur, et ne permet pas réellement de s'affranchir des aléas liés aux conditions du sous-sol.

Solétanche-Bachy a développé une méthode suffisamment souple pour s'adapter aux nombreuses configurations rencontrées, et suffisamment efficace pour suivre sans retard l'avancement de plus en plus rapide des chantiers.

Cette méthode, basée sur l'informatique et l'électronique pour prévoir et mesurer les mouvements tout en pouvant les contrôler par l'injection de compensation, est actuellement appliquée en particulier à Puerto Rico sur le projet Tren Urbano, et s'articule sur deux systèmes :

• le programme COGNAC (COmpensation GroutINg Assisted by Computer) développé par Solétanche-Bachy, permet de définir quotidiennement un programme prévisionnel d'injection, tenant compte à la fois du programme d'excavations souterraines et du retour d'expérience des travaux précédents ;

• le système automatique de mesures optiques appelé CYCLOPS (CYCLic OPTical Surveyor), couplé au système informatique Géoscope et développé en commun par Sol Data (filiale de Solétanche-Bachy) et l'IGN (Institut Géographique National) permet le contrôle en temps réel des mouvements causés par les excavations.

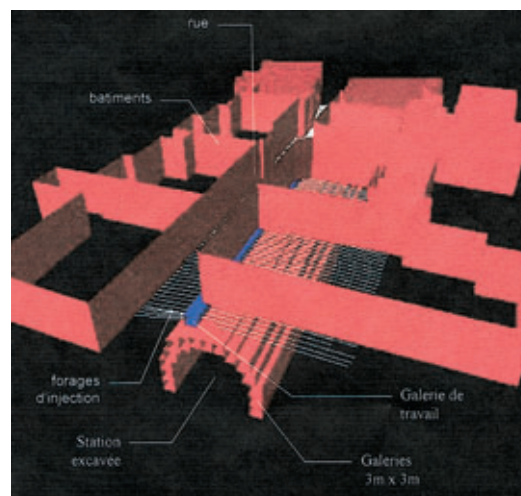


Figure 1
Vue 3D
du chantier
3D view
of site

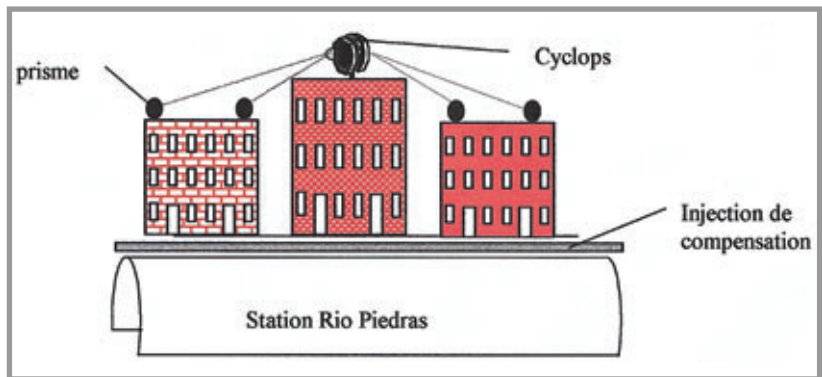
■ STATION RIO PIEDRAS

La section la plus critique du projet de la nouvelle ligne de métro à San Juan (Puerto Rico) est incontestablement la station Rio Piedras de 140 m de long, 18 m de haut et 23 m de large, réalisée en souterrain sous un quartier à forte activité commerciale dans le centre historique de la ville.

Le défi réside principalement dans la très faible couverture de terrain, seulement 2 m, au-dessus des travaux d'excavation. C'est dans cet intervalle de 2 m que l'injection de compensation doit opérer. Afin de limiter au maximum les perturbations et nuisances lors des travaux de la station, celle-ci est construite suivant le phasage suivant :

- ◆ creusement d'une galerie de travail 2,5 m x 2,5 m entre deux puits d'accès ;
- ◆ réalisation des forages d'injection de compensation à partir de cette galerie ;
- ◆ excavation en méthode traditionnelle de 15 petites galeries de 3 m x 3 m, du bas vers le haut, sous la protection du faisceau de forages horizontaux et subhorizontaux d'injection de compensation, pour réaliser la structure de la station ;
- ◆ excavation de la station en sous-œuvre (figure 1).

Figure 2
Représentation de l'installation du cyclops sur le site
Representation of the Cyclops installation on the site



■ CONTRÔLE AUTOMATIQUE DES MOUVEMENTS

Initialement, il était prévu de n'effectuer que des mesures de nivellement sur un maillage relativement dense couvrant l'ensemble du site, ainsi que des mesures ponctuelles sur les structures et dans le sol. Mais les mesures faites au mieux une à deux fois par jour, outre les difficultés d'accès à certaines parties des chantiers et surtout le délai de traitement des informations, ont montré que cette approche était insuffisante pour assurer un bon suivi des mouvements. C'est pourquoi il fut décidé d'utiliser le système CYCLOPS, développé par Sol Data et l'IGN.

Le cœur du système consiste en un tachéomètre autonome contrôlé par un ordinateur. L'appareil de mesure effectuée à intervalles programmés des "rondes" de mesures sur des prismes répartis sur le chantier. Ces prismes se différencient en prismes "d'appui" et prismes de "détection", les positions et les mouvements de chacun d'entre eux étant traités à l'issue de chaque cycle de mesures (photo 1). Le but de cette instrumentation est de surveiller en continu vingt-deux bâtiments situés au-dessus de la zone critique le long des 150 m de la station Rio Piedras (figure 2).

L'emplacement des différents éléments prend en compte les problèmes de visibilité, le rayon d'action du tachéomètre (directement lié à la précision finale désirée), la répartition des prismes "d'appui" en des endroits réputés stables.

Le tachéomètre, placé sur le toit d'un bâtiment élevé, a une vue d'ensemble sur les cinquante prismes fixés sur le haut des bâtiments à surveiller. Des prismes de référence, installés en dehors de la zone directement concernée par les travaux, permettent au CYCLOPS de recalculer sa position "instantanée" et de corriger l'ensemble des observations. Le tachéomètre est relié à un ordinateur qui présente en temps réel les mouvements en 3D de chaque prisme avec une précision au millimètre pour 120 m. Les valeurs acquises par CYCLOPS sont

stockées dans la base de données de Géoscope afin de retracer l'historique des déplacements des points de mesure et de les confronter aux injections et/ou travaux d'excavation effectués dans la même zone.

■ CONDUITE DU CONTRÔLE ACTIF DES TASSEMENTS SUR LA STATION RIO PIEDRAS PAR INJECTION DE COMPENSATION

L'injection de compensation est utilisée pour limiter les tassements associés aux excavations souterraines. Le programme d'injection repose sur une combinaison des tassements prévisionnels calculés et ceux déduits de la mesure des mouvements pendant les travaux.

C'est pourquoi le suivi efficace des tassements et mouvements de terrain est une part essentielle dans la réussite d'un chantier d'injection de compensation (figure 3).

En effet, les phénomènes de tassements sont dynamiques, et très difficiles à évaluer, aussi le cœur de la méthode consiste-t-il à organiser un cycle interactif de régulation, pour :

- ◆ prévoir et estimer les tassements : en effet, le phénomène de tassement précède le passage des excavations en souterrain. Les calculs complets sont longs et incompatibles avec l'avancement des chantiers et un modèle simplifié doit être utilisé ;
- ◆ évaluer les quantités d'injections nécessaires pour compenser les tassements ;
- ◆ observer les mouvements du sol, et ajuster les injections en temps réel ;
- ◆ comparer quotidiennement les prédictions avec les observations faites sur le terrain, pour recalculer le modèle prédictif.

La première étape, avant le démarrage des travaux d'excavation consiste à paramétrer du mieux possible le modèle global qui intègre d'une part les effets des tassements lors de l'excavation d'une galerie, et d'autre part la réaction des bâtiments et des terrains aux injections de compensation. Le paramétrage préalable du système concerne d'une part les tassements prévisibles et d'autre part l'effet des injections de compensation.

Les tassements

Les estimations préalables de tassements ont été effectuées au préalable par modélisation aux éléments finis de :

- ◆ l'excavation de chacune des seize galeries unitaires formant la voûte de la station Rio Piedras, suivant le planning contractuel, y compris la galerie de travail ;
 - ◆ l'excavation des puits d'accès formant la future station.
- Furent pris en compte les effets du pompage né-



Photo 1
Station cyclops fixée sur le toit d'un bâtiment

Cyclops station on a building roof

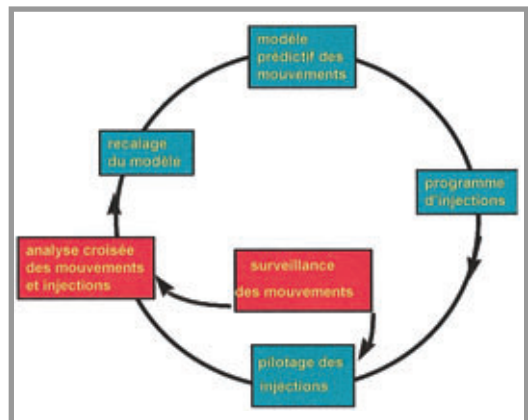


Figure 3
Processus cyclique permettant d'asservir le déroulement des injections aux mouvements de réaction du sol
Cyclic process allowing the grouting phases to be slaved to soil reaction movements

cessaire à la réalisation des galeries basses dans des terrains sableux et noyés. Ces premières estimations avaient pour objet principal de définir les éléments essentiels, tels que tassements et différentiels maxima, zone d'influence selon chaque phase d'excavation, éléments qui ont servi d'une part de base à la conception du projet d'implantation des forages de compensation (couverture des forages, maillage, espacement inter manchettes) et d'autre part, à déterminer, galerie par galerie, l'approche technique des travaux d'injections de compensation (procédure, phasage, volume, coulis, quantités estimées...).

Dans un deuxième temps, ces estimations nous ont permis de paramétrer le modèle de tassements interne à Cognac, les valeurs de tassements déterminées aux éléments finis servant de "point zéro".

Le tassement maximal estimé pendant l'exécution des travaux de la station Rio Piedras est de l'ordre de 80 mm, avec une limite spécifiée de 25 mm.

L'effet des injections

La géométrie de la station et de la galerie d'injection nous a amené à considérer des injections de compensation à réaliser dans un espace de 2 m directement sous les fondations des bâtiments. L'approche des travaux d'injections s'effectue globalement en trois étapes.

La première étape, mise en œuvre avant tous travaux d'excavation, correspond au "conditionnement des terrains", injection minimale qui permet de recomprimer les terrains, et d'obtenir un début de réaction de soulèvement des bâtiments de l'ordre du millimètre.

Cette phase sert de validation du système global de protection des bâtiments, en démontrant la capacité à obtenir des soulèvements, à les mesurer et à les contrôler.

Elle permet également de paramétrer le modèle de soulèvement interne à Cognac, en indiquant selon un maillage fin (1 m x 1 m) sur la station Rio Piedras les coefficients de réaction initiaux à l'injection obtenus pendant la phase de conditionnement. Le paramètre principal nommé "coefficient d'efficacité" de l'injection est le rapport entre le volume de soulèvement et le volume injecté. Ce coefficient purement empirique est principalement fonction de la profondeur des manchettes, du type de coulis, de la nature du terrain et du type de fondation du bâtiment situé au droit de l'injection. Ce coefficient est entré en valeur zéro, et est ensuite actualisé régulièrement au cours des travaux d'injection en fonction des résultats obtenus.

La deuxième étape a pour but de compenser les tassements des structures en temps réel, directement au-dessus du tunnel en cours d'excavation. Dans notre cas, ces phases sont prévues pendant l'excavation des tunnels en NATM et au TBM, ain-

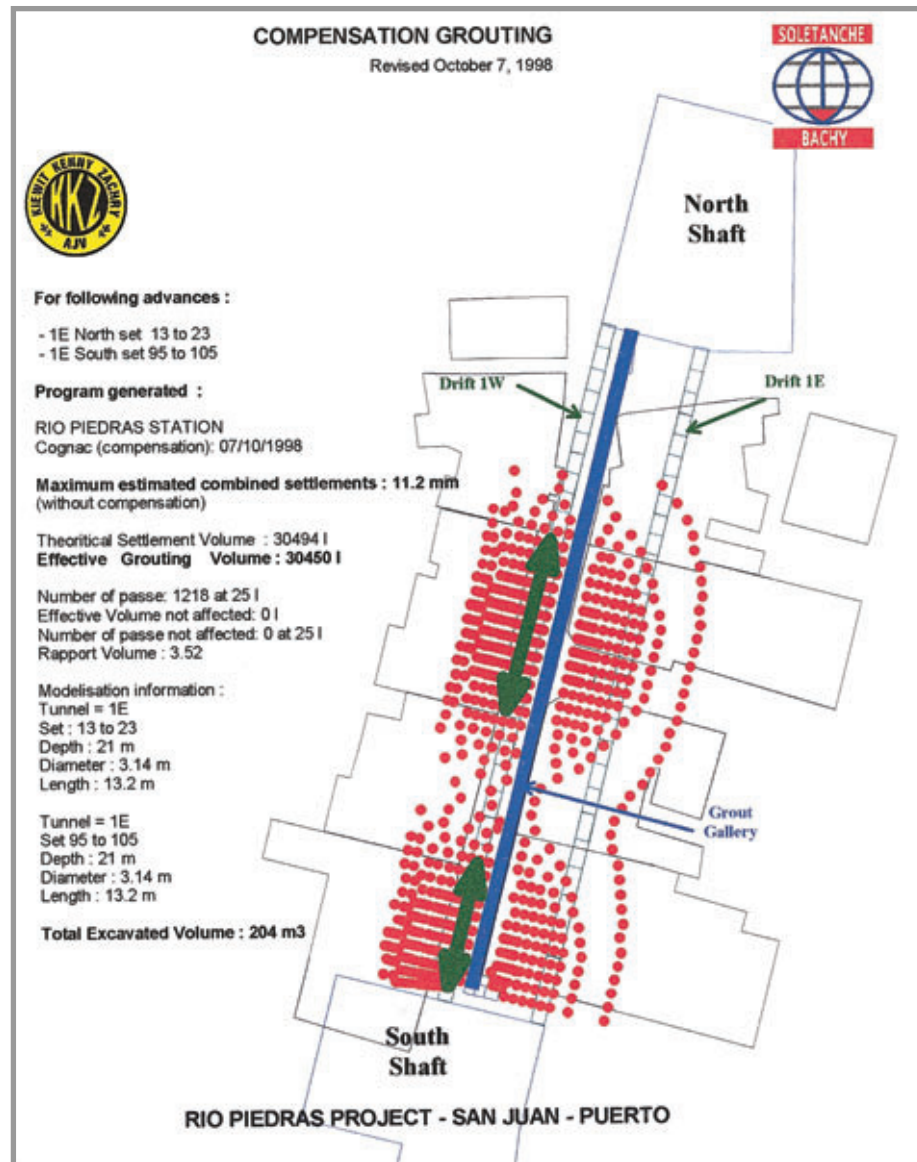


Figure 4
Programme
COGNAC
COGNAC
programme

si que pour les galeries basses de la station. Quant à la dernière étape, elle permet le réajustement et la recompression des terrains, pour laisser la structure dans un état compatible avec l'exécution des tunnels suivants. Au cours de cette phase, nous pouvons, entre autres, mesurer et contrôler l'action non négligeable des tassements à long terme.

Le système d'injection de compensation mis en place doit répondre à la contrainte d'injecter de manière "homéopathique" les volumes strictement nécessaires pour compenser les tassements engendrés par l'excavation, à grande proximité du front, sans générer de surpression pouvant entraîner l'instabilité de la face du tunnel.

C'est là que notre système global COGNAC de prévision des tassements et des réactions de l'injection, combiné au système CYCLOPS - Sol Data, trouve une application intensive.

Sur la base des paramètres initiaux de tassements prévisibles et de réaction à l'injection, le système COGNAC permet de définir automatiquement le programme d'injection, en répartissant au mieux les volumes à injecter sur les forages mis en place sur le site. Le programme génère un jeu d'instructions détaillées qui seront directement utilisées pour le pilotage de l'injection (figure 4).

Les différents paramètres sont ensuite fréquem-

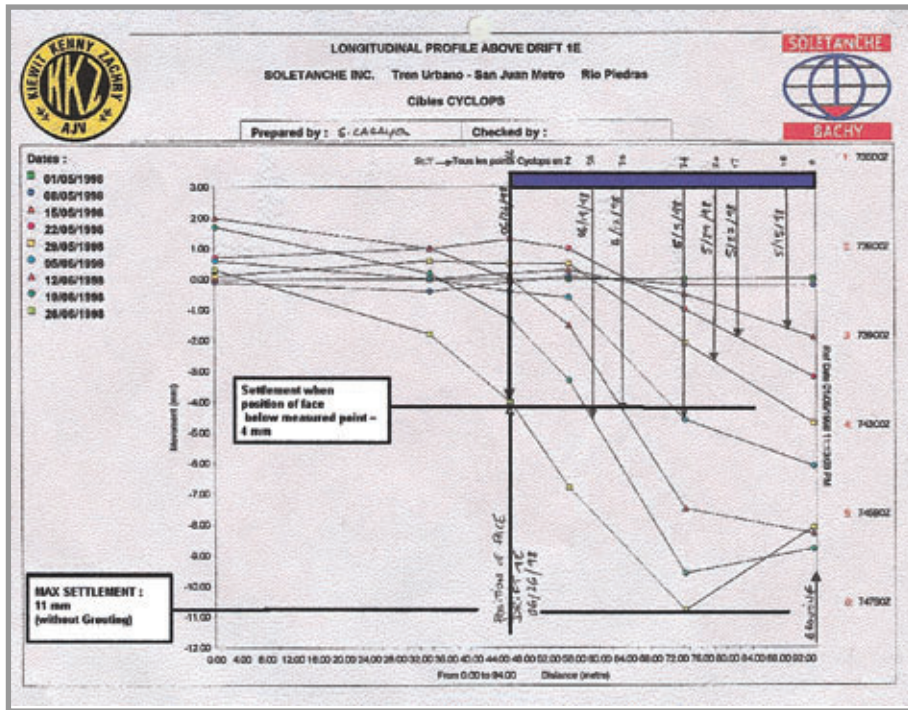
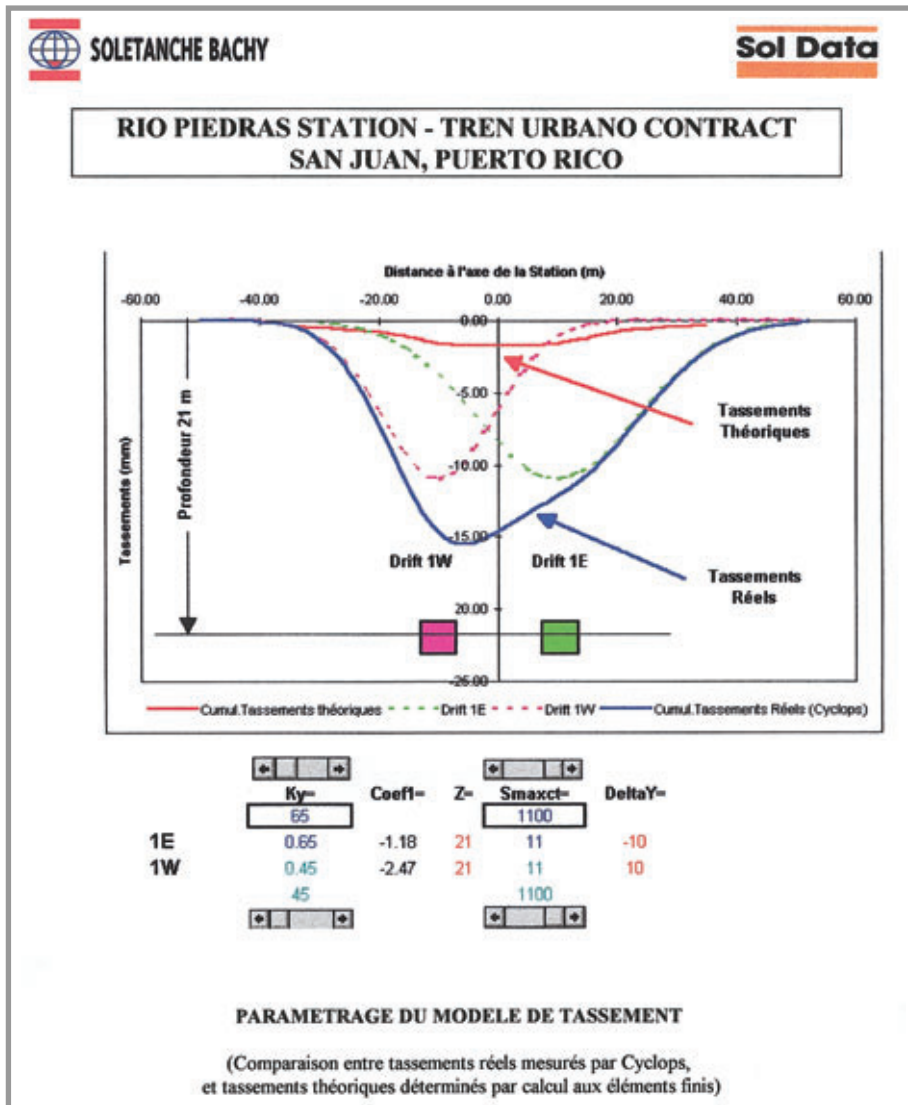


Figure 5
Tassements longitudinaux
des bâtiments au-dessus de la galerie 1E
*Longitudinal settlement of buildings
over gallery 1E*

Figure 6
Ajustement
des paramètres de tassement
Adjustment of settlement parameters



ment ajustés ou validés, en fonction des résultats des mesures de mouvements obtenus en temps réel par CYCLOPS.

Exemple de contrôle sur la station Rio Piedras

Les puits nord et sud, ainsi que la galerie d'injection sont excavés. L'ensemble du système de contrôle des tassements (installation des forages, injection de conditionnement, instrumentation) est mis en place et validé depuis le mois de février 1998, et deux galeries de 3 m x 3 m situées à 21 m de profondeur sont désormais excavées.

Dès la phase d'injection préalable de conditionnement, nous avons vu que la partie nord de la station réagissait moins bien que la partie sud, et que la zone située au-dessus de la galerie de travail était très décomprimée, ce qui nous a permis de paramétrer le modèle de réaction en conséquence.

D'autre part, pendant l'excavation de la première galerie 1E, située entièrement sous l'arrière des bâtiments, le système de surveillance CYCLOPS a rapidement détecté que les tassements réels (de l'ordre de 11 mm) étaient dix fois supérieurs aux tassements prévus (1,2 mm), principalement du fait d'une surexcavation importante et d'un collage tardif des anneaux au terrain. Tassements qui n'auraient pu être détectés en surface par les géomètres, étant donné que l'accès à l'arrière des bâtiments ou à l'intérieur était physiquement interdit (figure 5).

Encore une fois, le système itératif nous a permis de détecter, de modifier et d'ajuster rapidement notre programme pour limiter les dégâts causés en surface par des tassements imprévus (figure 6). Des exemples comme celui-ci sont nombreux, et depuis le démarrage des travaux d'excavation, nous avons pu constater entre autres, sur le chantier de Puerto Rico :

- ◆ la sous-estimation des tassements engendrés par l'excavation des puits exécutés en "berlinoise", avant la pose trop tardive des butons ;
- ◆ la sous-estimation des tassements générés par l'excavation des petites galeries, dus à la perte de terrain en face de l'ordre de 4 à 5 % du volume excavé, au lieu de 1,5 % estimé ;
- ◆ les tassements imprévus dus à la rupture d'une conduite d'eau qui a délavé les terrains sous les fondations d'un bâtiment (tassement de 20 mm dans la semaine) ;
- ◆ coefficient de réaction des injections relativement faible dans une zone d'argile molle.

CONCLUSION

Les facteurs clés du système COGNAC mis en place sur le chantier de Tren Urbano à Puerto Rico sont

d'une part l'approche itérative, qui permet l'ajustement régulier en fonction des résultats des mesures effectuées en continu par CYCLOPS, et d'autre part la souplesse d'utilisation sur un chantier ; le modèle numérique simple et basé sur quelques coefficients pour la plupart empiriques permettant de le faire tourner et de l'actualiser quotidiennement sur un ordinateur standard, pour coller au mieux à la réalité du terrain.

L'expérience montre qu'un modèle de prédictions des tassements aussi complet soit-il, ne saurait prévoir tous les aléas qui surviennent sur un chantier et qui ne peuvent être détectés et résolus qu'au jour le jour.

Seul un modèle itératif de contrôle des mouvements et de calcul des tassements permet d'anticiper, de déterminer ou de remédier rapidement à un problème lorsqu'il survient, la vitesse de traitement, d'analyse et de réaction étant primordiale dans ce type de travaux.

BIBLIOGRAPHIE

- J.-G. La Fonta - S. Carayol - "Contrôles de tassement et injection de compensation" - Revue *Tunnels et ouvrages souterrains*, n° 140, mars/avril 1997.
- S. Carayol - "Injection de compensation" - Revue *Travaux*, mai 1997.
- J.-G. La Fonta - T. Person - Puerto Rico - "Contrôle en temps réel de l'injection de compensation par le système CYCLOPS" - Revue *Tunnels et ouvrages souterrains*, n° 149, septembre/octobre 1998.

ABSTRACT

Computer-assisted compensation grouting Application to the Tren Urbano project of Puerto Rico

S. Carayol

Surface movements produced by the construction of a metro station in Puerto Rico are monitored by a compensation grouting and real-time movement measurement technique based on a cyclic process. This method comprises two systems : the COGNAC programme which defines a grouting programme on a daily basis and the CYCLOPS automatic optical measurement system which monitors in real time the movements caused by excavations. The use of computer technology and electronics makes it possible to define a predictive model which is adjusted thanks to the effective monitoring of parameters during the works.

DEUTSCHES KURZREFERAT

Rechnergestützte Kompensationseinspritzung Anwendung im Projekt Tren Urbano in Puerto Rico

S. Carayol

Die durch den Bau einer U-Bahn-Station in Puerto Rico verursachten Oberflächenbewegungen werden durch ein Verfahren mit zyklischer Kompensationseinspritzung und Echtzeit-Messungen ausgeglichen. Diese Methode stützt sich auf zwei Systeme : das Programm COGNAC, das täglich einen Einspritzungsplan festlegt, und das automatische optische Meßsystem CYCLOPS, das in Echtzeit die von dem Aushub bewirkten Bewegungen erfaßt. Der Einsatz von Elektronik und EDV ermöglicht die Definition eines Prognosemodells, das über eine effiziente Verfolgung der Parameter im Zuge der Bauarbeiten reguliert wird.

RESUMEN ESPAÑOL

La inyección de compensación asistida por ordenador Aplicación al proyecto de Tren Urbano de Puerto Rico

S. Carayol

El control de los movimientos de superficie provocados por la construcción de una estación de metro en Puerto Rico se lleva a cabo por medio de un procedimiento cíclico de inyección de compensación y de medición de los movimientos en tiempo real. Este método se articula según dos sistemas : el programa COGNAC, que define diariamente un programa de inyección y el sistema automático de mediciones ópticas CYCLOPS, que, a su vez, controla en tiempo real los movimientos provocados por las excavaciones. La utilización de la informática y de la electrónica permite definir un modelo de predicción que se reajusta por medio de un seguimiento eficaz de los parámetros durante la ejecución de las obras.

Le système de gestion des routes de Santa -

Le système de gestion de l'entretien des routes de l'état de Santa-Catarina au Brésil a été développé dans le cadre d'un projet de réhabilitation et de l'entretien du réseau routier (6 306 km dont 3 135 km revêtus).

Pour atteindre les objectifs fixés, le système de gestion comprend les fonctionnalités suivantes :

- base de données, développée sous VISAGE (Setra - LCPC);

- modèle HDM - EBM de la Banque Mondiale;

- système de programmation PROG;

- système de suivi ACOMP.

Les systèmes de programmation et de suivi comportent une double approche - qualité d'usage et conservation du patrimoine - pour tenir compte des objectifs principaux de l'entretien. Le système a été conçu pour être facilement utilisable par les gestionnaires et son module "suivi" peut être utilisé dans le cas des concessions privées.

Dans le cadre de la mise en place d'un vaste programme de réhabilitation et de l'entretien du réseau routier, le DER de Santa-Catarina a développé avec l'assistance technique de Scetauroute un système de gestion de l'entretien routier.

Les principaux objectifs assignés au système sont les suivants :

- ◆ rationaliser l'entretien;
- ◆ avoir une double approche : qualité d'usage de la route et conservation du patrimoine;
- ◆ gérer les routes revêtues et non revêtues;
- ◆ permettre l'évaluation socio-économique de l'entretien et mesurer l'impact des budgets routiers sur la qualité du réseau;
- ◆ être informatisé mais laisser la place à l'intervention du gestionnaire.

Ajoutons que le système doit être assez souple et performant pour permettre de s'adapter aux variations des conditions économiques de l'Etat.

Pour atteindre ces objectifs, le système (SIGESC) a été conçu de façon modulaire (figure 1) en sachant que :

- ◆ la banque de données, développée à partir du progiciel VISAGE, a été fondée sur un système de repérage, complètement revu et implanté sur le réseau;
- ◆ le modèle HDM - EBM de la Banque Mondiale est intégré dans le système avec les passerelles nécessaires; il permet l'évaluation économique sous

contrainte budgétaire pour choisir les stratégies optimisées à long terme;

◆ le système de programmation PROG, cohérent avec les résultats de l'optimisation, est l'outil qui permet d'établir les programmes annuels de travaux; il fonctionne en deux étapes;

◆ le système de suivi est fondamental au niveau central pour mesurer les reflets de la stratégie choisie et des niveaux budgétaires, au moyen d'index de performance.

Tous les modules doivent être cohérents, les seuils et les hypothèses de chacun étant déterminés en fonction des autres (figure 2).

Ce sont les aspects les plus innovants du système, à savoir le système de programmation et de suivi qui vont être plus particulièrement développés ci-après.

■ SYSTÈME D'INFORMATION

La mise en place d'un système de gestion implique de disposer des données nécessaires sur le trafic, la structure et l'état des chaussées, l'historique de l'entretien, la largeur des routes, etc.

Dans cette optique le DER de Santa-Catarina a installé le logiciel VISAGE du Setra - LCPC, ainsi que ses outils complémentaires SILLAGE et SACARTO (cartographie).

Ce système qui reproduit tableaux, schémas itinéraires et autres cartes, alimente aussi les autres modules du système de gestion : HDM, programmation et suivi.

Après un repérage et un bornage préalable du réseau, une auscultation systématique a été réalisée :

◆ relevé des caractéristiques de la route (géométrie, dépendances) à l'aide d'un DESY (clavier et ordinateur embarqués);

◆ relevé de l'état des chaussées par le même DESY;

◆ mesure d'uni au Bump Integrator, et calcul de l'Indice international d'uni (IRI).

Les données existantes sur les chaussées (photos 1 et 2), l'historique et le trafic ont également été intégrées dans la base de données. Pour l'avenir, une véritable politique d'auscultation a été mise en place, avec :

◆ des comptages et pesées de trafic systématiques;

◆ un relevé de dégradation par DESY tous les deux ans;

◆ une mesure de l'uni tous les trois ans.

Tableau I
Hiérarchisation
du réseau
*Network
hierarchisation*

Catégorie	Classe de trafic	T (MJA)	% Poids lourds
I	T ₅ T ₄ ⁺ T ₃ ⁺	> 5000 3000 - 5000 1500 - 3000	≥ 30 %
II	T ₃ ⁻ T ₂ ⁺	1500 - 3000 750 - 1500	< 30 % ≥ 30 %
III	T ₂ ⁻ T ₁ T ₀	750 - 1500 200 - 750 0 - 200	< 30 %

Tableau II
Modèle
de réseau
*Network
model*

Déflexion	IRI ≤ 3			IRI > 3		
	≤ 50	50 - 70	> 70	≤ 50	50 - 70	> 70
Largeur						
L ≤ 8.5 m						
8.5 m < L < 10 m						
L > 10 m						

de l'entretien Catarina au Brésil



Photo 1
Faïençage généralisé par bandes (de construction)
General phasing in strips (construction)

Photo 2
Pelade (enrobés coulés
à froid sur grave non traitée)
*Peeling (slurry surfacing systems
over untreated granular material)*

■ ÉVALUATION DES STRATÉGIES

L'évaluation et l'optimisation des stratégies ont été réalisées à l'aide du modèle HDM - III (avec EBM) de la Banque Mondiale. Une telle étude suppose la hiérarchisation préalable du réseau en catégories (tableau I). On a ensuite modélisé le réseau afin d'appliquer le modèle HDM sur un échantillon de liaisons représentatif du réseau. Le modèle de réseau choisi est reporté sur le tableau II. Le calage de HDM, c'est-à-dire la vérification de l'adéquation du modèle à la réalité des routes concernées, réalisé sur un nombre important de sections a conduit à corriger les facteurs de dégradations, prévus à cet effet dans le modèle. Ainsi, ont été corrigés :

- ◆ K_{ci} (temps d'apparition des fissures) = 1,2 ;
- ◆ K_{cp} (vitesse de progression des fissures) = 0,8. Les autres facteurs étant fixés à 1.

L'évaluation sur ces bases et sous contrainte budgétaire conduit aux stratégies suivantes :

- ◆ catégorie 1 : enrobés minces (3 cm), plus épais dans certains cas, quand l'IRI dépasse 3 ;
- ◆ catégorie 2 : enrobés minces à partir d'un IRI de 3 et quelques reconstructions à IRI = 5 ;
- ◆ catégorie 3 : enrobés minces à IRI = 3,5 ou coulés à froid pour un taux de dégradations de 10-20 %.

Gilbert Caroff

DIRECTEUR
DU DÉPARTEMENT
CHAUSSÉES - ENTRETIEN
ROUTIER
Scetauroute



Yvan Casan

EXPERT - DÉPARTEMENT
CHAUSSÉES - ENTRETIEN
ROUTIER
Scetauroute



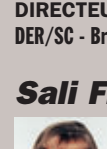
Robert Mesnard

EXPERT
Cete de l'Ouest



Paulo Meurer

DIRECTEUR DU PROJET
DER/SC - Brésil



Sali Franzoi

EXPERT
Appe - Brésil

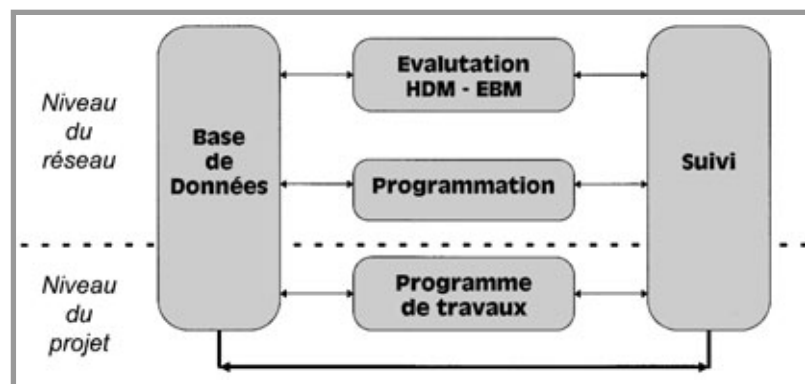


Figure 1
Schéma général
du système
*General diagram
of system*

■ PROGRAMMATION DES TRAVAUX

Généralités

Le système de programmation des travaux a été développé à partir des objectifs fixés, à court ou à moyen terme, et en fonction des stratégies optimales. La stratégie étant choisie, ce système permet de déterminer le programme de travaux (tâches d'entretien et priorités) sans faire appel à un outil complexe et surtout en intégrant d'autres paramètres (adhérence, drainage, sections de travaux, contexte local...). Ce système de programmation doit être souple pour pouvoir à la fois prévoir des enveloppes de travaux au niveau national et définir les travaux précis dans le cadre des projets. Ce module qui s'articule dans l'ensemble du système de gestion reste un outil d'aide à la décision. Le système est destiné à déterminer la consistance

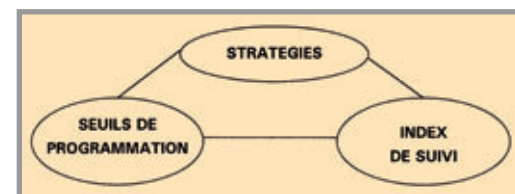


Figure 2
La cohérence
des modules
Units coherence

Qualité d'usage								
Niveaux	1° Note					2° Note		
	IRI	Adhérence	% ornierage	% ressuage	Nb Npoule	accotements	%arracht	
Intervention	3	?	10	10	2	Mauvais	10	
Alerte	2,5	?	5	5	1	-	5	

Qualité Patrimoine									
Niveaux	1° Note							2° Note	
	% fiss.	% fai.	IRI	%orn. GR	% Affais.	Répara.	Déflexion	Drainage	Accôt.
Intervention	10	10	3,5	10	10	10	70	Mauvais	
Alerte	5	5	3	5	5	5	50	-	Mauvais

Tableau III
Seuils de programmation
Programming thresholds

1,5x10 ⁶ ≤ N < 4x10 ⁶						
Faïence < 5	Déflexion					
	< 50	50 - 70	70 - 100	100-120	120 - 150	> 150
5 - 10			4BB	5BB	5BB/15BNT	5BB/20BNT
10 - 20		4BB	5BB	7BB	5BB/20BNT	5BB/25BNT
> 20	4BB	5BB	7BB	9BB	7BB/20BNT	7BB/20BNT

Tableau IV
Solutions structurelles
Structural solutions

Uni IRI	3	3,5	4	4,5	5
Epaisseur	rien ou 3BB	rien ou 3BB	5BB	5BB	7BB
	→ seuil d'intervention				

Tableau V
Solutions pour l'uni
Solutions for smoothness



ce et le coût des travaux qui résultent de l'application des stratégies choisies. L'analyse des besoins est conduite en distinguant les deux objectifs de l'entretien :

- ◆ la qualité d'usage;
- ◆ la conservation du patrimoine.

Avec des indicateurs adaptés à chacun des objectifs et des sections d'analyse de faible longueur (200 m en général), le système doit fournir pour chaque section d'analyse :

- ◆ une priorité à deux notes "qualité d'usage" et "patrimoine", chaque note ayant deux chiffres, sous forme de note primaire et secondaire, exemple : (1, 2) ou (2, 3);
- ◆ une solution technique type, exemple : enduit superficiel (ES) ou béton bitumineux (BB) qui sera précisée au niveau du projet.

Après analyse détaillée par section de 200 m, on préparera le programme de travaux, en regroupant en section de travaux les sections élémentaires.

Pour chacun des objectifs, on utilise les indicateurs pertinents suivants :

- ◆ qualité d'usage : uni, adhérence ou macrotexture, ornierage, arrachements, ressuage, glaçage, nids de poule;
- ◆ patrimoine : fissuration, uni, déflexion, ornierage.

Pour chacun de ces indicateurs, deux niveaux sont définis :

- ◆ niveau 1 : seuil d'intervention;
- ◆ niveau 2 : seuil d'alerte.

La cohérence devra être assurée avec les index globaux utilisés pour le suivi, comme il est mentionné plus haut : ce qui sera jugé bon ou très bon ne doit pas être classé ici, en priorité de travaux. Les résultats de l'analyse sont d'abord présentés, section par section, en rappelant la stratégie de référence, les notes de priorité et la solution type proposée, pour l'approche "qualité d'usage" et l'approche "patrimoine" et définition de la technique d'entretien : coulis bitumineux, béton bitumineux ou renforcement.

Les techniques d'entretien ont fait l'objet d'une définition précise, avec des spécifications sur les constituants, la fabrication, la mise en œuvre et les contrôles.

Calcul des priorités

La définition des priorités est la suivante :

- ◆ priorité 1 : 2 indicateurs de niveau "intervention";
- ◆ priorité 2 : 1 indicateur de niveau "intervention" et 1 de niveau "alerte";
- ◆ priorité 3 : 2 indicateurs de niveau "alerte" ou 1 de niveau "intervention";

Les seuils sont fixés par catégorie et pour la catégorie 1 ils sont reportés sur le tableau III.

Détermination de la solution type

Par rapport aux pratiques antérieures, des modifications ont été apportées dans les spécifications des matériaux pour éviter des problèmes récurrents (arrachements...), certaines techniques ont été abandonnées (enrobés coulés à froid) et d'autres vont être introduites progressivement (enduits superficiels). Les techniques d'entretien retenues sont les suivantes :

- ◆ entretien courant;
- ◆ point à temps;
- ◆ enduits superficiels;
- ◆ béton bitumineux (BB) de 3 à 11 cm;
- ◆ renforcement épais : couche de roulement (BB ou ES) et couche de base en grave (BNT) ou recyclage;
- ◆ reconstruction d'une ou deux voies.

La méthodologie retenue consiste à définir la solution structurelle en fonction de la déflexion et de la fissuration, puis la solution pour l'uni et de re-

tenir la solution maximale (tableaux IV et V). Les solutions pour l'aspect structurel et pour l'uni sont respectivement reportées tableaux IV et V.

Synthèse

Le gestionnaire peut alors choisir une solution de synthèse cohérente avec la stratégie retenue; ainsi pour chaque section, il peut retenir :

◆ 1 - La priorité et la solution "qualité d'usage", en cohérence complète avec les résultats de l'évaluation;

◆ 2 - La priorité "qualité d'usage" et la solution de synthèse (maximum des solutions "qualité d'usage" et "patrimoine"), ce qui consiste, au-delà de l'impact sur les transports à sauvegarder pour le long terme le patrimoine;

◆ 3- Respectivement la priorité et la solution "qualité d'usage" pour les forts trafics et "patrimoine" pour les faibles trafics, ce qui permet de corriger la non prise en compte sur les faibles trafics d'effets indirects sur la production agricole, le tourisme, l'éducation et la santé.

Dans l'État de Santa-Catarina, après avoir envisagé la solution 3, on s'est finalement orienté vers la solution 1 compte tenu du resserrement de la contrainte budgétaire.

Programme de travaux

Les solutions travaux doivent être regroupées pour constituer des sections de travaux viables (environ 2 km) puis ordonnées par ordre de priorités. On détermine ensuite le coût des travaux à réaliser sur chaque section. On retient comme programme de travaux pour l'année 1, la liste des sections dont le coût cumulé est égal au budget affecté. Une première approche des programmes de travaux de l'année suivante est établie de la même manière, en poursuivant la même logique.

LE SYSTÈME DE SUIVI

Le système de suivi est un module s'intégrant dans le système de gestion, et dont l'objectif est de qualifier l'état général du réseau routier, afin de suivre l'évolution des chaussées. Il permet :

◆ de mesurer l'impact de la stratégie d'entretien sur la qualité du service offert à l'utilisateur sur l'état du patrimoine, et ainsi d'apprécier la qualité des simulations;

◆ de voir les effets des dérives budgétaires éventuelles;

◆ de fournir des éléments de négociation pour justifier les budgets.

Le système de suivi se présente comme une série d'index. Ceux-ci sont établis à partir d'agrégations de différents indicateurs (dégradations, mesures) qui traduisent le mieux l'état de la chaussée. Il peut

Dégradations NDE	NIU					
	A	B	C	D	E	Z
A	A	B	B	C	C	Z
C	B	B	C	D	D	Z
D	B	C	C	D	E	Z
E	C	C	D	D	E	Z
Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z

Tableau VI
Index de qualité
d'usage (IQU)

Usage
quality index (UQI)

NDT	NIP					
	A	B	C	D	E	Z
A	A	A	B	B	C	Z
B	B	B	B	C	C	Z
C	B	C	C	C	D	Z
D	C	C	D	D	D	Z
E	C	D	D	E	E	Z
Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z

Tableau VII
Index de qualité
du patrimoine (IQP)

Patrimony
quality index (PQI)

avoir plusieurs index : index élémentaire et index global. Chaque index est classé en cinq niveaux :

- ◆ A - Très bon;
- ◆ B - Bon;
- ◆ C - Moyen;
- ◆ D - Mauvais;
- ◆ E - Très mauvais.

Afin d'être facilement compréhensible et efficace, le système de suivi doit distinguer les différentes finalités recherchées par le gestionnaire. En cohérence avec le système de programmation, il permettra de suivre les objectifs de "qualité d'usage" et de "qualité du patrimoine". Les index globaux du système de suivi donnent une image synthétique du réseau, mais ne peuvent pas servir à la programmation des travaux.

En effet :

- ◆ un même index peut représenter des états de chaussée qui nécessitent des solutions de travaux différentes;
- ◆ les sections très dégradées ne sont pas forcément prioritaires sur le plan de la programmation des travaux.

D'autres index de suivi peuvent être définis. On peut citer par exemple :

- ◆ l'index d'environnement;
- ◆ l'index de sécurité.

En cohérence avec le sous-système de programmation, on distingue la "qualité d'usage" et la "qualité du patrimoine".

Au travers de deux analyses distinctes, un index de qualité d'usage (IQU) et un index de qualité du patrimoine (IQP) sont calculés. Puis, un index de qualité global (IQG) regroupant les deux premiers est établi.

La définition des index de suivi se fait par l'intermédiaire de matrices (tableau VI pour IQU et tableau VII pour IQP). Les mentions NIU et NDE (tableau VI) correspondent respectivement à la note synthétique d'uni et à la note synthétique de dégradations de surface. La mention NIP (tableau VII)

représente la note d'uni pour le patrimoine et NDT le croisement de la note de déflexion et de dégradations.

Index global de niveau de service

Trois possibilités sont offertes à l'utilisateur selon la définition que l'on veut adopter pour un index global :

- ◆ la qualité d'usage et le patrimoine sont d'importance égale ;
 - définition optimiste : la bonne note prévaut,
 - définition pessimiste : la mauvaise note prévaut ;
 - ◆ la qualité d'usage doit être privilégiée avant tout ;
 - ◆ le patrimoine est le caractère le plus important.
- C'est la deuxième solution qui a été retenue.

ENSEIGNEMENTS

Le développement et la mise en place du système de gestion SIGESC à Santa-Catarina a été l'occasion de mettre en place une véritable politique d'auscultation des routes, de se poser les questions stratégiques fondamentales et de redéfinir les objectifs et les priorités de l'entretien.

Le système d'information VISAGE, le système de programmation PROG et le système de suivi ACOMP constituent des outils pratiques qui vont permettre de rationaliser l'entretien pour le bénéfice de l'utilisateur et pour une meilleure utilisation des crédits.

Ce système de suivi par index de performance est également un outil efficace aux mains du DER dans le cadre de concessions, puisqu'il permet de mesurer synthétiquement l'état du réseau et son évolution.

ABSTRACT

The highway maintenance management system of Santa-Catarina in Brazil

G. Caroff, Y. Casan, R. Mesnard, P. Meurer, S. Franzoi

The highway management and maintenance system of Santa-Catarina in Brazil was developed in connection with a highway network rehabilitation and maintenance project (6,306 km of highway, 3,135 km of which are paved). To reach the set targets, the management system comprises the following functions :

- database, developed under Visage (Setra - LCPC) ;
- HDM - EBM model of the World Bank ;
- PROG programming system ;
- ACOMP monitoring system.

The programming and monitoring systems involve a double quality approach in the use and conservation of the existing heritage, to take into account the main objectives of maintenance.

The system was designed to be easily utilisable by highway officials and its "monitoring" module can be used in the case of private concessions.

DEUTSCHES KURZREFERAT

Das Managementsystem für die Straßeninstandhaltung im brasilianischen Staat Santa-Catarina

G. Caroff, Y. Casan, R. Mesnard, P. Meurer, S. Franzoi

Das Managementsystem für die Instandhaltung der Straßen des brasilianischen Staates Santa-Catarina ist im Rahmen eines Projektes zur Sanierung und Wartung des Straßennetzes (Länge : 6306 km, davon 3135 km asphaltiert) entwickelt worden. Zur Erfüllung der Aufgabenstellung umfaßt das Managementsystem folgende Funktionalitäten :

- eine mit der Visage-Software (Setra - LCPC) entwickelte Datenbank ;
- das HDM-EBM-Modell der Weltbank ;
- das Programmiersystem PROG ;
- das Verfolgungssystem ACOMP.

Die Programmier und Verfolgungssysteme beinhalten einen zweifachen Ansatz der Nutzung und Bewahrung des vorhandenen Netzes, um bei der Instandhaltung die wichtigsten Zielsetzungen zu berücksichtigen.

Das System ist im Hinblick auf Benutzerfreundlichkeit (Verwendung durch die Straßennetzverwalter) ausgelegt worden. Sein "Verfolgungs" Modul kann für Privatkonzessionen eingesetzt werden.

RESUMEN ESPAÑOL

Sistema de gestión para el mantenimiento de carreteras de Santa-Catarina, en Brasil

G. Caroff, Y. Casan, R. Mesnard, P. Meurer y S. Franzoi

El sistema de gestión para el mantenimiento de las carreteras del estado de Santa Catarina, en Brasil, se ha desarrollado en el marco de un proyecto de rehabilitación y de mantenimiento de la red de carreteras (6306 km, de los cuales 3135 km asfaltados). Para alcanzar los objetivos impartidos, el sistema de gestión incluye las funcionalidades siguientes :

- base de datos, desarrollada bajo Visage/Setra - LCPC) ;
- modelo HDM - EBM, del Banco Mundial ;
- sistema de programación PROG ;
- sistema de seguimiento ACOMP.

Los sistemas de programación y de seguimiento incluyen un doble enfoque : calidad de utilización y conservación del patrimonio, para tener debidamente en cuenta los objetivos principales del mantenimiento.

Este sistema se ha diseñado para ser fácilmente utilisable por los responsables de la gestión y su modelo "seguimiento" para ser utilizado para su aplicación al caso de concesiones privadas.

Le barrage de Mengkabau au Sultanat de Brunei Darussalam

Le barrage de Mengkabau au sultanat de Brunei Darussalam est un barrage en enrochements à masque amont en béton, de 30 m de hauteur. Cette solution est la mieux adaptée aux conditions climatiques et au respect des contraintes environnementales du site.

Une particularité du chantier a été l'importation, par voie fluviale et maritime, des enrochements (215 000 m³) en provenance d'états voisins.

Une autre originalité a été l'adaptation des méthodes de construction aux conditions spécifiques du site : météorologie et coût de la main d'œuvre. Ainsi :

- le support du masque a été réalisé en béton, au fur et à mesure de la montée des remblais, afin de se protéger contre les effets de l'intense pluviométrie de la région;
- le masque a été construit à l'aide d'un équipage spécialement conçu et réalisé sur le chantier.

Bernard Bouyge



INGÉNIEUR EN CHEF
Bec Frères SA

George Virgil Siddall



DIRECTEUR DE TRAVAUX
Bec Frères SA

Patrick Le Merrer



INGÉNIEUR
Bec Frères SA

■ SITUATION GÉOGRAPHIQUE ET BUT DE L'OUVRAGE

Situé sur la côte nord-est de l'île de Bornéo (entre les latitudes 4 et 5 ° nord) (figure 1) le sultanat de Brunei Darussalam a une superficie de 5 765 km² pour une population d'environ 300 000 habitants. Son climat tropical est caractérisé par une température élevée et une forte humidité. L'économie du pays repose essentiellement sur ses ressources en hydrocarbures (le Brunei est le 4^e exportateur mondial de gaz).

Avec une capacité de stockage de 9,6 M m³, le barrage de Mengkabau est destiné à renforcer les ressources en eau potable du sultanat (photo 1).

■ CONTEXTE LOCAL

Géologie

Les conditions générales du site sont de qualité moyenne : sous une couverture de dépôts peu épaisse, le substratum rocheux est constitué de marnes noires intercalées de bancs de grès.

Il n'existe pas sur le site de gisement de matériaux susceptible de fournir tant des matériaux de remblai que des granulats.

Par ailleurs, le sultanat de Brunei est situé au centre de la plaque tectonique de l'Asie du Sud-Est et même si une activité intraplaque est confirmée, le séisme maximum probable reste modéré.

Hydrologie et climatologie

Le climat tropical du pays est caractérisé par :

- ◆ une température élevée (température annuelle comprise entre 24 et 36 °C);

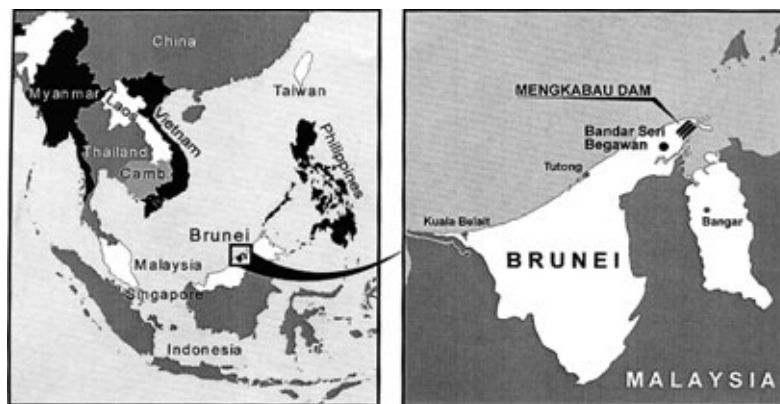


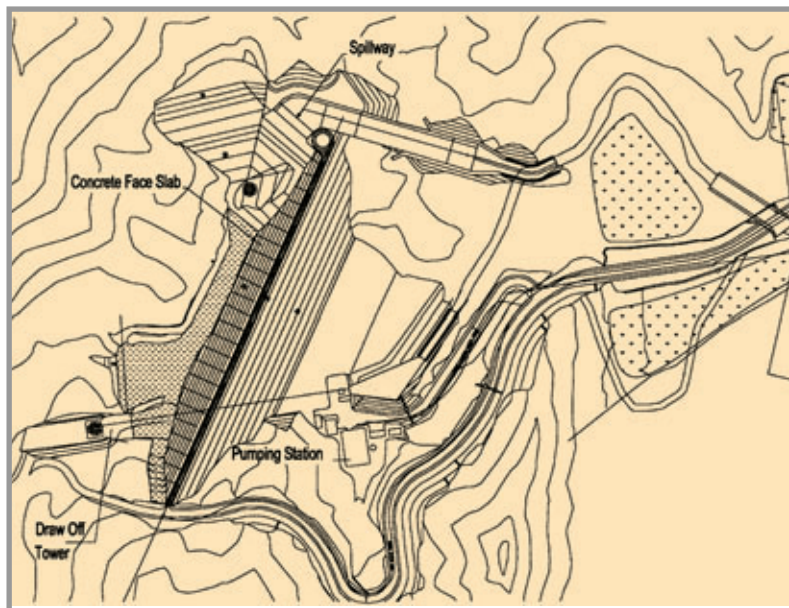
Figure 1
Plan
de situation
Location



Photo 1
Vue générale
du barrage
General view
of dam

- ◆ une humidité forte ;
 - ◆ une pluviométrie abondante (2 900 mm par an), répartie sur 9 mois et se produisant sous forme d'averses brutales.
- Il en résulte des débits de crue élevés : alors que le débit moyen de la rivière Mengkabau est de l'ordre de 1 m³/s :
- ◆ la crue de chantier est estimée à 40 m³/s ;
 - ◆ la crue de fréquence 10² est estimée à 115 m³/s ;

Figure 2
Vue en plan
de l'aménagement
*Plan view
of the development*



et sa vulnérabilité aux dommages accidentels ou résultants d'actes de vandalisme ;

◆ un barrage en enrochements à noyau en terre, béton ou béton bitumineux, plus coûteux.

L'aménagement est constitué :

◆ d'une digue en enrochements à masque amont en béton ;

◆ d'un évacuateur à seuil libre en rive gauche ;

◆ de deux tours de prise d'eau, la première en rive droite faisant également fonction de vidange de fond, la deuxième, en rive gauche, devant être équipée dans une phase ultérieure ;

◆ de deux galeries sous remblai associées à chacune des tours ;

◆ d'une station de pompage.

L'ensemble du chantier sera réalisé en 20 mois à partir du 1^{er} juin 1997, le masque en béton étant réalisé, quant à lui, en 2,5 mois, du 15 juillet 1998 au 30 septembre 1998 (figure 3).

Dérivation provisoire pendant les travaux

La dérivation des eaux durant le chantier a été réalisée en faisant transiter la rivière dans l'ensemble tour de prise d'eau - galerie sous remblai de la rive droite, construit au début du chantier.

Pour augmenter la sécurité du chantier pendant la montée des remblais, une zone d'enrochements "armés" a été ménagée à l'aval de la zone d'enrochements "tout venant", permettant ainsi une éventuelle submersion de l'ouvrage, sans dommages majeurs.

Les remblais

La coupe type de la digue est représentée sur la figure 4. La pente du talus amont est de 1.3/1, la pente du talus aval est de 2.5/1, pour un volume total de 285 000 m³.

D'amont en aval on trouve successivement :

◆ la zone 1 de 2 m d'épaisseur, constituant la surface d'appui du masque, réalisée avec un matériau sablo-graveleux 0-100 mm, et spécifiée comme semi-perméable ($K \geq 3.10^5$ m/s) ;

◆ la zone 2 en enrochements de carrière (0-400 mm), autodrainante (K moyen 2.10^2 m/s) mise en œuvre en couches de 0,5 m d'épaisseur ;

◆ la zone 3 en enrochements "tout venant" (0-400 mm) alluvial, mis en œuvre en couches d'épaisseur 0,5 m, avec une perméabilité spécifiée $\geq 1,10^4$ m/s ;

◆ la zone 6 (au contact de la fondation sous les 2/3 aval du remblai) constituée d'enrochements (0-250 mm) autodrainants en matériau roulé, avec une perméabilité supérieure ou égale à 1.10^2 m/s, mis en œuvre en couches de 500 mm d'épaisseur ;

◆ la zone 4 à l'aval (70 000 m³) constituée avec des matériaux provenant des fouilles de l'ouvrage (marnes et grès), contenant jusqu'à 85 % de fines.

TACHES	1997												1998												1999
	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J					
Mobilisation / Défrichage	[Bar chart showing mobilization and clearing from June to August 1997]																								
Ouvrages hydrauliques RD Galerie, tour de prise d'eau chambre de sortie, 'tailbay'													[Bar chart showing construction from August 1997 to August 1998, with 'Dérivation 19/11' and 'Mise en eau' markers]												
Socle de pied													[Bar chart showing construction from September 1997 to March 1998]												
Ouvrages hydrauliques RG Galerie, tour de prise d'eau chambre de sortie													[Bar chart showing construction from April 1998 to August 1998]												
Enrochements													[Bar chart showing construction from May 1998 to August 1998]												
Masque Amont													[Bar chart showing construction from June 1998 to September 1998, with 'Béton de propreté' and 'Date' markers]												
Evacuateur de crues													[Bar chart showing construction from July 1998 to August 1998]												
Station de pompage	[Bar chart showing construction from June to August 1997]																								
Installation canalisations Finitions, Démobilisation																									[Bar chart showing completion and demobilization from October 1998 to January 1999]

Figure 3
Planning général
des travaux
*General
works planning
schedule*



- ◆ la crue de fréquence 10³ est estimée à 200 m³/s ;
- ◆ la crue de projet (PMF) est estimée à 360 m³/s ;

■ L'AMÉNAGEMENT

Solution retenue pour le barrage (figure 2)

Le maître d'œuvre a choisi une digue en enrochements à masque en béton comme étant le meilleur compromis entre :

◆ un barrage en remblais, relativement économique, mais mal adapté aux conditions climatiques et pour lequel la recherche d'emprunts créerait des dommages environnementaux ;

◆ un barrage avec étanchéité amont obtenue par une géomembrane, solution la moins chère mais présentant des incertitudes quant à sa durabilité

Une des originalités du chantier est qu'en l'absence de matériaux de qualité sur le site ou au Brunei, ceux-ci ont dû être importés des états voisins du Sabah et du Sarawak (Fédération de la Malaisie) :

- ◆ les matériaux de la zone 1 provenaient d'une carrière granitique dans l'état du Sabah, à 300 km du site, transportés par barges de 5 000 t ;

- ◆ les matériaux de la zone 2 provenaient d'une carrière de grès, en bord de mer, dans l'état du Sabah, à 120 km du site, transportés par barges de 5 000 t ;

- ◆ les matériaux des zones 3 et 6 provenaient de ballastières situées dans l'état du Sarawak, à 100 km du site, transportés par barges de 1 000 t. Ces dispositions ont nécessité la constitution de stocks de matériaux sur le chantier, de façon à assurer la continuité de leur mise en œuvre.

Le compactage de ces matériaux a été réalisé à l'aide d'un rouleau vibrant lourd (type V5) selon des modalités déterminées à l'issue de planches d'essai.

Lors des planches d'essai de compactage, l'influence de l'arrosage (100 à 200 l/m³) préalable des enrochements a été testée pour les matériaux concassés de la zone 2. L'essai ayant été jugé non concluant, l'arrosage préalable des enrochements a été abandonné lors de leur mise en œuvre dans la digue.

Le masque en béton

(figures 5 et 6)

L'étanchéité du barrage est assurée par un masque en béton armé de 30 cm d'épaisseur constante. Le masque, d'une surface de 8 646 m² est raccordé :

- ◆ en partie inférieure à une plinthe en béton armé de 50 cm d'épaisseur ;

- ◆ en partie supérieure au parapet "antivagues".

Le masque est découpé en dalles de 12 m de large. Les joints de construction (amont-aval) sont équipés en partie basse d'un joint waterstop en cuivre, posé sur un mortier asphaltique.

Le joint entre les dalles et le parapet est équipé d'un waterstop PVC de 230 mm.

Le joint entre les dalles et la plinthe est équipé :

- ◆ d'un joint waterstop en cuivre, en partie basse, posé sur un mortier asphaltique ;

- ◆ d'un joint waterstop en PVC de 230 mm en partie supérieure.

Les dalles sont armées de deux nappes parallèles d'acier doux diamètre 12 mm, correspondant à un taux de 80 kg/m³.

La plinthe périmétrale a été construite avant la réalisation des remblais.

Support du masque

En raison de la pluviométrie intense de la région, l'option a été retenue par l'entreprise de réaliser en béton le support du masque en lieu et place de

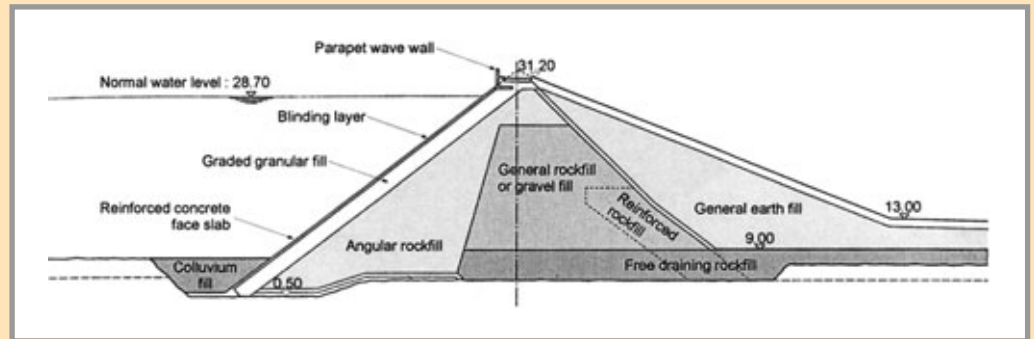


Figure 4
Coupe type
de la digue

Typical cross section
of the embankment

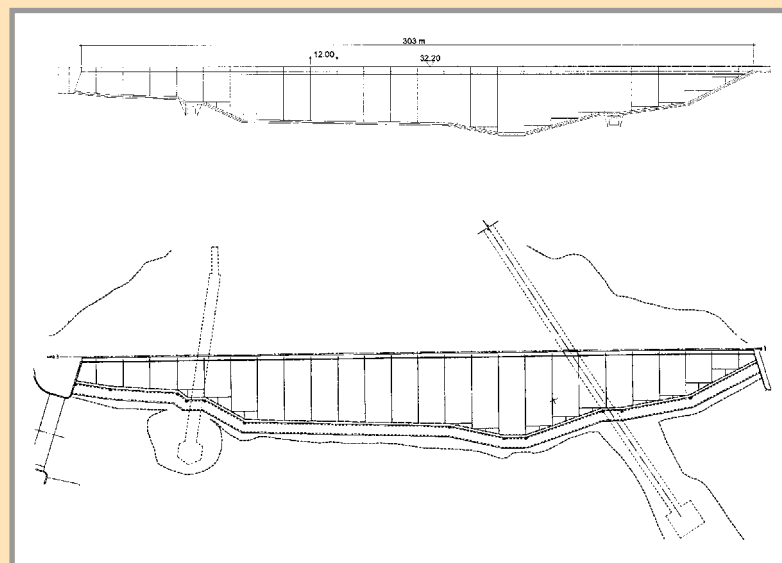


Figure 5
Elévation
et vue en plan
du masque

Elevation and plan
view of the facing

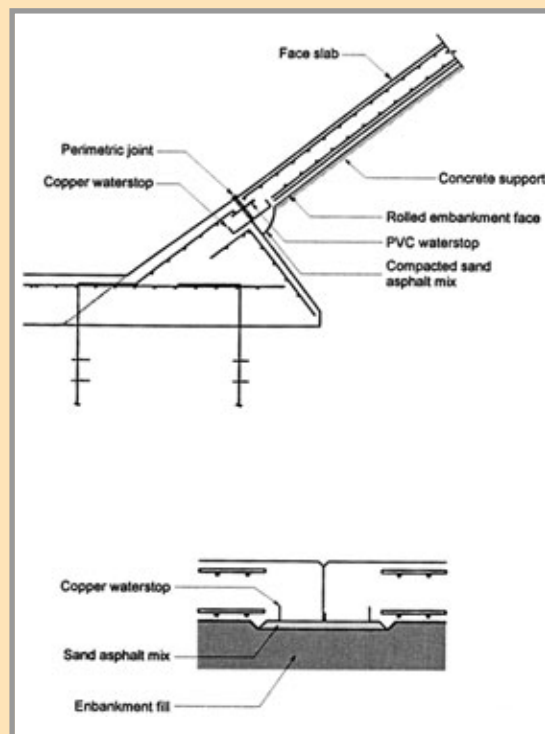


Figure 6
Coupe du masque
et détails des joints

Cross-section
of facing and details
of joints

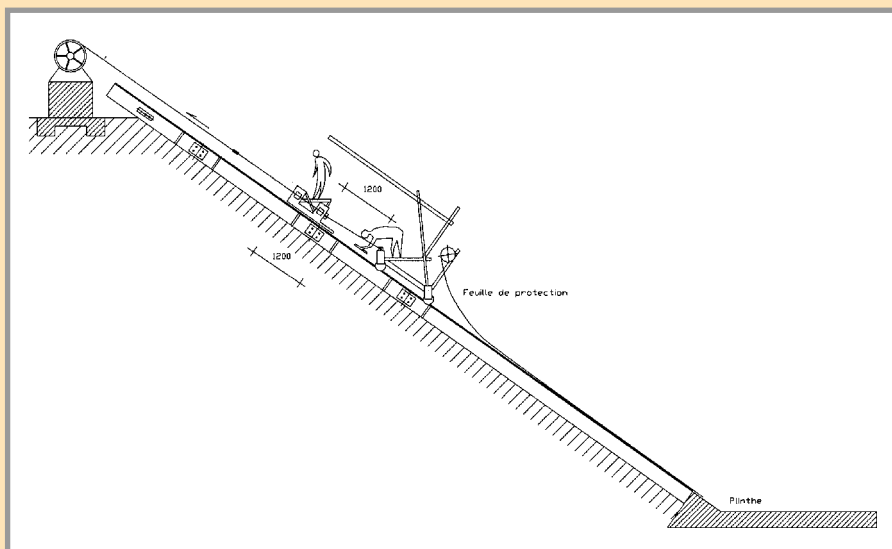
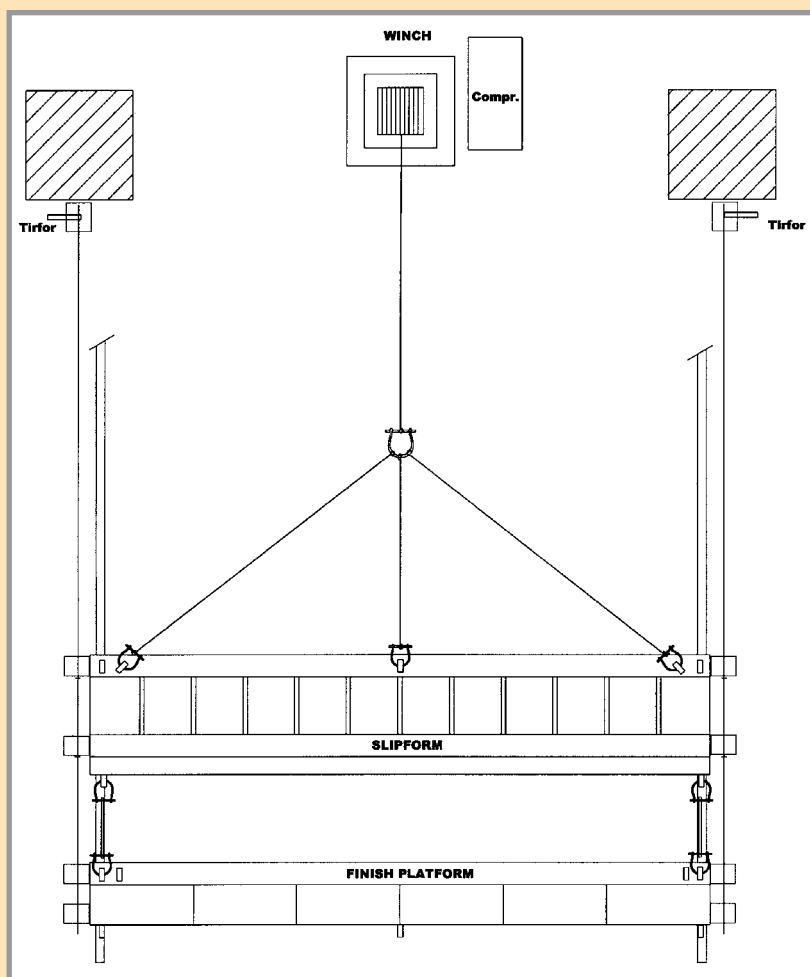


Figure 7a
Réalisation du masque
Completion of facing

Figure 7b
Réalisation du masque
(vue de dessus)
Completion of facing
(upper view)



l'imprégnation de bitume prévue au projet, en suivant la montée des remblais (par pas de 6 m environ).

La méthode appliquée a été la suivante :

- ◆ réalisation de la couche de remblais support avec une surlargeur de 0,5 m ;
- ◆ pré réglage et compactage du talus à l'aide d'une pelle hydraulique équipée d'une plaque amovible (serrage statique) ;
- ◆ réglage fin sur rails guide incorporés dans le remblai ;
- ◆ contrôle de compacité au gamma densimètre ;
- ◆ mise en place, sur 5 cm d'épaisseur, d'un béton de propreté, tiré à la règle.

Ce mode opératoire a permis de protéger le support du masque contre l'érosion, puis de faciliter la réalisation du masque (coffrage - ferrailage - bétonnage).

Réalisation du masque

Les méthodes de réalisation et les formules des bétons ont fait l'objet de planches d'essai.

La méthode de construction retenue est fondée sur l'utilisation d'un équipage roulant sur des rails latéraux de guidage et constitué d'un coffrage glissant et de deux plates-formes de travail, permettant la vibration et la finition de surface du béton (figures 7 et photos 2 et 3), celui-ci étant approvisionné, depuis la crête de l'ouvrage, par des goulottes. Cette solution économique et performante a été préférée à l'utilisation d'outils plus industriels, du fait de la taille moyenne de l'ouvrage et du coût peu élevé de la main d'œuvre.

La longueur des dalles varie de 11 à 44 m. Une fois le support terminé, la procédure de réalisation du masque a été la suivante :

- ◆ implantation de la dalle ;
- ◆ ferrailage en place ;
- ◆ mise en place des joints en cuivre sur un mortier d'asphalte ;
- ◆ mise en place des rails de guidage sur le joint de cuivre ;
- ◆ mise en place et calage des treuils et tirforts latéraux de traction du coffrage ;
- ◆ mise en place de l'équipage ;
- ◆ mise en place des goulottes de bétonnage sur le ferrailage ;
- ◆ bétonnage, vibration, finition et cure du béton à partir de l'équipage.

La vitesse moyenne d'avancement a été de 5 m/h, le rythme global d'exécution étant de 2,5 dalles par semaine.

L'utilisation de cet équipage n'a été possible qu'après réalisation de la partie inférieure des dalles (partie triangulaire).

Dans cette zone la dalle a été coulée en deux parties de 6 m de large, "starter bays", une poutre de 8 m de long étant utilisée comme coffrage glissant.



Photo 3
Bétonnage
par goulottes
*Concreting
by use of chutes*



Photo 2
Réalisation du masque
Completion of facing

Remarque

Conformément à la conception actuelle des masques en béton, il n'y a pas de joint horizontal en partie courante du masque.

En cas de nécessité (interruption du bétonnage, quelle qu'en soit la raison) une configuration d'arrêt de bétonnage était prévue, mais n'a jamais été utilisée.

Le béton utilisé était dosé à 370 kg/m^3 , pour une dimension maximale de granulat de 20 mm. Avec un ratio E/C de 0,43, l'affaissement au cône était de 5 cm environ.

Ce fort dosage en ciment a imposé la réfrigération de l'eau de gâchage à $2 \text{ }^\circ\text{C}$ pour limiter à $30 \text{ }^\circ\text{C}$ la température du béton à la mise en place.

Les ouvrages hydrauliques

Évacuateur de crue

L'évacuateur de crues, situé en rive gauche, bénéficie de conditions topographiques favorables pour évacuer, loin à l'aval du barrage, les débits de crues.

Vidange de fond et tour de prise d'eau

Ces fonctions sont dévolues à deux ensembles tour de prise - galerie sous remblai, l'ensemble en RG étant aménagé en 2^e phase.

Les tours ont fait l'objet d'un travail architectural soigné, visant à leur intégration dans le site (figure 8).

■ COÛT DE L'OUVRAGE

Le marché de construction de l'aménagement a été obtenu à l'issue d'un appel d'offres international. Le montant des travaux était de 28,7 M B\$ (1 Brunei dollar \approx 3,60 FF).

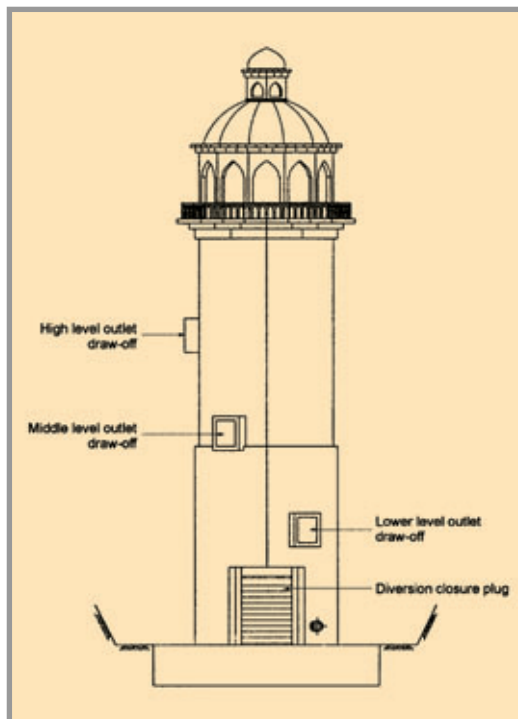


Figure 8
Tour de prise d'eau
Water intake tower

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

Kerajaan Negara Brunei Darussalam
Kementerian Pembangunan
Jabatan Kerja Raya

Maître d'œuvre

Watson Hawksley Asia - Consulting
Engineers

Exécution des Travaux

Groupement d'entreprises :

- Bec Frères SA (mandataire)
- Swee Sdn Bhd

CONCLUSIONS

Cet aménagement a été réalisé par l'entreprise Bec, en groupement avec une entreprise Bruneienne, les conditions contractuelles étant les conditions Fidic. L'implantation permanente de Bec en Malaisie voisine a permis un appui facile au chantier.

Jusqu'à deux cents personnes représentant neuf nationalités différentes (Français, Anglais, Bruneiens, Malaisiens, Sri Lankais, Indiens, Thaïlandais, Indonésiens, et Philippins) ont travaillé en bonne harmonie sur ce chantier.

L'encadrement a été largement confié à du personnel local, quatre Européens seulement ayant été positionnés sur le site.

FICHE SYNOPTIQUE DE L'OUVRAGE

- Barrage en enrochements à masque amont en béton
- Nature de la fondation : marnes noires avec bancs de grès
- Longueur en crête : 330 m
- Largeur en crête : 3 m
- Volume des remblais : 285 000 m³
- Hauteur maximale sur fondation : 30 m
- Pente du talus amont : 1,3 h/1v
- Pente du talus aval : 2,5 h/1v
- Cote de la crête du barrage : 31,20
- Cote du sommet du parapet : 32,20
- Cote de retenue normale : 28,70
- Cote de retenue à la PMF : 31,70
- Capacité du réservoir à la cote de retenue normale : 9,6 hm³
- Surface du réservoir à la cote de retenue normale : 1,3 km²
- Surface du bassin versant : 13,7 km²
- Crue de projet (PMF) : 360 m³/s
- Crue de fréquence 10⁻³ : 200 m³/s
- Débit évacué pour la crue de fréquence 10⁻³ : 120 m³/s
- Evacuateur à seuil libre en rive gauche
- Longueur du seuil : 35 m
- Crue de chantier : 40 m³/s
- Galerie de dérivation provisoire S : 10,9 m²
- Vidange : par prises d'eau étagées (n : 3) et conduite de vidange diamètre : 700 mm

ABSTRACT

The Mengkabau dam in the Sultanate of Brunei Darussalam

B. Bouyge, G.-V. Siddall, P. Le Merrer

The Mengkabau dam in the Sultanate of Brunei Darussalam is a rock-fill dam with an upstream facing in concrete, 30 m high. This solution is the best suited to the climatic conditions and to the environmental requirements of the site.

A particular feature of the site was the import, via waterway, of rock (215,000 m³) coming from neighbouring countries.

Another original feature was the adaptation of construction methods to the specific conditions of the site : weather and cost of labour. Thus :

- the support of the facing was designed in concrete, completed as the embankments built up, in order to provide protection against the effects of the intense rainfall of the region ;
- the facing was constructed using equipment specially designed and assembled on the site.

DEUTSCHES KURZREFERAT

Der Staudamm von Mengkabau im Sultanat Brunei Darussalam

A. Bouyge, G.-V. Siddall, P. Le Merrer

Die Talsperre Mengkabau im Sultanat Brunei Darussalam wird von einem 30 m hohen Steinschüttdamm mit oberwasserseitiger Dichtung aus Beton gebildet.

Angehts der klimatischen Bedingungen und der landschaftsschutztechnischen Vorgaben ist dies die am besten geeignete Lösung.

Zu den Besonderheiten dieses Bauvorhabens gehört der Import auf dem Wasser- und Seeweg des Schüttungsgesteins (215 000 m³) aus den Nachbarstaaten.

Ein weiterer neuartiger Ansatz war die Anpassung der Baumethodik an die spezifischen Standortbedingungen : Meteorologie und Preis der Arbeitskräfte. Dementsprechend wurde :

- der Dichtungsschleier zeitparallel zur hochsteigenden Aufschüttung aus Beton gebaut, um sich vor den Auswirkungen der starken Regenfälle dieser Region zu schützen ;

- die Dichtung mit Hilfe einer speziell konzipierten und vor Ort gefertigten Ausrüstung errichtet.

RESUMEN ESPAÑOL

La presa de Mengkabau, en la sultanía de Brunei Darussalam

B. Bouyge, G.-V. Siddall y P. Le Merrer

La presa de Mengkabau, en la sultanía de Brunei Darussalam es del tipo de escollera con pantalla de hormigón por su parte aguas abajo, de 30 m de altura. Esta solución es la que mejor corresponde a las condiciones climáticas y al respeto de los imperativos medioambientales del emplazamiento.

Una particularidad de estas obras ha consistido en la importación, por vía fluvial y marítima, de los materiales rocosos que forman la escollera (215 000 m³), procedentes de estados vecinos.

Otra originalidad ha sido la adaptación de los métodos de construcción a las condiciones específicas del emplazamiento : meteorología y coste de la mano de obra. Y por todo ello :

- el soporte de la pantalla de impermeabilización se ha ejecutado en hormigón, a medida que la altura de la presa aumentaba, con objeto de conseguir una protección contra los efectos de la intensa pluviometría reinante en la región ;
- la pantalla se ha construido por medio de una instalación especialmente diseñada y ejecutada en el lugar de las obras.



Métro de Sydney

Dix kilomètres de ligne nouvelle entre le centre-ville et l'aéroport

Le groupement Transfield-Bouygues assure actuellement la conception et la construction de la New Southern Railway (NSR), une nouvelle ligne de métro souterraine de 10 km de long qui reliera le centre de Sydney à son aéroport et étendra la capacité du réseau de banlieue existant. Quatre nouvelles stations souterraines seront réalisées, deux dans la partie sud de la ville, et deux à l'aéroport de Sydney respectivement aux aéroports des vols intérieurs et internationaux. Par ailleurs, cette nouvelle ligne sera raccordée au réseau de banlieue existant, ce dernier se faisant, d'une part au niveau de la gare centrale (Central Station) près de Turrella, sur la ligne East Hills, et au niveau d'une nouvelle gare de correspondance sur la ligne Illawarra, à North Arncliffe, d'autre part.

Le présent article décrit les travaux réalisés dans le cadre du projet, notamment l'installation des ouvrages de drainage du tunnel et la conception, la fabrication et l'installation des équipements mécaniques et électriques, tant dans le tunnel que dans les stations. L'article s'intéresse également aux ouvrages complexes de la partie sud et à la construction des cinq stations prévues au total.

L'article paru dans le n° 737 de *Travaux* (décembre 1997) mettait en lumière l'origine et l'histoire de la New Southern Railway à Sydney, traçait les grandes lignes du projet et du contrat, et décrivait les principaux éléments d'infrastructure qui la constituent ainsi que les conditions géologiques et hydrogéologiques dans lesquelles elle s'inscrit. Voici maintenant plus de trois ans et demi que la signature des contrats pour la conception et la construction de la NSR a eu lieu. Les études détaillées d'exécution du projet sont achevées en totalité, les travaux de construction des infrastructures sont pour la plupart bien avancés et dans plusieurs secteurs (tunnel au rocher, tunnels en tranchée couverte et jonction nord, par exemple), ils approchent de leur achèvement.

Le présent article passe en revue les activités en cours, qui ont un poids tout autre que la phase de construction lourde qui vient juste de s'achever; il décrit plus en détail les ouvrages complexes de la partie sud ainsi que les stations souterraines du tracé. L'échéance de l'an 2000 se rapprochant inéluctablement, des efforts considérables devront être déployés afin de transformer les "trous" actuels dans le sol australien en une ligne de métro parfaitement opérationnelle.

■ LES TRAVAUX EN COURS

Drainage

Dans le tunnel au rocher, la plate-forme supportant les voies (i.e. le radier du tunnel) est constituée

par un béton de propreté de 100 mm d'épaisseur coulé sur le substratum rocheux dégagé. Dans cette section, le réseau gravitaire est constitué d'un caniveau semi-cylindrique situé de chaque côté du tunnel, qui collecte les eaux de ruissellement des parois et se déverse dans un drain enterré au centre du tunnel. Le drain central comporte des puits de relevage et des pièges à ballast tous les 90 m, avec des regards intermédiaires espacés de 30 m pour permettre l'accès pour les travaux de maintenance. L'eau est évacuée via une station de pompage située au point bas, d'où elle est pompée vers la surface, au portail nord du tunnel, par l'intermédiaire d'une conduite montante (figure 1).

Dans le tunnel en terrain meuble, la plate-forme supportant les voies est remblayée en grave-ciment. Le réseau de drainage du tunnel est constitué d'un drain enterré dans la grave-ciment, au centre de la plate-forme et d'une membrane drainante en partie basse du radier. La canalisation centrale comporte des puits de relevage et des pièges à ballast tous les 120 m, avec des regards intermédiaires tous les 30 m. L'eau est évacuée via quatre stations de pompage situées aux points bas, d'où elle est pompée vers la surface au niveau des stations de Mascot, Domestic Terminal et International Terminal (figure 2).

Dans les tunnels en tranchée couverte, la plate-forme des voies est constituée par la dalle inférieure du caisson. Une canalisation de drainage gravitaire est incorporée à la dalle, avec des grilles à intervalles variables, des puits de relevage et enfin des regards destinés à permettre l'accès pour les travaux de maintenance.

Equipements mécaniques et électriques - Description

Superstructure des voies

Les voies sont du type ballastées, avec traverses en béton, satisfaisant à la classe 1XC; le ballast, de classe 1, supporte des traverses en béton SRA type 5 et des rails à 60 kg/m, standard ou ayant subi une trempe en surface, soudés en continu et fixés au moyen d'attaches Pandrol (photos 1 et 2). Le tracé a été établi sur la base d'une vitesse maximale de circulation des trains égale à 80 km/h et d'un dévers maximal de 115 mm. La réduction du bruit et des vibrations transmis par la superstructure est obtenue au moyen d'une membrane résiliante placée de manière discontinue en différents points du tunnel entre le radier et la première couche de ballast.

Force et éclairage dans le tunnel

L'alimentation électrique des équipements techniques et de l'éclairage du tunnel est considérée comme un élément essentiel; elle est donc assurée par deux sources indépendantes, via un commutateur automatique installé à côté de chaque tableau divisionnaire du tunnel. Les deux branchements indépendants, de 415 V

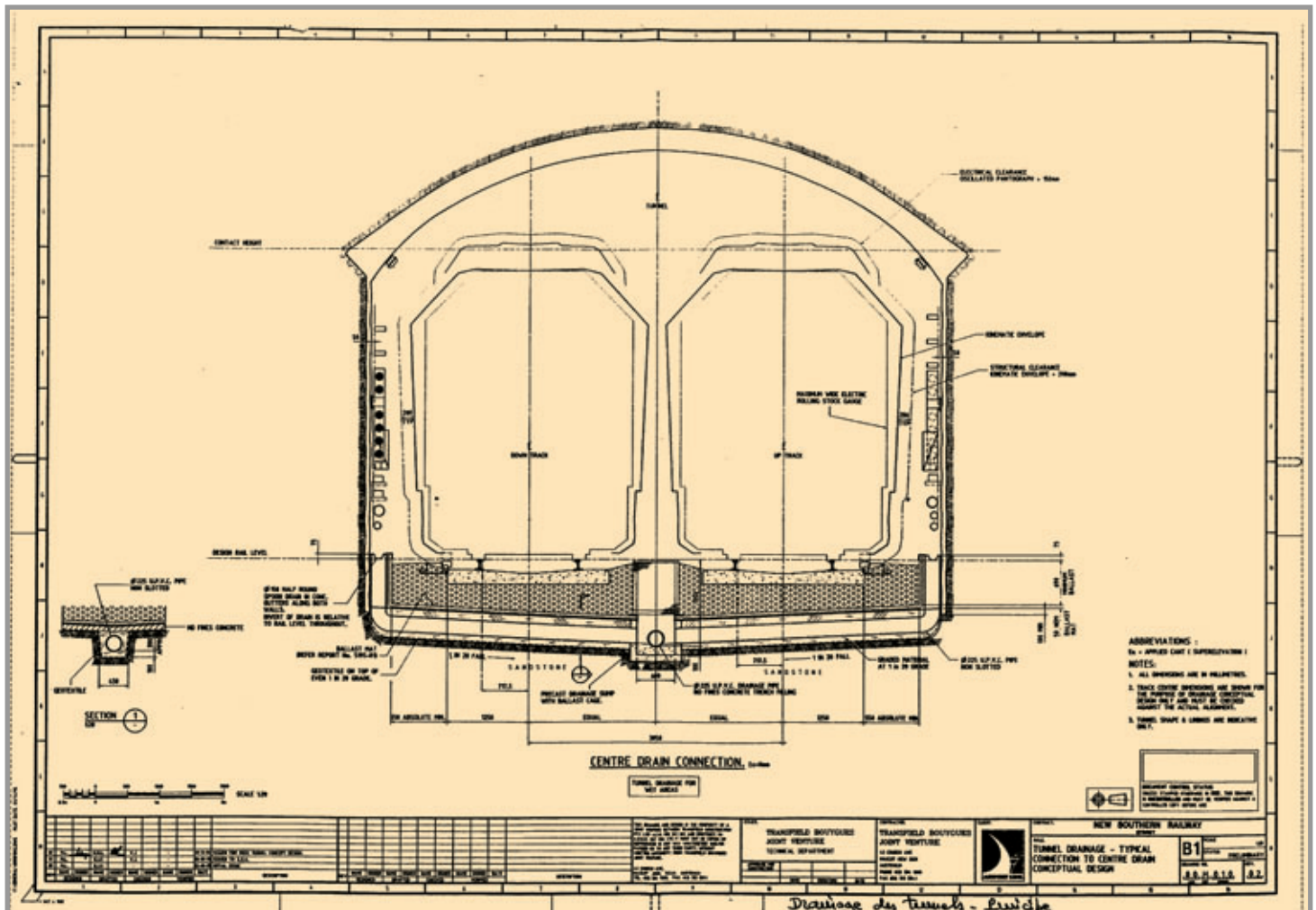
AC chacun, partent des tableaux électriques généraux des stations, et courent sur les deux côtés du tunnel pour alimenter les tableaux divisionnaires dans tout le tunnel. Ceux-ci alimentent en électricité les différents équipements du tunnel, notamment les pompes, l'éclairage normal et l'éclairage de secours ainsi que les prises d'usage courant. L'éclairage normal et de secours est assuré des deux côtés du tunnel.

Les fonctions de contrôle-commande du réseau électrique et du système d'éclairage sont assurées par le système de surveillance et d'acquisition des données.

Energie de traction dans le tunnel

L'énergie de traction est fournie par un fil de contact double en 1500 V CC, à suspension caténaire indépendante, à ancrages fixes à l'intérieur du tunnel et à tension régulée à l'extérieur du tunnel. Les *feeders* des caténaires sont alimentés par deux sous-stations de transformation et de redressement permettant de passer de l'alimentation en 33 kV aux 1500 V CC requis. Il s'agit d'une part d'une sous-station existante à Prince Alfred Sidings, appartenant à Rail Access Corporation, et d'autre part, d'une nouvelle sous-station située à Undercliffe, près de la station Wolli Creek.

Figure 1
Principe de drainage
des tunnels
Tunnel drainage



Le retour du courant négatif aux sous-stations s'effectue par le rail de roulement raccordé à une barre de retour latérale.

Signalisation

Le système de signalisation est à base de relais et utilise des circuits de voie à fréquence audio pour détecter la présence des trains. La conception tient compte de l'opération des équipements latéraux des voies depuis les salles de contrôle des stations. Des afficheurs donnant cinq ou six positions de signaux, des afficheurs standard et à LEDs, faisant apparaître des signaux automatiques, semi-automatiques et manuels, sont utilisés sur la NSR.

Des dispositifs d'arrêt automatiques des trains, du type électro-pneumatiques, sont alimentés par un circuit d'air comprimé en boucle et assurent une protection à sécurité intrinsèque. Les armoires à relais, de même que la plus grande partie du matériel de signalisation, sont installées dans les stations.

Le système de surveillance et d'acquisition des données assure la surveillance du diagnostic des défauts, de l'isolation de l'alimentation électrique des signaux et du bon fonctionnement du système de signalisation.



Photo 1
Portail du tunnel au Prince Albert Park. Connection nord entre le NSR et le système de chemin de fer existant, en attente de mise en œuvre du ballast

Prince Albert Park tunnel portal. Northern connection between NSR and existing rail system. Awaiting placement of ballast and track



Photo 2
Central Junction. Connection entre le NSR et le système existant

Central Junction. Showing the elevated connection between the NSR and the existing rail system

Figure 2
Coupe type du tunnel en terrain meuble
Tunnel typical section in soft ground

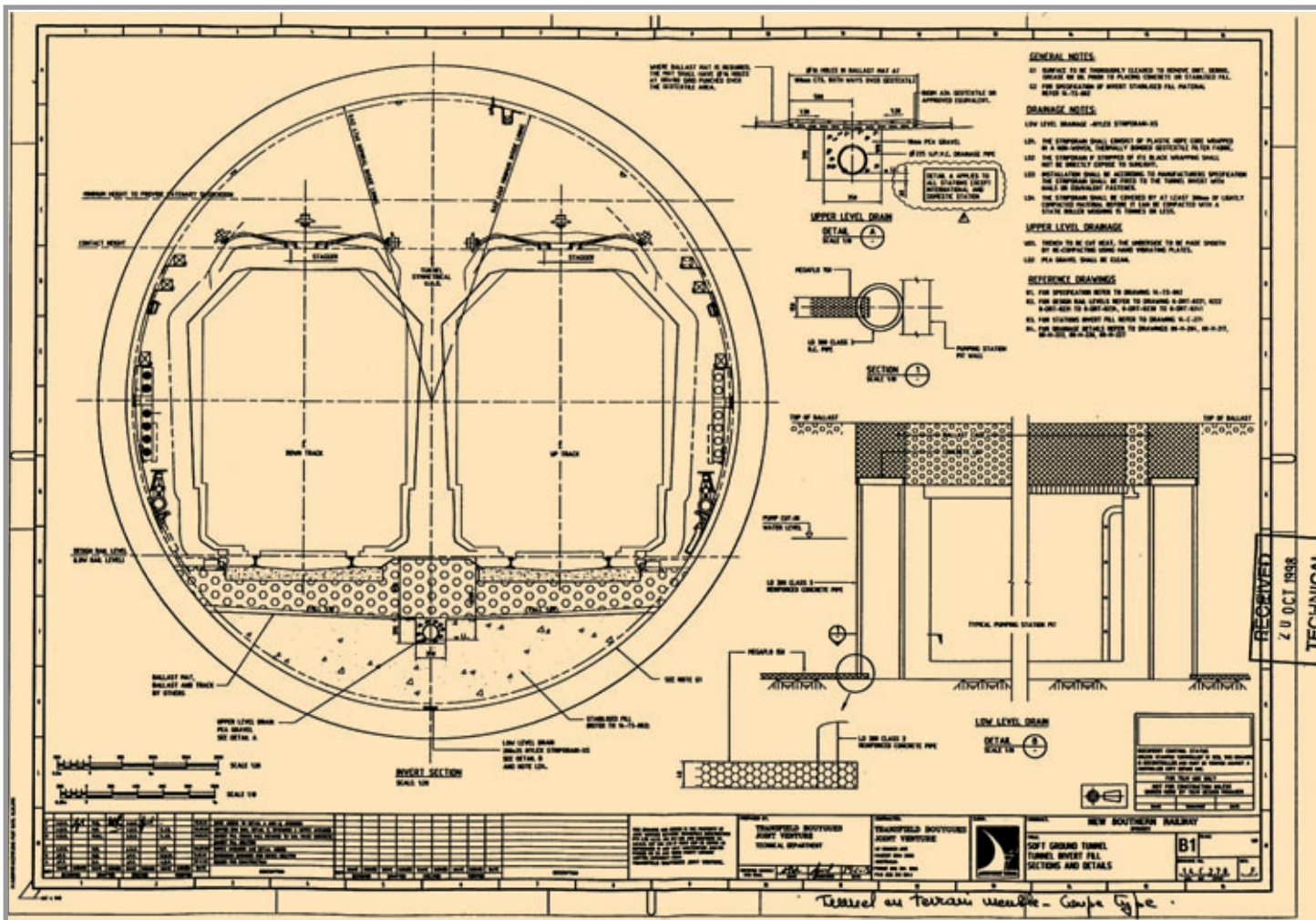


Photo 3
Station d'interconnection
de Wollri Creek.
Vue de l'escalier latéral
vers les quais du NSR

*Wollri Creek interchange
station. Showing the side
stair to the NSR platforms*



Photo 4
Station d'interconnection
de Wollri Creek. Ligne
d'Illawarra avec le cadre
enterré des quais du NSR
en dessous

*Wollri Creek interchange
station. Illawarra line
platform with NSR platform
box passing beneath*



Photo 5
Rampe de East Hills.
Connection sud entre
le NSR et le système
existant. Le NSR émerge
de dessous des lignes
d'Illawarra

*East Hills ramp.
The southern connection
between the NSR and the
existing rail system.
The NSR emerges from
beneath the Illawarra lines
in the concrete structure*



► Communications et commande dans le tunnel

La structure de base des communications s'articule autour, notamment, d'un câble à fibres optiques qui court tout le long du tunnel NSR et se raccorde au réseau existant.

La redondance de la structure de base sera obtenue par l'utilisation partagée d'une liaison de transmission RAC existante via la surface, entre les stations Wollri Creek et Central, et par le nouveau câble de transmission propre à NSR qui doit être installé dans le tunnel. La structure assurera les liaisons phonique et données entre les stations, vers la salle de contrôle de l'Airport Link Company (ALC) à Mascot et vers les réseaux SRA (State Rail Authority) et RAC.

Les équipements de télécommunication installés dans le tunnel incluent les postes d'appel d'urgence incendie, placés tous les 120 m des deux côtés

du tunnel et les postes d'appel d'urgence des trains, placés au niveau des signaux et/ou à 5 mn à pied. Les communications radio dans le tunnel incluent la radio du train, la radio publique et la radio de la police; elles sont reçues et transmises par un câble coaxial rayonnant, courant le long du tunnel.

Ventilation du tunnel

La totalité du tunnel est équipée d'un système de ventilation mécanique destiné à réguler la température en cas de congestion sur les lignes et la fumée en cas d'incendie.

Le système de ventilation du tunnel est constitué de seize accélérateurs (ventilateurs de type axial) totalement réversibles, situés, par groupes de deux, à chaque extrémité des quatre caissons des stations souterraines, à l'exception de la station Green Square, où deux puits de ventilation séparés ont été excavés juste au nord et au sud de la station. En fonctionnement normal, les puits de ventilation assurent la chute de la pression pour compenser l'effet de piston créé par la circulation des trains. Si le fonctionnement le requiert, les accélérateurs peuvent être utilisés soit en mode soufflage soit en mode aspiration.

Tous les accélérateurs du tunnel sont équipés d'un système de surveillance des vibrations de manière à assurer une détection précoce des défauts éventuels. Le système de surveillance et d'acquisition des données assure la surveillance de la ventilation.

Protection incendie dans le tunnel

Le tunnel est équipé d'une canalisation sous pression, avec des poteaux incendie situés alternativement tous les 60 m de part et d'autre du tunnel. L'eau est amenée aux poteaux incendie depuis chacune des stations par une canalisation en boucle de 150 mm.

Drainage du tunnel

Le système d'évacuation des eaux collectées dans le tunnel est constitué de cinq stations de pompage, chacune équipée de deux pompes d'exhaure submersibles, situées entre les deux voies, à tous les points bas du tunnel. Une sixième station de pompage est installée dans le radier du caisson de la station Wollri Creek. Les eaux d'infiltration sont pompées dans des conduites montantes constituées de tuyaux de 50 mm ou de 100 mm de diamètre en acier doux galvanisé.

Air comprimé dans le tunnel

L'air comprimé pour les dispositifs d'arrêt automatique des trains est fourni par un circuit en boucle de 50 mm. Deux compresseurs fonctionnant alternativement en mode normal et en mode secours sont situés respectivement aux stations International Terminal et Mascot, assurant la redondance de l'installation.

Équipements mécaniques et électriques - Les contrats

Le groupement a passé neuf contrats de sous-traitance complexes portant sur des activités de conception et de construction afin de bien gérer le processus de conception, fabrication, installation et mise en service des équipements électriques et mécaniques. Le plus important a été conclu avec Rail Services Australia (RSA). Évalué à plus de 70 millions de dollars australiens, il constitue effectivement le contrat de sous-traitance le plus important passé dans le cadre du projet et couvre les travaux des voies, les caténaires, l'alimentation électrique, les communications et les commandes – y compris la surveillance et l'acquisition des données – pour les stations et le tunnel. RSA installera également les systèmes de sécurité clés du réseau et des stations relevant du contrat, systèmes incluant la détection incendie, le circuit interne de télévision pour toutes les stations, la communication radio pour la police et SRA et les systèmes d'information des passagers. Le projet détaillé concernant les équipements mécaniques du tunnel est en grande partie achevé. Des contrats de fourniture individuels ont été passés pour une vaste gamme de matériel. L'installation sera réalisée par le groupement et concernera plus de 50 km de tuyauteries pour l'installation d'air comprimé, le système de signalisation, la protection incendie, les pompes d'exhaure du tunnel, les conduites montantes, les compresseurs et six stations de pompage.

L'installation hydraulique des stations inclut les pompes, les déshuileurs, les systèmes de contrôle du pH et les tuyaux. Elle est en cours de réalisation par Fire Control, dans le cadre d'un autre contrat de sous-traitance. Les systèmes de protection incendie des stations, quant à eux, sont fournis par Metropolitan Fire Services. Ils comportent les *sprinklers*, les poteaux incendie des stations, les RIA et les extincteurs portatifs.

Les ascenseurs et les escaliers mécaniques de toutes les stations sont fournis par Schindler Lifts Australia, qui fournira et installera également le trottoir roulant dans le tunnel d'accès piétons entre la station Domestic Terminal et le bâtiment Qantas de l'aérogare.

Deux autres contrats de sous-traitance clés concernent les systèmes de ventilation du tunnel et des stations et la climatisation de ces dernières. Ces deux contrats ont été attribués à Southern Air Conditioning. Les travaux des structures en surface des stations Green Square et International Terminal, sont déjà bien entamés. Les gaines de chauffage, ventilation et air conditionné des stations sont actuellement en cours d'installation dans trois des cinq stations du projet.

L'éclairage des stations souterraines de l'Airport Link sera installé par FIP, la conception étant fournie par l'éclairagiste du groupement.



Photo 6
Rampe de East Hills.
Extrémité de la structure
béton proche des lignes
existantes

*East Hills ramp. At the end
of the concrete structure
showing the proximity
to the existing lines*



Photo 7
Rampe de East Hills.
Le tunnel émerge
de dessous des lignes
d'Illawarra

*East Hills ramp. Showing
the tunnel as it emerges
from passing beneath
the Illawarra lines*

La partie sud du projet

La partie sud du projet est particulièrement complexe à cause de :

- ◆ l'espace confiné dans lequel s'inscrit la construction ;
- ◆ des questions d'environnement et de patrimoine soulevées ;
- ◆ du nombre d'infrastructures et de réseaux existants dans la zone ;
- ◆ de la très mauvaise qualité des sols pour des travaux en tranchée couverte ;
- ◆ du niveau élevé de la nappe aquifère ;
- ◆ de la proximité de lignes de chemin de fer existantes fortement circulées (photo 3).

Tout ceci a nécessité une planification et un séquençage complexes des travaux, nécessitant l'intervention sur les voies, afin de minimiser les perturbations infligées aux voyageurs.

Le groupement a divisé les travaux correspondants en quatre sections plus petites – franchissement de Cooks River, passage sous Princes Highway, gare de correspondance de Wollie Creek à North Arrcliffe (photos 3 et 4) et jonctions avec les lignes East Hills et Illawarra (photos 5, 6, 7).

Le tunnel et la station de la partie sud sont généralement réalisés en tranchée couverte, avec utilisation de batardeaux pour permettre une construction à l'abri de l'eau (photo 8).

Le groupement réalise actuellement la construction du tunnel sous le lit de Cooks River et utilise pour cela onze batardeaux circulaires, une technique qui n'avait pas été utilisée en Australie auparavant, mais qu'il a été nécessaire d'adopter afin de limiter l'embâcle à l'amont et maximiser l'accès



Photo 8
Traversée de Cooks River.
Travaux de tunnel
dans les batardeaux circulaires

*Cooks river crossing.
Work on the tunnel
inside the circular cofferdams*

Photo 9
Station Terminal International.
 Niveau hall, installation
 des plafonds architecturaux,
 des panneaux de mur
 et de l'éclairage

International Terminal station.
 Concourse level, showing
 installation of architectural
 ceiling and wall panels
 and lighting



Photo 10
Station Terminal International.
 Structure externe contenant
 les machines et la chambre
 des moteurs d'ascenseurs

International Terminal station.
 Above ground structure
 containing plant
 and lift motor rooms
 nearing completion



Photo 11
Station Terminal International.
 Escaliers de secours
 et chambre de machines
 associés

International Terminal station.
 Emergency stair exits
 and associated plant rooms



► à la zone des travaux. La fouille du tunnel est réalisée à l'intérieur de chaque batardeau jusqu'à une profondeur de 16 m sous le niveau de l'eau. La couche de 1 à 2 m de matériaux contaminés au fond du lit est draguée, le sable propre récupéré et l'eau pompée dans un bassin de décantation. Les limons contaminés y décantent puis sont pompés vers une centrifugeuse qui les réduit en plaquettes. Ils sont alors évacués du site dans des camions scellés. Une fois la fouille réalisée, le tronçon du tunnel correspondant est coulé en place à l'intérieur du batardeau. Chaque tronçon a une longueur de 14 m. La fouille est ensuite remblayée avec des maté-

riaux propres et le lit de la rivière rétabli à son niveau d'origine. Le battage des palplanches du batardeau suivant peut alors commencer. Un pont temporaire a été construit sur la rivière pour permettre l'accès des camions, du personnel et du matériel (photo 8).

Le tunnel passe également sous l'une des artères les plus fréquentées de Sydney, Princes Highway. Ceci a nécessité la construction d'un pont provisoire qui permet à la voie de franchir le chantier qui se poursuit par dessous, sans être gêné.

Les stations

Dans trois des quatre stations concédées, qui sont situées dans les terrains meubles autour de l'aéroport de Sydney, tous les murs enterrés ont été réalisés par IP Foundations, filiale de Bouygues, qui a utilisé la technique des parois moulées. Peu utilisée en Australie, cette technique permet d'utiliser les murs à la fois comme blindage provisoire des fouilles et comme soutènement permanent. Dans cette technique, les planchers des stations sont construits à mesure qu'est réalisée la fouille et ils agissent comme des butons permanents. Chaque station est constituée d'environ 60 panneaux de paroi moulée. Chaque panneau a une largeur de 6,5 m, une épaisseur de 1,2 m et sa profondeur est égale à la profondeur totale de la station, généralement de l'ordre de 28 m.

IP Foundations a utilisé la plus grande fraise hydraulique de l'hémisphère Sud, amenée en Australie spécialement pour la construction des stations. La tête découpe mécaniquement le rocher sous-jacent. Cette méthode est beaucoup plus rapide, silencieuse (peu de vibrations) et plus précise que celle plus communément utilisée consistant à désagréger le rocher au trépan avant d'utiliser une benne preneuse.

La fraise utilise des molettes et une pompe à boue pour extraire en continu le sol du fond de la tranchée, en le désagrégeant et en le mélangeant à la boue bentonitique dans la tranchée. La boue, chargée de particules de sol, est ensuite pompée dans une canalisation de grand diamètre vers l'installation de dessablage du chantier. Là, la bentonite est nettoyée et renvoyée vers la tranchée tandis que les matériaux extraits sont évacués par camion benne.

Les terrassements en pleine fouille des stations en sol meuble sont tous exécutés selon la méthode *top down*. La dalle de couverture, puis la dalle immédiatement inférieure, sont mises en œuvre à mesure que l'excavation progresse vers le bas. 70 000 mètres cubes de déblais environ sont retirés de chaque site au travers des quatre ouvertures prévues dans la dalle de couverture.

Deux niveaux de butons provisoires sont installés dans le caisson après excavation. Un niveau peut être retiré une fois le radier construit, l'autre reste

en place jusqu'à ce que le tunnelier ait traversé la station, la dalle de la salle des billets étant située plus bas que les points d'entrée et de sortie du tunnelier dans chaque station.

Les matériaux autour des stations sont un mélange agressif de remblais, de boues marines et d'alluvions. On trouve une roche de bonne qualité en fond de fouille dans les stations, où les excavations sont profondes.

Dans les quatre stations souterraines considérées, la maçonnerie, les cloisons intérieures, les équipements électriques et mécaniques, les systèmes de commande et les travaux de finition sont actuellement en cours (photos 9, 10, 11, 12).

La cinquième station de la ligne, financée et exploitée par le secteur public, permettra aux habitants du sud de Sydney de se rendre aux aéroports des vols intérieurs et internationaux de l'aéroport de Sydney, sans devoir passer par le centre-ville.

Cette dernière station est stratégique pour le développement urbain. Les études d'urbanisme effectuées pour évaluer la faisabilité de la New Southern Railway ont estimé que 2 800 nouveaux emplois et 2 500 nouvelles habitations pourraient être créés dans

cette zone, si la station était construite. La station et la gare de correspondance amélioreront l'accès transrégional et encourageront par ailleurs, les voyageurs à abandonner leurs voitures pour utiliser un transport public rapide et commode. Ce qui signifie moins de pollution atmosphérique, moins d'embouteillages et moins de stress pour les banlieusards condamnés à se rendre quotidiennement au centre de Sydney.



Photo 12
Station Mascot. Vue du chantier encombré par les immeubles existants et les approvisionnements réservés au tunnelier

Mascot Station. Showing the congested site due to proximity of existing buildings and use of this station as supply point for TBM

ABSTRACT

Sydney metro. Ten kilometres of new line between the city centre and the airport

D. Miller

The Transfield-Bouygues consortium is currently handling the design and construction of the New Southern Railway (NSR), a new underground metro line 10 km long which will link the centre of Sydney to the airport and will extend the capacity of the existing suburban network.

Four new underground stations are to be built, two in the southern part of the city and two at the Sydney airport, respectively at the domestic and international air terminals. This new line will also be connected to the existing suburban network, the latter being carried out, on the one hand, at the level of the Central Station near Turrella, on the East Hills line, and at the level of the new transfer station on the Illawarra line, at North

Arncliffe, on the other. The present article describes the works completed in connection with the project, and in particular the installation of tunnel drainage structures and the design, manufacture and installation of mechanical and electrical equipment, in the tunnel as well as in the stations. The article also describes the complex works of the southern part and the construction of the five stations planned.

DEUTSCHES KURZREFERAT

Die U-Bahn von Sydney Zehn Kilometer U-Bahn- Neubau zwischen Stadtmitte und Flughafen

D. Miller

Die Arbeitsgemeinschaft Transfield-Bouygues ist derzeit mit der Konzeption und dem Bau der zehn kilometer langen neuen U-Bahn-Linie, dem New Southern Railway (NSR), zwischen dem Stadtzentrum von Sydney und dem Flughafen beschäftigt, die eine Kapazitätserweiterung des vorhandenen Vorstadtnetzes zum Ziel hat. Vier neue unterirdische Bahnhöfe werden errichtet, zwei in den südlichen Stadtteilen

und zwei am Flughafen Sydney (jeweils am Terminal der Binnen- bzw. internationalen Flüge). Die neue Linie wird auch mit dem vorhandenen Vorstadtnetz verbunden : im Central Station bei Turrella mit der Linie East Hills und in einem neuen Anschlußbahnhof in North Arncliffe mit der Linie Illawarra.

Im vorliegenden Artikel werden die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Maßnahmen beschrieben, insbesondere die Installation der Tunneldrainierstrukturen sowie die Konzeption, Fertigung und Montage der mechanischen und elektrischen Ausrüstungen im Tunnel und in den Bahnhöfen. Desweiteren kommen die komplexen Bauwerke des südlichen Teils und die Errichtung der insgesamt fünf geplanten Bahnhöfe zur Sprache.

RESUMEN ESPAÑOL

Metro de Sydney Diez kilómetros de nueva línea entre el casco urbano y el aeropuerto

D. Miller

El grupo Transfield-Bouygues lleva actualmente a cabo el establecimiento del concepto y la construcción de la New Southern Railway (NSR), nueva línea de metro subterránea de 10 km de longitud, que pondrá en comunicación el centro de Sydney con su aeropuerto y ampliará la red de cercanías existente. Se habrán de construir también cuatro nuevas estaciones subterráneas, dos de ellas en la parte sur de la ciudad, y dos en el aeropuerto de Sydney respectivamente para los terminales de los vuelos interiores y de los vuelos internacionales. Asimismo, esta nueva línea estará conectada con la red de cercanías existente, que se efectuará, por una parte al nivel de la estación central (Central Station) cerca de Turrella, en la línea East Hills, y al nivel de una nueva estación de correspondencia en la línea Illawarra, en North Arncliffe, por otra parte. En el presente artículo se describen las obras ejecutadas en el marco del proyecto, y fundamentalmente, la instalación de las estructuras de drenaje del túnel y el diseño, la fabricación y la instalación de los equipos mecánicos y eléctricos, tanto en el túnel como en las estaciones. El artículo trata también de las estructuras complejas de la parte sur y de la construcción de las cinco estaciones proyectadas, en total.