

# Travaux

n° 792

## EUROPE

- Portugal. Autoroute Scut Interior Norte. Soutènements de grande hauteur
- Allemagne. 300 km/h sur voie béton entre Cologne et Francfort
- Tchernobyl. Réalisation du nouveau centre de stockage
- Dublin. Une paroi de soutènement hybride pour le quai Sir John Rogerson

## AFRIQUE

- Egypte. Centrale EDF de Port Said
- Egypte. La construction de la Grande pyramide

## AMÉRIQUE DU NORD

- Quai 400, port de Los Angeles
- Sacramento. Etanchement de la digue rive droite de l'American River

## AMÉRIQUE DU SUD

- Le plus long minéroduct du monde dans les Andes

## INTERNATIONAL

- Innovation et international

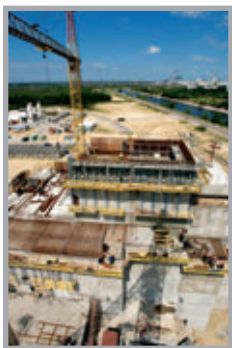
# International



# sommaire

**Travaux**  
numéro 792

décembre 2002  
**International**



## Notre couverture

Le nouveau centre  
de stockage de Tchernobyl

© VINCI Construction Grands Projets

## DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

Roland Girardot

## RÉDACTION

Roland Girardot et Henry Thonier  
3, rue de Berri - 75008 Paris  
Tél. : (33) 0144 13 31 44

## SECRÉTAIRE DE RÉDACTION

Françoise Godart  
Tél. : (33) 0241 18 11 41  
Fax : (33) 0241 18 11 51  
Francoise.Godart@wanadoo.fr

## VENTES ET ABONNEMENTS

Olivier Schaffer  
9, rue Magellan - 75008 Paris  
Tél. : (33) 0140 73 80 05  
revuetravaux@wanadoo.fr

France (11 numéros) : 163 € TTC  
Etranger (11 numéros) : 200 €  
Etudiants (11 numéros) : 56 €  
Prix du numéro : 20 € (+ frais de port)

## MAQUETTE

T2B & H  
8/10, rue Saint-Bernard - 75011 Paris  
Tél. : (33) 0144 64 84 20

## PUBLICITÉ

Régie Publicité Industrielle  
Isabelle Duflos  
61, bd de Picpus - 75012 Paris  
Tél. : (33) 01 44 74 86 36

Imprimerie Chirat  
Saint-Just la Pendue (Loire)

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

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

## Éditions Science et Industrie S.A.

3, rue de Berri - 75008 Paris  
Commission paritaire n° 0106 T 80259

## éditorial

Daniel Tardy

## actualités

## matériels

## PRÉFACE

Jean Monville

## EUROPE

◆ Autoroute Scut Interior Norte - Portugal. Soutènements de grande hauteur. Techniques Terramesh® et Géogrilles  
- *Scut Interior Norte Motorway - Portugal. Very high supporting structures. Terramesh® and Geogrid techniques*

R. Matras

◆ Allemagne. 300 km/h sur voie béton entre Cologne et Francfort  
- *Germany. 300 kph on concrete track between Cologne and Frankfurt*

P.-O. Boutin

◆ Réalisation du nouveau centre de stockage de Tchernobyl. 3 000 tonnes de combustible nucléaire usé à entreposer pour un siècle  
- *Construction of the new Chernobyl storage centre. 3,000 tonnes of spent nuclear fuel to be stored for a century*

M. Hasenohr, J.-L. Le Mao

◆ Conception et réalisation d'une paroi de soutènement hybride pour le quai "Sir John Rogerson", à Dublin  
- *Dublin. The design and construction of a hybrid retaining wall at Sir John Rogerson's Quay*

P.A. Kingston, T. Brown

## AFRIQUE

◆ Centrale EDF de Port Said en Egypte. Le défi des travaux maritimes  
- *EDF power station at Port Said, Egypt. The challenge of maritime works*

P. Gauthier

◆ La construction de la Grande Pyramide. La seule méthode plausible  
- *Construction of the Great Pyramid. The only plausible method*

J.-P. et H. Houdin





# Sommaire

décembre 2002

International

Dans les prochains numéros

**Ponts**

**Travaux**

**souterrains**

**Routes**

**Recherche**

**et innovation**

**Terrassements**

**Sols**

**et fondations**

**Environnement**

**Travaux urbains**

**Réhabilitation**

**d'ouvrages**



## AMERIQUE DU NORD

◆ Quai 400, port de Los Angeles. Le chantier du futur  
- Pier 400, Port of Los Angeles. Project for the future

Fr. Chaignon

59



◆ Sacramento (Californie). Etanchement de la digue  
rive droite de l'American River par une paroi sol - ciment -  
bentonite

- Sacramento (California). Sealing the levee on the right  
bank of the American River with a soil-cement-bentonite  
wall

L. Aubert, N. Willig

63



## AMERIQUE DU SUD

◆ Un minéroduct dans les Andes. Le plus long  
"minéroduct" du monde

- A mineral pipeline in the Andes. The longest  
"mineral pipeline" in the world

Y. Pasquier

76



## INTERNATIONAL

◆ Innovation et international

- Innovation and international activities

V. Cousin

80

**répertoire  
des fournisseurs**

87

**ABONNEMENT  
TRAVAUX**

Encart après p. 48

Les entreprises du SEFI ont réalisé en 2001 un chiffre d'affaires à l'international de 17,5 G €. Ce chiffre, à périmètre constant, représente une progression de 4,2 % de l'activité par rapport à l'année 2000. A elles seules, ces entreprises réalisent à l'export près de 15 % de la totalité du chiffre d'affaires de

la construction en métropole (120 G €).

La progression de l'activité réalisée à l'international semble même s'accélérer ces dernières années puisque nous constatons un taux de croissance de 18,2 % entre 1999 et 2001 alors que nous n'avions eu que 11 % de croissance entre 1997 et 1999.

La part des activités internationales de ces entreprises reste relativement constante ces dernières années, autour de 40 % de leur chiffre d'affaires.

### Quels enseignements peut-on tirer de ces quelques données chiffrées (cf. tableau I) ?

- Le terrain de ce développement international, bien que relativement stable se déplace cependant vers les pays développés ou proches.

L'Europe, au sens large, plus l'Amérique du Nord représentent actuellement 69 % (54 % pour l'Europe et 15 % pour l'Amérique du Nord) du chiffre d'affaires international de nos entreprises, suivie de l'Afrique qui arrive en troisième position avec 11,3 % et de l'Asie Océanie avec 10,6 %.

Rappelons que l'Amérique du Nord et l'Europe représentent à elles seules plus de 50 % du marché mondial de la construction estimé

**Tableau I**  
Répartition du chiffre d'affaires international des membres du SEFI (en G €)

	1999		2001		Evolution en %
	CA	%	CA	%	
Amérique du Nord	1,93	13	2,67	15	+ 38
Asie Océanie	1,72	12	1,86	11	+ 8
Moyen Orient	0,61	4	0,54	3	- 12
Afrique	2,22	15	1,98	11	- 11
Amérique Latine	0,55	4	0,64	4	+ 16
Autres pays d'Europe	1,31	9	2,52	14	+ 92
Union européenne	6,12	41	6,91	40	+ 13
Autres	0,31	2	0,34	2	+ 10
<b>Total</b>	<b>14,77</b>	<b>100</b>	<b>17,46</b>	<b>100</b>	

à près de 3 000 G €.

- Il faut noter, à l'intérieur de l'Europe, le développement spectaculaire des activités de nos entreprises en Europe de l'Est avec une croissance de près de 92 % entre 1999 et 2001 mais également la baisse de nos activités au Moyen-Orient et en Afrique.

- Sur le plan sectoriel, les infrastructures de transport représentent le premier secteur d'activités des entreprises du SEFI devant le bâtiment, le génie civil, l'environnement et l'énergie.

- Nos entreprises deviennent plus sélectives sur la grande exportation et cherchent à intervenir plus en amont sur les programmes d'investissement. Par ailleurs, on constate une recherche constante d'activité récurrente. L'orientation vers les concessions de travaux

dans les pays développés est une tendance générale de développement.

- Il faut noter également un changement de mode opératoire de nos entreprises qui travaillent de plus en plus à travers des filiales locales bien établies dans les pays développés et très souvent dirigées par des locaux. Plus de 70 % de l'activité internationale de nos entreprises sont réalisés par ces filiales locales. Malgré tous les bouleversements économiques et structurels rencontrés par notre secteur ces dernières années, nos entreprises ont su rester le leader européen en matière de réalisations à l'international devant l'Allemagne et le Royaume Uni.

Nos entreprises ont à faire face à un grand défi – le défi européen. Les interpénétrations déjà évidentes de

nos marchés européens, les réglementations communautaires et un certain sens de l'histoire feront de l'Union européenne notre marché national. Les nouvelles formes de marchés (concessions, PPP, PFI, partenariats...) exigeront de nos entreprises des capacités de réaction et de créativité rapides.

Elles ont déjà prouvé dans le passé leurs capacités d'adaptation et nul doute qu'elles sauront encore relever les défis nombreux auxquels elles seront confrontées.

En Asie, en Amérique du Sud et à l'Est de l'Europe, l'élévation des compétences et du savoir-faire des entreprises locales rendra encore la tâche plus difficile dans l'hypothèse d'une intervention directe de nos entreprises, notamment pour les marchés traditionnels de construction.

Le Moyen-Orient et l'Afrique, pour des raisons très différentes et bien connues resteront, à moyen terme, des zones difficiles.

La recherche de valeur ajoutée, les apports technologiques, la fidélisation de nos grands clients, les partenariats sur le long terme et le développement des services resteront des valeurs de dévelop-



■ **JEAN MONVILLE**  
Président du SEFI



# Interior Norte hauteur et Géogrilles

**Rémy Matras**

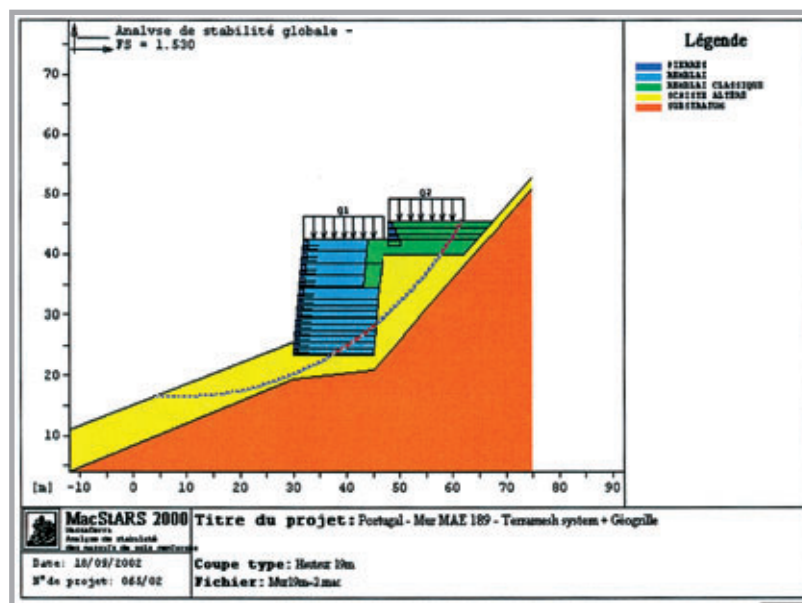
INGÉNIEUR ÉTUDES  
France Gabion



mixte remblai/déblai sur de fortes pentes naturelles, utilisation de matériaux de remblai du site, dimensionnement des ouvrages sous conditions statiques et sismiques...

Développé sous environnement Windows, le logiciel Macstars permet d'analyser la stabilité des massifs de sol renforcé (figure 3), ouvrages dont la bonne tenue est assurée par l'insertion de renforts capables de reprendre des efforts de traction. De plus, Macstars permet d'effectuer des vérifications de stabilité par la méthode de l'équilibre limite pour des pentes naturelles ou pour des talus renforcés.

Le logiciel offre le choix entre différents types de renforts : grillage métallique, géogrilles de renforts ou géotextiles, dont il intègre les caractéristiques mécaniques intrinsèques (résistance à la traction, facteurs de sécurité, module de déformation...). Les calculs sont menés selon la méthode des tranches (Bishop ou Janbu).



## LE CHANTIER

Les travaux en cours sont effectués par le groupe Eiffage pour ce qui est des terrassements, alors que le parement minéral des ouvrages est réalisé par l'entreprise Gabimarao, spécialiste portugais de la réalisation d'ouvrages en gabions (photos 1 et 2).

Le remplissage du parement minéral utilise des pierres de 80 - 200 mm de granulométrie, qui sont issues de déblais rocheux du tracé : cela permet la réalisation d'ouvrages de soutènement qui s'intègrent au mieux dans leur environnement du fait de la teinte locale des pierres, malgré leur grande hauteur. L'aspect environnemental est donc un avantage important de cette technique.

Les granulats sélectionnés sont arrangés manuellement au parement extérieur afin d'assurer un remplissage optimal, ainsi qu'une bonne esthétique finale de l'ouvrage. Le remplissage de l'intérieur du gabion est réalisé mécaniquement. Un géotextile anti-contaminant est disposé à l'interface entre le parement arrière du gabion et le remblai structural, afin d'éviter la fuite de fines. Le remblai technique est ensuite réalisé.

Les nappes de renfort en géogrilles sont disposées à l'arrière des gabions dans le remblai structural du massif. En raison de la hauteur importante de certains ouvrages, plusieurs types de géogrilles sont utilisées : leur résistance va de 200 kN/ml à 400 kN/ml, pour des longueurs maximales proches

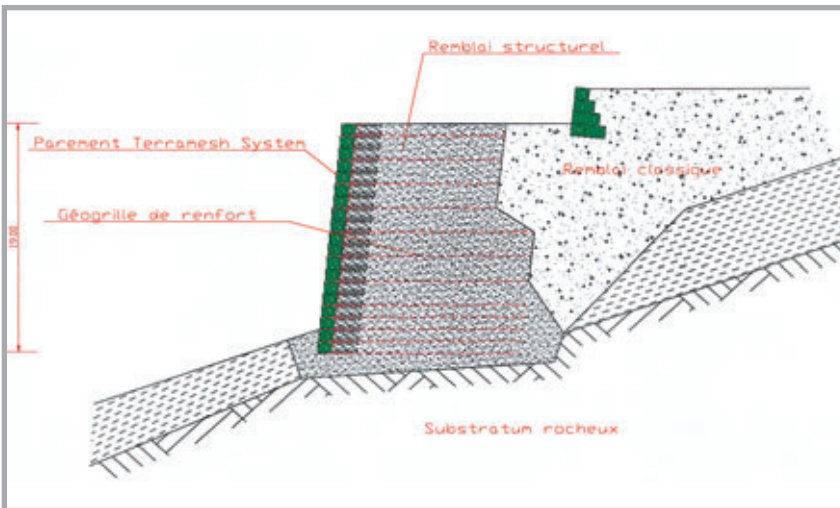


Photos 1 et 2  
Photos de chantier  
Site photos



de 20 m. Etant livrées par rouleaux, leur mise en place est simple et rapide. Le déroulement et le découpage ne nécessitent aucun outillage particulier ou personnel spécialisé.

Les matériaux constituant le remblai entrent directement dans la constitution même de l'ouvrage. Ils ont donc une influence directe sur le comportement de la structure. Les critères de choix portent sur leur constitution, leur insensibilité à l'eau, leurs performances mécaniques et plus spécialement leur angle de frottement interne dont dé-



**Figure 4**  
Coupe de principe  
*Schematic cross section*



pend le dimensionnement de l'ouvrage. La courbe granulométrique doit répondre à plusieurs critères afin d'obtenir un angle de frottement interne d'au moins 35°, valeur qui a été retenue pour le dimensionnement des massifs.

Des dispositions particulières d'exécution sont utilisées, à chaque étape de la construction, pour s'assurer que la géométrie finale du parement est conforme à celle requise par la conception. De telles dispositions comprennent le réglage des éléments de parement selon les alignements horizontaux et verticaux, la mise en place de coffrage du parement et de tirants internes (photo 3 et figure 4).

## CONCLUSION

Le projet d'autoroute Scut Interior Norte, en cours de réalisation dans le nord du Portugal, met en évidence les nombreux avantages des remblais renforcés de type Terramesh® : réalisation d'ouvrages de soutènement de grande hauteur, utilisation de matériaux du site, et très bonne intégration du parement minéral dans l'environnement.



**Photo 3**  
Vue de l'ouvrage  
MAD 171  
*View of structure*  
MAD 171

## ABSTRACT

**Scut Interior Norte Motorway - Portugal**  
**Very high supporting structures. Terramesh® and Geogrid techniques**

*R. Matras*

Supporting structure techniques involving reinforcement of the soil mass are very extensively employed nowadays, because they give a very worthwhile construction cost/technical performance ratio, especially in the case of very high supporting structures.

From this twofold viewpoint of reliability and limitation of the final production cost, the construction of the Scut Interior Norte motorway (Vila Real - Regua section), on which work is in progress, is the scene for implementation of numerous very high supporting structures (15 to 24 m) of the reinforced embankment type, combining Terramesh® System techniques with a mineral facing and reinforcing Geogrids of high mechanical strength.

## RESUMEN ESPAÑOL

**Autopista Scut Interior Norte - Portugal**  
**Muros de contención de gran altura. Procedimientos Terramesh® y Georrejillas**

*R. Matras*

Los procedimientos de contención mediante refuerzos de macizos de suelo se emplean ampliamente en la actualidad, ya que permiten obtener una relación coste de ejecución/prestaciones técnicas sumamente interesante, y sobre todo, al tratarse de estructuras de contención de gran altura.

Situándose en estas miras de fiabilidad y de limitación del precio de coste final, la construcción de la autopista Scut Interior Norte (tramo Vila Real - Régua), en curso de ejecución, constituye el campo de acción de la implementación de numerosas estructuras de contención de gran altura (15 a 24 m) del tipo relleno reforzado, en que se combinan las técnicas Terramesh® System de paramento mineral y Georrejillas de refuerzo de elevada resistencia mecánica.



# Allemagne

## 300 km/h sur voie béton et Francfort

Au cours des dernières années, les chemins de fer allemands (DB AG) se sont engagés résolument dans la voie de l'innovation en matière ferroviaire. Ainsi des lignes nouvelles dédiées à la grande vitesse sont construites sans ballast. La DB AG espère ainsi amortir les surcoûts de la voie dite fixe par rapport à la voie traditionnelle en ballast par une diminution conséquente des coûts de maintenance et une plus grande disponibilité de la voie.

Pour atteindre ces objectifs, les contraintes imposées aux entreprises ferroviaires qui se sont lancées sur le marché de la voie fixe sont énormes. Depuis les études d'exécution jusqu'à la mise en œuvre, la qualité est omniprésente.

Cela concerne bien évidemment les matériels et matériaux utilisés à tous les stades de la réalisation, avec une mention spéciale pour la topographie et les tolérances d'implantation de la voie dont la précision doit atteindre le millimètre.

Le niveau de qualité requis doit permettre à la DB AG d'exploiter les lignes avec voie fixe dans des conditions économiques satisfaisantes et d'apporter aux utilisateurs de l'ICE un niveau de confort optimal à 300 km/h.

### LES PRINCIPAUX INTERVENANTS - LOT B

#### Pilotage technique du projet

Spie Enertrans

#### Pilotage commercial et administratif

Eichholz

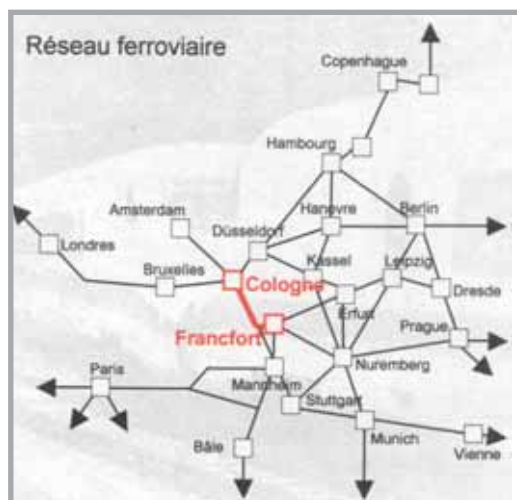


Figure 1  
Situation de la ligne Cologne-Francfort en Europe  
Position of the Cologne-Frankfurt line in Europe

### INTRODUCTION

La Deutsche Bahn AG (DB AG) a programmé dans les années 80 la construction de la ligne grande vitesse destinée à terme à s'intégrer dans le réseau européen. Le programme initial a sûrement été perturbé par la réunification des deux Allemagne intervenue en 1989 et l'importance des financements nécessaires à la reconstruction des infrastructures dans l'ex-Allemagne de l'Est.

Néanmoins, la DB AG lance en 1986 les études préliminaires d'une ligne nouvelle reliant la ville de Cologne à celle de Francfort-sur-le-Main (figure 1 et photo 1) : il s'agira d'une ligne grande vitesse permettant à des trains ICE (l'équivalent du TGV) de relier les deux villes à une vitesse commerciale de 300 km/h et ce en 1 h 10 min (2 h 15 étant nécessaires jusqu'à présent).

Par sa configuration, cette ligne s'apparente à celle du TGV Nord, notamment par son jumelage avec une autoroute. Mais la comparaison s'arrête là, car la ligne nouvelle "Köln-Rhein/Main" a la particularité d'être dépourvue de ballast. En effet, dès l'origine la DB AG projette de construire une voie fixe (Feste Fahrbahn) ou autrement dit voie sans ballast. Ce n'est pas la première fois que la DB a recours à cette solution dont elle n'a cessé d'explorer les possibilités depuis plusieurs années. Plusieurs systèmes ont été développés et construits en Allemagne. On distingue deux grandes catégories de voie fixe : les voies avec assise béton et les voies avec assise asphaltée. Lors du lancement de l'appel d'offres en 1996, la DB AG décide que la voie

sera de type Rheda, c'est-à-dire avec une structure monolithique en béton.

### LE LOT B

L'ensemble du projet d'une longueur totale de 219 km se décompose en trois parties :

- ◆ au nord les voies d'accès sur la ville de Cologne y compris une bifurcation sur l'aéroport Cologne/Bonn;
- ◆ au centre la ligne nouvelle d'une longueur d'environ 140 km destinée à être circulée à 300 km/h, qui fera l'objet de trois lots de travaux (A, B et C);
- ◆ au sud les voies d'accès vers la gare de Francfort y compris une gare intermédiaire desservant l'aéroport de Francfort.

C'est en mai 1998 que Spie sera consultée par un consortium de 13 entreprises piloté par la société Hochtief pour la construction de la voie fixe sur les 43 km du lot B. Le contrat nous sera attribué en juillet 99. Il s'agit d'un contrat forfaitaire et fonctionnel pour les études, la fourniture et la construction d'une voie fixe permettant à des trains de circuler à une vitesse commerciale de 300 km/h  $\pm$  10 %.

Le type de voie fixe proposé et retenu par le consortium en accord avec la DB AG est le système Rheda Berlin HG (HG = Hochgeschwindigkeitsverkehr), c'est-à-dire à grande vitesse.

### LA VOIE FIXE RHEDA BERLIN HG

Spie s'intéresse dès le début des années 90 au marché allemand des infrastructures ferroviaires. En 1994, l'entreprise se lance dans le développement et la réalisation d'une voie fixe. Il s'agit de trouver une solution technique compétitive pour le renouvellement d'un tronçon de 8,8 km dans le centre de Berlin. C'est ainsi que naît le système Rheda Berlin, système développé en collaboration avec la société Pfeleiderer, fournisseur allemand de traverses. L'originalité du système consiste en l'utilisation de traverses bibloc en remplacement des traverses monobloc traditionnellement prescrites. Fort de cette expérience, nous décidons en 1995 de poursuivre nos développements afin de pouvoir proposer à la DB AG un système de voie homologué pour la grande vitesse et adaptable à tous les types de structure : terrassement, pont, tunnel. Ce fut fait en juillet 1996 avec l'agrément obtenu de l'EBA, organisme de contrôle technique ferroviaire



# entre Cologne

allemand, pour la construction sur le réseau de la DB AG du système Rheda Berlin HGV, qui fait l'objet d'un brevet.

## ■ DESCRIPTION DU SYSTÈME RHEDA BERLIN HGV

Le système peut être assimilé à une poutre en béton armé continue et monolithique. Des interruptions sont nécessaires pour franchir des ponts d'une longueur supérieure à 25 m et dans les zones d'appareils de voie (figure 2).

Le système consiste, en :

- ◆ 1 couche de fondation (HGT) traitée au liant hydraulique d'une épaisseur minimum de 30 cm ;
- ◆ 1 auget en béton d'une épaisseur minimum de 18 cm, armé à 0,8 % ;
- ◆ de traverses bibloc équipées d'attaches Vossloh 300.1 dont la base de la traverse n'a pas été bétonnée de manière à permettre une liaison optimale entre l'armature des traverses et le béton de remplissage ;
- ◆ d'un béton de remplissage y compris quatre aciers filants placés au milieu et à l'extrémité des traverses, destiné à maintenir les traverses dans leur position définitive et à assurer le monolithisme de l'ensemble.

## ■ LES BÉTONS

La construction de la voie fixe en respectant les critères de qualité et les normes en vigueur implique une maîtrise parfaite de la technologie du béton. Elle commence par une bonne gestion des problèmes de logistique. Afin de réduire les temps de parcours entre la production et la mise en œuvre sur le chantier, il a fallu produire le béton à proximité du tracé.

Pour cela des centrales à béton qui avaient déjà été implantées pour les travaux de génie civil ont été utilisées et nous avons imposé à notre fournisseur la construction d'une nouvelle centrale afin de limiter les temps de transport à 45 minutes quelle que soit la partie du tronçon à alimenter.

Autre élément essentiel également : la qualité du béton. Deux types de béton ont été nécessaires pour la construction de la voie fixe. Premièrement, une couche de fondation de type grave-ciment a été réalisée suivant la norme ZTV-Beton StB 95. Cette couche de fondation a une hauteur minimale de 30 cm. Il a été cependant nécessaire dans

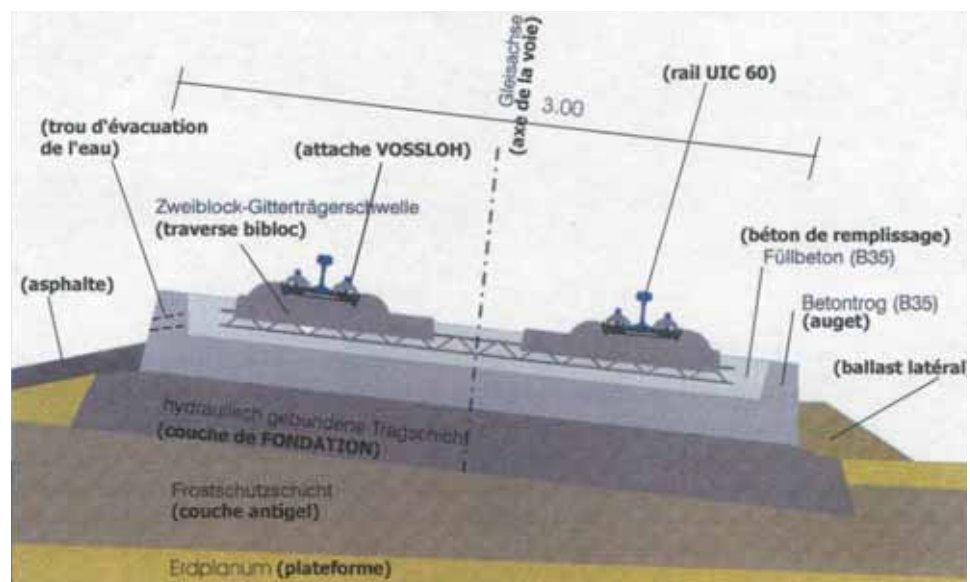


**Photo 1**  
Voie fixe Rheda Berlin HGV terminée

**Completed Rheda Berlin HGV rigid track**

**Figure 2**  
Coupe type du système Rheda Berlin HGV

**Typical cross section of the Rheda Berlin HGV system**



certaines parties du tracé d'augmenter la hauteur jusqu'à 60 cm. Pour cette raison, l'entreprise a dû également mettre en œuvre un béton de type B 15 permettant une mise en œuvre à la slip form en plusieurs couches.

Deuxièmement, un béton de type B 35 DIN 1045 (BII) suivant la norme ZTV-STB 95 avec une grande résistance au gel a été utilisé pour la construction de l'auget et la mise en œuvre du béton de remplissage. L'adjonction d'entraîneur d'air a permis d'améliorer la résistance au gel et la maniabilité du béton en particulier pour garantir un bon enro-

**Photo 2**  
Mise en place manuelle  
du béton de remplissage

*Manual laying  
of filler concrete*



**Photo 3**  
Construction de l'auget  
à la slip form

*Trough construction  
by slip-form paver*



**Photo 4**  
Construction  
de la couche de fondation  
à la slip form

*Construction  
of the foundation course  
by slip-form paver*



► bage des traverses lors de la mise en place du béton de remplissage (photo 2).

Un autre facteur essentiel lors de la construction d'une voie fixe est la maîtrise de la fissuration. De la maîtrise de la fissuration dépendent la qualité du produit fini et sa durée de vie. C'est avec le plus grand soin qu'il a fallu définir les différentes formulations des bétons en collaboration avec le fournisseur. En particulier, le choix des agrégats, la teneur en eau, une faible teneur en mortier et l'utilisation des adjuvants ont fait l'objet d'études ap-

profondes et de contrôles tout au long de la production. Au total une vingtaine de formulations différentes ont été nécessaires pour tenir compte en particulier des conditions de réalisation et des conditions climatiques.

De plus, lors de la mise en œuvre du béton de remplissage, il est essentiel de respecter un approvisionnement du béton toujours dans le même sens et de s'assurer de la progression du béton sous les traverses à l'aide de vibreurs (photo 2). Cette méthode permet de garantir le bon calage et l'enrobage des traverses.

Enfin, il convient de préciser les conditions dans lesquelles le curing des bétons a été réalisé, ceci également afin de maîtriser la fissuration.

La couche de fondation, l'auget et les ouvrages coffrés tels que les augets sur pont ou dalle des appareils de voie ont systématiquement été bâchés pendant 1 à 3 jours après réalisation. L'utilisation d'une bâche n'étant pas possible après coulage du béton de remplissage, ce qui aurait interdit la circulation sur la voie, Spie a choisi de pulvériser le béton frais avec une huile de paraffine assurant un coefficient d'étanchéité de 75 %.

## ■ CONSTRUCTION DE LA COUCHE DE FONDATION ET DE L'AUGET

Les partenaires du groupement ont décidé dès le démarrage du projet d'harmoniser les méthodes de construction des 88 km de couche de fondation et des 88 km d'auget.

Des machines à coffrage glissant (*slip form*) de type Wirtgen SP 500 équipées de système de guidage géodésique Leica de type LM GS - S ont été retenues. L'utilisation d'un tel système de guidage pour un projet ferroviaire était une nouveauté qui fonctionnait sur le principe suivant : deux tachymètres mobiles placés le long du tracé permettaient en permanence de définir la position des *slip form*, par référence à des points fixes implantés sur les poteaux caténaire.

Les paramètres de la section à construire étaient chargés dans un ordinateur situé à bord des *slip form*. Un échange d'informations permanent entre les tachymètres et les machines permettait une progression constante sur le tracé calculé avec, si nécessaire, corrections ; le système permettant d'agir directement sur les vérins des *slip form* (photos 3 et 4).

L'utilisation d'un système de guidage sans fil présente pour un chantier de cette ampleur beaucoup d'avantages comme par exemple :

- ◆ flexibilité : les topographes étaient en mesure de programmer et préparer une section de 500 m en 1 heure ;
- ◆ logistique : aucune contrainte concernant les accès chantier pour la fourniture du béton ;
- ◆ précision : pour la mise en œuvre de la couche

de fondation ainsi que pour la construction de l'auget des écarts de l'ordre de 3 mm en alignement et en hauteur ont été constatés, ce qui présente un énorme avantage lors de la pose de voie.

L'ensemble *slip form* + système de guidage a permis d'atteindre des cadences de 500 m pour la couche de fondation et 600 m pour l'auget par poste de 10 heures.

## ■ LE RÉGLAGE DE LA VOIE

La DB AG (Deutsche Bahn) a imposé pour la construction de la ligne Cologne - Francfort des tolérances très contraignantes en matière de réglage de la voie. Tout d'abord en valeur absolue, la voie ne pouvait varier de  $\pm 5$  mm des cotes théoriques du projet. Ensuite en valeur relative, une variation supérieure à  $\pm 2$  mm mesurée sur deux points distants de 5 m, toujours par référence au tracé théorique du projet, ne pouvait être dépassée.

C'est donc avec la plus grande attention qu'ont été sélectionnés la méthode de réglage et le concept topographique permettant de remplir ces conditions. La société Bahnbau Wels a été retenue car elle présentait l'avantage d'avoir développé un système de relevage de la voie associé au concept topographique Hergie avant bétonnage au millimètre près. Ce système consiste à placer des cales biaises sur des plots en béton reposant sur le fond de l'auget et venant au contact du patin du rail; chaque file de rail peut être relevée de manière indépendante par l'intermédiaire de ces cales. De plus, une plaquette coulissante en Téflon® située sur la partie haute de la cale permet de s'affranchir de la dilatation des rails qui avaient été approvisionnés en barres longues de 120 m. Ce dernier point fut essentiel dans le choix et la validation du système retenu. En effet, les travaux de réglage et de bétonnage de la voie ayant été réalisés au printemps et début de l'été, période de l'année où les variations de température sont les plus importantes, l'entreprise ne pouvait accepter d'induire des contraintes de dilatation dans le rail risquant de modifier la géométrie d'une voie réceptionnée avant coulage du béton (photos 5 et 6).

Le système topographique Hergie permettant de s'assurer du positionnement de la voie au millimètre près était composé d'un tachymètre associé à un dispositif télémétrique, le tout monté sur un chariot. Un ordinateur sur lequel avaient été enregistrés les paramètres du tracé – hauteur, alignement, dévers et écartement des rails –, pilotait l'ensemble et permettait en instantané de contrôler la position de la voie à chaque traverse.

L'ensemble de cette technique a donné entière satisfaction puisque lors du contrôle final de la géométrie, seulement 2 % du tracé ont fait l'objet de mesures de correction de la voie pour atteindre les tolérances contractuelles.



**Photo 5**  
Cale de relevage  
de la voie  
*Track raising wedge*



**Photo 6**  
Réglage fin de la voie  
avec le système Hergie  
*Precision adjustment  
of the track  
with the Hergie system*

## ■ LA VOIE FERRÉE

Les 86 000 ml de voie ont nécessité l'approvisionnement, le déchargement et le montage de 132 000 traverses et 172 000 ml de rails, sans oublier les opérations de soudage et à la fin des travaux la libération de la voie.

Le lot B ayant la particularité de comprendre deux gares, il a été également nécessaire d'approvisionner 24 appareils de voie, tous posés sur dalle en béton.

Pour mettre en œuvre l'ensemble du matériel ferroviaire différentes méthodologies ont été utilisées.

### Les traverses

Les augets ayant la particularité d'être circulables pour des camions, il a été retenu pour la première voie un approvisionnement par la route depuis l'usine de production directement sur le chantier. Le déchargement a été effectué par une pelle équipée d'un palonnier à traverses hydraulique permettant le déchargement de cinq traverses à la fois et la pose de celles-ci à l'écartement voulu. Celles de la deuxième voie ont été simultanément déchargées latéralement afin d'éviter ultérieurement une logistique trop lourde et peu flexible.

**Photo 7**  
Pose d'un rail  
de 120 m  
*Laying  
a 120-metre rail*



**Photo 8**  
Approvisionnement  
d'un panneau d'appareil  
de voie au portique  
*Bringing in a points  
and crossing panel  
by gantry crane*



► Dans ce cas l'approvisionnement de la deuxième voie consistait en une reprise des traverses disposées latéralement à l'aide d'une pelle rail-route.

### Les rails

Des rails en barre de 120 m ainsi que les appareils de voie ont été exclusivement livrés par chemin de fer. Pour cela Spie disposait de trois embranchements provisoires entre le réseau de la DB AG et le tracé de la ligne nouvelle. La logistique et la traction des trains étaient de la responsabilité du groupement (photo 7).

Les rails ont été soit déchargés latéralement sur le tracé puis, à l'aide de cinq pelles synchronisées, positionnés sur les traverses soit déchargés à l'avancement à l'aide d'une goulotte de déchargement frontal puis tirés sur rouleau.

### Les appareils de voie

Enfin, les appareils de voie ont fait l'objet d'une méthode de déchargement particulière. En effet, les appareils ont été livrés prémontés, certains éléments pouvant atteindre un poids de 15 t pour une longueur de 20 m. C'est la société Swietelsky qui a été missionnée car elle dispose d'un portique automoteur Plasser capable de reprendre sur wagon de telles pièces et de les positionner au centimètre près sur le tracé (photo 8).

## LES PRINCIPALES QUANTITÉS LOT B

- Longueur du projet : 43,00 km comprenant :
  - tunnels : 11
  - ponts longs : 5
  - ponts courts : 27
  - dévers : 170 mm
  - rampe : 4 %
- Couche de fondation traitée avec liant hydraulique : 115 000 m<sup>2</sup>
- Dalle béton auget : 60 000 m<sup>3</sup>
- Béton B35 de remplissage : 34 000 m<sup>2</sup>
- Rails UIC 60 Voest Alpine (Autriche) en barres élémentaires de 110 m soudées en place électriquement : 170 000 m
- Traverses Pfeleiderer : 132 000
- Appareils de voie Butzbacher Weichenwerk (BWG) : 28

**Montant de la commande : 150 MDM**

## LES OUVRAGES D'ART

### Les ponts

Les ponts peuvent être considérés comme un projet dans le projet. Chaque pont doit faire l'objet d'une étude de détail particulière comprenant une statique et les plans d'exécution. A noter également que chaque pont nécessite avant sa construction l'obtention d'un agrément de l'EBA.

En ce qui concerne la conception de la voie fixe sur pont, deux catégories – courts et longs – peuvent être considérées.

### Les ponts courts

Les ponts dits courts ont une longueur inférieure à 24 m. Dans ce cas il y a continuité de la dalle de répartition. Trois dispositions particulières sont à prendre en compte dans la conception :

- ◆ un renforcement des aciers entre le pont et les plates-formes encadrantes ;
- ◆ la mise en œuvre d'une couche élastique et glissante afin de désolidariser le pont de la voie fixe ;
- ◆ la construction d'un ergot longitudinal sur le béton de protection du pont dans l'axe de chaque voie assurant la stabilité latérale de la voie fixe.

### Les ponts longs

Les ponts dits longs ont une longueur supérieure à 25 m. Il y a dans ce cas discontinuité entre la dalle de répartition adjacente et les augets du pont. Quatre dispositions sont à prendre en compte dans la conception :

- ◆ renforcement des dalles de répartition à la transition entre les culées de pont et la plate-forme adjacente ;
- ◆ construction de massif béton à l'extrémité de la dalle de répartition côté plate-forme afin de reprendre les contraintes dues à la dilatation ;
- ◆ construction d'augets discontinus sur le pont avec mise en œuvre d'une couche élastique et glissante entre le pont et l'auget ;
- ◆ construction d'ergots de forme carrée sur le béton de protection du pont afin d'assurer la stabilité des augets.

## CONCLUSION

Malgré des difficultés rencontrées, inhérentes à un projet de cette ampleur, ainsi que les conditions climatiques défavorables, la voie fixe fut terminée dans le délai contractuel fin septembre 2001. La DB commença les essais sur le lot B le 3 décembre 2001. Le 5 décembre, soit deux jours après le début des essais, une rame ICE atteignait la vitesse contractuelle de 300 km/h à la plus grande



Photo 9  
Rame d'essai  
ICE 3  
de la DB AG  
*ICE 3  
test train  
set of the DB AG*

satisfaction de l'entreprise (photo 9). Mais c'est seulement début août 2002 que commença le trafic commercial entre Cologne et Francfort. Cette période relativement importante que s'était réservée la DB AG entre la fin des travaux, y compris électromécaniques, et l'ouverture commerciale s'explique par le fait que Cologne - Francfort est la première ligne en Allemagne conçue pour une vitesse opérationnelle de 300 km/h. Les chemins de fer allemands souhaitent se laisser le temps de valider l'ensemble du projet en particulier la caténaire, le système de signalisation et le matériel roulant, un ICE de troisième génération développé pour ce projet.

Cologne - Francfort est présenté d'après les informations recueillies comme un grand succès technique pour la Deutsche Bahn et représente une référence importante pour le groupe de Spie qui se positionne comme un des leaders sur le marché des infrastructures ferroviaires en Europe.

### LA LGV EN CHIFFRES

- Coût total : 9,29 milliards de marks dont 7,75 milliards à la charge de l'Etat
- Longueur totale : 219 km, dont 74,7 km de déblais et 51,4 km de remblais
- 30 tunnels (47 km cumulés) et 18 viaducs (6 km cumulés)
- Rampe maxi : 40 %
- Date de mise en service : août 2002
- Vitesse : 300 km/h
- Temps de trajet Cologne - Francfort : 1 heure 10 minutes
- Fréquence : cinq trains par heure et par sens
- Gares d'arrêt : Cologne Hbf, Cologne-Deutz, aéroport Cologne-Bonn, Bonn-Siegbourg, Montabaur, Limbourg, aéroport de Francfort, Francfort, Wiesbaden, Mainz

### ABSTRACT

#### Germany. 300 kph on concrete track between Cologne and Frankfurt

*P.-O. Boutin*

In recent years, the German railway system (DB AG) has resolutely taken the path of innovation in the railway sector. For example, the new dedicated high-speed lines are built without ballast. In so doing, DB AG hopes that the extra cost of the so-called rigid track by comparison with the traditional ballast track will be covered by a major reduction in maintenance costs and greater track operating availability.

To achieve these objectives, the requirements laid down for the rail companies which have entered the rigid-track market are extremely demanding. From final design to implementation, quality is a constant watchword.

This applies of course to the equipment and materials used at all stages of construction, with a special word about topography and the track layout tolerances, for which a precision to within one millimetre must be achieved.

The quality level demanded should enable DB AG to operate the rigid-track lines in satisfactory economic conditions and should provide the users of the ICE train with an optimum level of comfort at 300 kph.

### RESUMEN ESPAÑOL

#### Alemania. 300 km/h en vía de hormigón entre Colonia y Francfort

*P.-O. Boutin*

Durante los últimos años, los ferrocarriles alemanes (DB AG) se han lanzado resueltamente hacia la innovación desde el punto de vista ferroviario. Siguiendo esta pauta, las nuevas líneas dedicadas a la alta velocidad se construyen sin balasto. La DB AG piensa, de este modo, amortizar los sobrepuestos de la vía denominada "fija" por comparación con una vía tradicional de balasto, obteniéndose una disminución apreciable de los costes de mantenimiento y una mayor disponibilidad de la vía.

Para lograr tales objetivos, los imperativos impuestos a las empresas ferroviarias que se han lanzado hacia el mercado de la vía fija son de suma importancia. Desde los estudios de ejecución hasta la implementación, la cali-

dad es omnipresente. Todo ello se refiere, evidentemente, a los equipos y materiales utilizados en todas las etapas de la ejecución, con mención especial por lo que se refiere a la topografía y las tolerancias de implantación de la vía cuya precisión debe alcanzar el milímetro.

El nivel de calidad requerido deberá permitir a la DB AG operar las líneas con vía fija en condiciones económicas satisfactorias y aportar así a los usuarios del ICE un nivel de confort óptimo a 300 km/h.

# Réalisation du nouveau de Tchernobyl 3 000 tonnes de combustible pour un siècle

C'est aux confins de l'Ukraine, de la Biélorussie et de la Russie, dans la zone d'exclusion de Tchernobyl, à 2500 m du réacteur accidenté en 1986 qu'un groupement mené par VINCI Construction Grands Projets réalise les travaux de génie civil d'un centre de stockage de combustible usé. A partir de 2005, 3 000 t de combustible nucléaire entreposées de manière provisoire seront transférées vers cette nouvelle unité qui les abritera pour cent ans en totale sécurité. Premiers travaux neufs préalables à la mise en sommeil définitive de la centrale nucléaire, ils sont conduits dans un environnement radiologique hors du commun et un contexte économique local difficile.



Figure 1  
Situation du chantier  
Work Site Location

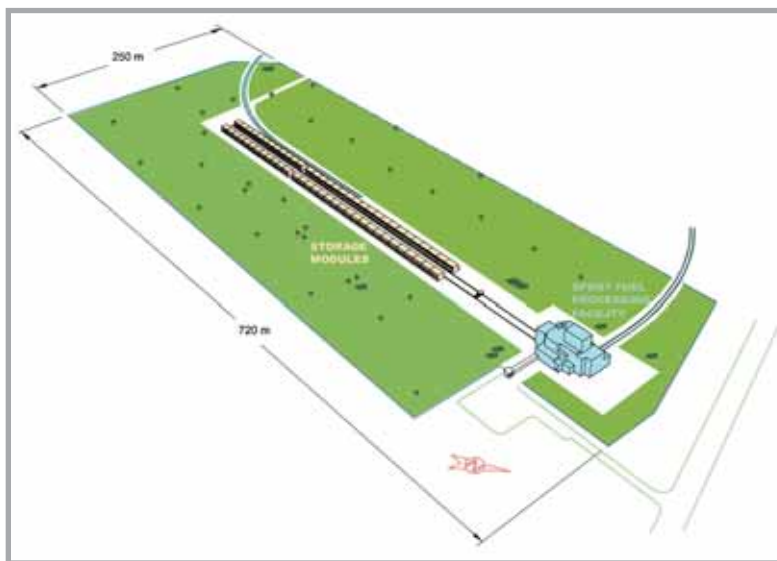


Figure 2  
Vue d'ensemble  
du site  
General  
Site View

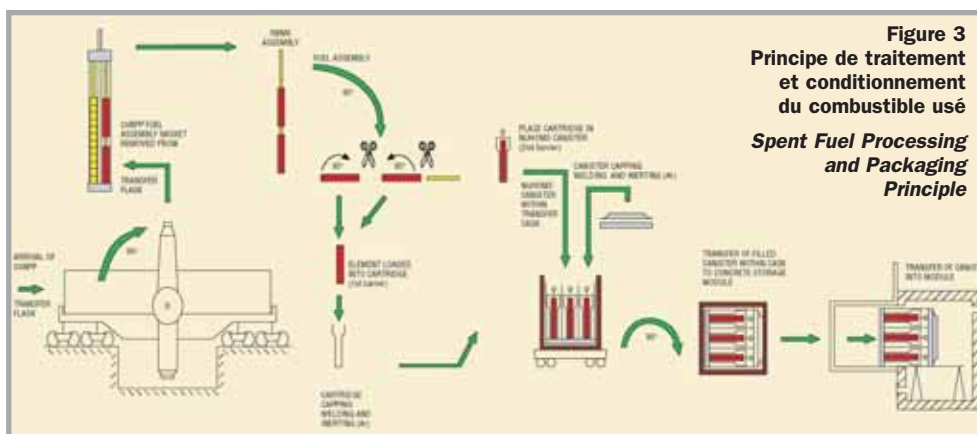


Figure 3  
Principe de traitement  
et conditionnement  
du combustible usé  
Spent Fuel Processing  
and Packaging  
Principle

## ■ RAPPEL HISTORIQUE (figure 1)

Le 26 avril 1986, le réacteur n° 4 de la centrale de Tchernobyl explosait. L'incendie s'ensuivant rejeta pendant une dizaine de jours des tonnes de matériaux hautement radioactifs dans l'atmosphère. L'Union soviétique puisa dans ses énormes ressources et mobilisa des légions pour éteindre l'incendie, évacuer et reloger les populations civiles, concevoir et construire une structure de confinement, appelée sarcophage, et créer un périmètre de sécurité de 30 km autour de celle-ci.

Cinq ans plus tard, l'Ukraine prenait son indépendance et s'ouvrait sur le monde occidental. Des scientifiques et des industriels de tous pays furent peu à peu invités par le nouvel état à réfléchir à des solutions aux problèmes posés par les conséquences de l'accident. Ce fut ainsi que Campenon Bernard, devenu aujourd'hui VINCI Construction Grands Projets, remporta en juin 1993, grâce à son projet "Resolution", un concours international d'idées pour le démantèlement du réacteur accidenté. Dans le cadre du programme Tacis, la Commission européenne commanda l'année suivante une étude plus poussée au vainqueur, associé aux autres lauréats dans un groupement nommé "Alliance".

En mai 1998, Energoatom, l'organisme ukrainien chargé de la production d'électricité nucléaire, lança un appel d'offres international pour un marché de conception-construction d'une unité de stockage de combustible usé des trois tranches 1, 2 et 3. Campenon Bernard, associé à Bouygues proposa un partenariat à Framatome pour mettre en œuvre un procédé moderne de stockage par voie sèche, dont Framatome détenait la licence. Le consortium 100 % français obtint ainsi le 7 juillet 1999 le contrat de 70 millions d'euros financé par le Fonds de Sûreté Nucléaire mis sur pied par la BERD (Banque européenne de reconstruction et développement) et doté par le G7.

Le 15 décembre 2000, tenu par ses engagements internationaux, le président de la République d'Ukraine, Leonid Koutchma, procéda à la fermeture de la tranche 3, la dernière alors encore en service à Tchernobyl.

La centrale de Tchernobyl ne produit désormais plus d'électricité; les 25 000 Ukrainiens dont le travail en dépendait ont perdu leur source de revenu, en dépit des études en cours, la zone d'exclusion de 30 km n'est pas près de reprendre vie, la situation économique ukrainienne est vacillante. C'est dans ce contexte maussade que voit le jour la première construction d'envergure sur le site de

# centre de stockage

## nucléaire usé à entreposer

Tchernobyl – et même en Ukraine, prélude indispensable à l'abandon définitif de la centrale et à son éventuel démantèlement.

### ■ PRÉSENTATION DU PROJET

(figures 2, 3 et 4)

Le combustible usé, naguère envoyé dans des centres de stockage en Russie, fut depuis 1986 entreposé sur place pour trente ans dans une "piscine" dont la construction s'acheva en même temps que celle du sarcophage. Aujourd'hui saturée, elle ne peut pas contenir les quelques centaines de barres de combustible résiduel des tranches 1 et 3, toujours en place dans le cœur des réacteurs. La solution développée et mise en œuvre par le consortium permettra le stockage des 25 000 grappes de combustible et des quelques milliers de barres de contrôle associées pour une durée de cent ans. A sa mise en service, prévue en 2005, il devrait être le plus grand centre de stockage de ce type au monde. Il s'articule autour de deux entités. L'usine, où sera conditionné le combustible, est un bâtiment de 40 x 40 x 30 m de haut dont certains voiles et planchers atteignent 1,30 m d'épaisseur afin de servir d'écran radiologique. Les pièces chaudes de cette usine répondent à des exigences réglementaires analogues à celles d'une enceinte de réacteur nucléaire. Le combustible irradié, acheminé par voie ferrée à l'abri d'un château de plomb, sera télémanipulé, découpé et placé à l'intérieur de cartouches en acier inoxydable remplies de gaz inerte et dont le couvercle sera soudé par un robot. Les cartouches seront ensuite placées par séries de 196 dans des conteneurs cylindriques alvéolés, formant une deuxième barrière radiologique, également en inox et scellés de manière analogue. Chacun des 232 conteneurs ainsi chargé pèsera une quarantaine de tonnes. Le personnel contrôlera les opérations par caméras interposées ou directement à l'abri de fenêtres en verre au plomb. Les opérations de conditionnement devraient s'étaler sur dix ans.

La zone de stockage est constituée de deux rangées de vingt-neuf casemates en béton (10 x 8 x 6 m de haut) se faisant face sur 300 m de long et appelées à contenir chacune quatre conteneurs séparés par des cloisons de 30 cm. Elles sont écartées de 25 mm les unes des autres pour éviter la continuité en cas de séisme tout en minimisant le flux de photons s'échappant à travers les parois transversales. Un système de chicanes permet une

ventilation naturelle sans fuite de radiations qui permettra d'évacuer la chaleur résiduelle du combustible.

Les conteneurs, mis à l'abri d'un château de plomb, seront transférés de l'usine vers la zone de stockage sur rail par un chariot qui assurera également leur introduction dans les casemates.

Usine et casemates sont entourées d'une triple

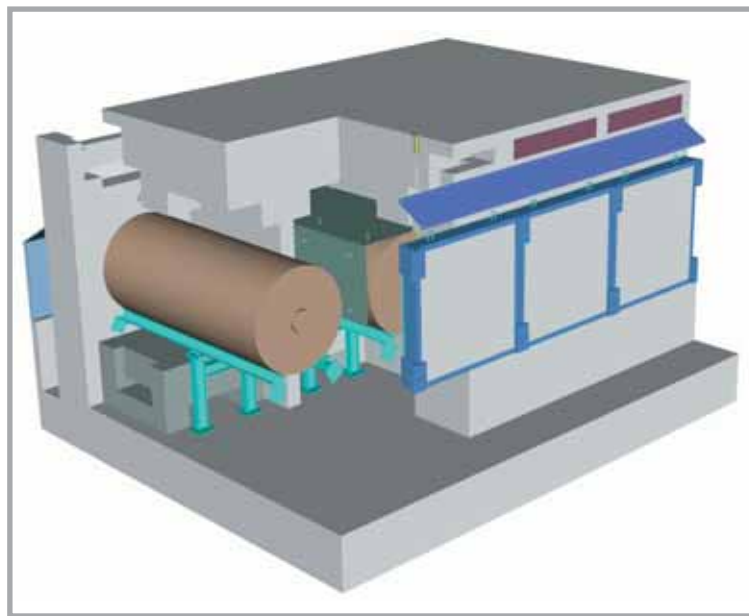


Figure 4  
Casemate  
et conteneur  
Storage Module  
and Canister

© Framatome

clôture bardée de caméras et détecteurs anti-intrusion capable d'arrêter un camion de 15 t lancé à 60 km/h.

Le consortium doit l'ouvrage clés en main, de la conception à la mise en route, ainsi que la formation des opérateurs qui en assureront le fonctionnement. Framatome, mandataire, a la responsabilité de la conception de l'ensemble du processus et est en charge de toute l'électromécanique et de la mise en exploitation de l'ouvrage. Le procédé de stockage, sous licence américaine (procédé Nu-homs "Nuclear Horizontal Monitoring System") a dû être adapté à la géométrie du combustible des réacteurs graphite-gaz soviétiques (RBMK), ce qui a nécessité la conception d'une usine de conditionnement sophistiquée où, entre autres, les longues barres de combustibles seront coupées en deux. Le client ukrainien est représenté par un maître d'œuvre délégué, PMU ("Project Management Unit"), qu'il a désigné conjointement avec la BERD. Par sa double composante ouest-européenne et ukrainienne, le PMU joue le rôle d'intermédiaire entre les concepteurs-entrepreneurs occidentaux et les

**Marc Hasenohr**



DIRECTEUR  
DES TRAVAUX  
DE CONSTRUCTION DU  
CENTRE DE STOCKAGE  
Vinci Construction Grands Projets

**Jean-Louis Le Mao**



CHEF DE PROJET.  
DIRECTEUR  
DU DÉPARTEMENT 3D  
"DÉCONTAMINATION,  
DÉMANTÈLEMENT,  
DÉCONSTRUCTION"  
Vinci Construction Grands Projets

Crédits-photos :

Photos 1 à 10 et photo 12 : groupement Vinci  
Construction Grands Projets - Bouygues TP



**Photo 1**  
Consolidation de sol  
par préchargement

*Soil Compaction through  
Surcharge Loading*



**Photo 2**  
Installations  
de chantier :  
les centrales à béton  
*Site Installation :  
the Concrete Batching  
Plants*



## CARACTÉRISTIQUES DU PROJET

### Montant du marché

70 millions d'euros

### Dates clés

- Signature du contrat : 7 juillet 1999
- Essais de sol : août-septembre 1999
- Consolidation du sol : novembre 1999 - mars 2000
- Installations de chantier : mars - septembre 2000
- Début des travaux sur l'usine : 1<sup>er</sup> juillet 2000
- Fin du gros œuvre : été 2002
- Fin des travaux de finition : printemps 2003
- Mise en service préliminaire : août 2004
- Livraison clés en main : août 2005

► autorités de tutelle et de sûreté ukrainiennes. Les travaux de construction ont été sous-traités et placés sous la supervision d'une équipe d'expatriés. A l'instar des employés de la centrale de Tchernobyl, le personnel expatrié et ukrainien du groupement est logé dans la ville de Slavoutitch, en dehors de la zone d'exclusion, à une heure de voiture à l'est du chantier via la Biélorussie.

## LES ÉTUDES

Bien que le caractère international du projet et le recours à des entreprises occidentales pour son exécution soient les garants de l'obtention d'une qualité de niveau international, les codes et standards inscrits au contrat sont ukrainiens, c'est-à-dire hérités de l'époque soviétique. Le consortium a donc décidé de se doter d'une structure mixte. La conception du génie civil fut réalisée sur la base de codes britanniques et américains par Taywood Engineering Ltd., filiale de Taylor Woodrow, bureau d'études spécialisé dans les installations nucléaires. Les plans d'exécution ont été réalisés par un bureau d'études et d'ingénierie ukrainien, Kiep, ayant une longue tradition de conception de centrales nucléaires.

Encore fallait-il être sûr que les codes de calculs

utilisés aboutissent systématiquement à des dimensionnements acceptables au regard des normes ukrainiennes. C'est pourquoi la première tâche fut d'effectuer un exercice de récolement des principales normes appropriées dans les deux systèmes pour établir les conditions dans lesquelles les BS et ACI étaient au moins aussi conservateurs que les GOST. La complexité de l'exercice liée à l'analyse d'une masse considérable de documents normatifs ukrainiens, pas tous concordants, a nécessité un effort de synthèse remarquable.

La mise au point des plans de détail, du ressort du bureau d'études ukrainien, était supervisée par une équipe mixte qui s'assurait de leur conformité au cahier des charges de Framatome, de leur compatibilité avec les méthodes de construction développées par VINCI Construction Grands Projets et du respect des règles de l'art occidentales.

## ■ GÉOLOGIE (photo 1)

Le sous-sol, caractéristique du bassin du Dniepr, est constitué d'une succession de couches sableuses plus ou moins argileuses et contenant des lentilles de tourbe, sur les 80 premiers mètres. Afin d'éviter les tassements futurs, on procéda à une consolidation du terrain par surcharge d'un poids équivalent à celui de la structure à venir. En fonction des tassements observés, la surcharge restait en place entre quinze jours et un mois avant d'être transportée au lieu suivant de préchargement. Ces opérations ont duré cinq mois et demi, les tassements obtenus n'ont pas excédé 5 cm.

## ■ UN BÉTON POUR CENT ANS

(photo 2)

La spécificité de l'ouvrage réside dans sa durée de vie et les conditions climatiques continentales (-40° C/+40° C). Les équipes de VINCI et Bouygues ont dû mettre au point un béton haute performance par sa durabilité et sa résistance aux cycles de gel/dégel, tout en employant au maximum les matériaux locaux, dont la qualité était fluctuante. Cela a conduit à la formulation d'un B40/32 contenant beaucoup de fines pour fermer le béton (perméabilité à l'oxygène  $K_{28}$  de l'ordre de  $10^{-18}$  m<sup>2</sup> et perméabilité à l'eau de 5 mm, valeurs toutes deux extrêmement faibles) et à l'adjonction d'un agent entraîneur d'air (MicroAir 104 de MBT) afin de créer un réseau de micro-bulles disjointes (espacement moyen de 250 μm) occupant environ 4 % du volume du béton, limite maximale pour ne pas entamer le pouvoir d'écran aux radiations, qui est une fonction croissante de la densité du matériau. Se défiant des ressources locales obsolètes ou hypothétiques, le groupement a décidé d'importer deux centrales à béton Imer/Oru de 30 m<sup>3</sup>/h, équi-

pées de malaxeurs verticaux de capacité nominale 1,5 m<sup>3</sup> (1 m<sup>3</sup> de béton vibré) et d'une centrale de production d'eau chaude et de vapeur, permettant de produire du béton à + 10° C par - 10° C extérieurs (les centrales ont produit du béton sans encombre jusqu'à - 18° C).

Les deux centrales n'avaient en commun que l'unité de production de chaleur et le silo de cendres volantes ; ce doublement des moyens put garantir la continuité des bétonnages critiques (joint froid interdit dans les cellules chaudes) et la non-interruption du chantier en cas de panne et d'attente de pièces détachées immobilisées en douane (temps moyen de dédouanement de cinq semaines, une fois tous les documents approuvés).

## ■ MÉTHODE D'EXÉCUTION DES CASEMATES (photos 3 et 4)

C'est une solution combinant béton coulé en place et éléments préfabriqués qui a été retenue afin de tirer parti au mieux de la répétitivité de la construction. Deux jeux de coffrages métalliques ont été conçus et réalisés en France, les uns pour les radiers de 75 cm et les voiles périphériques (1 m et 30 cm) coulés en place, les autres pour les cloisons (30 cm) et les caissons de toit, réalisés sur une aire de préfabrication. Une fois installés, les caissons de toit recevaient un ferrailage complémentaire et étaient remplis de béton jusqu'à atteindre une épaisseur de 1 m. Le bétonnage s'effectuait exclusivement à la benne.

Les casemates étaient réalisées de manière alternée ; un coffrage double-face était utilisé pour les éléments impairs tandis que les radiers et voiles des numéros pairs étaient isolés de leurs voisins par un joint de polystyrène de 25 mm, soigneusement ôté par sciage après bétonnage.

Le pré-assemblage des cages d'armatures et la réalisation des pièces préfabriquées, techniques familières des Ukrainiens, se sont toujours déroulés de manière exemplaire, même au plus dur de l'hiver.

Une structure métallique, berceau destiné à recevoir le conteneur, était ensuite installée dans chaque casemate avec une précision millimétrique. Là encore, les Ukrainiens, habitués aux travaux de charpente métallique, étaient dans leur élément. Enfin, un écran thermique en acier inoxydable était suspendu en partie supérieure de la casemate afin de protéger le béton d'une chaleur excessive dégagée par les conteneurs, dont la température surfacique pourrait atteindre 300° C.

Une fois les conteneurs vides livrés par Framatome, ils seront installés dans les casemates, protégés par une porte guillotine béton + acier lourde de 8 t, avant d'être utilisés au conditionnement.



**Photo 3**  
Installation du coffrage des voiles de casemates  
*Shuttering the Walls of the Storage Modules*



**Photo 5**  
Usine de conditionnement - Salle principale : installation des cadres en inox  
*Processing Plant - Main Process Room : Stainless Steel Frames Installation*

*Processing Plant - Main Process Room : Stainless Steel Frames Installation*



**Photo 4**  
Casemates : charpente métallique galvanisée accueillant les conteneurs  
*Storage Modules : Galvanized Steel Cradle for Canisters*

*Storage Modules : Galvanized Steel Cradle for Canisters*



**Photo 6**  
Usine de conditionnement - Salle principale : prédalles et béton coulé en place  
*Processing Plant - Main Process Room : Precast Slabs and In-Situ Concreting*

*Processing Plant - Main Process Room : Precast Slabs and In-Situ Concreting*

## ■ LE BÂTIMENT DE CONDITIONNEMENT (photos 5 et 6)

Les banches métalliques et étaielements locaux de tradition soviétique étant loin d'offrir l'efficacité, la souplesse d'utilisation et la qualité de rendu du matériel occidental, le groupement a employé des banches Doka (Framax) et de l'étaielement ETEM. Tous les voiles étaient coulés en place car la complexité du bâtiment ne se prêtait pas à la préfabri-

cation. Seule une partie des planchers a pu être réalisée au moyen de prédalles.

Tâche délicate et hors de portée des entreprises ukrainiennes et russes consultées, le revêtement des locaux en peinture décontaminable a été confié à une société française, Erba, appliquant un complexe allemand, Geholit. Les corps d'état traditionnels ont été confiés à une société spécialisée ukrainienne.

**Photo 7**  
Coffrage des voiles  
des casemates et abri  
protecteur

*Storage Modules Wall  
Formwork and Winter  
Shelter*



**Photo 8**  
Bétonnage en hiver :  
béton en cure  
sous abris; abri écarté  
le temps du bétonnage

*Winter concreting :  
Concrete Curing  
under Shelters; Shelter  
Put Aside  
during Concreting*



## ■ MESURES HIVERNALES

(photos 7 et 8)

Même si le mercure n'est que rarement descendu en dessous de - 20° C, des mesures particulières devaient être mises en œuvre dès que la température descendait aux alentours de 5° C, par crainte des chutes brutales de 15° C pendant la nuit. Des abris étaient disposés pendant le ferrailage ou, à tout le moins, avant bétonnage sous lesquels l'atmosphère, les armatures et le joint de bétonnage étaient portés aux alentours de 10° C grâce à des chauffages soufflants et des fils chauffants

courant le long des armatures et noyés dans le béton. Les coffrages étaient isolés, éventuellement maintenus en température par soufflage d'air chaud entre la bâche isolante et le coffrage dans les premières heures suivant le bétonnage. La cure, à l'abri de bâches isolantes, durait entre une semaine et dix jours afin que le béton monte suffisamment en résistance pour ne plus être sujet au choc thermique.

Les fleuves gelant en hiver et la centrale de lavage de la carrière ne fonctionnant pas par temps de gel, des stocks de granulats étaient constitués au début de l'automne et n'étaient reconstitués qu'après la débâcle. A de rares exceptions près, l'approvisionnement ferroviaire en ciment et cendres n'a pas souffert de l'hiver.

## ■ CONTEXTE RADIOLOGIQUE ET SÉCURITÉ DU TRAVAIL

(photo 9)

Le site de 17 hectares choisi pour la réalisation du centre de stockage est situé en plein centre de la zone d'exclusion, à 2500 m du sarcophage. La plate-forme ayant été contaminée par l'accident de 1986, elle a dû être débarrassée de sa couverture végétale ainsi que des cinquante centimètres supérieurs de sol. Même si de rares poussières radioactives subsistent dans le sol, la radioactivité résiduelle y est désormais largement en dessous des normes européennes les plus contraignantes. Néanmoins des dangers persistent avec le risque d'effondrement du sarcophage ou d'incendies de forêt qui remettraient en suspension des éléments radioactifs. C'est pourquoi le groupement de génie civil a mis en place un système complet de gestion du risque radiologique : prévention, contrôle et mesures d'urgences. Ce système est avant tout le garant de la maîtrise du risque sur le lieu de travail au même titre que les traditionnels plans et mesures de sécurité du travail. Bien souvent, c'est aussi l'assurance pour le personnel, tant étranger qu'ukrainien, *a priori* rétif à l'idée d'aller travailler dans la zone de Tchernobyl, que l'employeur a bien compris ses craintes et a traité les aspects sécuritaires avec rigueur et professionnalisme.

Ainsi, en conformité avec la législation française, tous les expatriés ont suivi une formation de protection nucléaire de premier niveau (PR1) avant leur départ. Ils ont en outre bénéficié d'une formation spécifique au site de Tchernobyl et reçu un livret d'accueil décrivant le contexte, les mesures en vigueur sur le chantier et la conduite à tenir en cas d'incident nucléaire.

Un technicien en radioprotection a été affecté au chantier dès le premier jour, emportant avec lui une batterie d'instruments détectant radioactivité sur les matériaux, dans le sol ou sur les corps et les vêtements. Il procède régulièrement à l'inspection

## LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Consolidation de sol : 15 000 m<sup>2</sup>
- Terrassement : 110 000 m<sup>3</sup>
- Armatures : 3 300 tonnes
- Béton : 30 000 m<sup>3</sup>
- Charpente métallique : 1 500 tonnes
- Revêtement en acier inox : 6 200 m<sup>2</sup>

des installations de chantier, des matériaux entrant sur le chantier, des travaux neufs et des terrassements en cours. Le site a été équipé d'une station de mesure en continu de la radioactivité et de la contamination de l'air; elle est capable d'identifier la venue d'un nuage radioactif sur le chantier. Un plan d'évacuation a été joint au Plan hygiène et sécurité. Chaque collaborateur a été doté à cet effet d'une tenue de protection individuelle et les bureaux de chantier d'un système de mise en surpression; les chauffeurs des véhicules ont été instruits en conséquence; des répétitions périodiques sont effectuées. Le personnel porte en permanence un dosimètre et est suivi médicalement: il passe tous les six mois un examen anthropogammamétrie permettant la mesure de la radioactivité inhalée et ingérée.

A ce jour, aucune anomalie n'a été constatée; les valeurs relevées étant d'un ou plusieurs ordres de grandeur inférieures aux normes internationales. La sécurité traditionnelle n'a pas été négligée non plus, mais les habitudes ukrainiennes en la matière – rigorisme sur le papier, laxisme dans l'application – ont la vie dure. A côté du matériel importé qui est aux normes occidentales, engins et outils d'un autre âge sont le lot commun. La maintenance qui va de pair avec la prévention est un concept qui n'est pas encore entré dans les mœurs, malgré les efforts de nos équipes. En outre, il a été décidé de pallier la déficience croissante du système médical local en dotant le chantier d'une infirmerie occupée 7 jours sur 7 par un médecin et un infirmier ainsi qu'en mettant en place un plan particulier d'évacuation sanitaire des blessés. Au total, les mesures de sécurité, dictées par le contexte local, sont d'une ampleur exceptionnelle au regard de la taille et de la durée du chantier de génie civil.

## ■ LA GESTION DU PROJET

(photos 10 et 11)

A l'origine, des expatriés porteurs de leur expertise technique et de leur expérience des grands projets internationaux devaient se rendre sur le chantier pour encadrer, conseiller, aider, voire former les équipes d'un sous-traitant. En fait, le manque d'expérience d'équipes n'ayant plus réellement travaillé depuis la chute de l'Union soviétique, le manque d'efficacité lié à un rythme de travail propre à la zone de Tchernobyl (15 jours consécutifs de travail, puis autant de repos) et une faible motivation liée à un bas niveau de salaire ont rendu les choses singulièrement compliquées. Sans oublier la barrière de la langue: dans le milieu des travaux publics ukrainiens, la pratique des langues étrangères est quasi inexistante même chez les cadres. L'implication des chefs de chantier et conducteurs de travaux est finalement devenue telle qu'il a fal-



**Photo 9**  
Station de mesure de la contamination atmosphérique  
*Monitoring Station for Airborne Contamination*



**Photo 10**  
L'usine de conditionnement. Vue d'ensemble  
*The Processing Plant : General View*



**Photo 11**  
Vue d'ensemble des 232 casemates  
*General View of the 232 Storage Modules*

© F. Vigouroux - Vinci Construction Grands Projets

lu faire appel à des renforts et même faire venir de France pendant quelques mois des ouvriers hautement qualifiés. En pointe, le chantier a compté 25 expatriés (dont quinze cadres) et 600 Ukrainiens (dont 50 cadres).

En outre, le désarroi de l'économie ukrainienne et la faillite de l'industrie ont nécessité de repenser les approvisionnements et d'avoir recours à des fournisseurs étrangers, d'où des problèmes d'importation et de mise en conformité avec les normes locales...



**Photo 12**  
Usine de conditionnement : cérémonie du dernier béton  
*Processing Plant : Last Concrete Celebration*

## CONCLUSION (photo 12)

La réalisation du chantier sur ce lieu de sinistre mémoire s'est posée comme un pari audacieux. Rares étaient ceux qui dépassaient la barrière psychologique et voulaient tenter l'aventure. C'est grâce à ceux-là et à leur ténacité de tous les instants que les difficultés quotidiennes ont pu être dépassées et que le pari est en train d'être gagné.

### LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

#### **Maître d'ouvrage**

Centrale nucléaire de Tchernobyl ("Chernobyl Nuclear Power Plant", ChNPP)

#### **Maître d'œuvre**

Project Management Unit (PMU) incluant Westinghouse, NNC, KIEP et ChNPP

#### **Consortium**

Framatome ANP (mandataire, 60 %), Vinci Construction Grands Projets, Bouygues Travaux Publics

#### **Groupe génie civil**

Vinci Construction Grands Projets (pilote, 50 %), Bouygues TP

#### **Personnel génie civil**

- 50 personnes aux travaux dont 16 expatriés dans le groupement
- 600 personnes (sous-traitants travaux) en deux équipes de 300

#### **Principaux sous-traitants**

- Belgatom (Belgique)
- Erba (France)
- Frunze (Ukraine)
- Kiep (Ukraine)
- Kiizi (Ukraine)
- Monolit (Ukraine)
- Osi (Ukraine)
- Taywood Engineering Ltd. (Royaume-Uni)
- Ukrenergobud (Ukraine)
- Utem (Ukraine)

### ABSTRACT

**Construction of the new Chernobyl storage centre. 3,000 tonnes of spent nuclear fuel to be stored for a century**

*M. Hasenohr, J.-L. Le Mao*

It is on the borders of Ukraine, Belarus and Russia, in the exclusion area around Chernobyl, 2,500 metres from the reactor damaged by an accident in 1986, that a consortium led by Vinci Construction Grands Projets is performing the civil engineering work for a spent fuel storage centre. From 2005, 3,000 tonnes of nuclear fuel in interim storage will be transferred to this new unit which will shelter it for one hundred years in complete safety. These first new works prior to permanent mothballing of the nuclear power plant are carried out in an exceptional radiological environment and in a difficult local economic context.

### RESUMEN ESPAÑOL

**Ejecución del nuevo centro de almacenamiento de Chernóbil. 3.000 toneladas de combustible nuclear desgastado a almacenar para un siglo**

*M. Hasenohr y J.-L. Le Mao*

Situándose en los confines de Ucrania, de Bielorusia y de Rusia, en el área de exclusión de Chernóbil, a 2.500 m del reactor accidentado en 1986, un grupo de empresas encabezado por Vinci Construction Grands Projets, lleva a cabo las obras de ingeniería civil de un centro de almacenamiento de combustible desgastado. A partir de 2005, 3.000 t de combustible nuclear almacenadas provisionalmente, se habrán de transferir hacia esta nueva unidad para permanecer al resguardo durante cien años con una total seguridad y así descansar en un sueño de plomo. Se trata de primeros trabajos nuevos preliminares para el aislamiento definitivo de la central nuclear y se llevarán a cabo en un entorno radiológico fuera de lo común y ello en un difícil contexto económico local.

# Dublin

## The design and construction at Sir John Rogerson's Quay

Sir John Rogerson's Quay is located on the southern bank of the River Liffey to the east of Dublin City centre. This area, approximately 9 hectares in plan, was reclaimed from the Liffey estuary during the mid-Eighteenth Century. The gasworks, present since the early Nineteenth Century, has been decommissioned and substantially demolished over the last twenty years.

An extensive remediation scheme is underway to remove the existing foundations and treat/remove the contaminated soil and ground water. This requires the construction of an underground cut-off wall around the perimeter of the site, totaling over two kilometres in plan length. The wall acts to control groundwater entry onto site and to prevent the migration of any contamination beyond the site boundaries from recontaminating the site after remediation is complete. In addition, the wall must act as a cantilever retaining structure to allow excavation depths of up to 5.0 m.

This paper compares the various options considered during the tender process and describes the development of a hybrid retaining wall that has offered significant cost savings over more conventional solutions. The construction methods required to overcome the difficult and complex soil profile are discussed.

### ■ INTRODUCTION

The former Sir John Rogerson's Quay gasworks site, located approximately 0.5 km to the east of Dublin City centre, was acquired by Dublin Docklands Development Authority (DDDA) from Bord Gais Eireann in 1998. The 9 hectare site is divided into five areas; Sites 1-4 are identified on Plate 1 with Site 5 being located on the eastern end of the Grand Canal Dock. The River Liffey flows from west to east immediately to the north of the site. DDDA intend to transform the site into a mixed development of residential, commercial, amenity and retail uses. Parkman was commissioned to advise DDDA on the remediation works.

The proposed development will comprise large areas of underground car parking which will require excavation to depths down to at least -1.0 m OD (Mean); site ground levels prior to remediation works varied between around 1.5 and 4.0 m OD. Groundwater is located generally around 0.0 m OD across the site, near to mean tide level governed by the adjacent River Liffey.

"Town Gas" was manufactured on the site from the heating of coal in an oxygen free atmosphere within a retort which produced a number of initially unwanted by-products such as spent oxides and

coal tars. A detailed ground investigation identified significant amounts of such residual contaminants across large areas of the site; the presence of which would have resulted from the handling and disposal of these by-products.

A site-specific Quantified Risk Assessment was undertaken which identified that large volumes of contaminated materials required removal or treatment as part of a remediation process. In order to allow removal of contaminated and other materials, to facilitate the construction of an underground car park, it was considered necessary to construct an underground cut-off wall around the perimeter of the former gasworks site, keying into cohesive glacial till at depth.

The wall was to act to control the groundwater entering deep excavations and prevent any contamination existing beyond the boundaries of the site re-contaminating the area after remediation is complete.

### ■ HISTORY

For nearly 200 years, almost without exception, every town and even some villages in Ireland satisfied their energy needs by the manufacture of

Plate 1  
Aerial view of Sites 1 to 4  
prior remediation works



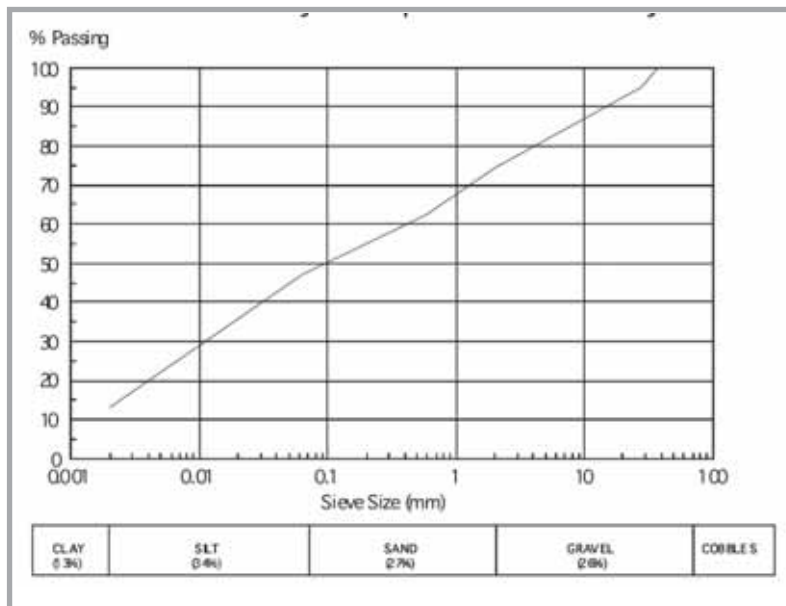


described in the following broad geological groups for the purposes of this paper :

- ◆ Made Ground (Fill);
- ◆ Recent soft Alluvial and Estuarine Deposits;
- ◆ Glacial and Post-Glacial Gravels;
- ◆ Cohesive Glacial Till; ;
- ◆ Limestone Bedrock.

Details of the soils and rock encountered together with a summary of their geotechnical properties are detailed below.

**Figure 2**  
**Typical**  
**grading curve**



### Made Ground

Sir John Rogerson's Quay was reclaimed from the Liffey Estuary in the mid-1700's and hence large depths of fill have been placed in the area of the site to bring the ground level above high tide level. Exploratory holes identified that the thickness of Made Ground varied between 0.7 and 4.7 m below ground level. Most of the fill had been laid in an uncontrolled manner, both in its content and in its compaction although it was found to be predominantly granular in nature and was generally loose or medium dense.

The near surface material and tank infill generally comprised demolition material from the numerous buildings formerly located across the site. Ash and clinker were encountered in some areas.

### Recent soft Alluvial and Estuarine deposits

The thickness of these deposits is limited to less than 1.8 m and comprises inter-bedded silts, clays and sands with significant proportions of organic material present in some locations. Such deposits would be expected to have low undrained shear strengths and relatively high compressibilities, al-

though the materials were found to be firm in consistency having been consolidated by the overlying Made Ground over a period of many decades.

No attempt has been made to generalise the geotechnical properties of these deposits due to their highly variable nature.

### Glacial and Post-Glacial Gravels

These deposits include the river and glacial gravels. The thickness of these gravels varies considerably and clay layers also occur within these deposits. A particular feature of the gravels on the site was the presence of significant amounts of cobbles and boulders, which caused difficulty in drilling of boreholes. The gravels tend to be dense or very dense; however pockets of medium dense material was encountered in places. The permeabilities of these deposits were found to be high; in the range of  $10^{-2}$  to  $10^{-3}$  m s<sup>-1</sup>.

### Cohesive Glacial Till

The cohesive glacial tills are unusually separated for the purposes of engineering assessment, into Dublin Brown Boulder clay and Dublin Black Boulder clay. The former refers to the 2 m or so of weathered material, which is generally encountered over the black boulder clay.

The brown boulder clay typically is firm or stiff sandy gravelly clay of low plasticity with an almost straight line grading curve, as shown in figure 2, which is characteristic of such tills<sup>1</sup>. This material was encountered at depths between 3.4 and over 15.0 m below ground level. The percentage fines is around 35%; consequently the description in terms of the British Standard BS5930<sup>2</sup> can be as a gravel or as a fine soil. The clay size particles are very cubical and angular in shape unlike normal plate like clay minerals<sup>3</sup>. The description of this deposit ranges from "firm brown sandy gravelly Clay" to "medium dense clayey sandy Gravel". Cobbles and boulders also occur within this material. The Plasticity Index (PI) of this soil is around 10% to 15%, indicating that the soil will soften significantly with small increase in water content. Hence, it is noted that isolated pockets of soft material can occur near old watercourses.

Typical SPT "N" values are in the region of 15 to 20, although low values of less than 5 have been recorded. Stroud and Butler's<sup>4</sup> correlation between N values and undrained shear strength has been found to give good results for the brown boulder clay; the undrained shear strength is  $6 \times N \text{ kN m}^{-2}$  as confirmed by Orr<sup>5</sup>. This would indicate that the brown boulder clay is generally firm to stiff in consistency.

The black boulder clay is a very stiff to hard lodgement till and has similar properties to the brown boulder clay although the black clay has a lower wa-



ter content and higher undrained shear strength. N values in the black boulder clay generally range from about 25 to refusal with an average of about 35 to 40. These results would indicate undrained shear strength in the order of 225 kN m<sup>-2</sup> with no obvious increase with depth.

A small number of boreholes excavated to rockhead did not appear to identify any cohesive glacial till; this may be due to the presence of an old watercourse. It is therefore, not possible to state with confidence that the cohesive glacial till is present beneath the whole of the site.

### **Limestone Bedrock**

The limestone was generally described as a dark grey argillaceous pyritous limestone generally thinly to thickly bedded (60 mm to over 3 m, but typically 300 mm to 400 mm).

It was encountered at depths between 7.0 and 21.0 m. The term "calp" is commonly used to describe the limestone and is understood to have come from quarrymen. The rock was considered to be quarriable because of the weak mudstone layers. The strength of the rock varies from weak to very strong with Rock Quality Designation values ranging from 0 to over 80 %.

The near surface rock would have experienced stress relief and weathering since its formation; although it is noted that cable percussion boreholes did not penetrate more than about 1 m.

Groundwater levels in the permeable soils appear to be very consistent at about 0.0 m OD although some tidal variation (up to about 500 mm) was recorded within 50 m of the River Liffey.

As discussed above, several by-products particularly coal tar and spent oxide are prevalent across Sites 1 and 2. The predominantly granular nature of the Made Ground and underlying Alluvial and Estuarine deposits and Glacial gravels together with a high water table has resulted in coal tar migrating across large areas of Sites 1 and 2. Heavy metals were also identified in soil samples across the site area associated with ash in the fill materials. Groundwater and leachate samples were found to be contaminated with similar compounds to the soil samples. Free product associated with naphtha was identified floating on top of the groundwater in the north-east corner of Site 2. This has probably leaked from above ground storage tanks associated with the oil-gas plant formerly located in this area.

### **■ QUANTIFIED RISK ASSESSMENT**

Ireland does not have any national guidelines on the clean-up of contaminated land and rather than use generic guidelines such as those used in Holland or the UK, a site specific Quantified Risk As-

essment (QRA) was undertaken to internationally recognised standards.

The risk assessment examined :

- ◆ the "sources" or degree of hazard represented by each of the contaminants detected;
- ◆ the "receptors" which could suffer harm if exposed to the hazards above. This would include ground and surface water, humans such as construction workers, or eventual occupiers of the development;
- ◆ the potential pathways or means by which the hazards could come into contact with the receptors. If all these are demonstrated to be present, this is known as a "pollutant linkage".

A Remediation Strategy had to be derived which defined the steps that must be taken to reduce the risk of the formation of all potential pollution linkages to an acceptable level. This could, for example, take the form of removal of sources or the interception of potential pathways. The fundamental approach for this scheme was the former i.e. source removal. Excavations on site, generally to a depth of around 3 to 4 m, but in places up to 5 m, will result in the removal of some 195,000 tonnes of contaminated material.

Although, as explained earlier, a cut-off wall was envisaged as a means of controlling groundwater and preventing recontamination of the site, it was not relied upon as a "permanent" solution in terms of containment. Should significant contamination have been allowed to remain on site, for example in underground tanks, questions would inevitably have been asked by funders and prospective developers about the reliance upon the effectiveness of a barrier whose life would not be infinite. Although the wall acts to inhibit the entry of any contamination present outside the site boundary, it is seen as temporary works.

### **■ PERIMETER CUT-OFF WALL**

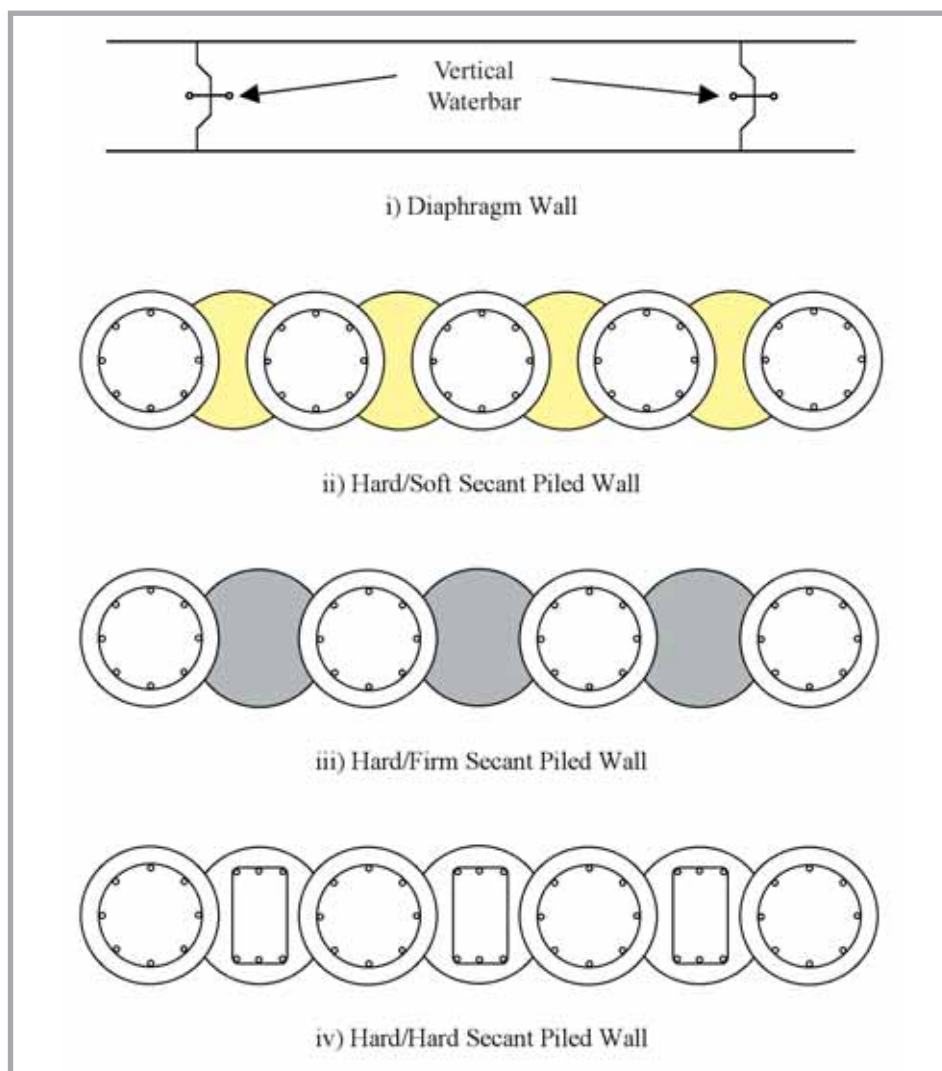
A major principal of the remediation strategy involved the construction of an underground cut-off wall around the perimeter of Sites 1 and 2 (phase 1) and also around Site 3 (phase 2). The total plan length of these perimeter walls is approximately 2,000 m with depths ranging from 8.0 to 16.0 m. The purpose of this wall was threefold :

- ◆ to retain the surrounding roads, services, etc. relative to an excavated level of at least -1.0 m OD required for the underground car park (deeper excavations are required in some areas to remove contaminated materials);
- ◆ to limit the volume of groundwater entering the site. It is considered that a wall extending into the cohesive glacial tills or to bedrock at depth would fulfill this requirement. Pumping of groundwater will be undertaken to allow excavation to proceed to the required depths;

- ◆ to prevent re-contamination of the site after remediation is complete. It is known that other contamination sources are present outside the boundaries of the site.

A procedure was undertaken to select a contractor to undertake the remediation works although the precise type of cut-off wall was not specified by Parkman; the wall is contractor designed. Parkman did however specify that a steel sheet piled wall could not be adopted for the scheme. Problems had been identified with sheet piled walls constructed in this area of Dublin due to the presence of the very dense gravel stratum; apparently due to the large fraction of cobbles and boulders leading to uncoupling of sheet piles. Such problems were experienced in the Custom House Docks area of Dublin<sup>6</sup>. It was important that the cut-off wall penetrated into the cohesive glacial tills where present and it was considered that a sheet piled solution could not provide this guarantee. It is acknowledged that a cut-off wall keying into the cohesive glacial tills at depth would not totally exclude groundwater due to the presence of gravel lenses, old watercourses etc. although it would control the groundwater adequately to allow excavation to required depth.

**Figure 3**  
**Conventional retaining wall options**



## ■ RETAINING WALL OPTIONS

Sub-contract tender enquiries for the perimeter retaining walls were issued by prospective main contractors during October 99 with an initial six week tendering period. This relatively lengthy duration was essential to allow a full understanding of the complex soil profile, consider over 30 different retaining wall design conditions and provide the opportunity to offer realistic alternative foundation solutions.

Figure 3 shows the conventional retaining wall options initially considered for this scheme. The benefits and risks associated with these options relative to this scheme are discussed below.

### Diaphragm wall

Diaphragm walling was considered to be the "conforming option" for this project although the specification only called for a continuous concrete wall. All other proposals were compared with this method as it gave a high degree of water retention, the flexibility to overcome cobbles and minor obstructions and a high bending moment capacity necessary for the cantilever condition. Wall widths of between 500 and 600 mm were considered with individual panel lengths of approximately 5.0 m. A vertical waterbar would be installed between the individual panels providing a seal at the cold joints. This solution provided the least number of construction joints and therefore minimised the risk associated with contaminated ground water and leachates penetrating the remediated sites in the future. The budget cost for this option was in the order of IR£200 per m<sup>2</sup> of wall resulting in an estimated wall cost of over IR£4M.

### Interlocking bored piles

Hard/soft, hard/firm and hard/hard interlocking bored pile walls were considered as primary alternatives to the diaphragm wall solution. The fundamental differences between these three piling options are the material used in the "female" pile and the size, power and type of the piling equipment required. In the hard/soft option a bentonite-cement mix is used in the female piles. This material gains a compressive strength of between 0.3 to 1.0 MN m<sup>-2</sup> that allows the use of standard Continuous Flight Auger (CFA) piling equipment for installing both female and male piles. Although this option offered significant savings, with costs of approximately IR£150 per m<sup>2</sup>, it was quickly abandoned as the potential for obstructions, large cobbles and very hard soils and rock posed too great a problem to overcome. The risk of not providing a fully interlocking wall within the granular soils was considered too high.

In the hard/firm option blended low early strength

concrete is used in the female piles. Typical 56 day strengths of 20 N mm<sup>-2</sup> are achieved. The use of this material requires larger more powerful heavy duty CFA piling equipment to cut through the female concrete mix to form the male piles. Improved construction tolerances allow an increase in the spacing between piles and a reduction in the volume of female concrete to be bored. This option offered similar cost savings to the hard/soft wall but was abandoned as a result of the high risks associated with the potential for gaps between the piles at depth.

In the hard/hard option a conventional C30 concrete is used in the female piles constructed using CFA equipment. The male piles are constructed using large diameter rotary bored piling techniques. This option required the use of long temporary casings that offered the slowest construction method and the greatest cost at over IR£250 per m<sup>2</sup>.

### Sheet piles

Conventional driven sheet piles were not considered as a viable option as the risk of refusing in the obstructed fill and coarse granular soils was very high. The use of CFA equipment to pre-bore prior to sheet piling was investigated but was ruled out over concerns with water tightness.

## PROPOSED RETAINING WALL SOLUTION

The most significant risk associated with this containment retaining wall is the potential for contaminated ground water and leachates penetrating the site following remediation. The chosen solution had to have a continuous low permeability, a high degree of construction certainty and be capable of withstanding the bending moments and shear forces associated with cantilever retained heights of up to 5.0 m. The ideal solution was considered to be a combination of two separate foundation processes joined together into a hybrid wall.

Conventional slurry walling is a widely accepted method for providing a low permeability barrier to limit the movement of contaminated ground water, leachates and gases both into and away from a site. The relatively low long-term strength of the bentonite-cement slurry mix means that its capacity for resisting bending moments is very low even when reinforced.

The initial hybrid wall considered was that of a slurry trench excavated to penetrate the cohesive glacial tills to form the cut-off with sheet piles lowered into the fresh slurry mix to provide the structural capacity. A similar solution has been adopted by Soletanche Bachy Group for remediation works in Metz, France. The slurry trench would be dug using a long reach backhoe excavator that could overco-

me the majority of the obstructions, large cobbles and potential boulders. Continuous interlocking sheet piles would be placed into the slurry trench to depths required for retaining wall stability alone and were therefore not necessarily full depth. This offered a highly flexible cost saving solution at approximately IR£125 per m<sup>2</sup>. This solution addressed the fundamental concerns and minimised the land take offering an additional client benefit. The main disadvantage of this solution was that the sheet piles could not easily be retrieved for re-use once the project was complete. The lack of availability of secondhand sheets in the booming Irish construction market meant that the cost savings could not be guaranteed.

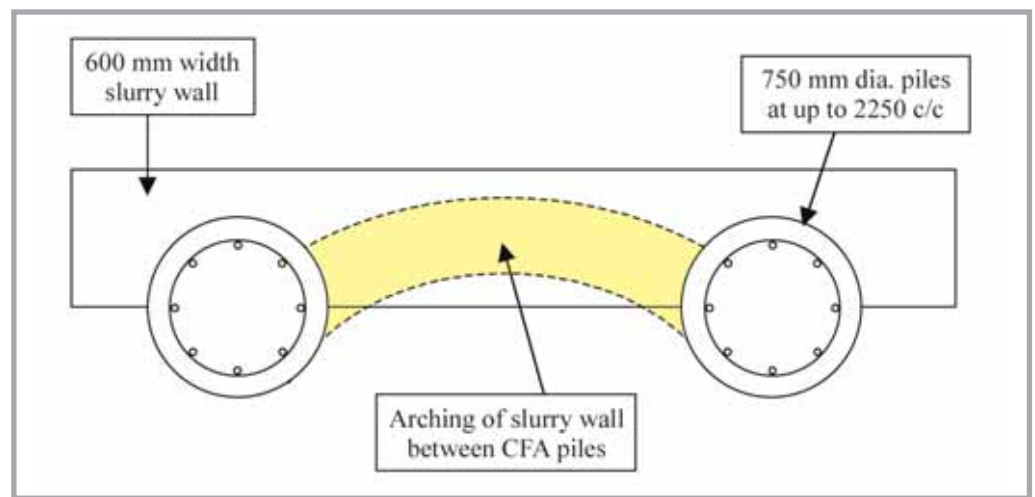


Figure 4  
Sketch of hybrid wall

The chosen hybrid solution consisted of a slurry trench with CFA piles to provide the structural capacity. The slurry trench was dug using a long reach backhoe excavator with a 600 mm wide bucket for the majority of the works. Where the slurry wall depth exceeded 12.0 m a 600 mm wide diaphragm walling grab was used. Once the bentonite-cement mix had set 750 mm diameter CFA piles were installed along the front face of the slurry wall. Piles were positioned at up to 3 diameter centres to suit the soil profile and retained heights at each location. This option offered the most economic solution at IR£110 per m<sup>2</sup>. Figure 4 shows a sketch of the typical hybrid wall layout.

## RETAINING WALL DESIGN APPROACH

During the site investigation three-dimensional soil modelling was carried out. This provided a reasonably clear overall picture of the variation in strata levels across this vast area. This quality of information was sufficient to carry out a realistic foundation design for tender purposes. In order to provide the optimum solution for detailed design additional information on the longitudinal soil profile was necessary. This information was provided by a series

**Table 1**  
Retaining wall  
design parameters

Soil Type	Bulk Density (kN m <sup>-2</sup> )	Effective Stress Parameters		Comments
		$\phi'$	$c'$ (kN m <sup>-2</sup> )	
Made Ground	17	32	-	
Alluvium	18	26	-	
Glacial Gravels	20	35	-	
Dublin Black Boulder Clay	22	37 <sup>3</sup>	10	$c' = 0$ long term

**Plate 2**  
Photograph of exposed  
hybrid wall



of trial bores along the entire perimeter of the containment wall. Trial bores, spaced at 2.5 m centres, were undertaken using a heavy duty CFA piling rig in advance of the slurry walling operations. Additional benefits of this exercise were that major obstructions not previously removed along the line of the wall were quickly identified and the surface of the hard Dublin Black Boulder clay was predrilled to ease the installation of the slurry wall. The latter benefit was seen as a critical requirement as previous works on the adjacent Grand Canal drainage tunnel<sup>7</sup> resorted to using explosives to penetrate the hard bouldery till.

The retaining wall design is based on the principles of CIRIA 104<sup>8</sup> with moderately conservative design parameters adopted are shown in table 1. The active ground water level has been taken at 1.0 m OD which is 0.5 m above the general high tide level as measured on site. The tidal range of the River Liffey is in the order of 4.0 m however the dampening effect of the quay wall results in a

maximum range of approximately 1.0 m on site. The analyses were carried out using Wallap version 4.10 retaining wall program. A minimum factor of safety ( $F_r$ ) of 1.50 has been adopted for the temporary condition based on Burland-Potts method with an available unplanned overdig allowance of 10 % of the retained height. The structural design of the CFA piles was in accordance with BS8110<sup>9</sup>. Grade C35 concrete was used with a minimum structural load factor of 1.50.

The CFA piles are installed along the front face of the slurry wall as shown in Figure 3. The slurry wall is required to arch between the CFA piles and the compression force within the arch was limited to approximately 200 kN m<sup>-2</sup>. Trials were performed in advance of the works to ensure that the bentonite-cement slurry achieved a characteristic compressive strength of 500 kN m<sup>-2</sup> together with a target permeability of  $1 \times 10^{-9}$  m s<sup>-1</sup> at 90 days. As the works proceeded these properties were generally achieved within 28 days. In time the slurry material could desiccate and potentially crack allowing contaminated ground water and leachates to penetrate the remediated site. For this reason a plastic liner will be placed on the front face of the exposed wall to minimise the moisture loss.

## CONCLUSIONS

The perimeter wall around Sites 1 and 2 has been successfully completed and the overall project is progressing on programme. Ground water monitoring, both inside and outside the site, is demonstrating that the containment wall is operating well with no indication that the perimeter is being breached. Plate 2 shows a section of the exposed hybrid wall. The construction of a similar wall around Site 3 is due to commence in September 2001. The hybrid slurry and CFA retaining wall solution has provided real benefits for this major development. Significant cost savings were generated together with offering a flexible solution that addressed the fundamental requirements of containment and retaining wall stability. The continuing success of the scheme has led to early agreement with future developers.

## Acknowledgements

The authors would like to thank Dublin Docklands Development Authority for their kind permission to publish this paper and Pierse-Soils NV Joint Venture for their contributions to this successful project.

## REFERENCES

1. N.A. Trenter : *Engineering in glacial tills*, CIRIA report C504. 1999.

2. British Standards Institution : *Code of practice for site investigations* BS 5930 : 1999.
3. E.R. Farrell : *Settlement parameters of Dublin Black Boulder clay*, Ground Engineering, July 1989, 30-32.
4. M.A. Stroud and F.G. Butler : *The standard penetration test and the engineering properties of glacial materials*, Proceedings of the Symposium on the engineering behaviour of glacial materials, University of Birmingham, 1975, 117-128.
5. T.L.L. ORR : *Probabilistic characterisation of Irish till properties*, Risk and reliability in ground engineering, 1994, 126-133.
6. J. Higgins and S. Mason : *Geotechnical Aspects of the redevelopment of the Custom House Docks area of Dublin*, Transactions of the Institution of Engineers of Ireland, 1989, 448-492.
7. D.J. O'Donoghue and P.R. White : *Grand Canal drainage tunnel : design aspects*, Transactions of the Institution of Engineers of Ireland, 1975, 99, 68-81.
8. C.J. Padfield and R.J. Mair : *Design of retaining walls embedded in stiff clay*, CIRIA report 104. 1991.
9. British Standards Institution : *Structural use of concrete* BS 8110 : Part 1 : 1997.

## RÉSUMÉ

### Conception et réalisation d'une paroi de soutènement hybride pour le quai "Sir John Rogerson", à Dublin

P.A. Kingston, T. Brown

Le quai "Sir John Rogerson" est situé sur la rive sud de la rivière "Liffey", à l'est du centre de la ville de Dublin (Irlande). Cette zone, d'environ 9 ha, a été récupérée sur l'estuaire de la rivière "Liffey", suite à l'influence de la marée, au cours du milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle. Depuis le début du XIX<sup>e</sup> siècle, les usines à gaz furent arrêtées et démolies en grande partie sur les 20 dernières années.

Un plan de réhabilitation de cette zone a été mis en marche, consistant à retirer les fondations existantes, nettoyer le sol fortement contaminé et à traiter la nappe d'eau atteinte par cette pollution. Ce plan nécessite la construction de plusieurs parois de confinement périmétrales, autour du site, sur un total de plus de 2 km, réalisant ainsi une coupure étanche, minimisant le passage de l'eau contaminée hors du site. La paroi de confinement contrôle l'entrée d'eau filtrante à l'intérieur du site et empêche la migration de toute contamination vers l'extérieur, ce qui pourrait provoquer à nouveau une nouvelle contamination du site, une fois les travaux terminés. De plus, la paroi doit agir comme une paroi autostable permettant l'excavation d'une fouille de plus de 5 m de profondeur.

Cet article compare les différentes options qui ont été considérées pendant la phase d'appel d'offres et décrit le développement d'une solution hybride de paroi de soutènement qui offrait une économie certaine comparée aux autres solutions traditionnelles. Les méthodes constructives nécessaires pour s'adapter aux difficiles conditions de sols en présence, sont ici discutées.

## RESUMEN ESPAÑOL

### Diseño y ejecución de un muro de contención híbrido para el muelle "Sir John Rogerson" de Dublín

P.A. Kingston y T. Brown

El muelle "Sir John Rogerson" está ubicado en la orilla sur del río "Liffey",

hacia el este del casco urbano de la ciudad de Dublín (Irlanda). Esta zona, de unas nueve hectáreas, se ha recuperado en el estuario del río "Liffey" a raíz de la influencia de la marea, durante el transcurso del siglo XVIII. Desde principios del siglo XIX, las fábricas de gas fueron cerradas y derribadas en totalidad durante los últimos 20 años.

Se ha puesto en ejecución un plan de rehabilitación de esta zona, que ha consistido en extraer los cimientos existentes y limpiar/tratar/extraer el terreno ampliamente contaminado así como el tratamiento de un acuífero contaminado. Este programa ha precisado la construcción de varios muros de confinamiento perimetrales, que rodean el emplazamiento, sobre un total de más de dos km, para obtener así un cierre hermético, para reducir al mínimo el paso del agua contaminada fuera del emplazamiento de las obras. El muro de confinamiento controla la entrada de agua filtrante en el interior del emplazamiento e impide la migración de cualquier contaminación hacia el exterior, puesto que ello podría llegar a provocar de nuevo una contaminación del emplazamiento, una vez finalizadas las obras. Además, el muro debe actuar como un muro autoestable para permitir la excavación de una zanja de más de cinco metros de profundidad.

En este artículo se comparan las diversas opciones que se han tenido en cuenta durante la etapa de licitación de ofertas y se describe el desarrollo de una solución híbrida de pared de contención que presentaba un ahorro certero por comparación con las demás soluciones tradicionales. Se ponen así en discusión los métodos constructivos necesarios para adaptarse a las difíciles condiciones de los suelos existentes.

# Centrale EDF de Port Saïd

## Le défi des travaux

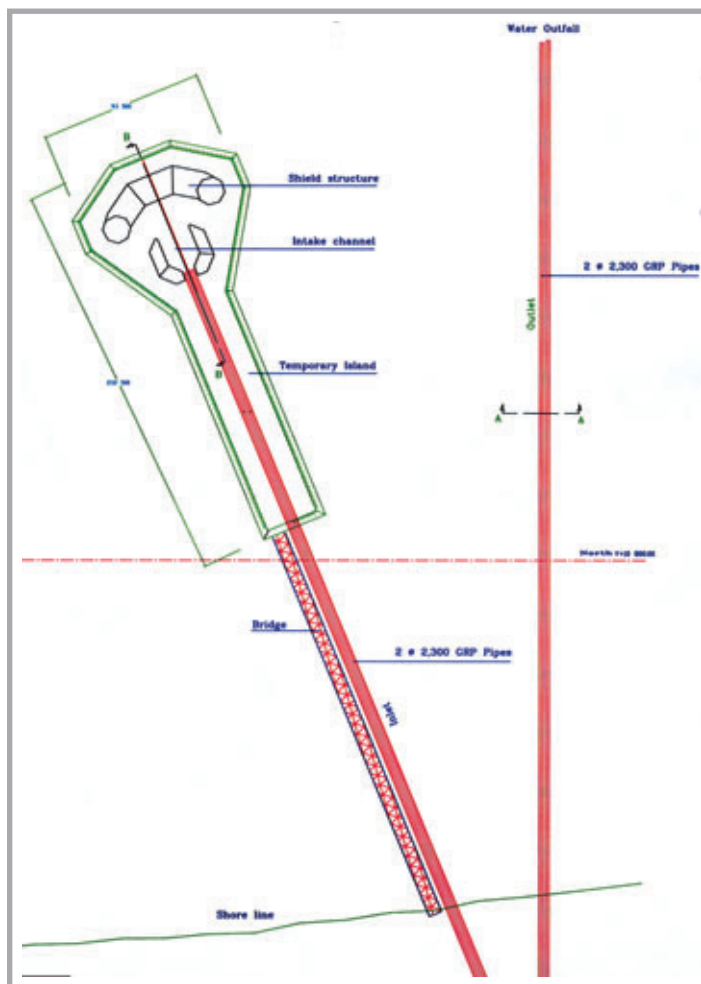
Avec les deux centrales thermiques de Suez et Port Saïd, EDF est en train de mener à bien le plus grand investissement français en Egypte depuis la construction du canal de Suez par Ferdinand de Lesseps. Les travaux maritimes à Port Saïd ont été un véritable challenge pour Eiffage International, filiale du troisième major français du BTP et qui, en participation avec son partenaire Egyptien Orascom, réalise le génie civil des deux unités.



Photo 1  
Vue de la centrale de Port Saïd  
View of the Port Saïd power station

Des caractéristiques géotechniques particulièrement défavorables associées à des conditions environnementales difficiles ont nécessité la mise en œuvre de techniques extrêmement pointues dans des délais très serrés. Plus de 3000 t de palplanches et quelque 3 km de tuyauterie en polyester de 2,30 m de diamètre ont été installés offshore pour amener à l'usine l'eau de refroidissement des condenseurs. Installées à 6 m sous le niveau de la mer, les conduites ont dû être posées sur pieux et chevêtres pour éviter les tassements.

Figure 2  
Vue en plan  
Plan view



Note de l'auteur :  
Avec l'aimable autorisation d'EDF

### ■ INTRODUCTION

Les deux centrales thermiques EDF de Port Saïd et Suez, situées aux deux extrémités du canal de Suez, représentent le plus gros investissement français en Egypte depuis le chantier de Ferdinand de Lesseps. Délivrant 684 MW chacune, elles fourniront à partir de 2003, près de 10 % de la puissance installée dans ce pays de 67 millions d'habitants (photo 1).

Les deux projets sont de conception similaire avec deux groupes de turbines vapeur alimentées par des chaudières au gaz naturel. La source froide des condenseurs est fournie par l'eau de la mer Rouge à Suez et par la Méditerranée à Port Saïd. Les ouvrages d'amenée et de rejet ont été particulièrement délicats à exécuter sur ce dernier chantier et les solutions mises en œuvre font l'objet du présent article.

En février 2000, le génie civil de ces installations a été confié par EDF à Eiffage International et son partenaire local Orascom. Ce marché, de plus de 100 M€, fait suite à une première coopération entre les deux sociétés françaises sur la centrale de Lai-Bin, en Chine.

La mise en service commerciale de l'unité de Suez aura lieu, comme prévu, en janvier 2003, suivie 6 mois après de celle de Port Saïd.

### ■ UNE PRISE D'EAU À 350 MÈTRES DU RIVAGE

Pour garantir une faible élévation du gradient de température les volumes circulant dans le condenseur sont très importants. Chacune des deux tranches de 342 MW est équipée de son circuit de refroidissement alimenté par deux turbopompes centrifuges débitant chacune 6 m<sup>3</sup>/s. La station de pompage

#### LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Palplanches : 3000 t
- Tirants : 50 t
- Pieux métalliques : 5400 m
- Berceaux : 700 t
- Conduites polyester diamètre 2,30 m : 3000 m
- Terrassements ouvrages provisoires : 100 000 m<sup>3</sup>

# en Egypte maritimes

**Pierre Gauthier**

DIRECTEUR DE PROJET  
Eiffage International



(24 m<sup>3</sup>/s) est située à l'extrémité d'un bassin de tranquillisation, lui-même alimenté par deux conduites en polyester de 2,30 m de diamètre dans lesquelles circule par gravité, l'eau de mer captée à 350 m au large par 3 m de fond. Le rejet est assuré par deux conduites de même diamètre diffusant l'eau réchauffée de 6° à une distance de la côte équivalente, à l'est de la prise d'eau, les courants dominants circulant d'ouest en est (figure 2).

## ■ UNE CÔTE MARÉCAGEUSE ET INSTABLE

La centrale de Port Saïd est située à 30 km environ à l'est de l'embouchure du canal de Suez. La zone, promise à un développement industriel futur est pour l'instant quasiment désertique. Elle est couverte d'une alternance de marécages et de dunes de sable et fait partie du delta du Nil. Le delta tel que nous le connaissons aujourd'hui s'est formé il y a environ 7 500 ans, la mer étant alors 9 à 10 m sous son niveau actuel. Les crues du Nil ont transporté les sédiments que l'on retrouve dans le sous-sol du site. Durant le premier millénaire de notre ère les bras majeurs du delta se sont comblés à l'exception des deux branches de Rosette et Damiette. Seuls des canaux irriguent maintenant le Nord-Ouest du Sinâï.

La ligne de côte reste néanmoins instable, un fort courant d'ouest en est occasionnant un transport alluvionnaire de l'ordre de 700 000 m<sup>3</sup> annuels. La moitié de ce volume environ transite entre la ligne de côte et la prise d'eau. Ce phénomène est particulièrement marqué les mois d'hiver associé aux conditions de forte houle (figure 3).

Les ouvrages de prise d'eau et de rejet ont donc été calculés pour être à une distance suffisante de la plage afin d'éviter leur ensablement. De plus, la liaison entre ces ouvrages et la côte ne doit en aucun cas faire "barrage" aux alluvions, écartant donc toute solution de digues en enrochement ou en palplanches. C'est donc par des tuyaux de grands diamètres que la circulation des fluides de refroidissement est assurée. Une modélisation informatique de l'ensemble, confirmée par des essais en bassins ont permis de valider les hypothèses de base concernant les courants et l'évolution de la ligne de côte.

De plus, une campagne de reconnaissances a été effectuée pour définir les caractéristiques géotechniques du sous-sol. La stratigraphie est la suivante au droit de la prise d'eau :

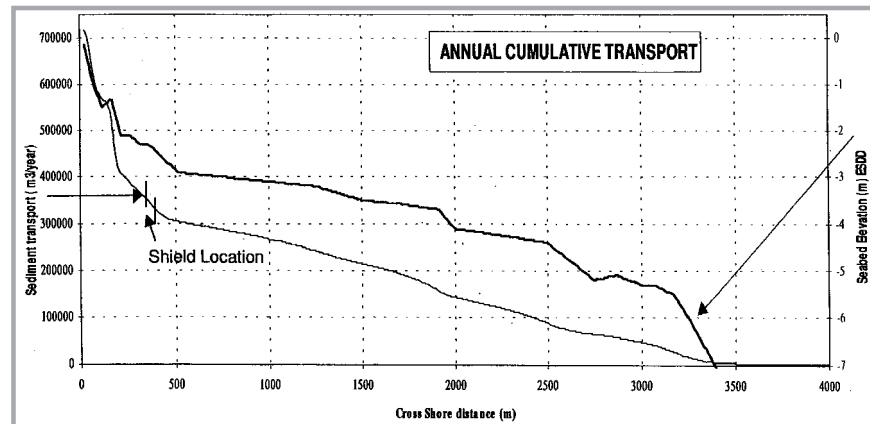


Figure 3  
Transport des sédiments vers l'est  
East bound sediment transport

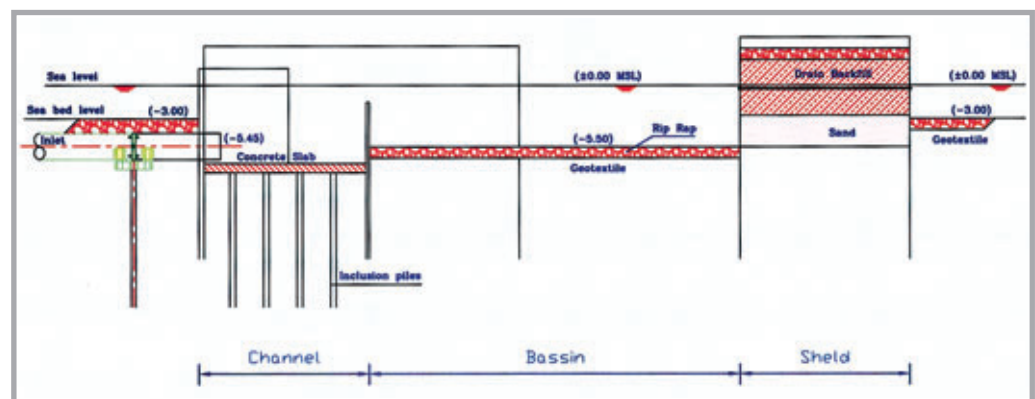


Figure 4  
Coupe de la prise d'eau  
Typical cross section intake structure

- ◆ en tête, sur une épaisseur de 1 m à 2 m, sable fin silteux, coquiller, peu compact ;
  - ◆ ensuite, sur 5 m à 8 m, silt plus ou moins argileux, coquiller, noir, peu compact ;
  - ◆ puis sur une quinzaine de mètres, argile molle noire.
- L'horizon des sables compacts se situe à - 28 m environ.

L'ensemble de ces contraintes a motivé les choix des solutions retenues décrites ci-dessous.

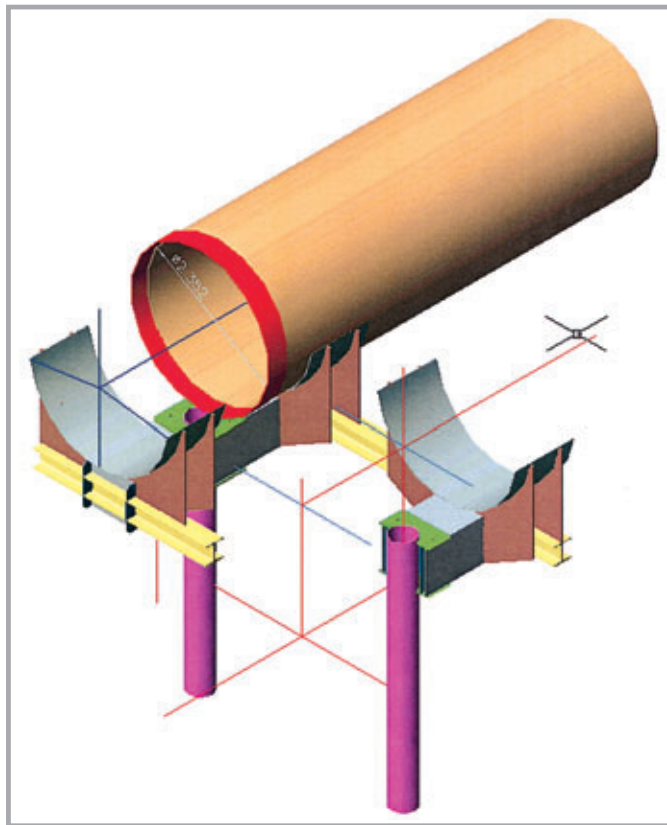
## ■ LES CHOIX TECHNIQUES

### La prise d'eau

Prévu à l'origine en béton préfabriqué immergé, l'ouvrage de prise d'eau a finalement été réalisé avec des gabions construits à l'aide de 2000 t de palplanches type AZ fichées entre 12 et 15 m de profondeur. Ce choix technique est motivé par la complexité des ouvrages de dessablage et par la faible portance du terrain naturel.

L'entonnement, en forme de fer à cheval, est protégé de la houle par un caisson en palplanches rempli d'enrochement. La stabilité des rideaux est assurée par tirants passifs de 52 mm de diamètre (figure 4).

Figure 5  
Schéma  
des appuis  
*Diagram  
of supports*



### Les conduites d'amenée

Les deux conduites d'amenée d'un diamètre de 2,30 m sont en polyester de 25 mm d'épaisseur. Fabriquées en longueur de 12 m, elles sont assemblées sur site par emboîtement, l'étanchéité étant assurée par un joint à lèvres. Elles sont immergées à la cote - 6,00 m environ, soit une couverture de 2 à 4 m de remblais. Dans toute la partie maritime, les tuyaux reposent sur des berceaux métalliques fondés sur pieux battus à 32 m de profondeur. Les berceaux, espacés de 12 m en section courante, se resserrent à l'approche de la plage pour prendre en compte l'épaisseur de remblais plus importante.

La traversée de plage jusqu'au bassin de tranquillisation n'a pas nécessité de fondations profondes (figure 5).

### Les conduites de rejet

Les deux conduites de rejet sont similaires aux conduites d'amenée mais se terminent par un diffuseur en forme de clarinette qui assure une meilleure répartition des effluents. Elles sont aussi posées sur berceaux et pieux pour la partie maritime (photo 6).

Photo 6  
Clarinette  
*Manifold*



Photo 7  
Vue d'ensemble  
*Overall view*



## ■ UNE ÎLE DE PRÈS DE 2 HECTARES

La complexité de l'ouvrage de prise d'eau en palplanches a conduit très rapidement à abandonner une mise en œuvre avec du matériel flottant. De plus l'ouvrage, assez faiblement fiché, n'était pas stable en phase provisoire et un important dispositif de protection contre la houle était à prévoir. Il n'est pas rare en effet, lors des tempêtes hivernales, d'avoir des vagues de 1,5 m à 3 m pendant des périodes pouvant durer de 3 à 5 jours. Le planning de construction du bouclier de protection étant de 8 mois, couvrant la période de l'hiver 2001-2002, une mauvaise météo était inévitable.

Une île artificielle d'une cinquantaine de mètres de rayon a donc été construite pour servir de plateforme de travail et assurer la stabilité des gabions pendant leur construction. Cette île se prolonge en direction de la côte par une digue de 45 m de largeur à partir de laquelle sont posées les canalizations. Afin de ne pas bloquer le transport alluvionnaire la digue est reliée à la plage par une estacade de 230 m de long (photo 7).

L'île et la digue ont été réalisées avec du sable de dune. La protection est assurée par des sacs de sable de 2 t encajés dans des structures métalliques tubulaires pour former des caissons d'une soixantaine de tonnes. Cette méthode a prouvé son efficacité lors de la tempête du 10 janvier 2002 pendant laquelle l'île et la digue étaient submer-



gées. La remise en état consécutive n'a nécessité qu'une journée de travail et a essentiellement consisté à reprendre la surface des plates-formes et des pistes. Le démontage de ces ouvrages provisoires est aussi très simple à réaliser alors qu'une protection en enrochement ou tétrapodes en béton préfabriqué aurait nécessité des moyens plus importants.

La géométrie des ouvrages temporaires et en particulier la longueur de l'estacade ont été validées par le calcul en s'appuyant sur la modélisation et les analyses qui ont servi à définir la prise d'eau. Des effets parasites concernant l'ensablement ont néanmoins été observés et ont conduit à un comblement partiel de la passe entre l'île et la plage (cf. encadré : Effet "tombolo"). Un dragage a donc été nécessaire pour reconstituer la ligne de fond.

## ■ DES CONDUITES INSTALLÉES PAR PLONGEURS

La pose des conduites en mer sur le site de Port Saïd constitue un véritable challenge. Le fort courant, la houle et le transport alluvionnaire important ont très tôt fait abandonner la méthode initiale de pose dans une souille ouverte à la drague pour orienter les choix vers une tranchée blindée de palplanches AZ13 vibrofoncées à - 13,50 m avec un lit de butons en tête de rideau. Les tuyaux fabriqués en longueur de 12 m sont emboîtés en place par des plongeurs, le caisson étant maintenu plein d'eau pendant toute la durée de l'opération pour des questions de stabilité de fond de fouille et d'allègement du soutènement.

Les premiers essais de pose ont été réalisés de la manière suivante :

- ◆ après terrassement à la benne preneuse et réglage du fond de fouille à sa cote finale, mise en place par plongeurs de sacs de sable à chaque extrémité des éléments de conduites, calés à la cote théorique de pose avec une faible tolérance ;
- ◆ pose des conduites par plongeurs, l'emboîtement étant réalisé à l'aide de vérins hydrauliques ;
- ◆ remblaiement de la fouille avec du sable propre et mise en place d'une protection en enrochement avant arrachage des palplanches.

En cours d'exécution, de nombreuses difficultés sont apparues, en particulier pour la mise en place des sacs de sable, ceux-ci disparaissant dans les sols constituant le fond de fouille. En fait, après déconsolidation des silts, la contrainte moyenne effective sur les premiers décimètres de terrain est pratiquement nulle et donc les sols ne présentent aucune résistance. Les tassements mesurés sur les premiers éléments de conduites étaient de plusieurs dizaines de centimètre à très court terme, bien au-delà des tolérances de pose. C'est à l'issue de ces essais infructueux que la dé-



**Photo 8**  
**Pose**  
**des tuyaux**  
*Pipe laying*



**Photo 9**  
**Berceaux de support des tuyaux GRP**  
*Support cradles for GRP pipes*

cision de mettre les conduites sur pieux a été prise. Le dispositif retenu se compose d'une paire de pieux métalliques de diamètre 406 mm et d'épaisseur 12 mm battus à la cote - 30 m. L'espacement des pieux en section courante est de 12 m mais se réduit à l'approche de la plage compte tenu de l'augmentation des charges sur les conduites. Des pieux de plus gros diamètre sont même prévus localement pour des cas de charge extrême. Un berceau métallique de plus de 7 t est mis en place sur les pieux. La connexion entre les pieux et les berceaux est assurée d'une part par des appuis soudés à la cote avant battage et d'autre part par l'injection sous-marine de l'espace annulaire entre le pieux et le corps du berceau. Les tolérances de positionnement des appuis sont de quelques centimètres, à 7 m sous le niveau de la mer la déviation maximale des conduites étant de 0,5°. Les conduites sont, comme dans la méthode initiale, mises en place par plongeurs. Elles reposent sur les berceaux revêtus de néoprène (photos 8 et 9).

## ■ UN CHANTIER PHARAONIQUE

L'augmentation du volume et de la complexité des travaux et la diminution des délais effectifs de réalisation due à la longue période de mise au point

### L'EFFET TOMBOLO

Selon les courants et la forme du rivage, les vagues transportent parfois en un endroit particulier de la côte, des silts, du sable ou du gravier. Avec les millénaires, ces dépôts peuvent former de véritables ponts de sable qui raccordent une île soit à une autre île, soit au continent. On parle alors de tombolo, nom d'origine italienne dérivé du latin *tumulus*.

Les tombolos les plus célèbres en France sont bien sûr celui du Mont St-Michel, mais aussi le tombolo de la presqu'île de Giens. Ce dernier a la particularité d'être double avec deux plages détachées du rivage et séparées par une lagune centrale.

La force importante du courant sur le chantier de Port Saïd, associée à un volume inhabituel de transport alluvionnaire ont considérablement accéléré le processus et en quelques semaines seulement un tombolo a fait son apparition entre les ouvrages temporaires de la prise d'eau et la plage, ceci malgré la présence de l'estacade qui permettait une libre circulation des flots.

Pour éviter le comblement complet de la passe, il a donc été nécessaire d'évacuer de façon régulière le sable déposé le long de la plage.

L'effet tombolo est parfois utilisé pour limiter l'érosion de la ligne de côte. Lorsque le transport alluvionnaire est suffisant, un rideau de palplanches ou une digue en enrochement parallèle à la plage crée une "zone d'ombre" qui favorise l'apparition d'un tombolo "artificiel".

du projet, a nécessité l'augmentation des moyens humains et matériels de façon sensible. Le chantier comptait durant l'été 2002 une vingtaine d'expatriés dont six plongeurs scaphandriers français, quatre échelons de battages (palplanches et pieux), huit grues dont une sur ponton flottant et de nombreuses ressources locales tant en personnel, qu'en équipement.

Le planning de pose des 4 x 600 m de conduite a ainsi pu être comprimé à 8 mois, le chantier devant impérativement être terminé avant la période d'hiver 2002-2003.

### LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

#### **Maitre d'ouvrage**

EDF Port Saïd East Power SAE

#### **Maitre d'œuvre**

EDF Egyptian Engineering Company  
CNET

#### **Entreprises**

- Eiffage International (France)
- Orascom Construction Industries (Egypte)

#### **Sous-traitant principal**

Entreprise Leduc (France)

#### **Fournisseurs principaux**

- Arbed (palplanches)
- Future Pipe Industries (tuyaux)

#### **Consultants principaux**

- Sogreah
- Mecasol

### ABSTRACT

#### **EDF power station at Port Said, Egypt. The challenge of maritime works**

*P. Gauthier*

With the two thermal power plants of Suez and Port Said, EDF is currently making the largest French investment in Egypt since the construction of the Suez Canal by Ferdinand de Lesseps. The maritime works in Port Said were a real challenge for Eiffage International, subsidiary of the third largest French building and construction major. Eiffage, in conjunction with its Egyptian partner Orascom, is performing civil engineering for the two units. Extremely unfavourable geotechnical features combined with difficult environmental conditions meant that extremely sophisticated techniques had to be applied in very tight deadlines. Over 3,000 tonnes of sheet piling and about 3 km of polyester piping 2.30 m in diameter were installed offshore to convey condenser cooling water to the plant. Installed 6 metres below sea level, the pipes had to be laid on piles and joists to prevent subsidence.

### RESUMEN ESPAÑOL

#### **Central EDF de Port Saïd, en Egipto. El reto de las obras marítimas**

*P. Gauthier*

Conjuntamente con las dos centrales térmicas de Suez y Port Said, EDF está llevando a cabo las mayores inversiones francesas en Egipto, desde la construcción del canal de Suez por Ferdinand de Lesseps. Las obras marítimas de Port Said han constituido un verdadero reto para Eiffage International, filial del tercer "major" francés de la Construcción y Obras Públicas y que, conjuntamente con su asociado egipcio Orascom, ejecuta las obras de ingeniería civil de las dos unidades. Las características geotécnicas particularmente desfavorables, combinadas con condiciones medioambientales difíciles han precisado la implementación de técnicas de alto grado de tecnicidad y ello ateniéndose a plazos sumamente estrictos. Más de 3.000 toneladas de tablillas y unos tres kilómetros de poliéster de 2,30 m de diámetro se han instalados costafuera para la alimen-

tación de la planta de enfriamiento de los condensadores.

Estos conductos, tendidos a 6 m bajo el nivel del mar, se han tenido que instalar sobre pilotes y brochales para evitar los asentamientos.

# La construction de la Grande pyramide

## La seule méthode plausible

**La Grande Pyramide de Khéops, première des sept "Merveilles du Monde" et seule encore existante, a toujours suscité de la fascination. Curieusement, aucune explication satisfaisante n'a jamais été proposée pour savoir comment elle a été construite. Toutes les théories qui ont été proposées à ce jour sont défailtantes car elles laissent sans réponse deux interrogations majeures. La première est comment a été construite la zone comprise entre la base de la Chambre du Roi au niveau + 43 m et le sommet de la pyramide. La seconde concerne la montée et la mise en place des poutres de 25 à 65 t de cette même chambre. La méthode logique et cohérente proposée résout ces deux problèmes en respectant les connaissances des anciens Egyptiens, ainsi que les techniques et les moyens prouvés de cette époque. D'abord, c'est l'utilisation de la rampe intérieure droite à quart tournant, ce "chaînon manquant" qui offre le moyen de construction de la pyramide le plus économique. Ensuite, le système à contrepoids est l'outil indispensable pour le levage et la mise en place des lourdes pierres de la Chambre du Roi.**

### ■ INTRODUCTION

Solidement implantée sur le plateau de Gizeh, la Grande Pyramide de Kheops (photo 1) domine le Nil depuis plus de 4600 ans et curieusement sa construction reste inexplicable. Aucun plan ni écrit de l'époque ne nous étant parvenu, les seuls témoignages anciens dont nous disposons apparaissent dans les récits d'auteurs ayant vécu bien plus tard, principalement dans ceux d'Hérodote et de Diodore de Sicile.

Le premier évoque – dans la "*Relation de voyage en Egypte*" écrit vers l'an 650 avant J.-C. – la construction de la pyramide "telle qu'elle lui fut racontée" grâce à l'utilisation de machines permettant d'élever les pierres d'assises en assises. Une disposition particulière des blocs, soit en crossai (pierres en saillies), soit en bômides (pierres formant socle), est à la base des théories défendues par les "machinistes".

Le second rapporte – dans le livre I, S.II, art. XV de la Bibliothèque Historique écrit au cours du 1<sup>er</sup> siècle avant J.-C. – que la pyramide fut construite au moyen de levées de terre. Il en est résulté un grand nombre de propositions faites par les "rampistes".

Finalement ces textes ont surtout eu une énorme influence dans la façon d'aborder le problème de la construction de la pyramide, privilégiant des solutions qui "collaient" à l'un ou l'autre de ces récits au détriment de l'essentiel : une analyse précise du monument et des ouvrages intérieurs qu'il comporte.

Une seule chose est sûre : la pyramide est là et il a bien fallu la construire !

Aussi, c'est avec l'approche de professionnels



© Georges Mesmin

**Photo 1**  
**Vue de la pyramide de Kheops**

**View of the Cheops Pyramid**

de l'acte de construire que nous avons abordé le problème :

- ◆ d'une part, il y a la pyramide, un bâtiment gigantesque mais qui n'est finalement que le résultat de l'accumulation d'une succession de couches horizontales de blocs de pierre plus ou moins travaillés ;

- ◆ d'autre part, il y a les couloirs intérieurs et les chambres funéraires, avec certains blocs de granite – pouvant peser jusqu'à 65 t – mis en place à plus de 60 m de hauteur.

Les techniques de construction ne sont donc pas les mêmes, tout particulièrement pour le transport et le levage des blocs : ceux de 1 t et ceux de 65 t ne requièrent pas les mêmes moyens. Finalement le projet doit être traité comme deux chantiers distincts intimement liés l'un à l'autre.



Cette démarche amène à aller plus loin dans la réflexion : certains ouvrages intérieurs n'ont peut-être eu qu'un rôle provisoire lié au procédé de construction, ou bien leur forme définitive a-t-elle été influencée par des obligations techniques liées à ce dernier ?

Par exemple, la présence de la Grande Galerie – ouvrage grandiose mais inséré de manière insolite entre deux couloirs de faible section – doit pouvoir s'expliquer autrement que par les raisons actuellement avancées.

Ou encore, la Chambre de Reine – inachevée et comportant des conduits qui débouchent nulle part – devait-elle réellement avoir un rôle funéraire ?

De même, la Chambre des Herses ne semble pas être optimisée pour un rôle de barrière incontournable à l'entrée de la Chambre du Roi, sachant de plus que les bouchons de granite au bas du couloir ascendant barraient déjà efficacement l'accès. Enfin, l'analyse du plan et de la coupe de la pyramide est très révélatrice : la superposition et l'alignement de ces mêmes ouvrages intérieurs dans la partie nord de l'édifice répondent à l'évidence à des raisons constructives.

Par contre les récits anciens doivent avoir leur part de vérité et ils ne sont, peut-être, que les fragments d'un processus plus complexe. En sériant les problèmes, il devient alors possible de reconstituer le puzzle du chantier.

Mais remontons un peu dans l'Histoire et faisons le point sur l'état des connaissances techniques acquises et les moyens disponibles à la veille de l'ouverture du chantier.

## ■ LES PREMIÈRES PYRAMIDES

Construite à Saqqarah sous la III<sup>e</sup> dynastie pour le pharaon Djoser par le fameux architecte Imhotep, la première pyramide est un mastaba transformé en pyramide à degrés. L'ensemble funéraire fut creusé directement dans le sol, la grande nouveauté étant l'utilisation de la pierre comme matériau de construction pour la superstructure en remplacement de la brique crue : l'architecture de pierre était née, mais la technique restait simple.

Puis sous Snéfrou – premier pharaon de la IV<sup>e</sup> dynastie – trois pyramides, véritables laboratoires technologiques, ont été réalisées :

- ◆ la première, à Méïdoum, initialement à degrés, fut transformée à la fin des travaux des deux suivantes en pyramide véritable. Ses deux innovations sont le long passage maçonné en superstructure reliant l'entrée à la chambre funéraire, et la couverture de cette chambre grâce à une technique révolutionnaire : la voûte en tas de charge – appelée à tort mais de manière plus imagée voûte en encorbellement – pouvant supporter une charge très importante ;

- ◆ la deuxième, la Rhomboïdale de Dahchour, fut

commencée avec une pente de 62° ramenée très rapidement à 55° ; des problèmes de stabilité, apparaissant à mi-travaux, conduisirent à revoir les plans. La pente fut une nouvelle fois réduite – à 43° environ – et les blocs du corps et ceux de façade mis en place horizontalement. La partie funéraire est plus conséquente avec une antichambre et deux chambres funéraires, dont une complètement dans la masse de la pyramide ; l'ensemble est relié par des galeries à deux entrées en façade. Enfin, le mortier au gypse y fit son apparition ;

- ◆ la troisième, la Rouge de Dahchour nord, est la mise en œuvre des avancées acquises précédemment. Les architectes optèrent, par précaution, pour une pente de 43°, et réalisèrent une pyramide véritable parfaite. La qualité de la partie funéraire fut améliorée et totalement intégrée dans la masse de la pyramide. Elle réunit enfin les deux objectifs recherchés : un monument imposant avec son complexe funéraire au cœur de sa superstructure.

Grâce aux connaissances acquises, la voie était ouverte aux architectes de Kheops pour qu'ils se lancent dans le projet de la Grande Pyramide.

## ■ LES MOYENS TECHNIQUES

Ne connaissant pas de matériau assez résistant pour faire des axes – le fer n'étant pas encore exploité – les Egyptiens ne se servaient ni de la roue ni de la poulie. Ils construisaient donc avec des moyens rudimentaires et compensaient ce handicap par une remarquable organisation de chantier. Sommairement résumé ils utilisaient :

- ◆ des outillages lithiques : masses et marteaux en diorite, forets et lames de pics en silex et divers instruments en quartzite ;

- ◆ des outillages en cuivre pur : scies, hachettes, herminettes et ciseaux. L'usure très rapide de ces outils imposait une gestion rigoureuse des matériaux travaillés ;

- ◆ des outillages en bois : leviers, chèvres, rouleaux, rondins et surtout traîneaux, moyens de transport habituels des charges. L'absence de forêt dans la région obligeait les concepteurs à économiser le bois qui était importé. Les Egyptiens étaient d'excellents marins – ils utilisaient des barques naviguant sur le Nil pour le transport des poutres de granite venant d'Assouan – et ils en tirèrent un savoir précieux au niveau du travail du bois et de la fabrication des cordages ;

- ◆ des cordes et cordages : pour les instruments de levage, le halage des traîneaux, l'assemblage des pièces de bois et l'appareillage des outils ;

- ◆ des couffins en feuilles de palmier ou en herbes d'alpha et des paniers en osier pour le transport des matériaux : sable, gypse, mortiers, débris de carrière et remblais ;

- ◆ enfin, la brique crue pour le revêtement des chaussées et le limon du Nil comme lubrifiant.

## ■ LES MOYENS HUMAINS

Le transport des blocs de pierre était une tâche primordiale et le traîneau tracté par un attelage humain en était l'élément clé : des centaines de traîneaux tirés par des milliers d'hommes étaient de ce fait nécessaires. Par contre la disparité des charges à déplacer impliquait des méthodes différentes, l'augmentation du nombre de tireurs étant limitée par le problème de leur coordination et par la place disponible.

En analysant les capacités de l'être humain, on s'aperçoit que le rendement énergétique est très différent suivant le type d'effort demandé : s'il est faible pour un halage lent et continu de plusieurs heures, il devient beaucoup plus important pour une traction en force de quelques minutes. L'homme peut ainsi exercer une force d'environ 20 kg dans le premier cas, et 4 à 5 fois plus dans le second. Les Egyptiens, adeptes du tir à la corde – un bas relief représentant une joute a été retrouvé à Saqqarah – devaient savoir parfaitement appliquer cette technique pour leurs grands travaux.

Un autre facteur très important est également à prendre en compte : l'inclinaison de l'espace de traction. Au-delà d'une pente à 10 %, le rendement énergétique chute très rapidement, la limite devenant l'incapacité du haleur à déplacer son propre corps. Trois exemples résumant parfaitement les données dont disposaient les architectes, surtout en ce qui concerne le déplacement des charges les plus lourdes :

1. Il faut dix hommes par tonne pour un halage continu sur une pente à 8 %.
  2. Il n'en faut que trois pour une traction brève à l'horizontale.
  3. Il en faut quatre pour une traction brève à l'horizontale avec la charge sur une pente à 8 %.
- Ces charges devant être élevées jusqu'à plus de 60 m de haut, il est évident que l'optimisation du transport passait par une solution basée sur le troisième exemple.

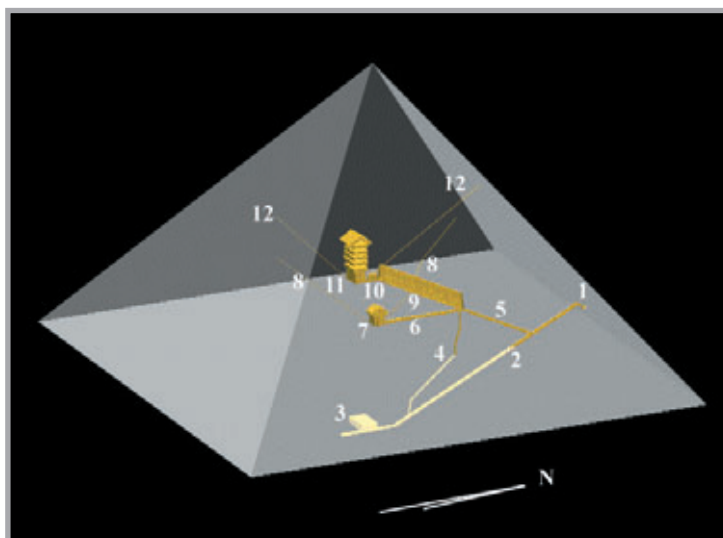
Un autre élément conforte par ailleurs cette hypothèse : on estime que 4 000 hommes ont été suffisants pour construire la pyramide elle-même – sans compter tous les travaux et métiers annexes – car il aurait été difficile d'engager beaucoup plus d'ouvriers en même temps au cœur du chantier en raison de la surface disponible.

La réduction du nombre d'hommes affectés au transport des blocs était une priorité absolue et donc à la base de la conception du chantier.

## ■ LES MATÉRIAUX MIS EN ŒUVRE

Les trois principaux types de matériaux composant la pyramide sont d'origines très différentes :

- ◆ les blocs les plus imposants des ouvrages inté-



**Figure 2**  
**Vue intérieure de la pyramide telle qu'on la connaît**

1. Entrée - 2. Couloir descendant  
3. Chambre souterraine - 4. Puits de service  
5. Couloir ascendant - 6. Couloir horizontal  
7. Chambre de la Reine - 8. Conduits inférieurs - 9. Grande Galerie - 10. Chambre des Herse - 11. Chambre du Roi - 12. Conduits supérieurs

### **Interior view of the pyramid as we know it**

1. Entrance - 2. Descending passage  
3. Underground chamber - 4. Service shaft  
5. Ascending passage - 6. Horizontal passage  
7. Queen's chamber - 8. Lower ducts  
9. Great Gallery - 10. Chamber of Cross-beams - 11. King's Chamber - 12. Upper ducts

rieurs, en granite rose, ont été extraits des carrières d'Assouan, à plus de 1 000 km au sud du chantier. La lenteur de leur extraction et de leur transport – au gré des crues du Nil – avait une incidence sur le planning de chantier. Par exemple, les 72 poutres des plafonds de la Chambre du Roi n'ont pu être approvisionnées que de nombreuses années après le début des travaux. Il fallait donc pouvoir les mettre en place alors que la pyramide avait déjà atteint une certaine hauteur ;

- ◆ les blocs les plus beaux en calcaire fin de Tourah – sur la rive est du Nil – ont été utilisés pour certains ouvrages intérieurs et pour le parement de façade. La mise en place de ces derniers allait de pair avec la construction de l'assise correspondante, entraînant des impératifs au niveau de la méthode constructive ;

- ◆ les blocs de soutien et du corps de la pyramide en calcaire de Mokattan ont été extraits d'une carrière ouverte à proximité au sud du monument. Si les premiers étaient calibrés, les seconds n'étaient que grossiers car destinés au remplissage de l'édifice. Leur forme les rendait donc inadaptés à toute technique de levage d'assises en assises. Par ailleurs un constat est très important : le volume extrait de cette carrière est égal au 5/6<sup>e</sup> du volume de la pyramide. Si la méthode constructive faisait appel à une rampe quelconque – dont le volume pouvait varier de 400 000 m<sup>3</sup> à plus de 2 000 000 m<sup>3</sup> suivant le type – la carrière n'aurait pas pu tout fournir, et alors la question se pose : d'où provenaient ses matériaux constitutifs ? Comme il aurait été illogique et dispendieux d'extraire des matériaux sur un autre site, de les transporter et de les évacuer en fin de chantier, la solution technique employée devait permettre tout simplement de réemployer ceux de la rampe.

Enfin, la brique crue, le sable, le mortier au plâtre et le bois ont été également largement employés sur le chantier à titre complémentaire ou provisoire.

## ■ COMPOSITION DE LA PYRAMIDE (figure 2)

Les dimensions générales de la pyramide sont les suivantes : une base de 230,60 m de côté, une hauteur de 146,70 m, un angle de 51,50° et environ 210 assises pour un volume de 2,6 millions

de m<sup>3</sup>. Sa structure est composée, depuis l'extérieur vers l'intérieur, d'une façade en blocs finement dressés – aujourd'hui disparus –, d'une maçonnerie de soutien en blocs taillés et appareillés, et d'un corps rempli de blocs grossiers liés par un mortier au plâtre. Cette composition hétérogène, du moins jusqu'au niveau + 120,00 m environ, montre que la pyramide n'est pas le résultat d'un empilement de blocs parfaitement calibrés. Jusqu'à une période récente, on pensait que la pyramide pesait environ 6,5 millions de tonnes pour une densité moyenne de 2,5 t/m<sup>3</sup>; on sait maintenant que celle-ci est plus proche de 2 t/m<sup>3</sup>. Les vides des ouvrages intérieurs et le mauvais appareillage des blocs dans le corps de la pyramide expliquent en partie cette différence, ainsi que peut-être des vides inconnus.

Les trois chambres funéraires, la première souterraine et les deux autres au cœur de la masse, sont superposées et ont toutes leur mur est en alignement parfait. La première est taillée dans le socle calcaire, les deux autres construites en maçonnerie appareillée et couvertes de chevrons pour l'une et de plusieurs plafonds en poutres et chevrons pour l'autre. Deux conduits sud et nord partent de chacune des chambres supérieures, les plus bas ne débouchant nulle part, les plus hauts sur l'extérieur.

Trois corridors étroits et la Grande Galerie, tous sur le même axe, relient ces chambres à l'extérieur; le premier, le couloir descendant, relie l'entrée, au niveau + 16,70 m sur la face nord, à la chambre souterraine au niveau - 30,00 m; le deuxième, le couloir ascendant, part du premier quart du couloir précédent pour s'arrêter au niveau + 21,00 m; le troisième, le couloir horizontal, part du haut du couloir précédent et relie la Chambre de la Reine située au même niveau; la Grande Galerie relie le couloir ascendant à la Chambre du Roi au niveau + 43,00 m, via la Chambre des Herses. Un puits de service vertical relie le bas de la Grande Galerie au bas du couloir descendant.

## ■ PRINCIPAUX DÉFAUTS DES SOLUTIONS ACTUELLEMENT AVANCÉES

### **Par les "machinistes", c'est-à-dire permettant de monter les blocs d'assises en assises**

#### *L'utilisation de chèvres*

Cette technique est difficilement applicable sur une si grande échelle car des milliers de machines sont nécessaires pour obtenir un rendement efficace, alors que la place disponible sur chaque assise est limitée et implique des manœuvres délicates et dangereuses. La composition hétérogène de la pyramide ne favorise pas ce système, si ce n'est pour

les blocs des vingt ou trente dernières assises qui sont calibrés. Aucune machine n'étant capable de lever des monolithes de soixante tonnes, le problème de leur déplacement demeure et les façades étant utilisées comme des gradins, le ravalement ne débute qu'une fois le sommet atteint. Des chèvres ont été certainement employées, mais elles ne sont pas à la base d'une méthode, leur utilisation étant plutôt complémentaire d'une autre technique.

#### *L'utilisation de leviers*

On imagine très mal la pyramide enveloppée par un essaim d'ouvriers manipulant des milliers de leviers en toute sécurité, les risques de basculement étant très importants. L'expérience Nova de l'égyptologue américain Mark Lehner a prouvé l'inadaptation des leviers, sauf pour une utilisation ponctuelle.

### **Par les "rampistes", c'est-à-dire permettant de tracter les blocs**

#### *La rampe droite frontale unique*

Elle comporte beaucoup de défauts en fonction de sa configuration : ou trop longue, ou trop volumineuse, ou trop pentue, ou pas assez large pour les assises inférieures; de plus son utilisation est arrêtée lors de son exhaussement et son revêtement doit être reconstruit à chaque fois. Elle est intéressante, à condition de la limiter à une certaine hauteur et que son utilisation soit continue, mais elle n'est pas suffisante pour pouvoir réaliser l'intégralité du chantier.

#### *La rampe en zigzag construite sur un remblai en appui sur une face*

A son manque de stabilité il faut ajouter l'étroitesse du passage et la difficulté de faire tourner de 180° les traîneaux sur des paliers réduits. Le transport des grosses charges n'est pas possible.

#### *Les rampes frontales multiples, appuyées sur chaque face de la pyramide*

Elles sont extrêmement voraces en remblais et particulièrement difficiles à mettre en œuvre à cause de l'étroitesse des rampes. C'est multiplier les inconvénients de la rampe frontale.

#### *Les rampes hélicoïdales extérieures en remblai enveloppant la pyramide*

Malgré l'avantage de permettre l'approche du sommet avec une faible pente en utilisant beaucoup moins de remblais, de nombreux problèmes demeurent : étroitesse et instabilité du passage, rotation des traîneaux dans les angles, sécurité des hommes; le halage des lourdes charges n'est pas possible.

#### *La combinaison d'une rampe droite frontale suivie d'une rampe extérieure hélicoïdale*

C'est la seule proposition intéressante car elle com-

bine certains avantages de chacune des deux rampes : une première rampe droite frontale réduite permet d'atteindre le premier tiers de la pyramide et d'approvisionner plus de 60 % du volume, puis une rampe hélicoïdale extérieure en prolongement permet d'arriver tout près du sommet. Mais l'avantage d'une faible pente continue et de moins de remblais n'enlève malheureusement pas les autres inconvénients des deux rampes et le problème de la provenance ou du réemploi des matériaux demeure. C'est la solution la plus généralement admise à l'heure actuelle mais elle n'est pas convaincante.

Par contre un nouveau concept apparaît : combiner au moins deux procédés, l'un prenant le relais du précédent lorsque celui-ci a atteint ses limites.

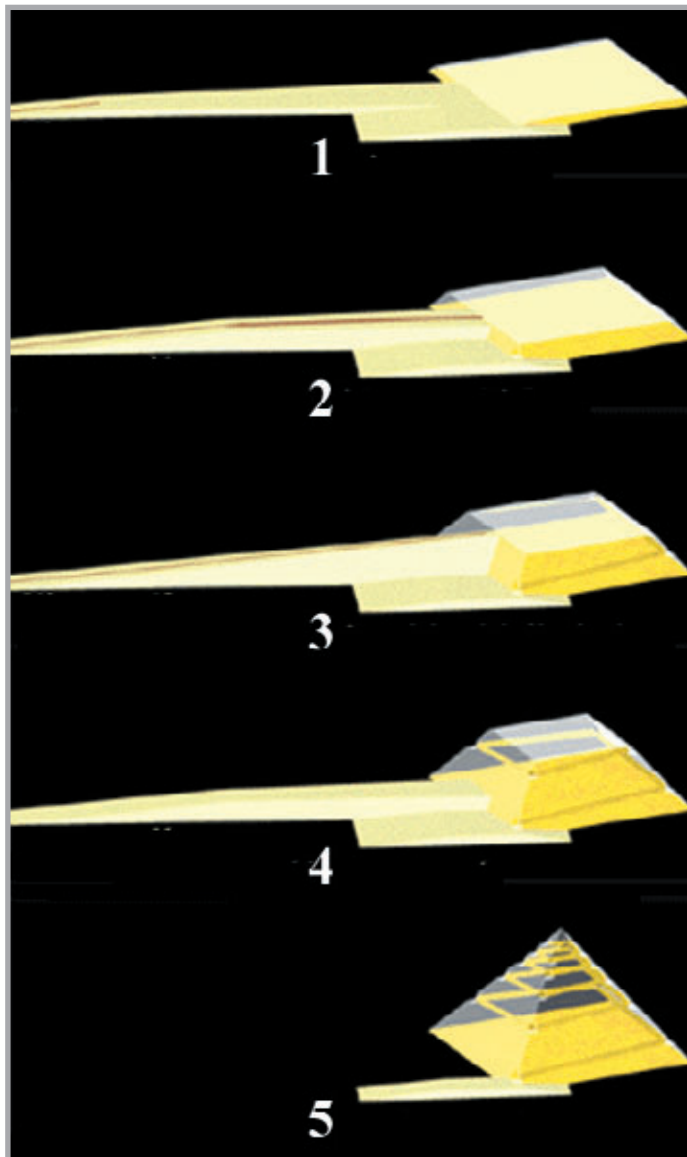
## ■ LES IMPÉRATIFS QU'IL EST ESSENTIEL DE RESPECTER POUR ÉTABLIR UNE THÉORIE

Un certain nombre de points paraissent essentiels :

- ◆ disposer jusqu'au niveau le plus haut possible d'une rampe en pente douce – 8 % maximum – tout en permettant de transporter les monolithes ;
- ◆ n'utiliser, pour construire une rampe extérieure et pour remplir la pyramide, que le volume connu de matériaux extraits de la carrière voisine en le réutilisant ;
- ◆ pouvoir contrôler pendant toute la durée des travaux les caractéristiques tridimensionnelles de la pyramide en laissant constamment libres les quatre arêtes, les rives des quatre faces et les quatre diagonales, éléments indispensables pour garantir une forme parfaite à la pyramide ;
- ◆ construire la pyramide par couches horizontales, et ne faire qu'environ une quinzaine de nivellements généraux pendant les travaux ;
- ◆ réaliser la majeure partie du ravalement au fur et à mesure de l'élévation ;
- ◆ utiliser des machines, mais uniquement ponctuellement et pour des besoins bien précis ;
- ◆ assurer la continuité et la sécurité du chantier.

## ■ NOTRE MÉTHODE LOGIQUE ET COHÉRENTE : LA SEULE PLAUSIBLE

On a vu au début de cet article que nous avons à traiter deux chantiers différents mais intimement liés : la construction de la pyramide et celle des ouvrages intérieurs. La méthode logique et cohérente que nous proposons répond parfaitement à cet objectif en se basant, d'une part, sur une combinaison de deux rampes et de machines et, d'autre part, sur l'emploi d'un contrepois.



**Figure 3**  
**Principe de construction de la pyramide**

1. Niveau + 7 m : Rampe extérieure en service ; point de départ de la rampe intérieure
2. Niveau + 21 m : 1<sup>er</sup> palier de la rampe intérieure ; base de la Chambre de la Reine
3. Niveau + 43 m : 3<sup>e</sup> palier de la rampe intérieure ; base de la Chambre du Roi ; hauteur maximum de la rampe extérieure ; la rampe intérieure va permettre de terminer le chantier
4. Niveau + 68 m : Démontage de la rampe extérieure en cours, réemploi de ses matériaux via la rampe intérieure
5. Niveau + 146 m : La pyramide est terminée ; la rampe extérieure a disparu, ses matériaux ayant été réutilisés pour construire la dernière partie de la pyramide

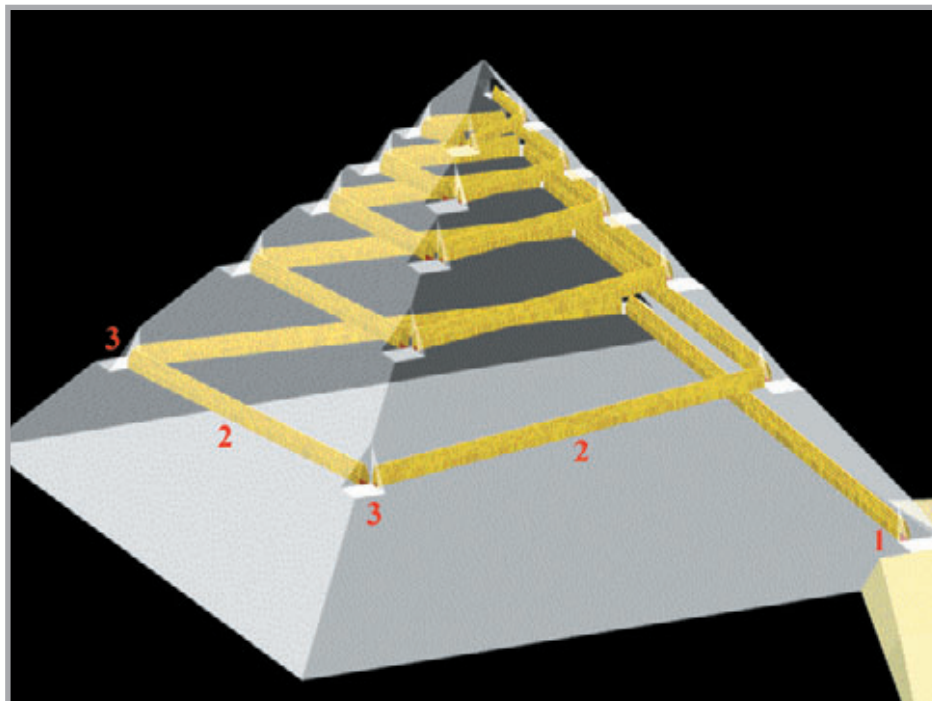
### **Pyramid construction principle**

1. Level +7 m : Exterior ramp in operation ; starting point for the interior ramp
2. Level +21 m : 1st landing on the interior ramp ; base of the Queen's Chamber
3. Level +43 m : 3rd landing on the interior ramp ; base of the King's Chamber ; maximum height of exterior ramp ; the interior ramp will make it possible to complete the project
4. Level +68 m : Dismantling of the exterior ramp in progress, re-use of its materials via the interior ramp
5. Level +146 m : The pyramid is completed ; the exterior ramp has disappeared, its materials having been recycled to build the last part of the pyramid

### **La combinaison de deux rampes et de machines pour la construction de la pyramide**

Une rampe extérieure (figure 3) est construite dès le début du chantier avec les matériaux de la carrière voisine ; en appui sur la face sud, elle s'élève jusqu'au niveau de la 50<sup>e</sup> assise (+ 43 m), soit à la base de la Chambre du Roi ; d'une longueur d'environ 500 m et d'une pente de 7,5 %, elle ne dépasse pas 750 000 m<sup>3</sup>. Elle est réalisée dès le départ à sa longueur maximum et élevée par couches horizontales successives. Elle est divisée en deux voies égales décalées d'une hauteur d'assise et séparées par un socle central maçonné aménagé en chaussée de traction.

L'utilisation des voies, revêtues en brique crue, est alternée : pendant que l'une sert au transport des matériaux, l'autre et le socle central sont exhaussés de deux niveaux d'assise. Elle permet de réaliser près de 73 % du volume de la pyramide et de transporter aisément, grâce à la chaussée centrale et au contrepois, les monolithes les plus lourds.



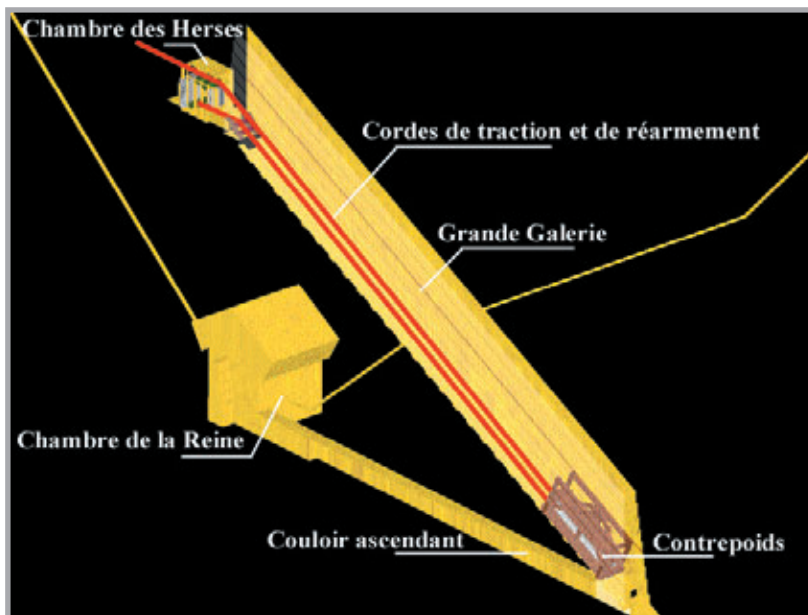
**Figure 4**  
**Rampe intérieure en spirale**

1. Entrée de la rampe intérieure  
2. Volée de la rampe intérieure en galerie - 3. Palier en encoche

**Spiral interior ramp**

1. Entrance of the interior ramp  
2. Flight of stairs on the interior ramp in gallery - 3. Recessed landing

**Figure 5**  
**Le système à contrepoids de la Grande Galerie**  
**The counterweight system of the Great Gallery**



La Chambre du Roi achevée, elle est alors démontée et la majeure partie de ses composants est récupérée pour terminer la construction de la pyramide.

Une rampe intérieure (figure 4), "chaînon manquant" entre la rampe extérieure et l'emploi de machines pour les dernières assises, est également construite dès le début des travaux. Partant près de la base (+ 7 m), elle est constituée d'une succession de 21 galeries droites de faible largeur – 2,60 m en-

viron – situées dans la maçonnerie de soutien parallèlement aux faces, au plus près de celles-ci à une distance de moins de 4 m. D'une pente moyenne de 7 %, elle est utilisable en permanence et est recouverte par une voûte en tas de charge construite au fur et à mesure de son avancement. Elle part à chaque volée d'un palier en encoche ouvert sur l'extérieur au droit d'une arête et débouche dans la paroi perpendiculaire, sur le palier d'une nouvelle encoche. De là elle repart à angle droit, comme un escalier, parallèlement à la nouvelle face jusqu'à la face perpendiculaire suivante, d'où son nom : rampe intérieure droite à quart tournant. Des "grutiers" assurent la rotation des traîneaux sur les paliers au moyen de chèvres. Le sol des galeries comporte deux sillons remplis de limon dans lesquels glissent les patins des traîneaux. Les attelages humains travaillent en toute sécurité dans de bonnes conditions de température, de ventilation – effet de cheminée – et d'éclairage – réseau de lampes à huile intégré dans les parois. Une coursive de service en bois construite parallèlement à l'extérieur permet le retour des attelages.

La rampe intérieure est utilisée concomitamment avec la rampe extérieure jusqu'à la fin de la construction de la Chambre du Roi, puis elle assure seule par la suite tout l'approvisionnement du chantier en matériaux, la dimension et le poids des blocs étant dès lors réduits. A ce stade des travaux, le volume de matériaux restant à mettre en œuvre et celui récupérable de la rampe extérieure sont quasiment équivalents. A la fin du chantier les encoches sont soigneusement rebouchées avec des blocs laissés en attente de part et d'autre de telle sorte qu'aucune différence ne soit visible.

A partir de la 188<sup>e</sup> assise (+ 130 m) et jusqu'au sommet de l'ouvrage, il ne reste plus que 8000 m<sup>3</sup> environ à mettre en place. Pour cela les matériaux livrés par la rampe intérieure sur un dernier palier en encoche sont élevés, grâce à une excroissance provisoire en forme de marches d'escalier, à l'aide de chèvres. Celles-ci sont parfaitement adaptées puisqu'à partir de ce niveau les blocs sont plus petits et calibrés. Le pyramidion d'une quinzaine de tonnes est introduit à l'intérieur de la pyramide avant le démontage de la rampe extérieure; il est ensuite élevé sur lui-même grâce à une chèvre spéciale, cette technique ne requérant que peu de place. Les récits d'Hérodote et de Diodore de Sicile sont ainsi tous les deux validés.

**Le système à contrepoids pour la construction des ouvrages intérieurs**

Il complète, grâce à la force qu'il restitue, celle produite par des attelages humains réduits manœuvrant dans le cas de figure le plus favorable évoqué : la traction brève d'une équipe travaillant à l'horizontale avec la charge sur une pente.

Ce système est articulé autour d'un contrepoids



glissant dans la gaine centrale de la Grande Galerie (figure 5) et réalisé avec les blocs de granite qui obstruent actuellement le bas du couloir ascendant. Sa course, environ 35 m, correspond à celle d'une traction et il est réarmé par une équipe à poste fixe faisant face au débouché de la Grande Galerie tandis que la Chambre des Herses sert de local technique provisoire.

Dans une première phase permettant le stockage des monolithes au niveau de la base de la Chambre du Roi, il est complété par la chaussée centrale de la rampe extérieure et par un espace de traction à l'horizontale sur l'assise concernée. Le traîneau chargé est relié simultanément au contrepoids et aux tireurs par des cordes dont une partie est segmentée par éléments de 35 m.

Le système est utilisé suivant un cycle réarmement/traction et après chaque traction un segment de cette chaîne est détaché, la partie restante étant à nouveau reliée au traîneau pour une nouvelle traction. Chaque monolithe est ainsi amené à l'aire de stockage moyennant une quinzaine de cycles.

Dans une deuxième phase (figure 6) – pour la mise en place définitive des monolithes – il est complété par une nouvelle chaussée de traction et un espace de traction à l'horizontale. Cette chaussée est élevée dans la face sud d'une pyramide intérieure érigée autour de la Chambre du Roi au fur et à mesure de la construction des plafonds de celle-ci. Un cycle suffit à la montée et la mise en place de chaque monolithe.

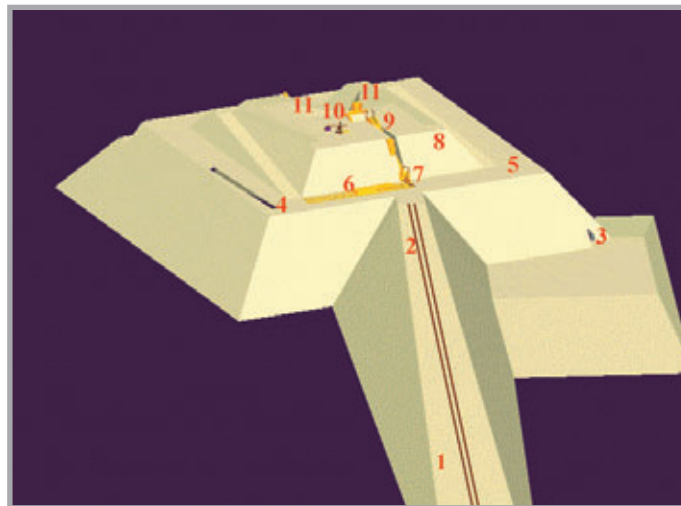
L'alignement des murs est de tous les ouvrages à l'intérieur de la pyramide et le décalage de 7,20 m vers l'est des axes des couloirs est justifié : les monolithes arrivent tous sur le même côté de la chambre et sont ensuite ripés latéralement et de façon dégressive vers l'ouest jusqu'à couvrir la totalité de celle-ci.

La Chambre de la Reine a peut-être eu deux rôles dans la construction : d'abord, en liaison avec le couloir ascendant, comme maquette pour expérimenter la technique du contrepoids, puis, grâce à son acoustique et ses deux conduits, comme système de transmission des ordres de chantier.

Ainsi, suivant cette méthode tous les impératifs énoncés sont respectés ; peu de matériaux ont été gâchés, d'où l'absence d'importants résidus aux abords de la pyramide – alors que 750 000 m<sup>3</sup> de remblais ont été nécessaires pendant une partie des travaux – et l'édification de la Chambre du Roi est expliquée.

## ■ PREMIER INDICE DE PREUVE

En 1986/87 des recherches ont été effectuées sous l'égide de la Fondation EDF dans le but de découvrir l'existence d'une chambre inconnue à proximité de celle de la reine et d'y trouver des trésors insoupçonnés. Près d'un millier de mesures de mi-

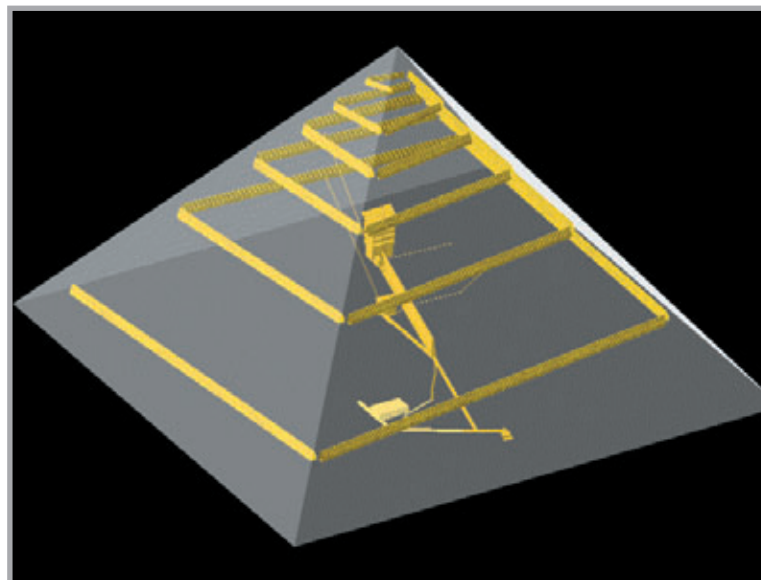


**Figure 6**  
**Chantier**  
**niveau + 43 m**

1. Rampe extérieure - 2. Chaussée centrale pour la montée des monolithes - 3. Entrée de la rampe intérieure - 4. Arrivée de la 3<sup>e</sup> volée de la rampe intérieure - 5. Niveau + 43 m (50<sup>e</sup> assise) - 6. Aire de stockage temporaire des monolithes - 7. Bascule de changement de pente des traîneaux des monolithes - 8. Pyramide intérieure érigée pour construire la Chambre du Roi - 9. Rampe spéciale pour la montée des monolithes - 10. Toit de la Chambre du Roi - 11. Plate-forme de traction pour les attelages

### Site level + 43 m

1. Exterior ramp - 2. Central passageway for raising the blocks of stone - 3. Entrance of the interior ramp - 4. Arrival of the 3<sup>rd</sup> flight of stairs on the interior ramp - 5. Level +43 m (50<sup>th</sup> course of blocks) - 6. Temporary storage area for stone blocks - 7. Rocker for changing slope of the stone block sled - 8. Interior pyramid erected to build the King's Chamber - 9. Special ramp for raising the blocks of stone - 10. Roof of the King's Chamber - 11. Hauling platform for the teams



**Figure 7**  
**Vue transparente**  
**de la pyramide**  
**avec la rampe**  
**intérieure**  
**telle qu'imaginée**  
**dans la théorie**

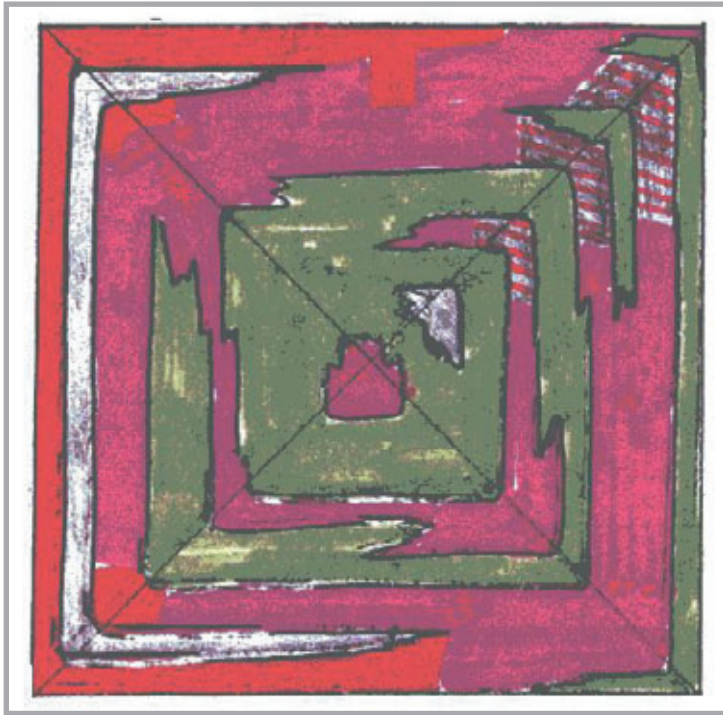
**Transparent view**  
**of the pyramid**  
**with the interior**  
**ramp**  
**as imagined in theory**

crogravimétrie a été pratiqué tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de la pyramide.

En 2000, ignorant cette campagne, nous avons présenté notre thèse aux experts ayant vécu celle-ci. Surpris par nos plans, ils nous indiquèrent que des anomalies avaient été constatées lors du dépouillement des calculs. A l'époque, certains d'entre eux avaient émis l'hypothèse qu'il pouvait s'agir de la "mémoire" d'une rampe hélicoïdale enveloppant la pyramide. La charge de celle-ci aurait densifié, par compression, les blocs l'ayant supportée. Cette hypothèse avait paru tellement invraisemblable qu'elle n'avait pas été retenue. Seules les mentions suivantes avaient été faites au Symposium d'Athènes de septembre 1988 :

- "ces zones ne se corrèlent pas horizontalement et peuvent suggérer diverses dispositions constructives (...constructions en spirale...)" et "sans qu'il ressorte de symétrie simple autre qu'une certaine allure en spirale".

Il est alors apparu que la thèse présentée pouvait très bien en apporter une explication crédible (figure 7).

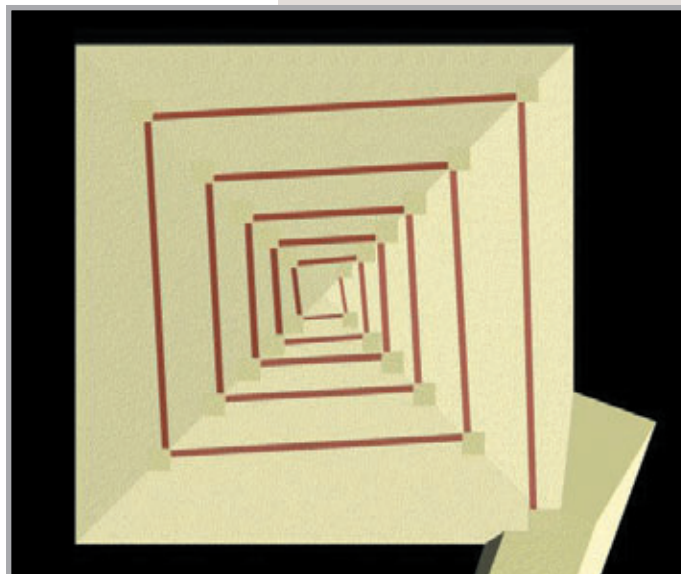


**Figure 8**  
Anomalies détectées lors des mesures de microgravimétrie effectuées sous l'égide d'EDF en 1986/87. En rouge, les zones de forte densité correspondant à celles des pierres utilisées pour la construction de la pyramide. En vert, les zones de faible densité pouvant indiquer la présence de vide dans la construction

*Anomalies detected during microgravimetry measurements performed under EDF sponsorship in 1986-87. In red, the high-density zones corresponding to the zones for stones used in construction of the pyramid. In green, the low-density zones which could indicate the presence of vacuum in the construction*

► La superposition (figures 8 et 9) du plan d'interprétation des zones de densité et de celui de la rampe intérieure révèle une très grande similitude. Ainsi se trouverait démontrée la validité de la rampe intérieure droite à quart tournant. Le recours à des technologies non destructives comme la sismographie, la thermographie infrarouge, la résistivité électrique ou encore le radar devrait permettre de détecter ces galeries et de prouver leur existence grâce à des microforages par lesquels seraient introduites des sondes endoscopiques.

**Figure 9**  
Vue en plan de la rampe intérieure. La correspondance entre les zones à faible densité et la position supposée des galeries est extrêmement troublante  
*Plan view of the interior ramp. The correspondance between the low-density zones and the assumed position of the galleries is extremely disconcerting*



### ABSTRACT

**Construction of the Great Pyramid. The only plausible method**

*J.-P. et H. Houdin*

Khufu's great Pyramid, the first of the seven wonders of the World and the only one which still exists, has always aroused fascination. It is a curious fact that no satisfactory explanation has ever been presented as to how it was constructed. Such theories as have been offered to date have all been flawed in that they leave two major questions unanswered. The first of these is how the zone between the base of the King's Chamber to the level (+ 43 m) and the summit of the pyramid was built. The second concerns the beams of 25 to 65 tons used in the chamber and how they were elevated and put in place. The proposition offered here answers both of these questions. Using knowledge that we know the ancient Egyptians possessed, allied to construction techniques and means that are proven to have been at their disposal, the riddle is solved. Firstly, there is the use of the straight interior ramp which rises spirally in quarter turns. This feature provides the "missing link" and offers the most economical means of construction. Secondly, there is the counterweight system which is the indispensable tool used for lifting and setting the heavy stones of the King's Chamber.

### RESUMEN ESPAÑOL

**Construcción de la Gran Pirámide. El único método verosímil**

*J.-P. y H. Houdin*

La Gran Pirámide de Keops, primera de las siete "Maravillas del Mundo" y única aún existente, ha suscitado siempre la fascinación. Curiosamente, nunca se ha propuesto una explicación satisfactoria para saber como fue construida. Todas las teorías que se han propuesto hasta la fecha presentan puntos flacos puesto que dejan sin respuesta dos interrogantes de capital importancia. La primera reside en saber cómo fue construida la zona comprendida entre la base de la Cámara del Rey en el nivel + 43 m y la cumbre de la pirámide. La segunda se refiere a la subida e instalación de las vigas de 25 a 65 toneladas de esta misma cámara. El método lógico y coherente propuesto resuelve estos dos problemas respetando siempre los conocimientos de los antiguos egipcios, así como las técnicas y medios demostrados de esta época. En primer lugar, corresponde a la utilización de la rampa interior recta de cuarto giratorio, que es el "eslabón faltante" que presenta el medio de construcción más económico de la pirámide. A continuación, el sistema de contrapeso es la herramienta indispensable para izar y colocar en su lugar los pesados bloques de la Cámara del Rey.

# Quai 400, port de Los Angeles

## Le chantier du futur

La société Sully-Miller (groupe Colas) présente principalement dans la région de Los Angeles avec près de dix postes d'enrobés bitumineux, une gravière et une société de construction de routes a remporté en mars 2001 le contrat de construction du Quai 400 pour le compte du Port de Los Angeles. C'est le contrat le plus important obtenu par une société du groupe Colas en Amérique du Nord et pourtant, Sully-Miller était "la moins-disante" des cinq sociétés invitées à participer à l'appel d'offres.

Cette plate-forme de 139 hectares servira à la compagnie maritime Maersk Sealand pour l'acheminement et le traitement de containers venant ou repartant par mer.

Le Pier 400 est le terminus du corridor Alameda qui relie, sur plus de 30 km, le centre de Los Angeles à son port, par voie ferrée et par voie routière.

Cet article présentera successivement les points suivants :

- ◆ examen des quantités principales à mettre en œuvre et des défis à relever pour la bonne marche du chantier;
- ◆ prise en compte des exigences du développement durable;
- ◆ le système de communication électronique mis en place pour l'accès à l'information;
- ◆ quelques précisions techniques;
- ◆ conclusion mettant en évidence la dimension futuriste de ce chantier.

### ■ EXAMEN DES QUANTITÉS PRINCIPALES À METTRE EN ŒUVRE ET DES DÉFIS À RELEVER

Les dimensions du chantier ainsi que les quantités mises en œuvre sont gigantesques. Par exemple, la structure de la chaussée se compose de :

- ◆ 300 mm de grave recomposée à partir de matériaux fraisés et de déchets de béton concassé;
- ◆ 100 mm d'un enrobé bitumineux 0/37,5 mm;
- ◆ 75 mm d'un enrobé bitumineux 0/37,5 mm.

Les quantités de grave recomposée (près de 1100 M de tonnes) permettraient de réaliser plus de 1000 terrains de football d'une épaisseur de 200 mm. Les quantités d'enrobés bitumineux conviendraient



© Ph. Lesage

Vue d'ensemble du Quai 400

Overall view of Quay 400

pour une route à deux voies d'une épaisseur de 40 mm sur plus de 1300 km.

Le béton de ciment servant à la base des grues de transfert des containers représente un volume de 20 000 m<sup>3</sup>.

Outre ces composantes, le marché comprenait également des prestations en terrassement (230 000 m<sup>3</sup>), l'installation d'un réseau électrique, d'un réseau d'eau potable pour l'incendie, d'un réseau d'eaux pluviales, d'un réseau d'eaux usées et de voies ferrées.

Une grande partie de ces prestations non routières a été sous-traitée par Sully-Miller à une vingtaine d'entreprises spécialisées.

Ce chantier est donc exceptionnel par les quantités mises en œuvre mais également en raison du délai qui était imparti. Le port de Los Angeles avait en effet promis de livrer cette plate-forme à la société danoise Maersk Sealand le 15 mai 2002. Sully-Miller disposait donc de 15 mois seulement pour la construction de cette première phase de travaux. Les pénalités prévues étaient de 61 718,00 \$ par jour supplémentaire de travail après le 15 mai.

Dans un tel contexte, ce chantier de 139 hectares faisant intervenir 19 sous-traitants sous-entendait une organisation très stricte.

Une équipe de direction de Sully-Miller a suivi le chantier en temps réel, au fur et à mesure des activités des intervenants internes et externes à l'entreprise.

En revanche, la météorologie de cette région des Etats-Unis est relativement clémente. Les hivers sont souvent frais mais peu pluvieux. En 2002 par exemple, entre mars et septembre, il y a eu plus de 170 jours sans pluie significative dans la région de Los Angeles.

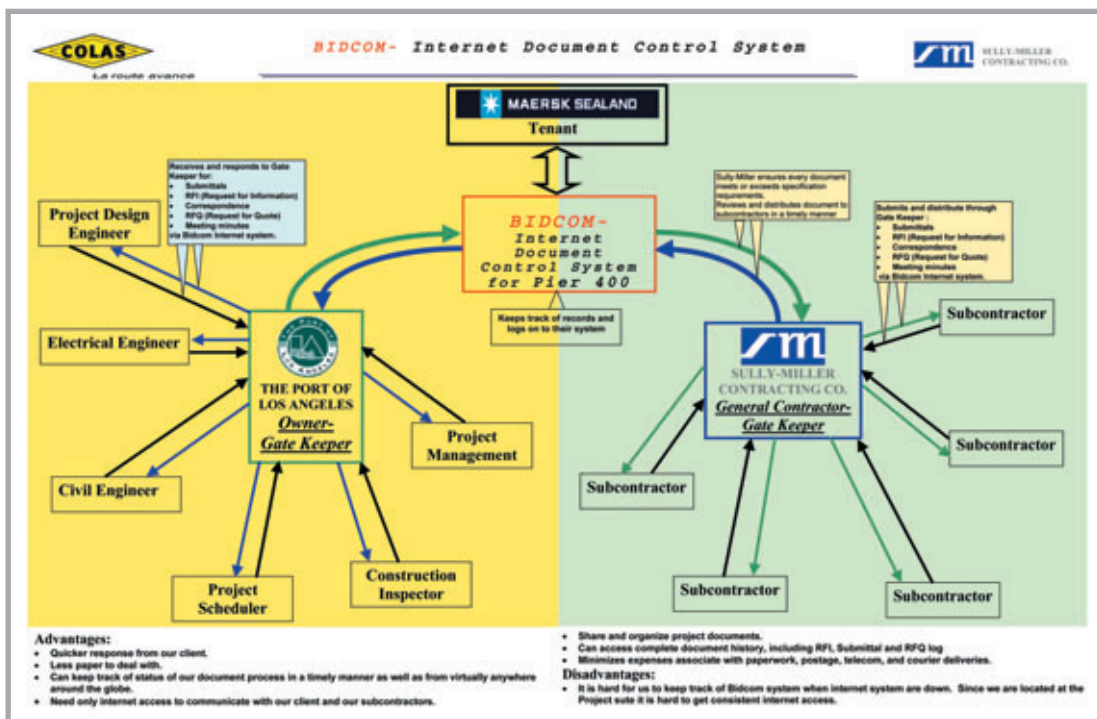
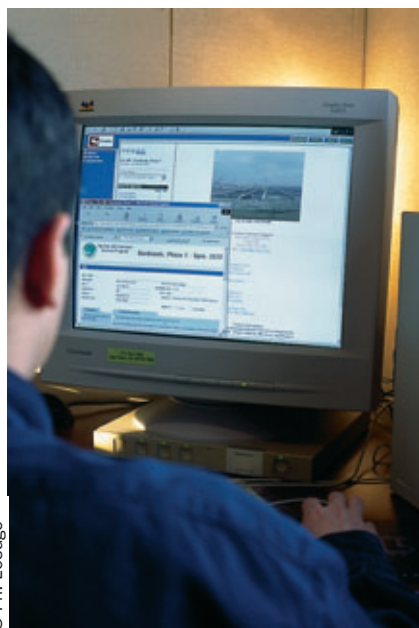


Figure 1  
Schéma de fonctionnement du Bidcom  
Diagram of Bidcom operation



Utilisation du système Bidcom  
Using the Bidcom system

## ■ LA PRISE EN COMPTE DES EXIGENCES DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

### Sécurité des hommes

Que ce soit pour Sully-Miller ou pour les sous-traitants, la question de la sécurité était omniprésente tout au long du chantier. Sur plus de 180 000 heures travaillées, aucun accident de travail sur le site n'a été déploré. Les mesures prises, relativement traditionnelles pour les sociétés du groupe Colas ont été étendues aux sous-traitants. Au début, certaines entreprises se sont plaintes de la quantité de documents à tenir et remplir ainsi que des réunions hebdomadaires à organiser. Mais rapidement l'ensemble des intervenants a pris conscience des progrès réalisés et s'est félicité de n'avoir à déplorer aucun incident, fait particulièrement remarquable pour un chantier de cette envergure.

### Protection des oiseaux

La sterne de Californie est un oiseau qui niche dans le sol sec des plages californiennes durant la période de nidification. En aucun cas le chantier ne devait perturber la nidification. Une zone de protection a donc été délimitée. D'autre part, la sterne ne nichant que sur du sol sec, Sully-Miller a utilisé 200 millions de litres d'eau, avec une arroseuse fonctionnant 24 heures sur 24, afin de ne pas permettre la nidification sur le chantier.

## Zéro papier

Les documents du chantier (rapports journaliers, quantités appliquées...) ont été traités sous forme électronique. Cette technique est d'ailleurs développée plus avant. Aucun document papier n'a été échangé à l'exception des documents relatifs à l'appel d'offres.

Un suivi électronique permanent a été mis en place pendant la durée du chantier, permettant une information en temps réel à la fois du maître d'œuvre, le Port de Los Angeles, et la société Maersk Sealand, futur locataire du Quai 400.

## Limitation des transports routiers

Afin de réduire au minimum les transports routiers, la plupart des matériaux utilisés pour les enrobés bitumineux ont été acheminés par mer depuis le Canada. Les bateaux d'une capacité de 60 000 t étaient déchargés directement sur le Quai 400.

Outre son incidence sur les coûts du chantier, cette action a permis d'éviter plus de 25 000 trajets de semi-remorques, dans une région soumise à un trafic intense.

## ■ LE SYSTÈME DE COMMUNICATION

Le système de communication mis au point par le Port de Los Angeles a été l'occasion d'optimiser les systèmes électroniques disponibles. Une information en temps réel journalière a été mise en place. Ce système, appelé BIDCOM, a permis de gérer pendant la durée du chantier l'ensemble des tâches des intervenants. Chaque jour, les quantités appliquées, posées ou installées étaient finalisées. Ce système a également permis d'optimiser les paiements (figure 1). Le chiffre d'affaires mensuel le plus élevé fut de 8 millions de \$.

Le décompte des prestations du mois était approuvé en 45 minutes et payé 10 jours après la fin du mois. Ce système de communication électronique présentait deux avantages : l'absence de papier et la rapidité des paiements.

A l'exception de l'appel d'offres, qui fut rempli sur papier, l'ensemble des documents et des rapports du chantier se trouvaient sous forme électronique.

## ■ LA PRESTATION TECHNIQUE DE SULLY-MILLER

En ce qui concerne, l'aspect routier du projet, quelques précisions techniques méritent d'être exposées. La grave reconstituée utilisée résulte d'un mélange homogène et suivi de granulats provenant du concassage de béton de ciment, du concassage de fraisats d'enrobés bitumineux et de granu-

lats et sables de carrières destinés à corriger la courbe granulométrique.

Les enrobés bitumineux employés sur ce chantier feront l'objet d'un développement particulier car ils sont, par leurs caractéristiques, très différents de ceux utilisés en France.

### La formulation

Ces enrobés bitumineux présentent une granulométrie que l'on retrouve en Grande-Bretagne, pour les couches de base, mais non pour les couches de roulement. Cette granularité 0/37,5 mm (1 pouce et demi en unité américaine) est exceptionnelle et ce type de formulation est sensible à la ségrégation de nature.

De plus, le fuseau de référence est très étroit et nécessite donc un suivi très précis (figure 2).

### L'approvisionnement des composants

Ces granulats provenaient d'une carrière de Colombie Britannique, au Canada. Leur déchargement a été particulièrement surveillé afin de limiter la ségrégation lors de l'opération.

Ils ont été stockés sur l'aire du Quai 400 à proximité du poste d'enrobage mobile installé à cet effet. Les aires de stockage ont été préparées avec des enrobés afin de limiter la perte de matériau et permettre l'évacuation de l'eau contenue dans les granulats.

Les stocks ont été créés étage de 2 m par étage de 2 m. Seul le bitume (AR 8000 d'après les spécifications du Port de Los Angeles) a été transporté par route sur le site.

La production journalière d'enrobés bitumineux a été en moyenne de 3500 t.

### La fabrication des enrobés bitumineux

Un poste mobile de 600 t/h a été installé pour ce chantier. De la même manière que pour le déchargement des granulats, la ségrégation a été le sujet central en phase de production.

Un suivi scrupuleux a été mis en place avec l'appui de trois techniciens. Les résultats sont probants, seules 75 t des 490 000 t appliquées ont été refusées sur ce chantier.

Au laboratoire également, des procédures ont été mises en place afin de limiter la ségrégation lors de la prise d'échantillon en vue des essais à réaliser. Plus de 50 kg d'enrobés bitumineux sont nécessaires pour obtenir un échantillon représentatif. De même, lors du chargement au poste, une procédure a été mise au point pour ne pas charger la benne du camion en un seul passage mais en le chargeant selon les indications données dans un document technique de la NAPA (National Asphalt

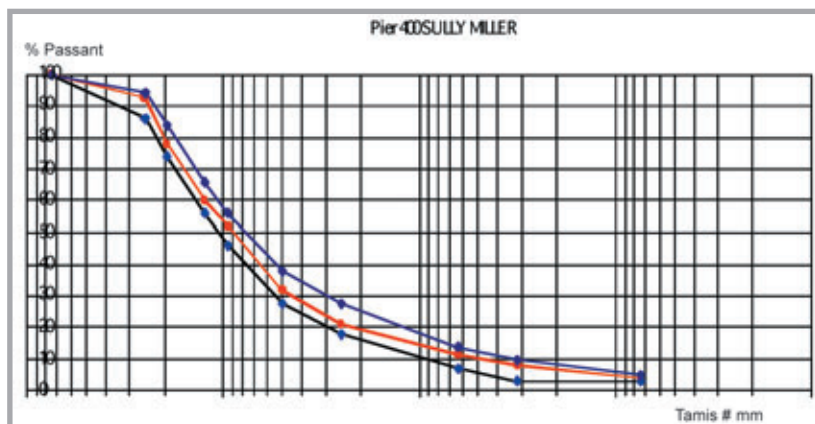


Figure 2  
Reconstitution granulométrique  
Particle size reconstitution



Barge de chargement et déchargement des containers

Barge for loading and unloading containers



Le poste d'enrobés bitumineux

The bituminous mixes station



Application des enrobés bitumineux 0/37,5 mm

Application of bituminous mixes, 0/37.5 mm



© Ph. Lesage

**Contrôle de compacité**  
*Compaction checking*

► Pavement Association, syndicat professionnel américain des producteurs d'enrobés bitumineux).

### Application des enrobés

Un système installé dans la trémie du finisseur a permis d'éviter d'avoir à refermer les côtés de cette trémie : l'enrobé bitumineux est dirigé directement sur les tapis d'amenée à la table.

Le compactage s'est effectué avec des compacteurs lourds vibrants.

Le contrôle de compacité effectué à la suite n'a pas montré de problèmes particuliers.

### ■ CONCLUSIONS : LA DIMENSION FUTURISTE DU CHANTIER

L'équipe jeune et dynamique de Sully-Miller en charge de la réalisation du Pier 400 a gagné son pari : réussir le plus grand projet du groupe Colas en Amérique du Nord en tenant compte des hommes et de leur sécurité, des impératifs techniques et environnementaux du chantier, des techniques modernes liées à l'Internet, sans oublier bien sûr les impératifs financiers et les contraintes de délais.

Accomplir un chantier de cette envergure sans avoir à déplorer d'accident de travail constitue un succès remarquable et Maersk Sealand a pris possession du Quai 400 du port de Los Angeles dans les délais prévus.

Sully-Miller attend l'appel d'offres de la seconde phase de ce chantier pour confirmer son professionnalisme et valoriser l'expérience engrangée lors de la première phase.

### ABSTRACT

#### **Pier 400, Port of Los Angeles. Project for the future**

*Fr. Chaignon*

**This gigantic project shows the potential of the company Sully Miller (Colas group) to control all the tasks of a job of more than 250 acres while taking in account the high demands for safety and environment.**

**In addition of that, the information system did allow to monitor all the tasks on a day to day basis and without any paper document.**

**An example to follow in the future.**

### RESUMEN ESPAÑOL

#### **Muelle 400. Puerto de los Ángeles. Las obras del futuro**

*Fr. Chaignon*

**Estas gigantescas obras vienen a demostrar la capacidad de la empresa constructora Sully Miller (grupo Colas), para dominar el conjunto de las prestaciones de un proyecto de más de 130 hectáreas, al mismo tiempo que se tienen en cuenta los importantes imperativos de seguridad y de medio ambiente.**

**Además, el sistema de comunicación ha permitido el seguimiento del conjunto de las tareas día por día sin el menor documento "de papel".**

**Se trata de un ejemplo a seguir para el futuro.**

# Sacramento (Californie)

## Etanchement de la digue rive droite de l'American River par une paroi sol-ciment-bentonite

Sacramento, capitale de l'Etat de Californie, (figure 1) est située au confluent de deux rivières, la Sacramento River et l'American River. En 1999, suite à plusieurs ruptures des digues qui protègent la capitale et aux graves inondations qui en résultèrent, les autorités publiques lancèrent un vaste programme de travaux de réhabilitation.

L'un des lots concernait le renforcement des digues en terre de la rive droite de l'American River par un écran étanche de 11 km de long, d'une superficie totale d'environ 200 000 m<sup>2</sup>, à réaliser selon la technique typiquement nord-américaine de la paroi sol-ciment-bentonite (SCB).

Ce lot, à réaliser au cours du second semestre 1999, fut attribué par le US Army Corps of Engineers, maître d'œuvre, au groupement d'entreprises américaines Soletanche Inc. - Inquip Associates.

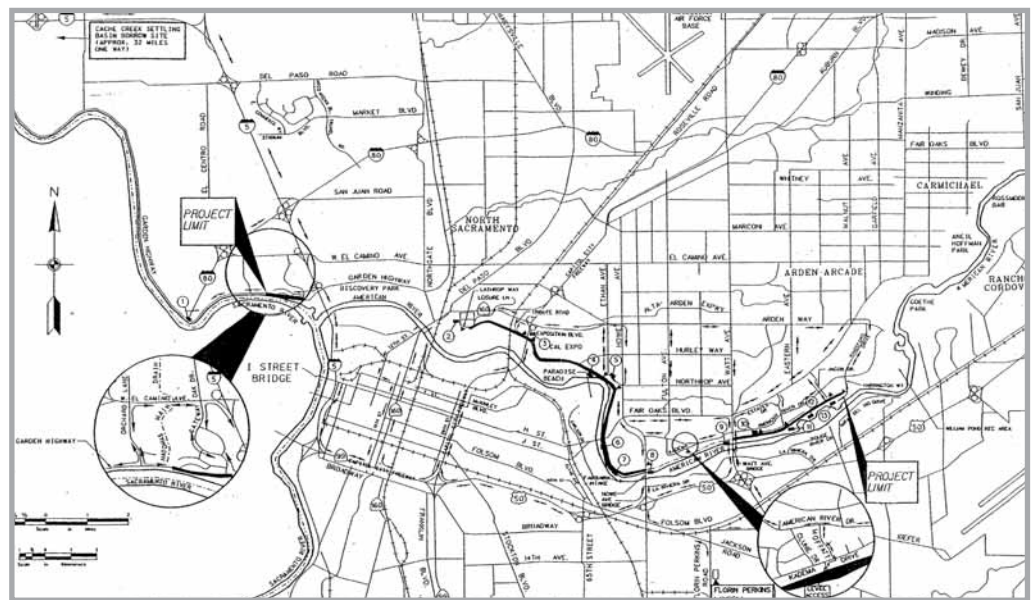
L'article rappelle les spécifications techniques de l'écran d'étanchéité et décrit le déroulement des travaux, depuis les essais de convenance du matériau SCB jusqu'aux résultats des essais de perméabilité in situ.



Figure 1  
Vue de la région  
de Sacramento

Sacramento  
area map

Figure 2  
Tracé  
de la paroi SCB  
Layout  
of the SCB wall



## ■ PRÉSENTATION DU CHANTIER

### Description générale des travaux

Les travaux consistaient principalement à réaliser un écran étanche de 11 km de long et d'une vingtaine de mètres de profondeur, s'étalant sur un chantier de 20 km et traversant la ville de part en part (figure 2).

La majeure partie de cet écran (10 km), le long de l'American River, devait être édifiée selon la méthode très répandue en Amérique du Nord de la paroi dite "sol-ciment-bentonite" (SCB), excavée à la pelle rétro à bras long.

Le tronçon restant de 1 km, le long de la Sacramento River, ne pouvait pas être construit en SCB, à cause de la présence d'une route située sur la crête de la digue et qui devait rester ouverte au trafic; la seule concession accordée par la ville de Sacramento a été d'autoriser l'ouverture d'une déviation pour mettre la circulation en sens unique au droit du chantier.

Cette partie du chantier, qui ne représente que 10 % de l'ensemble des travaux et qui fut réalisée par

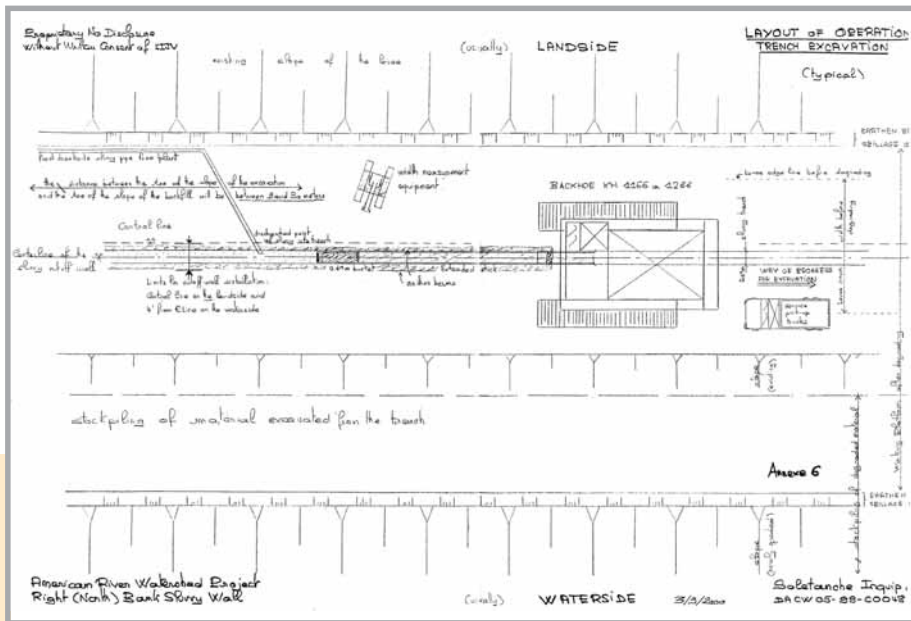
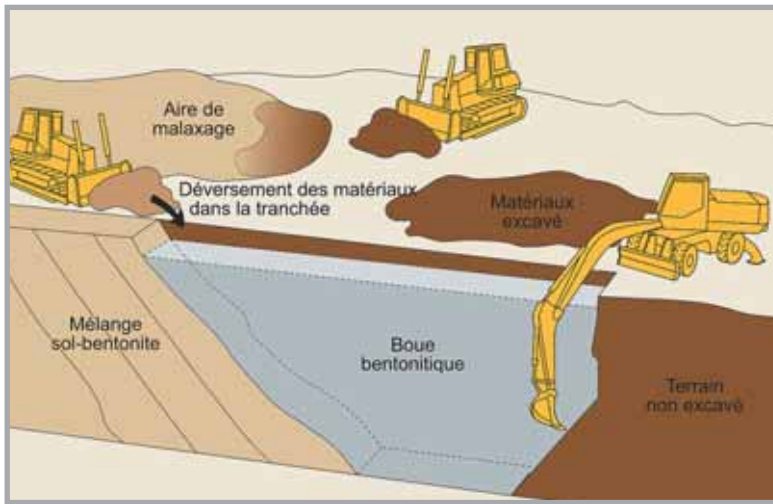
la technique classique de la paroi ciment-bentonite (hormis le fait d'excaver à la pelle-rétro et non à la benne), ne sera abordée dans cet article qu'à l'occasion de comparaisons avec la paroi SCB.

## ■ RÉALISATION DE LA PAROI SCB

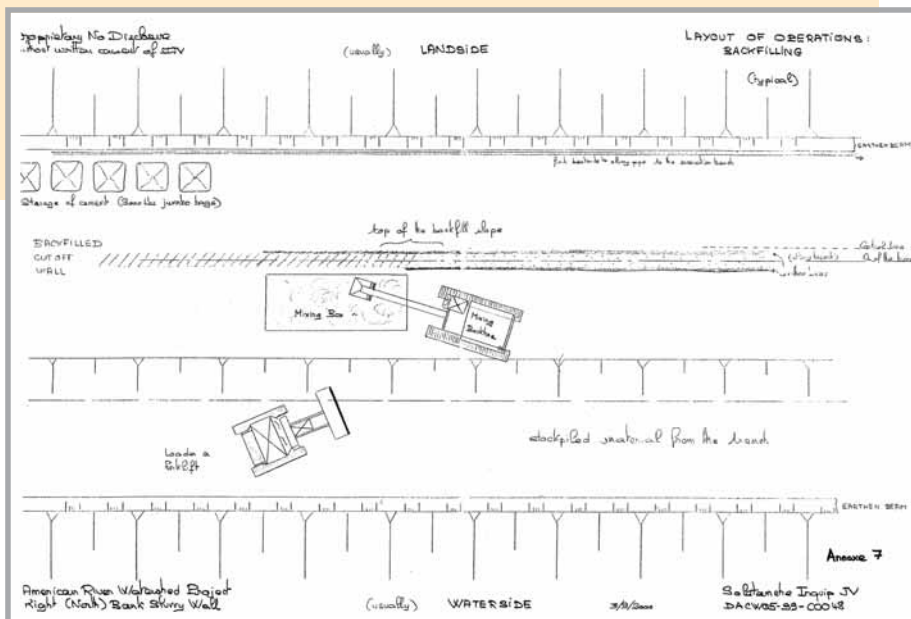
### Description générale

Le principe de la paroi SCB est de réutiliser les matériaux excavés de la tranchée dans le remblai

**Figure 3**  
Principe  
de construction  
de la paroi SCB  
Construction process  
of a SCB wall



**Figures 4a et 4b**  
Vue en plan schématique de la plate-forme de travail  
Schematic plan view of the working platform



constitutif de l'écran étanche définitif (figure 3). L'excavation de la paroi de 0,61 m de largeur et environ 20 m de profondeur, est faite par une pelle hydraulique équipée d'un bras long, au travers et sous les digues en terre existantes d'une hauteur de 3 à 5 m.

Les horizons géologiques traversés sont des sables et graviers, sables fins silteux et argiles.

La séquence des travaux est la suivante (figures 4 a et 4b) :

- ◆ détournement des réseaux éventuels ;
- ◆ décaissement de la digue afin de réaliser une plate-forme de travail ;
- ◆ excavation de la tranchée et stockage des déblais le long de la digue ;
- ◆ fabrication sur place du matériau SCB, à l'autre extrémité de la tranchée ouverte ;
- ◆ remblaiement : le SCB est déposé en tête de tranchée et s'écoule par gravité ;
- ◆ reconstruction de la digue avec un noyau en argile en tête de paroi ;
- ◆ rétablissement des réseaux, des routes de service et engazonnement.

L'écran est divisé en une dizaine de sections, d'une longueur allant de 200 m à 2600 m, en raison de divers obstacles (routes, chemin de fer, conduites enterrées, lignes haute tension). La digue, et par conséquent l'écran, suivent les courbes de la rivière. Le tracé est donc rectiligne ou à très grand rayon de courbure, et évite tout angle que la pelle rétro ne saurait prendre.

### Contraintes liées au respect de l'environnement

La saison des pluies en Californie centrale s'étend d'octobre à mars, avec de fortes chutes de neige dans les montagnes à l'Est. En raison des risques de crues, le contrat interdisait tous travaux touchant à la structure de la digue (paroi et terrassements) entre novembre et le 15 avril.

La paroi est séparée de la rivière par une zone inondable de quelques dizaines à quelques centaines de mètres de largeur. Cette zone aménagée en parc naturel ou de loisirs, est riche en espèces d'arbres ou insectes protégées. La traversée des piétons et cyclistes devait donc être surveillée à différents endroits.

Du côté opposé à la rivière, la majeure partie du tracé est longée par des habitations individuelles, en bois le plus souvent, situées à quelques mètres du pied de la digue. Ailleurs, on trouve des routes de desserte locale, des zones industrielles ou de bureaux, des parkings, des locaux universitaires et l'arrière du centre des expositions de Californie. Les spécifications contractuelles imposaient un enregistrement continu des vibrations et du bruit émis par l'activité du chantier. Ces mesures ont été mises en œuvre, sans résultat notable autre que l'avantage d'avoir des données en cas de réclamations



(inévitables petites fissures dans les murs de clôture ou carreaux de piscine). Les tolérances ont toujours été respectées, tant pour les vibrations (maxi : pics à 3 mm/s – soit 50 % du maximum – à 15 m pendant l'excavation dans les graviers) que pour le bruit (pics de 90 dB à 15 m pour la grue Koehring). Le matériel ou la méthode ne diffèrent pas en cela de la paroi moulée classique.

A noter une contrainte beaucoup plus lourde : le chantier ne devait émettre aucune poussière et l'activité était très surveillée dans les zones de villas avec piscine. Les mesures prises pour limiter la poussière au moment du mélange du ciment et de la bentonite pulvérulente sont décrites plus avant. Dans toutes les zones où la digue était décaissée, des camions aspergeaient toute la journée la plate-forme pour éviter que la circulation des engins, ou simplement le vent, ne provoquent des nuages de poussière. Cet effort a mobilisé deux camions-citernes pendant toute la durée des travaux.

Finalement, et bien que le chantier fût situé entièrement dans la ville de Sacramento, l'environnement urbain s'est trouvé peu contraignant, du fait de l'espace disponible et de la faible densité de circulation publique. On notera toutefois que la présence de riverains obligea à clôturer le chantier et à couvrir tous les soirs la tranchée ouverte avec des panneaux grillagés, ce qui représente une contrainte négligeable sur un chantier de ce type.

## Spécifications techniques

Comme souvent dans les contrats publics aux Etats-Unis, les spécifications techniques contractuelles représentaient plusieurs centaines de pages...

Ne sont reprises ici que les spécifications principales relatives à l'exécution de la paroi SCB.

### Profondeur - Critère d'ancrage

Afin de renforcer la tenue des digues en cas de crue, la paroi est soit ancrée dans des terrains relativement imperméables, soit arrêtée à une profondeur suffisante pour réduire le gradient hydraulique sous l'ouvrage.

Le sol excavé, et en particulier le matériau d'ancrage, devait être analysé en permanence. Un géologue, dont la présence sur le chantier était imposée par les spécifications, dressait ainsi une coupe de terrain tous les dix mètres environ (soit un millier à la fin du chantier!).

La profondeur du projet variait suivant les zones entre 18,1 m et 22,3 m (mais 13,5 m seulement pour la partie en paroi classique bentonite-ciment le long de la Sacramento River). Selon la nature du matériau d'ancrage, la profondeur réelle pouvait être ajustée par le maître d'œuvre de plus ou moins 1,5 m. Cette clause a été appliquée souvent et avec souplesse, soit pour descendre sous des sables et graviers trop perméables, soit pour s'arrêter à moindre profondeur dans des terrains durs

et suffisamment imperméables. La profondeur moyenne forée a été de 18,7 m.

### Matériau constitutif de l'écran

Suivant l'esprit du projet, l'écran avait évidemment un rôle d'étanchéité, mais aussi un rôle de renforcement mécanique de la digue (cela éliminant toute solution en paroi mince). Le matériau de cet écran de 61 cm d'épaisseur minimum devait être souple mais résistant, et surtout très imperméable. Le contrat spécifiait ainsi à 28 jours, une résistance à l'écrasement comprise entre 15 et 300 psi (103 à 2069 kPa) et une perméabilité inférieure à  $5 \times 10^{-7}$  cm/s.

On peut argumenter que cette dernière spécification, la plus difficile à respecter, était inutilement sévère : en particulier, compte tenu des joints de reprise, l'efficacité globale de l'écran n'aurait sans doute pas été moins bonne avec un critère 10 fois supérieur. Mais cette clause était intangible car figurant dans l'engagement du Corps of Engineers (COE) envers le maître d'ouvrage pour toutes les parois assurant une fonction identique en Californie.

Si le choix avait été laissé à l'entrepreneur entre parois CB ou SCB pour la partie Sacramento River (en respectant bien sûr les mêmes critères décrits plus haut), la paroi SCB en revanche, était imposée le long de l'American River. La formule du mélange SCB était de la responsabilité de l'entrepreneur et devait être choisie après une phase d'études et d'essais (10 formulations au minimum) utilisant des échantillons de sol représentatifs – donc extraits de sondages *in situ*.

Toutefois le mélange SCB devait avoir une teneur minimale en ciment (type Portland I/II) de 150 lbs/cuyd (89 kg/m<sup>3</sup>). On verra plus avant pourquoi cette contrainte n'a pas été respectée, avec l'accord du COE.

Deuxième contrainte : le mélange ne devait pas contenir de cailloux ou particules supérieurs à 76 mm. Enfin, lors de la mise en œuvre, le *slump* devait être compris entre 102 mm et 178 mm.

### Implantation de la paroi

Le projet spécifiait que la paroi devait être construite dans une zone de 1,22 m de largeur côté rivière à partir de la ligne médiane de la digue. Il aurait peut-être été plus judicieux de déplacer la paroi côté ville, pour agrandir d'autant l'espace disponible pour le stockage des déblais.

### Excavation de la tranchée

Le niveau de boue dans la paroi devait être maintenu en permanence entre 15 et 45 cm sous la plate-forme de travail, et au minimum 60 cm au-dessus de la nappe. Les caractéristiques imposées pour la boue étaient :

- ◆ filtrat < 20 cm<sup>3</sup> ;
- ◆ viscosité Marsh > 40 secondes ;

- ◆ densité > 1,025 g/cm<sup>3</sup>;
- ◆ pH entre 6,5 et 10;
- ◆ teneur en sable < 15 % en poids.

Ce dernier critère devait notamment être vérifié après le curage en fond de panneau et avant démarrage des opérations de remblaiement à chaque début de poste.

### Opérations de remblaiement en SCB

Le "coulis" utilisé dans le mélange devait faire l'objet d'un enregistrement en continu (densité, débit, volume), les spécifications étant écrites dans l'esprit d'une centrale de fabrication distante. Avec la méthode utilisée pour la fabrication du mélange, cette exigence s'est traduite plus simplement par le pesage du ciment à la bascule pour chaque gâchée (impression d'un ticket) et le comptage du nombre de sacs de bentonite ajoutés.

Afin d'éviter ségrégation et mélange du SCB avec la boue, la chute libre du SCB dans la tranchée est interdite. Il est donc déposé au niveau de la surface, en tête du talus qu'il forme dans la tranchée avec une pente naturelle de l'ordre de 1 pour 6 (pente qui varie avec le *slump* et le débit de dépose).

Cette contrainte conduit à des dispositions spéciales lors du démarrage d'une section : *lead-in trench* ou pompe pour déposer le matériau directement au fond, jusqu'à ce que le SCB émerge de la tranchée.

La pente naturelle du SCB combinée à la profondeur établissent une longueur de talus de l'ordre d'une centaine de mètres. Pour obtenir la distance totale entre les zones d'excavation et de remblaiement, il faut y ajouter la distance séparant le pied du talus de l'excavation en cours. Cette distance devait contractuellement être maintenue entre 9 et 30 m. Le respect de la valeur maximum de cette disposition est important pour la sécurité et le partage des responsabilités en cas d'effondrement plus ou moins grave de la tranchée. La valeur minimum limite le risque de mélange entre boue et SCB, et la réexcavation accidentelle de ce dernier.

#### Tête de paroi

Le SCB fait prise en quelques heures, et atteint rapidement les 15 psi requis avant toute intervention. Le SCB en tête de paroi doit être provisoirement recouvert dans les deux jours par de la terre non compactée pour éviter la dessiccation. Un noyau argileux est construit ultérieurement en tête de paroi.

#### Contrôle qualité

Le contrôle qualité faisait l'objet d'un rapport journalier. Comme toujours aux Etats-Unis, les tests sont réalisés par des techniciens n'ayant pas d'autres tâches. Sur ce chantier, le nombre des essais et

mesures à effectuer occupait largement une personne par atelier et par poste.

**Boue bentonitique** : tests classiques, deux fois par poste, de densité, viscosité, filtrat sur la boue neuve; tests, quatre fois par poste, de densité, viscosité, filtrat, pH et teneur en sable (en volume et en poids) sur des échantillons prélevés à différentes profondeurs dans la tranchée.

**Mélange SCB** : tests sur chantier, deux fois par poste, de densité, pH, *slump* et chaleur de neutralisation; prélèvement, deux fois par poste, de 12 échantillons cylindriques pour essais de perméabilité et de résistance en compression à 7, 14 et 28 jours.

**Mesures de profondeur** : outre les mesures suivant immédiatement la fin de la perforation, et celles effectuées en début de poste de remblaiement, les spécifications imposaient de mesurer la profondeur tous les 3 m le long de la pente du remblai SCB matin et soir.

**Mesures de largeur** : les spécifications imposaient de mesurer la largeur réelle de la tranchée, tous les 1,5 m de profondeur et à intervalles de 15 m le long de la paroi. A cette fin, un appareil a été développé, constitué d'un petit tracteur équipé d'une potence et de treuils supportant un gabarit métallique actionné par des vérins.

## MÉTHODES DE CONSTRUCTION

### Travaux préparatoires - Plate-forme de travail

#### Réseaux existants

Sur ses 10 km longeant l'American River, la digue est traversée par une vingtaine de réseaux. Les réseaux recensés sur plans par le client ont fait l'objet, suivant les spécifications, d'un sondage systématique sur le terrain. Les problèmes posés par la présence de ces réseaux pour la réalisation de la paroi diffèrent suivant leur nature :

- ◆ réseaux abandonnés : ils ont été mis à jour, démolis et la fouille remblayée en matériau d'apport compacté avant réalisation de la paroi;
- ◆ réseaux en service de faible diamètre : ces réseaux ont été soit coupés pendant les travaux et rétablis par la suite, soit protégés et enrobés dans une gangue de béton coulé en place;
- ◆ réseaux en service de gros diamètres : pour la majorité des gros réseaux, le projet du COE prévoyait une interruption de la paroi, la continuité de l'écran étant assurée ultérieurement par *jet grouting*;
- ◆ obstacles non repérés : malgré les recherches approfondies du COE et les sondages *in situ*, il peut arriver qu'un obstacle inconnu soit mis à jour au cours de la perforation. Si le réseau peut être identifié, coupé et colmaté rapidement, l'excavation reprend et les conséquences sont limitées au temps

perdu. En revanche, si l'on ne peut pas excaver dessous, et si la paroi doit être interrompue momentanément, les coûts sont plus lourds car il faut bâtir une nouvelle *lead-in trench* et réamorcer le remblaiement.

### Plate-forme de travail

La largeur de la plate-forme de travail doit être au strict minimum la largeur de la pelle d'excavation, centrée sur la paroi (les chenilles doivent se trouver bien à plat pour la stabilité). La méthode la plus simple consiste à stocker temporairement les déblais excavés sur le côté le long de la tranchée au fur et à mesure de la progression de l'excavation. Ces déblais sont ensuite repris directement pour être incorporés dans le mélange SCB, lui-même remis dans la tranchée.

Dans ces conditions, il est simple de calculer le volume des déblais à stocker en fonction de la profondeur et de l'épaisseur de la paroi (+ foisonnement suivant nature du sol). La crête de la digue n'étant pas assez large, il a fallu décaisser de 0,60 à 1 m (maximum autorisé : 1,20 m) pour créer une plate-forme de travail et de stockage adéquate. La figure 5 montre une coupe type du décaissement réalisé, avec une marche entre la plate-forme de travail et la zone d'épandage. Cependant, la meilleure solution pour le stockage des déblais consiste à creuser un véritable bassin le long de la tranchée, plutôt qu'une plate-forme : cette forme optimise le volume compte tenu de la largeur disponible, contient mieux les écoulements potentiels, et les déblais se trouvent plus près de la pelle de malaxage. Inconvénient : il faut entamer le corps de la digue. Dans le même esprit, la méthode de travail appelée *remote mixing* consistant à évacuer systématiquement les déblais vers une zone d'installation, avec centrale de fabrication du SCB, et retour du mélange par les mêmes camions, a été envisagée avant le démarrage du chantier. Cette méthode est classique en SCB (alors que le stockage sur place est usuel en S-B) et présente les avantages suivants : plate-forme réduite, malaxage mieux contrôlé en centrale, travail plus au propre.

L'étude a montré que, dans le cas de ce chantier, les économies sur les terrassements (décaissement et reconstitution de la plate-forme) n'équilibraient pas les surcoûts de transport AR, sans compter les éventuelles attentes camions lors de la perforation et du malaxage.

### Accès chantier

Du côté opposé au stockage des déblais (en principe côté terre), un cheminement sécurisé continu pour le personnel de chantier est souhaitable. En réalité, en raison de l'implantation imposée par le COE pour le tracé de la paroi, et de la volonté de minimiser l'impact des travaux sur le talus côté terre, ce passage n'a pas été toujours suffisamment large.

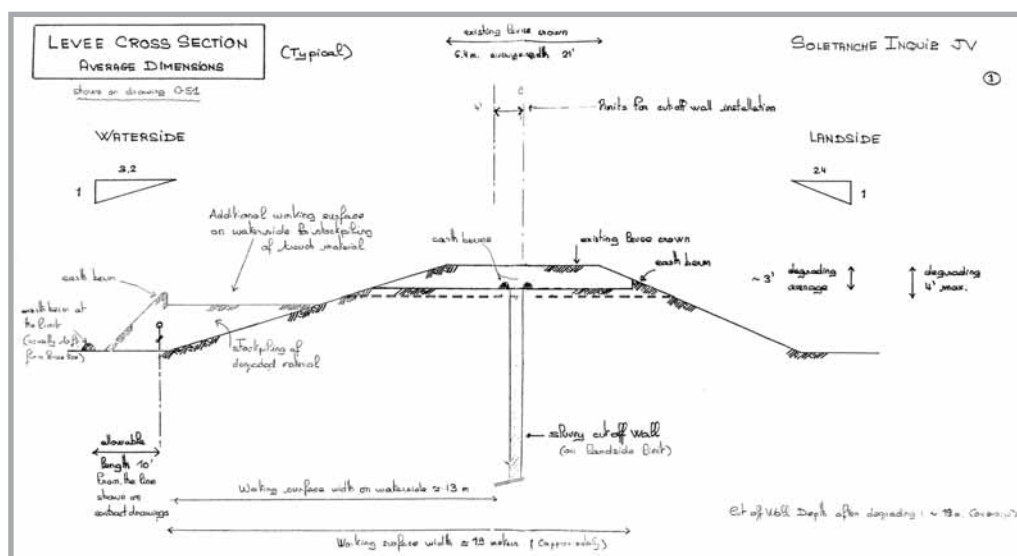


Figure 5  
Coupe-type de la digue  
Typical cross-section  
of the embankment

### Protection de l'environnement

Le stockage des déblais sur la plate-forme peut entraîner des écoulements de bentonite en pied de digue.

La conduite d'alimentation en boue neuve, habituellement posée en haut de la digue côté terre, présente aussi des risques. Des merlons de terre (50 cm) ont été montés systématiquement en prévention de part et d'autre de la zone de travail, et des bottes de paille mises en place aux accès principaux. Côté rivière, c'est la terre végétale décapée en première phase qui a été utilisée pour ces merlons.

### Excavation de la tranchée

#### Implantation de la paroi

Compte tenu de la nature de l'ouvrage, la précision dans ce domaine n'est pas fondamentale. Un piquet déporté et un autre dans l'axe ont été implantés par géomètre tous les 30 m, et ont servi de base au piquetage intermédiaire tous les 3 m, dans l'axe, pour le guidage de l'opérateur et de rappel pour le contrôle qualité.

#### Centrale à boue

La bentonite est fabriquée avec une centrale très simple installée sur l'une des dix zones mises à disposition le long de la digue.

La centrale est composée d'un malaxeur haute turbulence de forte capacité (9 t de bentonite à l'heure), d'un silo horizontal de 90 t pour la bentonite en poudre, de pompes et de bassins de stockage de boue d'environ 400 m<sup>3</sup>.

La boue neuve est envoyée dans la tranchée à l'aide d'une pompe Mission et de conduites Ø 4'', à une distance qui a parfois atteint 3 km. Compte tenu des distances séparant les différents ateliers de production, une centrale en alimentait généralement un seul, au plus deux. Deux puis trois centrales ont ainsi alimenté trois à cinq ateliers.

**Photo 1**  
**Pelle-rétro**  
**et son godet spécial**  
*Back-hoe*  
*with its special bucket*



### ► **Excavation et stabilité de la tranchée**

La perforation s'est faite sous boue bentonitique classique, en 0,61 m de largeur. La paroi est excavée en tranches ou passes successives de 8 à 14 m de long, suivant la profondeur, la machine et le terrain.

A la fin d'une passe, l'opérateur cure le fond sur toute la longueur que peut atteindre le bras de la pelle. Cette opération a été jugée suffisante par le COE, bien que les spécifications parlaient de pompe ou d'air lift, et demandaient le nettoyage tous les matins du tiers inférieur de la pente du SCB. Pour éviter la chute libre du SCB, la pelle débute habituellement une section par une pente de déversement ou *lead-in trench* à 1/1 en avant de la limite de la paroi. Il faut pour cela disposer d'une longueur équivalente à la hauteur de la paroi.

Pendant la saison d'excavation, la nappe se situait plusieurs mètres en dessous du pied de digue. En ajoutant la hauteur de celle-ci, la charge de boue est donc importante. Le risque sur la stabilité provient de la longueur de la tranchée ouverte, qui peut atteindre 150 m. La surveillance du niveau de boue dans la tranchée est donc primordiale.

Un autre risque est celui de la fracturation hydraulique de la digue, quand elle est haute (> 5 m) et suivant la compacité et la nature des matériaux constitutifs. Sous la charge hydrostatique de la boue, la digue se relâche et des fissures importantes et de grande longueur apparaissent, avec des écoulements de boue. Les travaux doivent dans ce cas être arrêtés d'urgence, la tranchée remblayée. Il faut alors envisager d'abaisser la plate-forme de travail, voire de reconstruire totalement la digue.

### **Rendements**

La perforation d'une passe de 10 m x 18 m durait environ 3 heures, soit 60 m<sup>2</sup>/h instantané dans du terrain facile. L'opération avançait donc, en temps

normal, à raison de 9 à 12 heures de perforation par jour, d'environ 25 m quotidiennement.

Par rapport à une paroi classique, la méthode permet d'éliminer les temps d'attente camions, le curage/dessablage, et il ne faut à l'opérateur que quelques minutes pour se mettre en position sur une nouvelle passe.

Toutefois, le rendement industriel global obtenu sur le chantier a été nettement plus faible en raison principalement du terrain dur et des attentes diverses.

### **Matériel**

Chaque atelier comprend les matériels suivants :

- ◆ 1 pelle rétro à bras long pour l'excavation ;
- ◆ 1 centrale de fabrication de la boue (malaxeur, silo, pompes, bassin) ;
- ◆ 1 pelle de mélange ;
- ◆ 1 boîte de mélange ;
- ◆ 1 silo de ciment sur roues ;
- ◆ chargeur ou chariot élévateur télescopique.

Le chantier a été démarré avec, rapidement, trois machines : deux Koehring 1266 et une Koehring 1166.

A noter que le godet est un élément déterminant pour le rendement. Il comporte des dents amovibles en avant et un trou en face arrière pour l'essorage de la boue (photo 1).

### **Opérateurs**

La technique de perforation à la pelle rétro à grande profondeur ne s'improvise pas. Ainsi, les spécifications exigeaient-elles pour les opérateurs une expérience sur au moins trois chantiers similaires.

## **Fabrication du mélange SCB**

### **Procédure**

Le choix a été pris, avant le démarrage, de fabriquer le mélange directement sur la plate-forme à l'aide de la technique la plus simple possible : le mélange du sol, du ciment et de la bentonite se fait mécaniquement dans une boîte métallique à l'aide du godet d'une pelle ordinaire.

La séquence est la suivante :

- ◆ la pelle tire la boîte métallique pour la placer à l'endroit où émerge le SCB ;
- ◆ la pelle prélève de la boue directement dans la tranchée, et la déverse dans la boîte jusqu'à un niveau prédéterminé ;
- ◆ le retardateur, liquide ou en sac de 25 kg, est ajouté manuellement ou avec le godet de la pelle ;
- ◆ le chargeur, situé de l'autre côté de la boîte, déverse le ciment pulvérulent contenu dans une cuve métallique préalablement remplie et pesée ;
- ◆ au même moment, la pelle prélève la bentonite additionnelle en poudre (suivant la formule utilisée), stockée en avance en sacs de 2 t le long des déblais ;
- ◆ la boue, le ciment et la bentonite sont mélangés

mécaniquement avec le godet de la pelle pendant 3 minutes environ pour obtenir un coulis homogène ;

◆ la pelle ajoute alors le nombre prévu de godets de déblais dans la boîte. L'ajout du sol peut se faire, au choix de l'opérateur, en une seule fois ou en plusieurs avec prémélange intermédiaire du coulis et du terrain ;

◆ les constituants sont mélangés à la pelle pendant 6 min environ, jusqu'à disparition du coulis libre et destruction des mottes d'argile ;

◆ on vérifie alors que le niveau du mélange pâteux dans la boîte correspond à peu près au volume calculé, et que le *slump* est acceptable ;

◆ le mélange est déposé avec le godet de la pelle en haut de la pente du SCB préalablement mis en place et s'écoule par gravité dans la tranchée ;

◆ lorsque la boîte est vide, le cycle recommence.

#### **Avantages de la méthode**

On remarquera tout d'abord que cette méthode ne nécessite à l'emplacement où se fait le mélange ni eau, ni électricité, ni pompes, ce qui est un gros avantage pour un chantier qui se déplace d'une vingtaine de mètres par jour.

Avec le SCB, utiliser la boue de la tranchée, et non de la boue neuve, est essentiel pour maintenir les caractéristiques de la boue et éviter le dessablage.

L'incorporation du ciment peut aussi être envisagée sous forme de coulis. Il faut alors un malaxeur et un ensemble pompe/conduite reliant le malaxeur à la boîte de mélange, avec les mêmes inconvénients que ci-dessus.

#### **Matériel**

**Pelle de mélange** : les pelles travaillent en continu dans un environnement difficile, au milieu des déblais boueux, et sont donc mises à rude épreuve. Les pelles John Deere 690 et 790, et Hitachi EX 200 utilisées au début pour le mélange se sont révélées trop fragiles et pas assez puissantes.

Elles ont été remplacées par des JD 330, avec une augmentation spectaculaire du rendement instantané (+ 30 %). Ce gain tient essentiellement à la taille du godet, qui permet d'accélérer le remplissage de la boîte en boue et en déblais, et à la vidange de la boîte, qui représentent la majeure partie de la séquence.

**Boîte de mélange** : son volume total est de 30 m<sup>3</sup>, mais il convient de respecter une garde d'environ 30 cm pour limiter les débordements lors du malaxage, et le volume utile est ramené à 23 m<sup>3</sup>.

Les temps de malaxage n'étant pas du tout proportionnels au volume du mélange, plus la boîte est grande, meilleur est le rendement.

**Silo de ciment** : le silo était installé sur ou à proximité de la digue, dans un endroit accessible aux camions.

**Chargeur** : utilisé principalement pour l'approvi-

sionnement en ciment et en sacs de bentonite, il sert aussi à pousser les déblais, à nettoyer la plate-forme et à recouvrir de terre la partie terminée de l'écran.

#### **Rendements**

L'opération critique est celle de la pelle de mélange, pour laquelle l'opérateur n'a quasiment pas de temps mort. Dans de bonnes conditions, la production est de l'ordre de deux gâchées de 20 m<sup>3</sup>/h, soit un rendement instantané moyen de 40 m<sup>3</sup>/h. Le rendement industriel final est de 20 m<sup>3</sup>/h, soit 50 % seulement de l'instantané. Les pannes et la maintenance ne représentent que 10 % du temps de travail. L'écart provient essentiellement des temps pendant lesquels l'atelier de mélange attend que l'excavation progresse suffisamment.

#### **Contrôles du mélange SCB**

**Boue bentonitique** : en première phase, la pelle prélève dans la tranchée un nombre déterminé de godets de boue. La quantité finale de boue va dépendre de la nature et de la teneur en eau du terrain, qui peuvent varier d'une gâchée à l'autre. Il faut viser la limite basse du *slump* (5''), de façon à rajouter si nécessaire à la fin du malaxage de la boue plutôt que du sol. La précision en première phase importe finalement assez peu, l'humidité du sol n'est jamais mesurée, et le respect de la teneur en eau du mélange est assuré par le *slump* final. En pratique, l'opérateur "sent" au cours du malaxage s'il y a besoin de liquide, et avec l'expérience évite le plus souvent l'ajustement final en boue.

**Teneur en ciment** : le poids de ciment ajouté à chaque gâchée est parfaitement connu et enregistré. La formule approuvée fait état du poids de ciment rapporté à celui du sol sec, et non du mélange. Le poids de sol sec contenu dans un godet bien plein (qui varie peu, contrairement à la teneur en eau et au poids total d'un godet) a donc été mesuré à chaque démarrage d'atelier, à chaque changement de matériel (pelle, boîte, cuve à ciment), et de temps à autre. Cette mesure laborieuse permet de fixer le nombre de godets de sol en fonction de la dose de ciment. La teneur en ciment est ainsi indépendante de l'ajout final en boue.

**Teneur en bentonite** : elle dépend de l'apport en boue – variable – et de l'apport en bentonite sèche, ajoutée de manière imprécise entre deux gâchées (niveau de remplissage à l'intérieur du godet à respecter).

**Homogénéité** : le mélange initial de la boue et du ciment s'effectue sans problème à condition de respecter une durée minimum. Un malaxage insuffisant du terrain et du coulis est facilement repéré par l'opérateur – ou l'inspecteur – car les filets gris de coulis sont alors visibles dans la masse marron.

Il faut garder à l'esprit que le SCB est un matériau

## **CONTRAT ET INTERVENANTS**

### **Nom du projet**

American River Watershed Project  
Right Bank Slurry Wall, Sacramento,  
California

### **Maître d'ouvrage**

Department of Water Resources,  
State of California

### **Maître d'œuvre**

U.S. Army Corps of Engineers, Sacra-  
mento District

### **Entreprise générale**

Soletanche-Inquip Joint Venture

### **Sous-traitant réseaux et divers**

Sierra National Construction

### **Sous-traitant terrassements**

DD-M



sensible, et que les malfaçons peuvent avoir des conséquences graves. La qualité du mélange varie avec celle du terrain.

La présence d'un technicien QC par atelier est pratiquement indispensable.

### Remblaiement en SCB

#### Amorçage

On a vu que le remblai SCB ne peut pas être déversé dans la tranchée depuis le haut au démarrage d'une section. La méthode classique consiste à excaver une pente de déversement à 1/1 en avant de la limite de la paroi. Si l'on ne dispose pas d'une longueur suffisante dans l'alignement de la paroi, la *lead-in trench* peut être en partie oblique ou perpendiculaire.

#### Section courante

La pente dépend essentiellement du *slump* à la mise en œuvre, mais elle a aussi tendance à s'allonger quand l'excavation s'éloigne. Lorsque les derniers pieds s'étalent sur une vingtaine de mètres, le bas de la pente du SCB est difficile à déterminer.

Ce phénomène d'étalement, avec une pente nettement moins forte en partie basse, se produit lorsque l'excavation en cours est maintenue plusieurs jours à 30 m – ou plus – du pied supposé du SCB. Pour la qualité de la partie inférieure de l'écran, il est préférable de maintenir l'excavation à une quinzaine de mètres, afin d'assurer un curage sur toute la zone excavée.

Après la prise du SCB, le lendemain ou surlendemain de la mise en œuvre, la tête de paroi est recouverte de terre non compactée pour éviter la dessiccation. Cette opération s'effectue sans précaution particulière car il faudra réexcaver au minimum les 30 cm supérieurs pour mettre en place le noyau d'argile.

#### Fin de section

A la fin d'une section de paroi, on ralentit l'excavation les derniers jours pour limiter le volume de boue à traiter (environ 1 000 m<sup>3</sup>). Avec des conditions favorables (planning, chaleur), la boue peut être répandue et sécher sur la plate-forme avant reconstruction de celle-ci. Sinon, il faut l'évacuer en décharge.

#### Survolumes

Le volume de mélange fabriqué lors d'une gâchée est calculé en mesurant la garde entre le niveau du SCB et le haut de la boîte. Il est assez vite constant, et connu avec une précision de l'ordre de 10 %. Le nombre de gâchées, et la consommation théorique de ciment, sont encore mieux maîtrisés.

La surconsommation de SCB (ou de ciment) ainsi calculée a atteint 32 % en moyenne sur le chantier.

### Reconstruction de la digue et finitions

#### Corps de la digue

La première opération consiste à séparer les galets du terrain excavé à l'aide d'un tamis vibrant. La reconstruction de la digue se fait ensuite avec des engins de terrassements classiques (bulldozer, niveleuse, chargeur, pelle, rouleau vibrant).

En dehors de la séparation des galets, la difficulté principale de cette phase a été le taux d'humidité du sol excavé. Lorsque la durée entre la perforation et la reconstruction de la digue était trop courte pour permettre le séchage des déblais, ceux-ci ne pouvaient pas être correctement travaillés et compactés.

#### Noyau d'argile de tête

Théoriquement, la géométrie du noyau argileux dépend de la hauteur du décaissement initial. En pratique, le noyau était de section rectangulaire : 3 m de large x (décaissement + 30 cm réexcavés dans le SCB en tête). Le matériau devait répondre à des critères de limite de liquidité (< 45), indice de plasticité (> 7), diamètre maximum (25 mm) et pourcentage de fines (n° 200 > 30 %), critères que ne remplissaient ni le sol décaissé ni le sol excavé. Il a donc fallu importer du sol argileux de l'extérieur (25 000 m<sup>3</sup> environ), et le placer en couches compactées à l'intérieur d'une tranchée creusée après reconstitution du corps de la digue.

#### Contrôles

Un test de compaction devait être réalisé tous les 420 m<sup>2</sup> de sous-couche, tous les 153 m<sup>3</sup> de sol mis en place, tous les 152 ml de noyau argileux et tous les 250 m<sup>2</sup> de surface de digue finie. De plus, un essai en laboratoire (Proctor, limites d'Atterberg, granulométrie) était dû pour quatre essais *in situ*. Ces centaines de tests ont requis le travail à plein temps de deux techniciens pendant les 2,5 mois de travaux de reconstruction de la digue. Le degré de compaction de 95 % et le taux d'humidité demandés ont le plus souvent été atteints du premier coup. Seules les zones nettement trop humides au départ ont posé problème.

La digue devait être reconstruite à l'identique. Afin de le vérifier, des coupes transversales ont été relevées par un géomètre tous les 30 m avant et après travaux. Les écarts constatés ont souvent dépassé les tolérances par le haut (surlargeur et surhauteur), en raison du survolume de sol.

#### Finitions

Les réseaux coupés pour la réalisation de l'écran ont été rétablis au cours de la reconstruction de la digue. Les pentes de la digue ont été chenillées de manière à limiter les entraînements potentiels de fines, et des barrières de confinement ont été placées aux endroits sensibles.

Après réalisation du noyau argileux, les rampes et la route de service en crête de digue ont été reconstruites (couche de base et couche de roulement), les panneaux et escaliers remplacés. Dernière opération, l'engazonnement des pentes de la digue et autres zones sujettes à l'érosion.

## ■ MÉLANGE SOL - CIMENT - BENTONITE

### Essais en laboratoire

#### Rappel des contraintes

On a vu plus haut que les spécifications contractuelles imposaient pour le SCB :

- ◆ une perméabilité maxi de  $5 \times 10^{-7}$  cm/s à 28 jours ;
- ◆ une résistance à la compression comprise entre 15 et 300 psi à 28 jours ;
- ◆ un *slump* à la mise en œuvre compris entre 5'' et 7'' ;
- ◆ une teneur en ciment minimum de 150 lbs/cuyd de mélange ;
- ◆ un diamètre maximum des particules contenues dans le mélange de 3'' (76 mm).

La mise au point d'une formule permettant de respecter les contraintes et d'atteindre les objectifs énoncés ci-dessus relevait de la responsabilité de l'entreprise. La phase de développement du mélange devait utiliser des échantillons de sol représentatifs (donc, implicitement, prélevés par carottages à travers la digue) et tester au moins 10 dosages différents, en faisant varier les proportions des différents composants, et la nature du sol si nécessaire. Les résultats et la formule proposée devaient être remis au moins 45 jours avant la date envisagée pour le démarrage des travaux.

#### Première phase d'essais en 1999

Dix essais ont été réalisés par un laboratoire privé en août 1999 en même temps que les essais du coulis de bentonite-ciment qui allait être utilisé pour l'écran le long de la Sacramento River. Ces premiers essais étaient basés sur une formule déjà utilisée et ne comprenant pas de bentonite sèche ajoutée. Ils ont fait varier :

- ◆ la teneur en ciment par poids de sol sec (7 %, 8 % et 9 %) ;
- ◆ le pourcentage de fines du sol (40 %, 55 %, 65 %), en utilisant différents échantillons ;
- ◆ le dosage et le type de retardateur ;
- ◆ la marque du ciment Portland utilisé.

Les résistances à la compression (37 à 86 psi) et les perméabilités ( $1,8 \times 10^{-7}$  cm/s maxi) se sont toutes avérées satisfaisantes. Le *slump*, dont la cible était 6'', a été plus délicat à maîtriser.

Par ailleurs, trois essais supplémentaires, non contractuels, ont été réalisés pendant cette première phase avec du ciment de haut-fourneau (*slag*

*cement*). Celui-ci permet de supprimer le retardateur, interfère moins avec la bentonite et donne une perméabilité plus faible à dosage équivalent. Il présente par contre l'inconvénient majeur d'avoir une prise très lente, avec une montée en résistance s'étalant sur plusieurs mois. Les 15 psi minimum, largement dépassés à terme, n'étaient donc pas atteints à 28 jours (3 psi seulement). Cette solution, écartée dans le cas présent, peut cependant présenter un intérêt sur d'autres projets.

#### Seconde phase d'essais en 2000

Une seconde série d'essais respectant, pour certains, les 150 lbs/cuyd de ciment a été lancée en mars 2000, avec pour objectif de faire accepter l'une des premières formules, nettement moins coûteuses en ciment. Les essais n° 14 à 17 ont respecté les objectifs en terme de résistance, perméabilité et *slump* (autour de 6''), avec une teneur en ciment allant jusqu'à 170 lbs/cuyd et 11,5 % en poids de sol sec.

C'est avec l'expérience de ces essais en laboratoire, et après avoir entamé les discussions avec le COE pour faire valider une formule avec moins de 150 lbs/cuyd de ciment, que des essais en vraie grandeur ont été lancés fin mars 2000. Ces essais avaient pour but de montrer que les bons résultats de résistance et de perméabilité pouvaient être reproduits dans des conditions de chantier. Ils devaient surtout permettre de valider ou faire modifier les méthodes de fabrication du mélange.

#### Analyse des essais en laboratoire

On retiendra de ces essais les principaux paramètres et comportements suivants :

- ◆ granulométrie du sol : plus le terrain contient de fines, plus il faut ajouter de liquide pour rester dans la fourchette du *slump*. Conséquences : la teneur en ciment et l'indice C/E diminuent, entraînant une baisse de la résistance ; l'indice des vides augmente et la perméabilité a alors tendance à être plus forte. Ce dernier phénomène semble toutefois souvent compensé par l'argile contenue dans le terrain, ou encore par une courbe granulométrique bien étalée. D'ailleurs, l'objectif de perméabilité a été atteint pour tous ces essais ;
- ◆ retardateur : les différents produits essayés ont sensiblement le même comportement. Si le rôle de retarder la prise du ciment est important en phase chantier, c'est la seconde fonction de fluidifiant qui est surtout examinée en laboratoire. Le produit permet, à *slump* égal, d'ajouter moins de liquide dans le mélange, avec les conséquences inverses de celles décrites ci-dessus ;
- ◆ teneur en ciment du mélange : enseignement essentiel de ces essais, la perméabilité n'est pas vraiment liée à la teneur en ciment, et elle dépend plutôt de la dispersion granulométrique du terrain, du pourcentage de fines ou de bentonite, de l'indice des vides ou d'autres facteurs difficiles à mettre



en évidence. On peut penser qu'avec un dosage minimum en ciment et une bonne dispersion de celui-ci, on assure l'essentiel, à savoir la prise du matériau. Le surplus ne sert alors plus à grand chose du point de vue de la perméabilité, et aurait même parfois tendance à interagir de façon négative avec la bentonite ;

◆ *slump* : on a vu précédemment que son maintien dans la fourchette autorisée demandait un ajout important de liquide en cas de sol fin, alors qu'une augmentation de la teneur en ciment aura peu d'influence. Sur chantier, un matériau avec un *slump* élevé sera plus facile à mélanger, à mettre en place et un peu moins coûteux. Un *slump* bas donnera par contre un matériau plus dense, donc – toutes choses égales par ailleurs – plus imperméable.

### Essais sur chantier

#### Premiers essais

Ces essais consistent à fabriquer une gâchée au plus proche des futures conditions du chantier, donc en utilisant le matériel (boîte, pelle) et les procédures (séquence et temps de malaxage, contrôle qualité) prévus. Le SCB obtenu est testé, mais non intégré à l'ouvrage.

Les deux premiers essais ont été réalisés environ un mois avant la date de démarrage de la paroi ; ils ont notamment permis d'étudier le mélange boue-ciment, de calibrer le godet de la pelle, et de dresser une courbe *slump*/temps.

Après avoir annoncé des résultats de perméabilité à 7 jours excellents, le laboratoire s'est rétracté et a confirmé des valeurs très inférieures à l'objectif ( $8,7 \times 10^{-7}$  et  $2,2 \times 10^{-6}$  cm/s). Nous avons alors pensé que le sol, qui renfermait de nombreux débris organiques, ou encore le mode de fabrication des échantillons pouvaient être en cause. Et, rassurés au moins sur les méthodes, nous avons proposé au COE d'assister à deux nouveaux essais, sur la digue cette fois.

Ces essais ont utilisé du terrain excavé dans les premiers mètres de tranchée, de nature franchement sableuse ou très silteuse. La prise d'échantillons a été plus soignée, avec tapotage du cylindre à chacune des trois couches.

Le laboratoire a de nouveau annoncé des résultats de perméabilité à 4 et 7 jours très éloignés de l'objectif. L'écart de perméabilité par rapport aux formules proches testées en laboratoire était d'un facteur 10, voire 50, alors que cet écart – sans doute inévitable – avait généralement été de l'ordre de 2, maximum 5, sur un chantier précédent.

#### Nouveaux essais

Nous avons alors décidé de remettre en cause sur plusieurs points la procédure ou la formule utilisée sur les essais précédents.

Une troisième série d'essais a donc été lancée en urgence alors que le chantier était prêt à démarrer.

Ces essais se sont attachés à vérifier les points suivants :

◆ utilisation de boue bentonitique provenant de la tranchée afin de vérifier que les écarts ne provenaient pas d'un temps d'hydratation insuffisant de la bentonite ;

◆ utilisation du sol importé destiné à être incorporé dans le mélange pendant la phase d'amorçage. Les caractéristiques de ce sol, sableux à 70 %, sont proches de celles du sol d'un chantier précédent ;

◆ utilisation d'un malaxeur pour la fabrication d'un coulis de ciment dosé à C/E = 2 ;

◆ le coulis est alors introduit en lieu et place du ciment en poudre. Cet essai avait pour but de lever le doute sur l'efficacité du mélange boue-ciment à la pelle, même si de visu le résultat semblait satisfaisant ;

◆ utilisation de terrain excavé de la tranchée en baissant progressivement la teneur en ciment et en introduisant de la bentonite en poudre à la fin du processus, à deux dosages différents. Ceci dans l'hypothèse où le ciment ferait perdre à la bentonite ses caractéristiques lorsqu'il est fortement dosé dans le coulis C-B, au début de la séquence de fabrication. Ce type de formule, dérogeant fortement à la clause des 150 lbs/cuyd de ciment, nous avait été suggéré par le COE, car cela avait donné de bons résultats sur un précédent chantier à Sacramento.

Nous avons également, pour certaines gâchées, prélevé plusieurs séries d'échantillons fabriqués de manière différente :

◆ SCB densifié dans le cylindre à l'aide d'une tige et non par tapotage ;

◆ cylindres plus petits.

Nous avons enfin demandé à notre laboratoire de tester :

◆ un même échantillon dans plusieurs cellules différentes ;

◆ un même échantillon dans le laboratoire installé dans les bureaux de la JV pour le chantier et dans le laboratoire extérieur ;

◆ un échantillon en le laissant deux jours dans le perméamètre ;

◆ les échantillons avec l'eau de la rivière, comme demandé par les spécifications.

Les nouveaux résultats insatisfaisants annoncés par le laboratoire à 4 puis 7 jours nous ont laissés perplexes. Bien que la résistance suivait d'assez près la teneur en ciment, aucune tendance n'apparaissait clairement pour la perméabilité, qui restait pour tous ces essais/échantillons/tests de l'ordre de  $1 \times 10^{-6}$  cm/s.

Ces résultats à peine connus, mais devant l'urgence de la situation, une nouvelle série de neuf essais a été définie. Les premiers résultats de cette quatrième série d'essais ont été donnés à nouveau dans la plage des  $1 \times 10^{-6}$  cm/s, et ne permettaient toujours pas d'établir de corrélation



entre la perméabilité et les différents paramètres et procédés. Le COE restait par ailleurs inflexible sur le critère discuté des  $5 \times 10^{-7}$  cm/s.

C'est à ce moment que furent décelées des incohérences dans les valeurs brutes relevées au cours de certains tests de perméabilité. Ces anomalies ne pouvaient s'expliquer que par de très faibles fuites dans le système, bientôt repérées au niveau de la pièce formant la tête de la cellule d'essai ! A partir de cette date, les résultats des tests de perméabilité à 7, 14 ou 28 jours se sont spectaculairement améliorés, pour passer généralement sous la barre des  $5 \times 10^{-7}$  cm/s.

### S-C-B en phase chantier

#### Formules utilisées sur chantier

Les erreurs du laboratoire remettaient en cause l'ensemble les résultats annoncés au cours des dernières semaines, sans qu'il soit possible précisément de corriger les valeurs a posteriori. Néanmoins, à partir des résultats postérieurs à la découverte des anomalies, deux formules distinctes furent proposées au COE :

- ◆ la première pour le sol d'apport sableux utilisé au moins pour l'amorçage ;
- ◆ la seconde pour le sol plutôt silteux excavé de la tranchée.

Ces deux formules ont été retenues pour leurs résultats satisfaisants aux tests, pour la faible consommation en matériau de la seconde (représentant plus de 90 % du volume total fabriqué), et surtout parce qu'elles simplifient au maximum la séquence et le matériel sur chantier : pas de coulis, pas de malaxeur, boue prélevée uniquement dans la tranchée, etc.

La composition réelle de chaque gâchée varie bien sûr en fonction du *slump*, de la nature du sol, de la température sur chantier, de l'opérateur, etc. On peut cependant estimer que la formule améliorée en usage à la fin du chantier avait la composition moyenne suivante – pour une gâchée de 23 m<sup>3</sup> (30,6 cuyd) :

- ◆ ciment en poudre : 2100 lbs soit 41 kg/m<sup>3</sup>, 4 % du sol sec ou 68 lbs/cuyd ;
- ◆ bentonite en poudre : 1000 lbs soit 20 kg/m<sup>3</sup> ;
- ◆ bentonite de la boue : 750 lbs soit 15 kg/m<sup>3</sup>, total bentonite 3,3 % du sol sec ;
- ◆ retardateur : 50 lbs soit 2,4 % du poids de ciment ;
- ◆ sol excavé (poids sec) : 52500 lbs densité globale du mélange 1,7 t/m<sup>3</sup> ;
- ◆ eau du terrain (25 %) : 17 500 lbs soit une teneur en eau dans le mélange de 35 % ;
- ◆ eau de la boue (5,6 m<sup>3</sup>) : 12500 lbs et un rapport C/E = 0,155.

#### Résultats en phase chantier

Sur l'ensemble du chantier, plus de 500 séries de tests à 7, 14 et 28 jours ont été réalisées (soit une moyenne de 3,4 par jour). Les résultats de résis-

tance ont été très satisfaisants (tableau I). Les résultats de perméabilité ont été satisfaisants également, mais plus variables avec quelques périodes très limites (tableau II).

### Analyse

#### Tests de perméabilité

Sans rentrer dans le détail du test de perméabilité ASTM D 5084-90, on peut dire que ce test, s'il nécessite du petit matériel très spécifique (perméamètre, raccords et joints, colonnes graduées de précision), reste simple dans son principe : mesure d'un débit sous une certaine pression à travers un échantillon préparé.

Les difficultés résident dans les nombreuses et souvent délicates étapes de la préparation (échantillon et cellule), de la calibration du système et de la réalisation du test. Le risque d'erreur provient aussi du fait que l'on cherche à mesurer des conductivités hydrauliques très faibles ( $10^{-9}$  m/s!), et qu'à ce degré de précision la moindre microfuite ou simplement une imprécision au moment de la lecture (différence d'appréciation entre deux techniciens par exemple) va influencer grandement sur le résultat. On a vu qu'un petit défaut sur une pièce formant la tête de la cellule d'essai pouvait provoquer des erreurs d'une puissance de dix.

Les trois laboratoires ayant travaillé sur le projet se sont successivement trompés.

En conclusion, on retiendra qu'à ce degré de précision le test de perméabilité est très délicat à réaliser convenablement dans la durée, qu'il y a donc lieu de retenir avec soin le laboratoire qui sera chargé de réaliser ces tests, et qu'en cas de problème il faut d'emblée soupçonner le processus du test et pas seulement le matériau testé.

#### Fabrication et cure des échantillons de SCB

En raison des difficultés rencontrées lors de la phase d'essais sur chantier et des doutes qui portaient sur la qualité des échantillons fabriqués pour les tests de résistance et perméabilité, de nombreuses dispositions ou procédés ont été étudiés :

- ◆ tamisage : suivant les spécifications, le matériau était passé, à la main, à travers une grille carrée de 6 mm d'ouverture, et recueilli dans un seau. Ce qui permet d'éliminer les graviers, mais aussi les petites mottes argileuses restées intactes. Ce procédé a été employé systématiquement, et aucune comparaison n'est disponible sur ce point ;
- ◆ remplissage : le remplissage des 12 cylindres plastiques (+ 2 en secours) était fait manuellement en trois couches d'égale épaisseur. Après chaque couche, on tapote vigoureusement le cylindre sur une surface dure. Ce tapotage, qui permet de chasser les bulles d'air et de densifier le matériau, est fondamental et améliore sensiblement la perméabilité par rapport à l'utilisation d'une tige, qui semble entraîner plus d'air dans le SCB ;

	Résistance moyenne	Moyenne hebdo/atelier		Satisfaisant > 15 psi
		Mini	Maxi	
7 jours	41 psi	15 psi	79 psi	96%
14 jours	52 psi	19 psi	113 psi	98%
28 jours	67 psi	24 psi	145 psi	99,50%

Tableau I

Table I

En cm/S	Perméabilité moyenne	Moyenne hebdo/atelier		Satisfaisant < $5,1 \times 10^{-7}$
		Mini	Maxi	
7 jours	$3,3 \times 10^{-7}$	$4,8 \times 10^{-8}$	$6,9 \times 10^{-7}$	85%
14 jours	$2,7 \times 10^{-7}$	$2,8 \times 10^{-8}$	$6,6 \times 10^{-7}$	90%
28 jours	$2,1 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-8}$	$5,1 \times 10^{-7}$	98%

Tableau II

Table II

**Photo 2**  
**Pelle-rétro**  
**à bras allongé**

**Extended**  
**arm back-hoe**



- ▶ ◆ table vibrante : en alternative au tapotage, nous avons essayé le compactage à l'aide d'une petite table vibrante basse fréquence. Ce procédé ne fait pas gagner de temps, n'améliore pas les résultats, et une circulation d'air à l'intérieur du cylindre apparaît lors de la mise en vibration de la dernière couche, entraînant une ségrégation et des débordements ;
- ◆ taille : la taille des échantillons cylindriques était imposée dans les spécifications (D = 3'' x L = 6''). Des cylindres plus petits (2'' x 4'') ont été testés en SCB. Les résultats de perméabilité des 2 x 4 ont été légèrement moins bons en moyenne, et surtout plus variables. Les échantillons 3 x 6, plus solides, peuvent être remplis avec plus d'énergie, d'où sans doute une meilleure compacité et une meilleure homogénéité ;
- ◆ lieu de fabrication : pour la dernière phase d'essais sur chantier, des échantillons supplémentaires ont été fabriqués dans le laboratoire de chantier, à partir d'un seau de SCB prélevé sur site environ 30 minutes auparavant. Les résultats de résistance comme de perméabilité ont été nettement et systématiquement moins bons qu'avec les échantillons fabriqués directement sur chantier. La raison en est certainement le début de prise du ciment au moment du remplissage ;
- ◆ transport : les échantillons sont nettoyés puis disposés à l'intérieur de boîtes plastiques dans une épaisseur de mousse creusée pour chaque cylindre individuellement. Le tout est alors aspergé d'eau. Les emballages moins soignés utilisés au début par les deux laboratoires du COE ont sans doute été à l'origine de certains résultats anormaux. Après la prise du SCB, il convient, pour ne pas risquer d'endommager les échantillons frais, d'attendre 72 heures minimum avant de les redéplacer, en particulier pour l'acheminement vers le laboratoire du contrôle extérieur ;
- ◆ stockage : les échantillons sont bien sûr entreposés dans une chambre à température et humidité contrôlées. Pour améliorer l'humidification du matériau, le couvercle de certains échantillons a été enlevé, tandis que des fentes étaient pratiquées sur certains autres cylindres. Ces mesures, qui pré-

sentent des risques de manipulation, n'ont apporté aucun changement dans les résultats, et n'ont donc pas été suivies ;

◆ préparation : la préparation d'un échantillon consiste d'abord à le retirer de son moule plastique, après avoir découpé celui-ci en trois endroits. La découpe au cutter provoque de légères entailles dans le SCB, qui sont en principe sans conséquences grâce à la membrane dont on revêt l'échantillon. Il est ensuite coupé à la taille de la cellule (environ 2'' de hauteur), et ses deux faces sont grattées.

#### **Procédés de fabrication**

Sans reprendre l'analyse du comportement des constituants du mélange, on trouvera ci-dessous les enseignements tirés des différents procédés de fabrication essayés quant aux résultats de perméabilité :

- ◆ le ciment peut être introduit en poudre ou sous forme de coulis, sans différence ;
- ◆ il est préférable d'introduire le ciment et la bentonite au début (avant le sol) afin de faciliter le malaxage et l'homogénéité du mélange ;
- ◆ au-delà d'un seuil (non connu), le surplus de ciment n'apporte rien et aurait même tendance à diminuer l'action de la bentonite ;
- ◆ le rôle du retardateur est également important comme fluidifiant ;
- ◆ la qualité de l'hydratation de la boue bentonitique n'a pas eu d'influence ;
- ◆ la qualité de la bentonite, pulvérulente ou granulaire, n'a pas eu d'influence ;
- ◆ la boue de la tranchée, chargée en sable, convient aussi bien que la boue neuve ;
- ◆ l'eau utilisée (rivière ou ville) pour le mélange et le test n'a pas eu d'influence ;
- ◆ il faut s'attendre à un facteur 2 entre les résultats de laboratoire et ceux sur chantier.

#### **Test de la chaleur de neutralisation**

Un test nouveau a été mis en œuvre pendant quelques mois. Il consistait à estimer la teneur en ciment du SCB à partir de la chaleur dégagée par la réaction exothermique entre le ciment et un acide versé sur l'échantillon. Les résultats n'ont jamais été en phase avec la courbe de calibration du laboratoire, ni avec la teneur théorique, ni avec les résultats de résistance à la compression. Ce test a donc été arrêté au cours du chantier.

## ■ RÉSUMÉ DES POINTS IMPORTANTS

### **Géométrie de l'ouvrage**

La technique de la pelle rétro (photo 2) est bien adaptée sur les tracés de grande longueur sans changement brusque de direction. La profondeur

idéale est sans doute d'une quinzaine de mètres, et reste raisonnable jusqu'à 25 m. Chaque interruption de l'écran SCB engendrant des surcoûts et délais importants, il convient de limiter les discontinuités, par exemple en détournant les réseaux ou en excavant dessous.

## Rendements

L'excavation à la pelle rétro à 20 m de profondeur dans des terrains faciles sera nettement plus rapide qu'à la benne. Le rendement réel est lié aux deux facteurs perforation et remblaiement, intimement liés par les règles d'ouverture maximale et de niveau de boue de la tranchée.

## Simplicité de la technique

La procédure utilisée pour la fabrication du SCB fait appel à du matériel standard et ne demande ni eau, ni électricité, ni pompes. Les installations sont rapides et réduites, et seule la centrale à boue nécessite un peu d'espace – mais elle peut être éloignée de la zone de travail. Le contrôle qualité n'a pas de raison particulière d'être excessivement lourd comme sur ce chantier.

## Efficacité de l'écran

La perméabilité du SCB peut être maintenue à moins de  $5 \times 10^{-7}$  cm/s, sur tout un chantier malgré l'hétérogénéité des sols. Cette valeur semble cependant inutilement faible. Avec un tel critère, l'étanchéité globale de l'écran – qui n'a pas été mesurée – va plutôt dépendre de la qualité des joints entre couches de SCB successivement déposées. On limitera le nombre de joints en assurant une continuité des opérations, et leur qualité sera améliorée notamment par le contrôle de la teneur en sable de la boue et par le respect de la distance appropriée entre perforation et pied du remblai.

## Risques

En dehors des déconvenues possibles sur le rendement (terrain dur, pannes), il faut veiller en permanence à trois risques principaux : fracturation hydraulique de la digue; surconsommation de SCB; obstacles enterrés non reconnus nécessitant une interruption de l'écran.

## Sécurité

La technique présente les risques classiques du métier sans spécificité marquée. La plate-forme de travail est en partie encombrée de déblais et boueuse. Les circulations d'engins sont assez faibles. Aucun incident sérieux ne s'est produit pendant les travaux de la paroi SCB décrite dans cet article.

## ABSTRACT

### Sacramento (California) Sealing the levee on the right bank of the American River with a soil - cement - bentonite wall

L. Aubert, N. Willig

Sacramento, capital of the State of California (figure 1), is situated at the confluence of two rivers, the Sacramento River and the American River. In 1999, following several failures of the levees protecting the capital and the resulting serious flooding, the public authorities launched a vast programme of rehabilitation work.

One of the work sections concerned reinforcement of the earth levees on the right bank of the American River with a watertight screen 11 km long, of total area about 200,000 sq. m, to be built according to the typically North American soil-cement-bentonite (SCB) wall technique.

This work section, to be executed during the second half of 1999, was awarded by the US Army Corps of Engineers, project manager, to the American consortium Soletanche Inc. – Inquip Associates.

The article summarises the technical specifications of the waterproofing screen and describes execution of the works, from suitability tests on the SCB material through to the results of in-situ permeability tests.

## RESUMEN ESPAÑOL

### Sacramento (California) Impermeabilización del dique de la margen derecha del American River, mediante una pared suelo - cemento - bentonita

L. Aubert y N. Willig

Sacramento, capital del Estado de California (figura 1) se encuentra en la confluencia de dos ríos, el Sacramento River y el American River. En 1999, a raíz de diversas rupturas de los diques que protegen a la capital y a las graves inundaciones que de ello se derivaron, las autoridades públicas iniciaron un amplio programa de consolidación de los diques de tierra de la margen derecha del American River, por medio de una pantalla impermeable de 11 km de longitud, de una superficie total de unos

200 000 m<sup>2</sup>, ejecutada acorde a la técnica típicamente estadounidense de la pared suelo-cemento-bentonita (SCB). Este lote de obras, a ejecutar durante el transcurso del segundo semestre de 1999, fue atribuido por el US Army Corps of Engineers, a la agrupación de empresas estadounidenses Soletanche Inc. - Inquip Associates.

Se mencionan en este artículo las especificaciones técnicas de la pantalla de impermeabilización y se describe el desarrollo de las obras, desde las pruebas de factibilidad del material SCB hasta los resultados de las pruebas de permeabilidad in situ.

# Un minéroduct dans Le plus long minéroduct

Spie Capag s.a., filiale de Spie SA, a construit le plus long minéroduct du monde : 300 km (Antamina Slurry Pipeline).

Dans un univers plutôt hostile, relief montagneux, altitude élevée, climat rude, les équipes composées de Français, de Colombiens et de Péruviens ont réussi à poser un pipeline de trois diamètres différents sur une longueur de 300 km pour acheminer le minerai de la mine d'Antamina au port de Puerto Huarmey situé sur la côte pacifique. En dehors de la performance exceptionnelle réalisée, ce projet constitue une référence de poids pour les futurs autres projets similaires qui pourraient se présenter dans cette région du globe (figure 1).



Figure 1  
Carte du Pérou  
Peru map

Photo 1  
Vue générale de la route d'accès à la mine  
General View of the road access to the mine



## LE PROJET

Le 21 décembre 1999, Spie Capag SA s'est vu attribué un contrat de 64 M US\$ pour la construction du projet Antamina Slurry Pipeline. Le contrat a été signé avec Bechtel Overseas Corporation, agissant en tant que maître d'œuvre de la Compagnie minière Antamina (CMA).

Ce projet s'inscrit dans le cadre du développement de CMA (Compañía Minera Antamina) d'un complexe minier au centre du Pérou pour la production de cuivre et de zinc provenant de trois différents minerais : deux de cuivre et un de zinc.

Le transport de ce minerai s'effectue par le biais de ce minéroduct de 301 km. Ce mode de transport moins contraignant que la route ou la voie ferrée, notamment sur le plan environnemental, consistait à construire un pipeline (diamètres 8", 9" et 10")

destiné à évacuer sous forme de boue épaisse (densité 4) le minerai de cuivre et de zinc de la mine d'Antamina située à 4200 m d'altitude au pied de la cordillère des Andes, pour l'amener au port de Huarmey sur la côte pacifique (photo 1).

Le projet a consisté principalement à :

- ◆ poser une conduite en acier avec un tube HDPE liner enfilé à l'intérieur de celle-ci pour assurer le revêtement, le minerai transporté étant très corrosif et abrasif ;
- ◆ poser un câble à fibre optique de communication enterré à 1 m de profondeur ;
- ◆ contrôler les soudures par ultrason automatique ;
- ◆ construire des stations de contrôle de pression et des stations de réception.

## LES CONTRAINTES

A l'étude du projet, trois contraintes sont apparues : travailler principalement sur route ouverte à la circulation – entre autres des poids lourds de la mine –, respecter une pente maximale de 12 % pour la pose du tube et franchir de nombreux dénivellés tout au long du tracé du "minéroduct" avec le passage d'un col à 4700 m.

Les difficultés associées à ces contraintes comprenaient :

- ◆ des mouvements de terrain importants le long des zones "cross-country" (hors route) pour obtenir des pentes à 12 % ;
- ◆ le travail en altitude (entre 3000 et 4750 m) dans des conditions climatiques particulièrement

### CALENDRIER DES TRAVAUX

- Passation du marché : 7 janvier 2000
- Début des travaux de pose : 1<sup>er</sup> mars 2000
- Fin de la pose des pipelines : 15 décembre 2000
- Fin des tests hydrauliques : 15 janvier 2001
- Achèvement des travaux : 15 février 2001

Photo 2  
Mise en fouille du tube  
Lowering



# les Andes du monde

**Yves Pasquier**

DIRECTEUR DE PROJET  
Spie Capag s.a.



difficiles handicapant sérieusement les performances des équipes humaines et du matériel ;  
◆ le travail sur route ouverte à la circulation sur 170 km avec un espace d'intervention très limité (photo 2).

Il a donc fallu aborder ce chantier avec un regard différent quant à la méthode de pose et aux matériaux mis en œuvre. Soixante pour cent du tracé s'inscrivait le long d'une route ouverte à la circulation, avec une bande de travail limitée à 3,30 m de large ; paradoxalement, à l'allocation du chantier, celui-ci fut considéré comme un chantier urbain.

Quatre groupes d'équipes de travail ont donc été constitués afin d'atteindre 1200 m de production journalière. Chaque groupe travaillait sur une emprise de 3000 m de long avec toutefois des espacements de 200 m entre les différentes équipes (creusement de la tranchée, bardage du tube et soudage, sablage et préparation des joints, mise en fouille, remblais) afin de permettre une circulation alternée (photo 3).

Pour le personnel, la raréfaction de l'oxygène se faisait sentir à partir de 3500 m d'altitude. Les organismes réagissaient différemment selon les individus (migraine, insomnie, hypertension...), ce problème s'accroissait pour certains qui effectuaient de nombreux trajets avec changements de dénivellés au cours d'une même journée. Un contrôle médical rigoureux a conditionné l'embauche du personnel qui a été suivi en permanence en phase chantier. Les temps de séjour des équipes travaillant en altitude ont d'ailleurs été réduits (photo 4).

## ■ DU SUR MESURE POUR LES CONDITIONS DE TRAVAIL ET L'ALTITUDE

Sur le plan du matériel, des engins compacts ont été utilisés et d'autres équipements spéciaux ont été conçus et mis en œuvre pour permettre de travailler dans ce corridor étroit réservé à la construction. L'ouverture de la tranchée a été essentiellement faite avec des tranchées modifiées afin d'évacuer les matériaux en avant sur des camions bennes et non pas latéralement (photo 5). Les tubes, d'une longueur de 12 m, ont été transportés et posés en fouille avec des camions à cabine centrale équipés de plateau rallongé pour la circonstance et de grue hydraulique auxiliaire. Les camions pouvaient ainsi décharger les tubes parallèlement à la tranchée. Le tube une fois soudé et en attente d'être dépo-



**Photo 3**  
Un chantier urbain  
An urban site

	Pression Maximum de Service (PMS)
Conduite	Pression Gaz
8", 9", 10"	230 bars
Acier	API 5L X 65



**Photo 4**  
Vue de la route  
View of the road



**Photo 5**  
Evacuation des gravats par camion benne en avant de la tranchée  
Removing rubble by skip truck at the front of the trench

► sé dans le fond de la fouille était supporté par des portiques sur roue enjambant la tranchée, développés à cet effet par le service matériel de Spie Capag SA. Ces portiques spéciaux remplaçaient les traditionnels "side boom" poseurs de canalisation inutilisables sur route (photos 6 et 7). Pour réaliser le lit de pose, le sable du fond de fouille n'était pas livré par des camions bennes classiques mais par des malaxeurs à béton qui se déchargeaient latéralement via une goulotte. Le remblaiement s'effectuait avec des petites char-

geuses dont le bras et le godet s'orientaient à 90° par rapport à la tranchée, évitant ainsi les manœuvres hors emprise de la voie réservée. Quant au matériel, il a fallu régler l'injection de tous les moteurs des gros engins (trancheuses, tracteurs, pelles...) pour réduire le débit de gazole, pour éviter tout risque d'étouffement et de surchauffe, induisant un risque d'éclatement des turbos. Malgré cela, la mise en route des moteurs était toujours difficile, nécessitant au moins une demi-heure de chauffe au ralenti.

Pour les petits équipements comme les plaques vibrantes à lancement manuel, il fallait leur injecter de l'oxygène au démarrage. La régulation des compresseurs était également difficile. Un système de valve de décompression à la sortie du séparateur d'huile a été installé pour éviter la réduction du régime moteur. Les pompes de chantier qui perdaient de la puissance ont dû être montées en série. L'altitude dénature l'huile également, qui devient plus épaisse et s'émulsionne. Les vidanges ont donc été ramenées à 3000 km pour tous les véhicules et 180 heures pour tous les engins, camions inclus (photo 8).

**Photo 6**  
Bardage  
Stringing



**Photo 7**  
Ouverture de tranchée  
et bardage de tubes  
Trenching  
and stringing



**Photo 8**  
Travaux hors route  
d'accès  
Cross country works



## ■ LA DIFFÉRENCE QUI FAIT LE SUCCÈS

Face à la concurrence, Spie Capag s.a. a réussi à s'imposer car elle est implantée en Amérique du Sud depuis 1985 à partir de la Colombie où elle a posé de nombreux pipelines. Ses expatriés connaissaient bien ces régions et une maîtrise colombienne a été formée à ce travail. Au fil des années l'entreprise a acquis une réputation de sérieux auprès des grandes sociétés d'ingénierie nord-américaines telles que Bechtel, Fluor Daniel, etc.

### **6 600 PERSONNES À 4 200 MÈTRES D'ALTITUDE**

La mine d'Antamina située à 400 km au nord-est de Lima au Pérou, est le plus important projet minier en cours de développement en Amérique du Sud. Le financement (2,3 milliards de dollars dont 64 millions pour le minéroduct) a été assuré par des opérateurs miniers canadiens, japonais et un financement international (la Banque Mondiale). Le gisement de cuivre et de zinc, situé entre 4 200 m et 4 800 m, sera exploité durant vingt ans avec une production annuelle de 1,8 million de tonnes de minerai concentré. Plus de 6600 personnes ont travaillé à l'aménagement du site (découverte du gisement, usine de concentration, bassin de sédimentation, etc.).

Sur ce chantier les exigences environnementales (sécurité et qualité) imposées étaient particulièrement élevées. Avec ses 301 km ce minéroduct est le plus long du monde : une belle référence pour de futurs projets !

## ■ LA SÉCURITÉ

L'effort de construction fourni par une centaine d'expatriés (principalement français et colombiens) et 700 péruviens, s'est inscrit dans le respect le plus rigoureux des normes de sécurité environnementales et archéologiques. Les chiffres en témoignent, au plus 120 jours d'arrêt de travail et trois accidents furent à déplorer en cours de chantier, sur 2 700 000 hommes/jour !

### LES PRINCIPALES QUANTITÉS

#### Moyens humains

- Expatriés : 12
- Colombiens : 60
- Péruviens : 700

#### L'équipe

- Directeur de projet : Yves Pasquier
- Responsable construction : Vincent Loffroy
- Superintendant : Jean-Luc Caspar
- Responsable administratif : L. Satui

#### Moyens matériels

- Sidebooms : 6
- Trancheuses : 4
- Pelles hydrauliques : 13
- Véhicules fourgons légers : 60
- Camions poids lourds : 50

### LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

#### Maitre d'ouvrage

Bechtel Overseas Group

#### Travaux

Spie Capag s.a. : 50 % - IGGSA : 50 %

#### Sous-traitants

- Pose liner HDPE : United Pipelines - USA
- Enrobage (revêtement de joints soudés) : Pipeline Induction Heat - UK
- Protection Cathodique : Corpro - Canada
- Pose, raccordements et *commissioning* fibre optique : Alcatel Pérou

### ABSTRACT

**A mineral pipeline in the Andes. The longest "mineral pipeline" in the world**

*Y. Pasquier*

**Spie Capag S.A., subsidiary of Spie SA, is building the longest "mineral pipeline" in the world, the 300-km Antamina Slurry Pipeline.**

**In a generally hostile universe, with a mountainous relief, high altitude and harsh climate, the teams consisting of Frenchmen, Colombians and Peruvians succeeded in laying a pipeline with three different diameters over a length of 300 km to convey ore from Antamina Mine to Puerto Huarmey harbour located on the Pacific Coast. Apart from the exceptional performance this involved, the project constitutes a major benchmark for other similar projects which could be carried out in the future in this region of the globe.**

### RESUMEN ESPAÑOL

**Un minero ducto en los Andes. El "minero ducto" más largo del mundo**

*Y. Pasquier*

**Spie Capag S.A., filial de Spie S.A. construye en los Andes el "minero ducto" más largo del mundo : 300 km (Antamina Slurry Pipeline).**

**En un universo más bien hostil relieve, montañoso, altitud importante y clima rudo, los equipos compuestos por franceses, colombianos y peruanos han logrado tender un pipeline de tres diámetros diferentes sobre una longitud de 300 km para transportar el mineral de la mina de Antamina hasta el puerto de Huarmey, situado en la costa del Pacífico. Además de la proeza excepcional llevada a cabo, este proyecto constituye una importante referencia para otros proyectos similares que puedan presentarse en esta región del globo.**

Une des raisons des succès des entreprises françaises sur les marchés internationaux est liée à leurs capacités techniques et d'innovation. Des exemples récents montrent même que l'innovation est un facteur stratégique important pour le développement international, et que innovation et international forment un cercle vertueux se nourrissant l'un l'autre. Cette capacité d'innovation, et l'aventure humaine propre à toute construction, sont à long terme un gage d'attractivité pour le secteur.



Photo 1  
Tunnelier de Groene Hart  
*Groene Hart tunnel boring machine*



Photo 2  
Hong Kong Portail sud de la route 3  
*Hong Kong South Gate on Road 3*

## ■ INTRODUCTION

Le secteur de la construction est souvent décrié pour son manque d'innovation et son peu d'attractivité des jeunes diplômés ou encore son caractère pour le moins perçu comme "low-tech". Par ailleurs, le public entend peu parler de batailles boursières concernant ce secteur que ce soit en France ou ailleurs dans le monde. Pourtant, l'éclatement récent de la bulle Internet et des télécoms s'est traduit par une chute brutale des valeurs industrielles les plus "high-tech" alors que les valeurs de l'économie traditionnelle, comme celle des entreprises de BTP, résistent plutôt beaucoup mieux. Il est donc temps de souligner que ces entreprises sont-elles aussi innovantes et internationales et que ces deux aspects s'y nourrissent l'un l'autre. Il est même tout à fait légitime d'y souligner deux aspects tout à fait uniques ; techniques et innovations de pointe y sont mises en œuvre au sein d'un tissu humain dense et chaleureux. Ceci en fait un milieu industriel passionnant et générateur d'aventures tout à la fois humaines et techniques. L'activité internationale et l'innovation entretiennent dans une entreprise de construction des relations étroites liées aux différentes stratégies qui peuvent y être déployées :

◆ les grands travaux à l'international sont très sou-

# Innovation

vent l'occasion de prouesses technologiques qui sont autant d'innovations ;

- ◆ certains marchés de niche n'acquièrent une taille suffisante que dans un contexte international ;
- ◆ les entreprises se doivent de suivre leurs clients eux-mêmes devenus internationaux ;
- ◆ l'introduction sur d'autres marchés nationaux de technologies innovantes en avance sur celles de la compétition est une stratégie payante ;
- ◆ la mise au point de nouvelles technologies et d'innovations demande de rechercher les meilleures compétences internationales dans des partenariats financés par des organismes supranationaux.

Ces stratégies sont actives dans les grandes entreprises françaises qui peuvent ainsi assurer leur leadership mondial sur un marché très compétitif : VINCI et Bouygues sont des leaders mondiaux avec respectivement des chiffres d'affaires dans la construction de 17,2 et 14,2 milliards d'euros en 2001 et leur activité hors de France compte pour 38 % et 45 % du total ; les seules entreprises routières de taille mondiale sont françaises avec Colas et Eurovia (7,5 et 5,5 milliards d'euros dont 44 et 41 % à l'international) ; un des très grands noms des fondations spéciales est Solétanche-Bachy dont 75 % de l'activité se situe à l'international.

## ■ LES CHALLENGES INTERNATIONAUX

La mise en œuvre directe du résultat de conceptions et méthodes particulièrement innovantes, est souvent indispensable pour répondre aux grands challenges techniques rencontrés par l'entreprise à l'international, qu'ils soient le résultat d'une taille exceptionnelle de projet, de contraintes environnementales ou de délais drastiques d'exécution. Pour Bouygues par exemple à Hong Kong, la réalisation d'une tranchée couverte d'accès au portail sud de la route 3 a conduit à la transformation du site en la plus grande carrière de granit d'Asie (1996-97). Les moyens mis en œuvre pour le marouflage, l'excavation, le concassage et le transport des convoyeurs ont conduit à un progrès significatif en matière de taille de projet réalisé et de délais d'exécution. En matière d'environnement, on citera le projet de tunnel ferroviaire de Groene Hart aux Pays-Bas, où travaille le plus grand tunnelier réalisé à ce jour (15 m de diamètre) pour une variante monotube très innovante (photos 1 et 2). Lorsque Groupe GTM, depuis fusionné avec VINCI,



# et international

**Vincent Cousin**

CONSULTANT  
EN MANAGEMENT  
DE L'INNOVATION  
Processus & Innovation

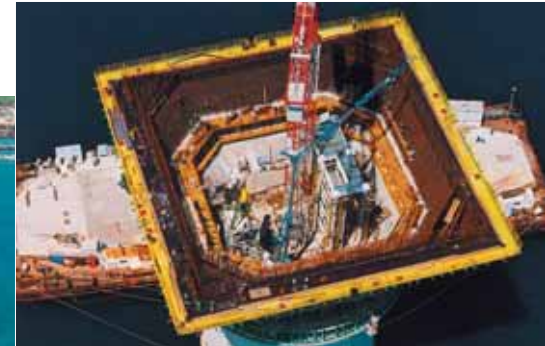


signe en 1997 la réalisation en concession du lien fixe Rion-Antirion entre le Péloponnèse et la Grèce continentale au travers du détroit de Corinthe, c'est à une série d'innovations qu'il faudra faire appel pour exécuter ce très difficile ouvrage : 2880 m de longueur en cinq travées haubanées par des profondeurs de 60 m enjambant une faille active et séismogène en extension!

La première est celle de la conception de l'ouvrage qui, du fait des contraintes de sol, de sismique, de vents et de chocs de bateaux conduit à innover avec un tablier unique, continu et suspendu aux quatre pylônes, et aussi avec des embases de fondations (90 m de diamètre - 75000 t) reposant simplement sur un sol renforcé (par des "clous" en acier de 2 m diamètre et 25 à 30 m de long). Ces deux dispositions, dont la deuxième est l'élément majeur, dotent la structure d'ensemble d'un comportement très adaptatif au séisme puisque la couche de liaison sol-embase agit comme "fusible" lors de séismes majeurs et peut ainsi céder selon un glissement horizontal qui décharge les efforts et rétablit la structure dans une position toujours verticale et saine même si les emplacements des embases ont été modifiés de quelques décimètres.

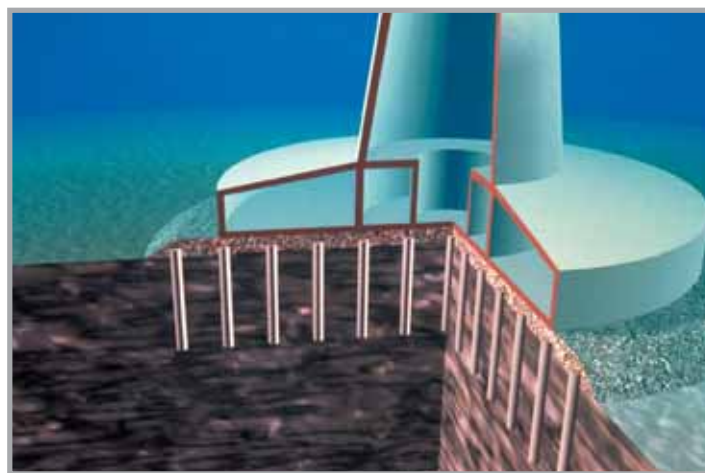
Le domaine des méthodes d'exécution est aussi largement sollicité puisque les embases ont été réalisées pour la première fois dans des docks fixes doubles et à deux niveaux mais sans ouvrage séparé de fermeture qui se fait par une structure métallique provisoire s'appuyant sur l'ouvrage en construction. Le problème de la réalisation du renforcement des sols sous les embases par 60 m de fond conduisant à la réalisation d'inclusions métalliques (200 environ sous chaque fondation) est aussi l'occasion du premier emploi en génie maritime des barges à pieds tendus adaptés de l'off-shore pétrolier et de la mise au point d'un cadre déporté pour le battage des inclusions et du positionnement des tubes d'approvisionnement en gravier pour le réglage de la couche de fondation intermédiaire (figure 1 et photos 3, 4 et 5).

De 1995 à 2000, c'est la réalisation du lien fixe de l'Oresund qui conduit à franchir de nouvelles limites technologiques. Celui-ci prévoit la réalisation d'un tunnel immergé de 3500 m de long acceptant deux lignes ferroviaires et une autoroute à deux fois quatre voies. Les méthodes d'exécution conduisent à préfabriquer des éléments de tunnel de 175 m de long, pesant 56000 t dans un atelier fixe à terre, de faire glisser à terre ces éléments coulés par plots de 22 m jusqu'à un dock de mise



**Photos 3 et 4**  
Pont de Rion-Antirion.  
Les piles en cours  
de travaux

*Rion-Antirion Bridge.  
Work on the piers*



**Figure 1**  
Pont de Rion-Antirion.  
Vue de synthèse  
du principe de fondations  
sur sol renforcé

*Rion-Antirion Bridge.  
Overall view  
of the foundation technique  
on reinforced ground*



**Photo 5**  
Vue aérienne  
de la double cale sèche

*Aerial view  
of the double dry dock*

**Figure 2**  
Tunnel de l'Øresund.  
Vue schématique  
des travaux à terre

**Øresund Tunnel.**  
Schematic view  
of work on land



**Photo 6**  
Vue du bassin  
de mise en flottaison  
et de l'atelier  
de préfabrication  
**View of the float-out basin  
and the prefabrication  
workshop**



en flottaison à l'abri d'un bateau-porte, de remorquer les éléments par flottaison jusqu'au lieu d'immersion, puis de les assembler au tronçon déjà construit avec des joints et des vérins spéciaux pour en conserver la rectitude (figure 2 et photo 6). Ce sont d'ailleurs sur tous ces chantiers de génie maritime que sont progressivement mises au point les techniques de topographie adaptées du GPS et qui sont devenues indispensables dans toutes les activités de génie civil.

Pour Solétanche-Bachy, le chantier de la Jubilee Line pour le métro de Londres en 1993, est l'occasion d'une grande première puisque les travaux de percement sont à effectuer à peu de distance de la surface sous des structures existantes qu'il ne faut pas perturber. Il faut donc tout à la fois observer et mesurer les perturbations induites dans le terrain par l'avancement du tunnelier et conduire les travaux d'injection en conséquence. L'observation de nombreux capteurs placés sur les structures et dans le sol permet, grâce à une chaîne de traitement et de stockage d'informations développée pour l'occasion et associant ordinateurs et télécommunications, de surveiller effectivement le terrain et d'en détecter les mouvements avec une précision du millimètre. Une analyse des données et une modélisation des résultats permettent

ensuite le pilotage avec un très faible différé des injections de compensation.

De telles technologies n'avaient encore jamais été appliquées en France. Elles ont été possibles du fait de la base technologique solide de l'entreprise qui a été ainsi capable de répondre rapidement au challenge posé par ce nouveau chantier international. Depuis, le domaine de l'acquisition en ligne des données de nombreux capteurs s'est très largement développé, et a conduit pour Solétanche-Bachy à établir une filiale spécialisée sur ce marché de niche d'ampleur internationale.

## ■ DES MARCHÉS UNIQUEMENT INTERNATIONAUX

Soldata est donc une filiale spécialisée dans le domaine de l'acquisition et du traitement de données nombreuses liées au sol. Suite aux travaux de la Jubilee Line, elle a développé de nouveaux produits et services : le logiciel GEOSCOPE pour la collecte, le stockage et le traitement de données issues de très nombreux capteurs et leur envoi à un central par télécommunications ou Internet ; le système Cyclops pour intégrer de multiples visées laser en temps réel sur des cibles et effectuer tous les calculs de corrections pour tenir compte des effets atmosphériques et des mouvements parasites. Des configurations à 150 cibles avec mesures plusieurs fois par heure sont désormais possibles. De tels systèmes ont été mis en œuvre sur Puerto Rico en 1998, puis à Madrid en 1999. Les câblages sont de plus en plus évités par l'emploi de transmissions radio utilisées et mises au point au cours des chantiers comme Amsterdam, Lefortovo (Russie), East West Rail (Hong Kong), Eurostar King's Cross (UK). Le projet d'Amsterdam a été l'occasion d'une installation spatiale sur 3 800 m x 200 m pour 6 000 points de mesure pendant 6 années associant 74 systèmes Cyclops reliés par réseau radio, permettant le suivi en temps réel de l'ensemble du tracé d'une future ligne de métro avec une précision inférieure à 0,9 mm.

Les sociétés VSL et Freyssinet, filiales respectivement de Bouygues et de VINCI dans le domaine de la précontrainte, y sont parmi les leaders mondiaux. Leur part d'activités réalisée à l'international est de respectivement 80 et 70 %. Elles renouvellent régulièrement leurs gammes de produits et services : câbles et ancrages de précontrainte, câbles et ancrages pour haubans et ponts suspendus. L'introduction des composites y est activement étudiée et, par exemple, Freyssinet vient de mettre au point un produit de câbles et ancrages en fibres de carbone pour l'ancrage des structures flottantes ou semi-flottantes par très grande profondeur (au-delà de 2 000 m) de façon à permettre l'exploitation pétrolière dans ces milieux hostiles (photo 7).

Le système Hydroplus de hausse fusible pour barrages inventé en 1995 représente une rupture importante dans le domaine de la gestion des ressources en eau. En effet, il permet à moindre frais de modifier la capacité de retenue des barrages ou le niveau d'écêtement des seuils déversants. Il en résulte soit une meilleure sécurité des retenues, soit une plus grande capacité, soit une meilleure gestion des crues des grands fleuves dans les plaines larges dont on peut maîtriser la mise en eau progressive. La qualité des prestations offertes par Hydroplus a une fois de plus été reconnue par la récompense – 2002 Award for National Rehabilitation Project – donnée cette année par l'Association of State Dam Safety Officials (USA) qui a salué la réhabilitation du barrage de Black Rock au Nouveau Mexique, dont la capacité du déversoir de crue a été multipliée par 7 sans pour autant diminuer la capacité de stockage. Le barrage était auparavant classé à haut risque par les autorités.

Les marchés sont ceux des fleuves majeurs et des barrages importants, ils demandent de nombreuses années pour venir à maturité du fait des impacts sur des ouvrages significatifs et des contraintes de financement. Le marché est devenu presque intégralement international et est passé de 1992 à 2000 de 0,5 à 4 millions d'euros pour une activité totale d'environ 25 millions d'euros depuis le début (figure 3).

## ■ AU SERVICE D'UNE CLIENTÈLE INTERNATIONALE

Il est naturel encore aujourd'hui de constater que la clientèle est avant tout locale. C'est même une caractéristique essentielle du secteur. Cependant, là aussi, l'on peut mettre en évidence des évolutions. Des grands groupes de distribution ont maintenant des stratégies au moins européennes. Pour accompagner leur développement international dans de nouveaux pays où les entreprises de construction sont jugées peu fiables, il est fréquent que ces groupes demandent aux entreprises françaises de prendre en main l'exécution de leurs magasins et bâtiments.

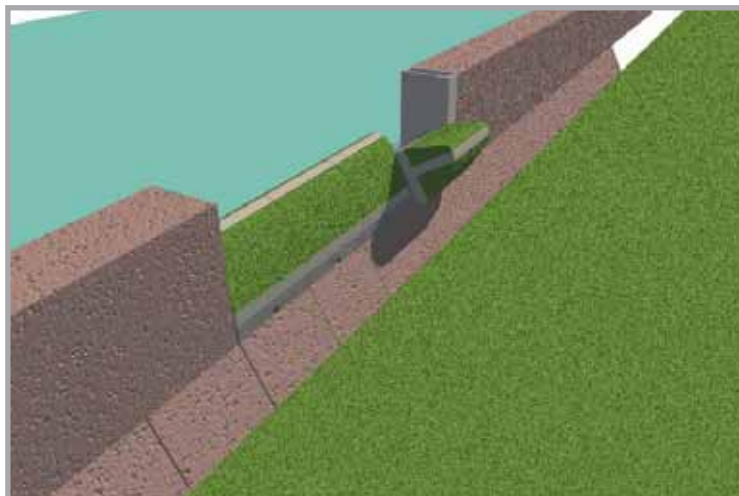
Le mouvement semble plus important et porteur d'innovations dans les secteurs industriels et des services. Deux exemples récents sont ainsi à souligner en montrant que cette stratégie peut se mettre en œuvre aussi à partir de filiales étrangères de groupes français de construction.

Le pôle Energie et Information de Vinci, actif dans les travaux et services d'électricité, de télécommunications et d'automatismes industriels, a ainsi acquis en 2001 une filiale autrichienne TMS spécialisée dans la conception et le montage des chaînes de fabrication et de transfert des automobiles. C'est une activité innovante et "high tech"



**Photo 7**  
Câble de carbone et son ancrage

*Carbon cable and its anchorage system*



**Figure 3**  
Une vue de synthèse de l'utilisation d'Hydroplus en écrêteur latéral pour grands fleuves en crue

*An overall view of the use of Hydroplus as a lateral flood limiter for large rivers in flood*

qui, collant de très près au process des constructeurs automobiles, suit ses clients dans tous les pays. Il devient ainsi possible d'ouvrir à TMS et au pôle Energie et Information l'ensemble des clients français du secteur automobile.

C'est une stratégie similaire qui est également suivie dans le secteur des services de maintenance ou plus généralement du "Facilities Management". L'acquisition par Vinci Construction en 1998 de SKE en Allemagne et aux USA a ainsi permis de prendre part au mouvement d'externalisation de l'opération des bases militaires américaines pour l'US Corps of Engineer. L'innovation n'est certes jamais très spectaculaire dans ces types d'activité, cependant la mise en place de réseaux connectant les intervenants individuels aux centraux d'opération pour leur permettre d'accomplir les tâches administratives indispensables et recevoir leurs instructions représente une innovation majeure et génératrice d'un saut important en qualité et en productivité.

## ■ TRANSFERT DE TECHNOLOGIES

Les parois et les pieux forés, moulés dans le sol sont les grandes spécialités de Solétanche-Bachy. L'entrée durable de cette société sur le marché très compétitif et très dynamique de Hong Kong a été le résultat de l'introduction de ces techniques à partir de la France où elles avaient été développées au sein d'une implantation permanente. Lorsque

**Photo 8**  
Bangkok Thaïlande. MRT  
Metro Project : benne  
hydraulique montée  
sur flèche raccourcie  
pour travail sous hauteur  
limitée

*Bangkok, Thailand. MRT  
Metro Project : hydraulic  
bucket mounted  
on a boom shortened  
for work with a limited  
clearance*



**Photo 9**  
Nagoya Japon. Réservoir enterré  
pour stockage de gaz naturel liquéfié.  
Construction d'une paroi circulaire  
à 100 m de profondeur utilisant  
une hydrofraise de 245 t

*Nagoya Japan. Underground tank  
for storage of liquefied natural gas.  
Construction of a circular wall 100 m deep  
using a 245-tonne hydro-cutter*

la société s'implante au début des années 70, elle y est la seule à posséder ce type de techniques. Depuis cette époque, l'activité n'a fait que croître pour atteindre un volume d'activité de plus de 100 millions d'euros, soit une pénétration de 15 % du marché des fondations profondes à Hong Kong et représentant aussi 25 % de l'activité totale du groupe, ou encore l'équivalent de l'activité française du groupe.

Les progrès technologiques à la source de ce développement et de cette "résilience" face à la concurrence sont principalement :

- ◆ des engins de creusement en continu (l'hydrofraise) ou en alternatif (la benne hydraulique ou mécanique, guidée ou pas) adaptés aux différents types de terrain toujours plus productifs, plus adaptables aux sites confinés, moins sonores (moins de 80 dB à 16 m), pouvant creuser jusqu'à 125 m de profondeur ;

- ◆ leur automatisation au moins partielle, comme la maîtrise du cycle d'excavation pour la benne hydraulique ;

- ◆ une instrumentation et un traitement informatique en temps réel des données permettant d'atteindre un très bon positionnement et une grande précision sur la verticalité des parois. En réduisant les déviations en dessous de 5 cm par 100 m de profondeur, il devient possible de construire le même ouvrage avec une paroi plus mince, offrant ainsi une très importante valeur client (photos 8 et 9).

Lorsque, en 1996, Jean Lefebvre, depuis fusionné avec Eurovia, acquiert la société Ringway en Grande-Bretagne, celle-ci est une société de services routiers sans technologies particulières puisque, d'une façon générale, le marché routier y est tenu par des acteurs peu industrialisés faisant appel à des fournisseurs de matériaux bitumineux travaillant sur produits normalisés. Au même moment, Jean Lefebvre comme ses collègues français a une avance technologique importante dans les bitumes, les bitumes modifiés, les enrobés à chaud, les bétons bitumineux à haute performance et les revêtements minces ou ultra-minces. Cette avance est d'ailleurs le résultat combiné d'une volonté stratégique, de partenariats techniques et scientifiques de qualité

avec les laboratoires publics, d'un partenariat "de raison" avec les pétroliers qui n'ont ainsi pas la charge de développer les applications de leurs bitumes, et enfin d'un marché où ils sont à la fois clients et fournisseurs et peuvent ainsi tester leurs innovations : cas des concessions autoroutières Cofiroute.

A ce moment précis d'ouverture technologique du marché britannique et de déréglementation, Jean Lefebvre prend la décision avec le management anglais de sa filiale de mettre en place une politique agressive de transfert technologique comprenant de nombreux échanges entre collaborateurs des deux côtés du Channel, une adaptation technologique des produits de l'entreprise au contexte environnemental et réglementaire britannique impliquant un important programme de recherche, de réunions nombreuses avec les responsables des autorités pour préparer puis faire homologuer les technologies, une politique de fabrication sous licence auprès des fournisseurs de matériaux. Le résultat est qu'en quelques années, et pour ne prendre que cet exemple, la production du produit ULM (revêtement ultra-mince) nulle en 1997 est passée à 2,1 millions de m<sup>2</sup> en 2000. Les produits de revêtement sont maintenant disponibles dans plus de 50 centres de fabrication répartis sur l'ensemble du territoire. Cette stratégie technologique globale est poursuivie maintenant plus avant par Eurovia grâce à la mise en commun de ses ressources technologiques dans ses différentes implantations en Europe de l'Est et au Canada (conditions climatiques extrêmes), en Espagne (avance certaine dans le domaine des enrobés à froid dont il est beaucoup attendu pour des procédés plus respectueux de l'environnement), et en Allemagne (consolidation avec la France des techniques de recyclage des déchets industriels en techniques routières ou des déchets de construction, enrichies des expériences propres à ces deux contextes réglementaires différents).

On peut citer aussi la première réalisation à Hong Kong par Bouygues Construction en 1989-1991 de ponts en encorbellement utilisant la méthode des voussoirs préfabriqués (Kwun Tong Bypass, phases 2 et 3). Cette méthode, initialement mise au point et développée par les entreprises en collaboration avec les maîtres d'œuvre français, a permis de valoriser l'expérience acquise et d'optimiser les temps de pose. Elle a ensuite été adaptée à Hong Kong après quelques études complémentaires, puis au Laos (photos 10 et 11).

Ce transfert de technologies se fait préférentiellement au sein des filiales des entreprises qui s'implantent de façon permanente sur un marché. Il peut aussi s'effectuer auprès du tissu local d'entreprises de façon à le rendre apte à exécuter des travaux de sous-traitance dans des conditions d'exécution à la fois plus fiable et meilleur marché. Ainsi, sur le projet de la route N4 en Afrique du Sud (livré en 2001), de nombreux échanges ont facilité

té, dans un contexte multiculturel, le transfert de technologies. Pour ce chantier, la création de joint-ventures entre PME mozambicaines et sud-africaines a permis de faciliter les échanges, notamment en matière de méthodes de construction, de techniques innovantes de repousse d'herbe sur matière rocheuse avec des pentes de 50°, de techniques d'enrobage et de revêtements de sols (recyclage "propre" des rejets d'une usine sans danger pour l'environnement, une première en Afrique du Sud). Par ailleurs, des échanges informatiques ont encouragé un usage accru des nouvelles technologies, avec la création d'un réseau Intranet d'une portée de 500 km et le développement d'un logiciel de gestion du courrier innovant, en collaboration avec une société sud-africaine qui le commercialise aujourd'hui (photo 12).

## ■ DES PARTENARIATS INTERNATIONAUX

Les compétences auxquelles il faut faire appel pour développer de nouvelles technologies ne sont pas nécessairement toutes disponibles en France, les financements non plus. Les programmes européens offrent alors de bonnes possibilités de développer à la fois des partenariats scientifiques et techniques et de mettre au point de nouvelles techniques de pointe. Les contextes réglementaires et techniques différents sont d'ailleurs aussi une occasion d'enrichissement des connaissances de l'entreprise par la prise en compte amont de ces points de vue techniques différents mais complémentaires. Le caractère international de certains projets est un excellent moyen pour abattre les barrières "culturelles" à l'innovation.

Topic représente un bon exemple de ce type. Il s'agit d'un programme relevant du 5<sup>e</sup> programme cadre de recherche et développement de l'Union européenne d'étude et d'amélioration des pieux moulés pour pallier la décompression des terrains qu'ils induisent et qui est la faiblesse de cette technique en comparaison des pieux battus. Dans ce domaine les règles de calcul sont loin d'être unifiées de pays à pays. Le fait même de traiter de ces problèmes avec des acteurs d'autres pays permet de développer ces améliorations en tenant compte de cette diversité des règles et d'y sensibiliser dès l'amont les acteurs locaux qui auront à faire évoluer les opinions des acteurs nationaux dans un sens favorable à l'innovation introduite. Les programmes Cosmus et Navijet, là encore réunissant des universitaires européens, Solétanche-Bachy et des prestataires de matériel étrangers PME, ont permis de progresser et de garder le leadership dans deux domaines distincts, les injections de compensation et le *jet-grouting* grâce à des instrumentations et des logiciels de modélisation permettant de prédire les performances et d'ajuster



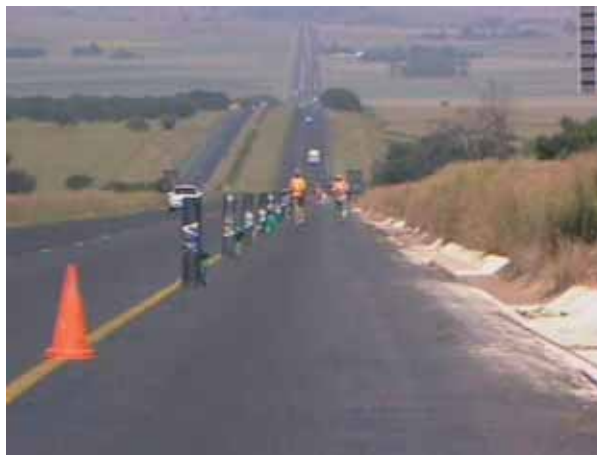
**Photos 10 et 11**  
Ponts préfabriqués en encorbellement au Laos (ci-dessus) et à Hong Kong (à droite)

*Prefabricated cantilever bridges in Laos (above) and in Hong Kong (on the right)*



**Photo 12**  
Travaux routiers en Afrique du Sud

*Road works in South Africa*



**Photo 13**  
Projet ACE. Le modèle réduit de pont à haubans avec ses haubans actifs lors des essais

*ACE Project. The scale model of a cable-stayed bridge with its cable stays active during testing*

les paramètres de travail en temps réel pour obtenir la performance voulue. Dans le cas du *jet-grouting*, les innovations introduites ont pratiquement doublé la performance des outillages existants. Depuis 1995, Bouygues Construction participe à de grands projets de recherche européens. Ces projets, menés avec des partenaires internationaux (entreprises de BTP, industriels fabricants d'équipements, universités et laboratoires d'essais...) ont permis de conduire des projets tels que ACE (contrôle actif des structures) ou Hiteco (étude des bétons au feu). La recherche dans le domaine du BTP s'oriente à présent vers des sujets hautement technologiques, tels que la compréhension des forces de cohésion du béton à l'échelle nanométrique, la métallurgie des mollettes de tunnelier, les vibrations des structures, la sécurité et les systèmes de protection des tunnels routiers et ferroviaires... Les compétences et moyens nécessaires pour mener à bien ces recherches, leur développement et leur application (conception et construction des ouvrages) ne peuvent être développés par les entreprises françaises pour garder leur leadership que dans un contexte international (photo 13). Lama est un laser de nettoyage de façade qui a été mis au point lors d'une telle collaboration internationale associant des industriels et sociétés de construction français (GTM), italiens et portugais.

► Sous un format minime (similaire à un simple pistolet de soudage et donc très facile de manipulation) rendu possible grâce à l'emploi de fibres optiques, ce laser est le premier à avoir réussi à nettoyer des salissures adhérentes sur des substrats pierreux ou en plâtre même dégradés sans affecter le support et sans production de poussières.

Le fait d'être soi-même une entreprise internationale est très intéressant pour monter des projets de recherche dans un système de partenariat interne enrichissant. Un exemple en est celui du projet Speedup de VINCI qui a permis, à partir de diverses expériences de projets de construction en France et à l'étranger, analysées d'un point de vue organisationnel et de gestion (usage des sciences "douces"), de dégager selon les contextes culturels, techniques et contractuels les meilleures pratiques de management de projet.

## ■ CONCLUSION

A ce jour, les entreprises françaises comptent parmi les leaders mondiaux de la construction. Dans les domaines des travaux publics et spécialisés, elles sont directement ou par leurs filiales à la pointe des technologies qu'elles continuent de développer au sein de partenariats internationaux permettant de mobiliser le meilleur des compétences scientifiques et techniques. Elles ont su adopter à l'international des stratégies d'entrants technologique partout où cela était possible. Elles ont toujours eu des positions internationales fortes et ont diversifié récemment leurs implantations permanentes en Europe. A l'aube d'un marché supranational de la construction qui n'a pas encore émergé (que l'on songe que les récents mouvements de capitaux de VINCI sur GTM en 2000, ou de Dragados sur HBG en 2001 n'ont suscité aucune réaction boursière ou sont restés lettre morte), les entreprises françaises sont certainement très bien armées pour jouer des rôles majeurs dans la compétition qui s'annonce. Mais rien n'est plus fragile qu'une bonne position dont on s'imaginerait assuré! Il faut donc poursuivre activement dans la voie des partenariats et dans celle de la consolidation des technologies, de leurs transferts et de leurs améliorations, décuplées grâce aux différents contextes nationaux que rend possible une activité réellement internationale. Eurêka et le 6<sup>e</sup> programme-cadre sont de bonnes opportunités à saisir de ce point de vue.

## ABSTRACT

### Innovation and international activities

V. Cousin

**One of the reasons of the international success of French contractors is linked to their capacities in the technical field towards innovation. Recent examples show even that innovation is a key strategic factor for international development. Innovation and international development reinforce each other. These innovation capacities as well as the human adventure existing in every construction guarantee the attractiveness of the sector on the long term.**

## RESUMEN ESPAÑOL

### Innovación y esfera internacional

V. Cousin

**Uno de los motivos de los éxitos logrados por las empresas francesas en los mercados internacionales, guarda relación con sus capacidades técnicas y de innovación. Varios ejemplos recientes demuestran, incluso, que la innovación constituye un factor estratégico importante para el desarrollo internacional y que la innovación y la esfera internacional constituyen un círculo virtuoso que se alimentan mutuamente. Tal capacidad de innovación, así como la aventura humana propia de toda construcción, constituyen a largo plazo una garantía de atraktividad para el sector de la construcción.**