

Travaux

n° 796

FONDATIONS

- Le tunnel du port de Dublin
- Construction d'une usine horlogère à Genève
- Hong Kong. Fondations records pour Mega Tower

AMÉLIORATION DES SOLS

- Confortement de l'institut Thalazur à Antibes
- Métropole Lilloise. Remblai d'accès à un ouvrage d'art ferroviaire
- Colonnes à Module Contrôlé® à Newport (Pays de Galles)
- Penny's Bay (Hong Kong). Etude géotechnique, vibrocompactage, instrumentation et auscultation

ENVIRONNEMENT

- Une paroi d'étanchéité au coulis avec vibreur pour la station d'épuration de Clermont-Fd

MARITIME

- National City Marine Terminal à San Diego (Californie). Extension du prolongement sud du quai 24-4

ÉGYPTE

- Le tombeau de Kheops et le témoignage d'Hérodote

Sols et fondations

sommaire

Travaux
numéro 796

avril 2003

Sols et fondations

éditorial 1
Daniel Tardy

actualités 8

techniques
et matériaux 16

matériels 18

PRÉFACE 23
Jean Launay

FONDATIONS 24
◆ Le chantier du tunnel du port de Dublin. 50 000 m² de parois moulées dans de mauvais sols - *The Dublin Port Tunnel project. 50,000 m² of diaphragm walls in poor soils*
D. Clerf

◆ Construction d'une usine horlogère à Genève - *Construction of a watchmaking factory in Geneva*
R. Degeorge, G. Krüger

◆ Des fondations records pour Mega Tower à Hong Kong - *Record foundations for Mega Tower in Hong Kong*
CK. Siu, C. Doby, G. Viroles

AMÉLIORATION DES SOLS 42
◆ Le confortement de l'institut Thalazur à Antibes - *Consolidation of the Thalazur Institute in Antibes*
M. Malard, J.-Ph. Depardon

◆ Métropole Lilloise. Remblai d'accès à un ouvrage d'art ferroviaire sur terrain compressible - *Lille metropolitan area. Embankment for access to a bridge over the railway track on compressible ground*
L. Brouet, K. de Kroes, V. Lecendre

◆ Colonnes à Module Contrôlé® à Newport (Pays de Galles) - *Controlled Modulus Columns®, in Newport (Wales)*
M. Lacazedieu



Notre couverture

Construction d'une usine horlogère à Genève

© Spie Fondations

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

Roland Girardot

RÉDACTION

Roland Girardot et Henry Thonier

3, rue de Berri - 75008 Paris

Tél. : (33) 01 44 13 31 44

SECRÉTAIRE DE RÉDACTION

Françoise Godart

Tél. : (33) 02 41 18 11 41

Fax : (33) 02 41 18 11 51

Francoise.Godart@wanadoo.fr

VENTES ET ABONNEMENTS

Olivier Schaffer

9, rue Magellan - 75008 Paris

Tél. : (33) 01 40 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) 01 44 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).

Editions Science et Industrie S.A.

3, rue de Berri - 75008 Paris

Commission paritaire n° 0106 T 80259



Sommaire

avril 2003

Sols et fondations

Dans les prochains numéros

Eau

Terrassements

Recherche

et innovation

Environnement

Travaux urbains

Réhabilitation

d'ouvrages

International

Ponts

Routes



◆ Penny's Bay (Hong Kong). Etude géotechnique, vibrocompactage, instrumentation et auscultation
- Penny's Bay (Hong Kong). Geotechnical study, vibratory compacting, instrumentation, detailed analysis
A. Abinader, D. Johnson

56



ENVIRONNEMENT

◆ Station d'épuration de Clermont-Ferrand. Réalisation d'une paroi d'étanchéité au coulis avec vibreur
- Clermont-Ferrand sewage treatment plant. Construction of a grouted cutoff wall with vibrator
J.-M. Dumazert, N. Deryckère

62



MARITIME

◆ National City Marine Terminal à San Diego (Californie). Extension du prolongement sud du quai 24-4
- National City Marine Terminal in San Diego (California). Southern extension of quay 24-4
Ch. Spaulding, S. Briet

65



EGYPTE

◆ Le tombeau de Khéops et le témoignage d'Hérodote. Une vérification peu coûteuse à distance de la pyramide
- The tomb of Cheops and Herodotus' testimony. An inexpensive remote appraisal of the pyramid
J. Kerisel

68

historique

77

répertoire
des fournisseurs

79

ABONNEMENT TRAVAUX

Encart après p. 48

INDEX DES ANNONCEURS

ARCELOR LONG COMMERCIAL.....	10	KELLER FONDATIONS SPÉCIALES.....	11
AXEL GC (GROUPE POISSON).....	22	KRINGS INTERNATIONAL	8
BALINEAU	67	LIEBHERR.....	6 ET 7
BOTTE SADE FONDATIONS.....	12	LIM SA.....	51
CNETP	51	MENARD SOLTRAITEMENT	4
COFRA	45	PERI	19
EUROSOL.....	55	SEFI FRANKI SOTRAISOL	15
FRANCE GABION	3È DE COUVERTURE	SOLETANCHE BACHY	2
HEAVEN CLIMBER	17	SOLETANCHE BACHY PIEUX.....	21
IHC.....	37	SOTRES	55
INTERMAT	14	SPIE FONDATIONS.....	2È DE COUVERTURE
JEAN LUTZ	37	TOTAL	4È DE COUVERTURE

Dans le domaine de la construction, les sols et les fondations sont la base des aléas majeurs. Le contrôle de ces aléas et de leurs risques afférents est toujours l'objet de questions de la part des investisseurs ou des donneurs d'ordres.

Même si le pourcentage que représentent les sols et les fondations dans le montant total des travaux est faible, les conséquences en termes de coûts et de délais sont dans la majorité des cas très disproportionnées par rapport aux estimations initiales.

Ce risque inhérent à l'hétérogénéité du sol aussi bien pour ce qui concerne le volume impliqué par l'ouvrage que par sa qualité doit être appréhendé le plus précisément possible. Ce contrôle ne pourra être réel que pour autant que :

- le maître d'œuvre aura une bonne connaissance des caractéristiques d'un tel projet aussi bien du point de vue technique que de l'estimation des prix et délais ;

- les reconnaissances géotechniques (sondages, essais en place, essais en laboratoire) auront été en nombre et qualité suffisantes et que leur interprétation aura été suivie et contrôlée par des professionnels reconnus et compétents. Le montant de cette part des dépenses devra être rémunéré à juste prix ;

- la conception et la réalisation de la fondation devront être confiées à des entreprises connaissant parfaitement le type d'ouvrage de fondation à réaliser et à même donc, d'en apprécier la difficulté aussi bien en termes de coûts que de délais. Les règles de l'art bien comprises et mises en œuvre correctement garantiront le contrôle des dépenses et des aléas autant que faire se peut. Ceci doit donc se traduire au moment de l'adjudication de l'ouvrage par l'application de la règle du mieux-disant.

Les divers exemples qui sont décrits dans ce numéro spécial "Sols et fondations" reflètent les types de travaux les plus couramment réalisés et à l'heure actuelle :

- les métros dont la construction au sein des villes implique un contrôle continu sur l'environnement immédiat (tasse-

ments, contrôle du front d'excavation, maintien de la nappe phréatique à son niveau, etc.) ;

- l'amélioration des sols permettant de construire des ouvrages sensibles à des emplacements inenvisageables au préalable ;

- les soutènements des fouilles provisoires ou définitives en ville auprès de structure de grande hauteur ou sensible aux tassements différentiels ;

- les fondations profondes au travers de terrains très variés pouvant inclure des roches dures et des sols mous.

Ces ouvrages qui sont construits dans le monde entier par les ingénieurs et les entreprises françaises sont basés sur des techniques nouvelles ou en développement la plupart du temps. Nous voyons en conséquence que la recherche et le développement qui sont à la base de l'essor de la profession et de ses succès par rapport à la concurrence étrangère doivent être poursuivis. Cet effort a un prix dont le financement ne peut être assuré que par des entreprises ou des ingénieurs-conseils dont les bilans financiers sont normaux, c'est-à-dire qu'ils auront dégagé des bénéfices leur permettant un investissement sur le futur aussi bien sur des idées nouvelles que dans des équipements nouveaux.

En maintenant un niveau normal de rémunération, l'ensemble de la profession permettra un développement harmonieux et contrôlé des aléas et risques liés aux métiers des sols et des fondations. Un ouvrage a une valeur qui, quels que soient les intervenants, sera toujours la même ; seule la ventilation des coûts pourra varier entre le maître de l'ouvrage, l'ingénieur, l'entrepreneur et l'assureur, ainsi qu'un colloque tenu il y a quelques années à l'E.N.P.C. a pu le démontrer. Le fait de reporter les difficultés possibles sur les autres acteurs de la construction, et ceci tout spécialement dans le domaine des sols et fondations, revient à renier l'idée du contrôle des risques et aléas qui dans le contexte actuel de l'industrie, de la construction devient un sujet primordial pour le maintien des investissements à un niveau raisonnable.



■ JEAN LAUNAY

Président
du Comité français
de Mécanique
des sols (CFMS)

Le chantier du tunnel 50 000 m² de parois moulées

Pour la réalisation d'une autoroute urbaine enterrée pour le tunnel du port de Dublin, le groupement Mowlem-Piling - Intrafor, en partenariat avec Mowlem et Irish and Co a mis en œuvre plus de 50 000 m² de parois moulées (épaisseur 1 200 à 1 500 mm). Face à des remblais de très mauvaise qualité (nécessitant un prétraitement des sols superficiels), aux argiles noires et au substratum calcaire plus ou moins résistant, des adaptations d'outils et de méthodes ont été nécessaires : la majeure partie des parois moulées ont été excavées à l'aide de bennes à câbles mais l'emploi d'un cutter a été nécessaire sur une section où la pénétration dans le calcaire sain ($R_c > 100$ MPa) atteignait jusqu'à 8 m. Ce chantier de grande dimension – un puits de diamètre 52 m excavé sur 32 m, deux trémies de 400 m et 350 m de longueur – a été réalisé en continu sur 15 mois, mobilisant jusqu'à 25 collaborateurs d'Intrafor.

■ INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le chantier de Dublin Port Tunnel prévoit la réalisation d'une autoroute urbaine reliant directement le port situé au sud de la capitale irlandaise à l'aéroport au nord et permettra aussi un nécessaire désenclavement du centre-ville.

Cet ouvrage s'étendra sur une longueur de 4,5 km, dont environ la moitié sera réalisée en tunnel bi-tube de diamètre unitaire 11 m. La part génie civil est quant à elle séparée en deux sections de part et d'autre du tunnel (figure 1).

L'ensemble du projet, en cours de réalisation depuis décembre 2000, s'étendra sur quatre ans. Il a été confié au consortium Nishimatsu (pour la section du tunnel), Mowlem-Irishenco (pour le génie civil). Dans ce contexte, Intrafor et son partenaire permanent Mowlem Piling sont intégrés au génie

civil pour la mise en œuvre des travaux de fondations spéciales, composés notamment de parois moulées, pieux et ancrages.

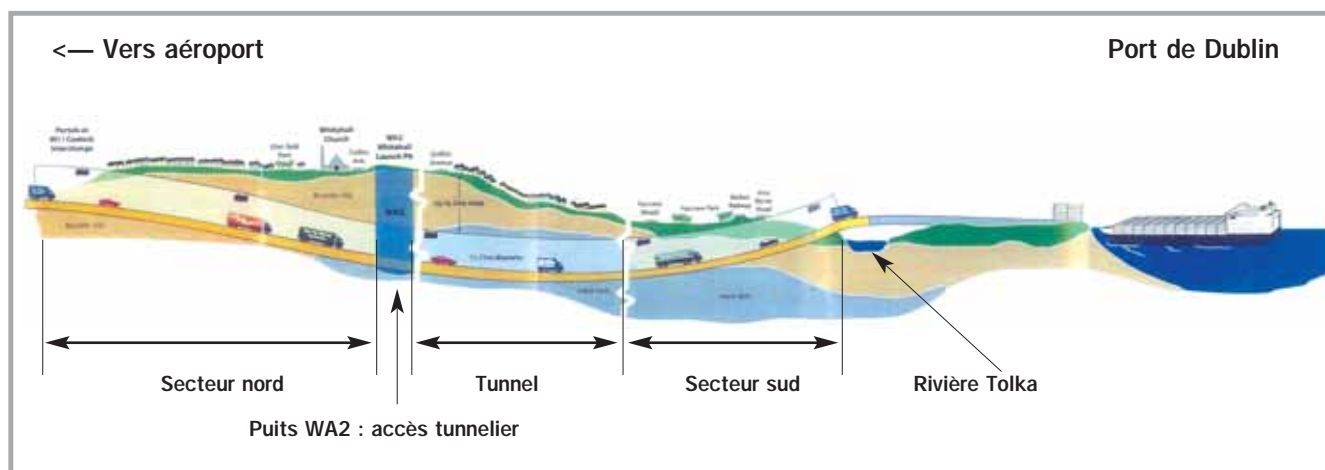
■ LES DIFFÉRENTES PHASES D'EXÉCUTION DE LA PAROI MOULÉE, LA GÉOLOGIE ET LES PARTICULARITÉS DE CHAQUE PHASE

Les exigences du programme des travaux et notamment le démarrage du tunnelier ont imposé la mise en œuvre rapide d'un puits de grandes dimensions (diamètre 53 m, profondeur excavée 34 m) pour l'amenée d'un tunnelier. Des tolérances d'exécution très strictes ont dû être respectées pour la paroi moulée circulaire d'une épaisseur de 1,5 m, afin de garantir l'effet "d'anneau", hypothèse du calcul, malgré la présence sur la hauteur excavée de sols de natures très différentes : remblais de surface, sables, argiles devenant très raides en profondeur dans lesquelles ont été rencontrées de nombreuses lentilles de sable très pulvérulentes parfois de taille décimétrique et très instables, des schistes puis le substratum calcaire (photo 1). Succédant à ce premier ouvrage, les travaux de paroi moulée ont enchaîné sur deux attaques (fronts) simultanées, l'une située au nord, l'autre au sud du projet visant la réalisation de deux tranchées couvertes s'étendant sur des longueurs respectives de (1 200 ml) et de (570 ml). La tranchée nord, dont l'exécution a dû intégrer un espace de travail réduit du fait de la proximité de la route de l'aéroport, est divisée en plusieurs phases (photo 2).



Photo 1
Puits WA2 : accès du tunnelier
Shaft WA2 : tunnel boring machine access

Figure 1
Profil du projet de Dublin Port Tunnel
Profile of the Dublin Port Tunnel project



du port de Dublin dans de mauvais sols

Daniel Clert



DIRECTEUR
EXPLOITATION FRANCE-
EUROPE
Intrafor VSL France

Cette partie du projet comporte des sols de nature sableuse à faible profondeur puis vers 15 m apparaît une argile noire dont la compacité s'est révélée croissante avec la profondeur. La paroi moulée a été ancrée dans le calcaire sain dont le toit s'est montré légèrement variable sur la longueur du profil. Les cages d'armatures disposées toute hauteur ont ainsi dû être adaptées en conséquence.

Un tout autre faciès géologique a dû être maîtrisé pour la mise en œuvre de la paroi moulée de la tranchée sud, qui elle-même traverse plusieurs types de sol tout au long du profil. Près du port, le soutènement, débouchant sur la rive de la rivière Tolka, se voyait situé dans une zone limoneuse très lâche pour, en remontant vers le nord, côtoyer des terrains très instables constitués de remblais ménagers relativement récents. La stabilité de la tranchée pendant l'excavation dans ce secteur a nécessité un prétraitement préalable au coulis bentonite ciment sur environ 8 m, opération mise en œuvre à l'aide d'une benne à câble (photo 3).

La proximité de la voie ferrée principale d'Irlande, laquelle est traversée par la future autoroute a imposé ce prétraitement afin de parer à tout risque éventuel de tassement des voies, une précaution qui venait en complément de mesures draconiennes de sécurité pour l'évolution des grues d'excavation et de manutention. De part et d'autre des voies ferrées, deux puits profonds terrassés sur plus de 25 m seront employés pour installer horizontalement par poussage des tubes métalliques de diamètre 1 m dans le but de constituer deux cadres qui soutiendront les voies pendant le creusement. L'exécution de la paroi moulée au droit de ces puits a nécessité une excavation profonde, dépassant 32 m (photo 4).

On retrouve cette profondeur d'excavation sur la section de la tranchée du Parc Fairview où, du fait d'une remontée du toit du calcaire en direction du nord, la pénétration de la paroi moulée dans le rocher a parfois atteint jusqu'à 8 m. Cette exigence a pu être remplie en employant un *cutter* de type BC 30 équipé de roues spéciales pour le rocher. A l'extrémité du parc, un autre puits, dit de réception et de retournement du tunnelier, a été réalisé en continuité avec la tranchée. Ce puits présente la particularité d'être terrassé sous le pied de la paroi moulée, laquelle est ancrée en sa partie inférieure.

Plusieurs réseaux existants, dont certains n'ont pu être déviés, se sont trouvés sur le chemin de la paroi moulée. En adaptant le plan de panneautage au

droit de ces obstacles, il a malgré tout été possible d'effectuer les panneaux à la benne et au *cutter* sans discontinuité.

Les terrains surmontant le calcaire au droit du parc présentaient les mêmes caractéristiques que sur le secteur nord, soit un faciès sablo-argileux devenant compact avec la profondeur.



Photo 2
Secteur nord :
trémie en paroi
moulée

*Northern sector :
tunnel approach
in diaphragm wall*



Photo 3
Tranchée sud :
Fairview Park

*Southern trench :
Fairview Park*



Photo 4
Secteur sud : Alfye Byrne
inséré entre la route,
la rivière Tolka et la voie
ferrée. Réalisation
de la structure définitive
dans la tranchée
maintenue par les parois
moulées butonnées

*Southern sector : Alfye
Byrne inserted between
the road, the Tolka River
and the railway track.
Execution of the final
structure in the trench held
in position by the stayed
diaphragm walls*

Photo 5
Ateliers Trench Cutter
BC30 et benne
*Trench Cutter BC30
and skip equipment*



Tableau I
Quantités
de parois moulées
réalisées (m²)
*Quantity
of diaphragm walls
constructed (m²)*

Puits WA2	Tranchée nord	Tranchée sud
5 896 m ² dont 277 au rocher épaisseur 1,5 m	14 110 m ² épaisseur 1,20 m	32 984 m ² dont 2 273 au rocher épaisseur 1,20 m
ensemble 50 120 m ² dont 2 550 au rocher		



Photo 6
Secteur nord -
Réalisation de pieux tangents
*Northern sector - Execution
of tangential piles*



Photo 7
Secteur nord - Vue partielle du mur clouté
Northern sector - Partial view of the gridded wall

LES TECHNIQUES MISES EN ŒUVRE ET LES MOYENS EMPLOYÉS POUR L'EXÉCUTION DES TRAVAUX DE PAROI MOULÉE

Comme on le voit, les techniques d'excavation ont dû s'accommoder et s'adapter aux sols de natures très différentes tout au long du tracé de ce projet. En pointe, pas moins de quatre ateliers de bennes et un cutter ont travaillé simultanément sur les deux sites nord et sud. L'ensemble employant un effectif de plus de cinquante personnes (en incluant le façonnage des cages d'armature) (photo 5).

RÉSUMÉ DES QUANTITÉS DE LA PAROI MOULÉE

L'ensemble du projet représente une surface totale de plus de 50 000 m² de parois moulées (épais-

seur 1 200 à 1 500 mm). Les travaux de paroi moulée évoqués ci-dessus se sont déroulés de juin 2001 (démarrage du puits circulaire WA2) à août 2002 (fin des tranchées nord et sud).

Le respect des délais imposés a nécessité la mobilisation de un à quatre ateliers de bennes à câbles, ainsi qu'un cutter BC 30 et trois centrales de traitement des boues. Tous les travaux étant situés sur le chemin critique de l'ouvrage principal (tableau I).

AUTRES TRAVAUX RÉALISÉS PAR INTRAFOR/MOWLEM PILING

Outre les parois moulées, on peut noter divers ouvrages répartis le long du projet où des fondations spéciales ont été mises en œuvre par le groupe Intrafor/Mowlem Piling.

Ainsi dans la continuité des parois moulées de la tranchée nord, deux autres types de soutènement vont assurer la stabilité des tranchées en phase provisoire.

En premier lieu une série de pieux tangents de diamètre (1 200 mm) s'étendant sur un linéaire de 55 ml, cet ouvrage sera butonné en phase provisoire avant réalisation de la structure béton. Les pieux, ancrés au rocher et armés toute hauteur sont d'une longueur moyenne de 16 ml. Ils sont exécutés en rotation à l'aide d'une foreuse de type Mait (photo 6).

Au-delà, un mur clouté s'étend sur... 850 ml, qui constitue le type de soutènement retenu pour le maintien provisoire des talus constitués d'argiles noires vers l'extrémité nord du projet.

Ce mur a une hauteur variant de 0 m à 12 m. Les clous de longueur de 8 à 11 m sont forés en destructif sous air comprimé à l'aide de deux ateliers de forage type Bonne Espérance. Ces machines permettent la réalisation de cadences élevées et ainsi la réalisation de plus de 800 ml de clous par jour avec, en suivant 100 m² de béton projeté par jour, pour un poste de 10 heures (photo 7).

Citons également la réalisation de 56 ancrages de forte capacité (2 500 kN) au pied des parois moulées du puits de retournement sud ainsi que le cloutage du rocher sous-jacent (210 u). Travaux exécutés à l'aide d'une foreuse type Bonne Espérance équipée de marteaux fond de trou, diamètres 208 mm et 100 mm.

RÉSUMÉ DES QUANTITÉS DE TRAVAUX SUPPLÉMENTAIRES

Le groupement Mowlem-Piling/Intrafor s'est vu confier, dans le cadre du projet Dublin Port Tunnel, les travaux complémentaires suivants :



Photo 8
Tronçon sud : de Fairview Park à la rivière Tolka
Southern section : from Fairview Park to the Tolka River

- ◆ murs cloutés : 12000 m² de béton projeté, 6000 clous passifs ;
- ◆ tirants actifs au rocher : 56 unités de force unitaire 2445 kN - Longueur 10,50 m ;
- ◆ boulons d'ancrage au rocher : 210 unités - Longueur 5 à 7 m ;
- ◆ pieux tangents forés tubés diamètre 1200 mm, 86 unités, 55 ml, profondeur 16 m ;
- ◆ pieux à la tarière : 18 u - Diamètre 750 mm - Profondeur 15 m (pile de pont).

■ CONCLUSION

Comme on le voit, le chantier de Dublin Port tunnel a été l'occasion, pour le groupement Intrafor/Mowlem-Piling de réaliser l'ensemble des travaux de fondations spéciales de ce grand projet d'infrastructures européen.

Au-delà des quantités importantes réalisées, il faut retenir la diversité des solutions techniques mises en œuvre rendues nécessaires à la fois par les exigences techniques du projet, mais aussi par la diversité géologique des terrains rencontrés (photo 8).

ABSTRACT

50,000 m² of diaphragm walls in poor soils
The Dublin Port Tunnel project

D. Clert

Within the scope of this underground highway for the Port of Dublin tunnel project, the Mowlem-Piling - Intrafor consortium (in partnership with Mowlem and Irish Co.) installed more than 50,000 m² of diaphragm walls (1,200-1,500 mm in thickness). Given the very poor quality backfill (necessitating preliminary treatment of surface soil layers), black clays and a limestone substratum with inconsistent strength, adaptations to both tools and methods were required : most diaphragm wall sections had to be excavated using cable-driven buckets. A cutter however was activated on a section where the intrusion of stronger limestone ($R_c > 100$ MPa) had reached 8 meters. This exceptionally large project - comprising a 52-m diameter shaft excavated over 32 meters and two hatches 400 and 350 m in length - was executed without interruption over a 15-month period and mobilized up to 25 Intrafor staff members.

RESUMEN ESPAÑOL

50,000 m² de pantallas continuas en terrenos difíciles. Las obras del túnel del puerto de Dublín

D. Clert

Para la construcción de una autopista urbana enterrada con destino al túnel del Puerto de Dublín, el grupo de empresas Mowlem-Piling- Intrafor, en asociación con Mowlem & Irish and Co, ha implementado más de 50,000 m² de pantallas continuas (esp. 1.200 a 1.500 mm). Al tener que hacer frente a terraplenes de muy insuficiente calidad (que precisaban un tratamiento previo de los suelos superficiales), a las arcillas negras y al substrato calizo más o menos resistente, ha sido necesario aplicar adaptaciones de equipos y de métodos : la mayor parte de las pantallas continuas se han excavado por medio de excavadoras con cucharas de cables, pero el empleo de un cutter ha sido de obligada utilización en una sección en que la penetración en la caliza sana ($R_c > 100$ MPa) alcanzaba una profundidad de hasta 8 m. Estas obras de gran alcance - pozo de 52 m de diámetro excavado hasta una profundidad de 32 metros, dos emboCADURAS de 400 y 350 m de longitud, se han ejecutado en continuo durante 15 meses, en que han participado hasta 25 empleados de Intrafor.

Construction d'une usine

Exemple typique d'une fouille de grandes dimensions (160 m x 140 m et 19 m de profondeur maximale) pour laquelle a été mis en œuvre le système de soutènement CAS[®] développé et breveté par Spie Fondations. L'innovation, particulièrement adaptée pour des grandes fouilles lorsque le recours aux tirants d'ancrage s'avère impossible, repose sur le principe d'une roue de vélo dont les rayons sont tournés vers l'extérieur. En l'occurrence, "la roue" est constituée d'une poutre en béton préfabriqué de section 4 m² et de longueur développée 428 m, qui véhicule quelques 66'000 KN en compression. Les "rayons" sont des butons métalliques de 1 020 mm de diamètre et de 1 à 41 m de longueur, dimensionnés pour reprendre jusqu'à 12'000 KN en service. Cette "roue" est portée par des poteaux métalliques préfondés dans une paroi moulée circulaire qui est arasée sous le fond de fouille et qui confine le terrain situé entre elle et la paroi moulée extérieure, ce qui limite les déplacements de cette dernière.

Photo 1
Coupe
de terrain
Cross section
of ground



La conception des soutènements et de leur système d'étaie ainsi que le choix de leurs méthodes d'exécution se sont souvent avérés déterminants pour la réussite des projets comportant des grandes fouilles. Opter pour telle ou telle solution technique peut non seulement être décisif pour l'efficacité du soutènement lui-même, mais peut aussi avoir d'importantes répercussions sur les capacités des autres intervenants (terrassement, gros œuvre...) à exécuter leurs travaux dans les meilleures conditions.

La construction d'un bâtiment R + 6 sur quatre niveaux de sous-sols pour une usine de production horlogère dans la zone industrielle de Plan-les-Ouates, à quelques kilomètres du centre de Genève, s'est avérée l'exemple même du chantier pour lequel le choix du système d'étaie s'est fait notamment en tenant compte des avantages qu'il apportait dans la conduite globale des travaux. Tout ceci sans parler du "challenge" qu'a représenté pour les Ingénieurs Civils genevois et pour l'entreprise Spie Fondations le fait d'avoir à calculer et mettre en œuvre dans un délai très court un système d'étaie aussi inédit et innovant...

Le volume des terrassements représentait environ 300 000 m³.

Courant 2001, un appel d'offres en lots séparés a été lancé pour la réalisation de cette fouille, qui fixait les contraintes auxquelles devrait satisfaire toute éventuelle solution variante.

En premier lieu, bien entendu, la géologie locale, qui n'est pas des plus favorables à l'ouverture d'une fouille de cette importance.

Typiques du bassin lémanique dans la région de Genève, les terrains sont constitués en partant de la plate-forme (photo 1) :

- ◆ d'une couche de 2 à 4 m d'épaisseur de limon sableux et de limon-argileux ayant une faible cohésion ;

- ◆ d'une couche d'argile très plastique et non consolidée, saturée en eau et de consistance molle à très molle, épaisse d'une quarantaine de mètres ;
- ◆ de moraines glacières.

Au sein de la couche d'argile, une nappe phréatique circule au gré de fines veines sablo-limoneuses, faisant craindre des venues d'eau dont l'importance n'est pas facilement évaluable.

Ensuite, du fait de la proximité immédiate de bâtiments industriels en fonctionnement, le type de soutènement et la méthodologie de réalisation des infrastructures devaient absolument permettre de limiter au strict minimum les déformations et tassements inévitables lors de l'ouverture d'une telle fouille. L'expérience de fouilles précédentes dans des terrains analogues, voire "meilleurs", laissait craindre en effet des mouvements importants susceptibles de créer des désordres dans les bâtiments avoisinants, voire d'interrompre le travail des appareils de précision qu'ils abritent.

Enfin, pour répondre aux exigences du maître d'ouvrage, les choix architecturaux excluaient toute utilisation des planchers pour assurer la stabilité de l'enceinte périphérique.

C'est dans ce contexte, pour répondre tout à la fois à ces contraintes de sols, de voisinage et de structure, mais aussi pour satisfaire aux exigences d'un planning draconien, que Spie Fondations a imaginé et proposé aux délégués du maître d'ouvrage et aux ingénieurs chargés du projet un système de butonnage[®] totalement novateur, et qui plus est élégant (photos 2 et 3). Ses nombreux avantages ont valu à cette solution variante d'être choisie.

Avant d'en décrire plus en détail les principaux éléments,

DESCRIPTION DU PROJET

La construction du bâtiment nécessitait l'ouverture d'une fouille de 22 000 m² au sol, de forme trapézoïdale¹ et de profondeur en zone courante égale à 14,00 m. Sur près d'un quart de sa surface (5 500 m²), le fond de fouille est approfondi à 19,00 m pour permettre la création de galeries tech-

1 - 135 m de hauteur, 166 m et 150 m respectivement pour la grande et la petite base

horlogère à Genève

ments, il est possible d'en résumer les principes comme suit :

◆ pour l'enceinte périmétrique, une paroi moulée avec panneaux en "tés" : l'impossibilité, en phase d'exploitation du bâtiment, de faire transiter les efforts de poussée des terres d'un bord à l'autre de la fouille par des planchers, mais aussi l'impossibilité de réaliser des tirants d'ancrage définitifs compte tenu de la nature du sol et des problèmes d'autorisation, ont conduit à maintenir la solution prévue par le dossier de consultation des entreprises. A savoir, une paroi moulée constituée d'une succession de panneaux en "tés" et de panneaux droits, qui peut travailler en console uniquement appuyée sur le radier général de 1,00 m d'épaisseur servant de fondation au bâtiment ;

◆ un butonnage provisoire "actif" en tête de la paroi moulée périmétrique, inspiré de la roue de vélo : obtenu par la mise en œuvre d'un nombre restreint de butons de forte capacité qui rayonnent par rapport au centre de la fouille et viennent s'appuyer sur une poutre circulaire. Ce système® permet de bloquer les déplacements de la partie supérieure de la paroi périmétrique par la précontrainte des butons et forme un ensemble peu encombrant, localisé sur la périphérie de la fouille ;

◆ un butonnage "passif" en pied de la paroi moulée périmétrique, réalisé à la fois par :

- une paroi moulée circulaire implantée à la verticale de "l'anneau" et arasée en dessous du fond de fouille. Cette paroi confine le sol situé entre elle et la paroi périmétrique, et améliore sa capacité de butée. Elle sert aussi d'assise aux poteaux préfondés qui supportent l'anneau,

- un sous-radier en béton armé : véritable buton coulé sur le fond de fouille au-dessus d'une couche drainante, il transmet directement en tête de la paroi moulée circulaire une partie des poussées des terres qui s'exercent sur la paroi périmétrique.

■ LE SYSTÈME DE BUTONNAGE®

Un butonnage "actif" en tête

Le butonnage en tête de la paroi périmétrique est assuré par l'ensemble anneau + butons précontraints.

L'anneau est une poutre en béton de section 4,00 m² en béton B60. Il a une longueur de 428 m et permet de véhiculer un effort de compression de 66 000 kN en fin de terrassement.

Bien qu'ayant un aspect circulaire à l'échelle du



Photos 2 et 3
Vue
d'ensemble
Overall view

chantier, l'anneau est en fait constitué de deux demi-cercles dont les centres sont distants d'environ 5,00 m. Les deux méplats, situés au niveau des contacts entre l'anneau et la paroi périmétrique, autorisent la reprise du léger déséquilibre des résultantes des efforts s'exerçant sur les deux demi-cercles, dû à la dissymétrie de la fouille.

Plus précisément, l'anneau est un polygone à 52 côtés. Chacun de ces côtés est constitué de quatre éléments préfabriqués empilés les uns sur les autres, soit un total de 208 pièces. Les longueurs des côtés varient de 5,00 à 11,00 m. Elles découlent d'un long travail itératif sur le panneautage de la paroi moulée et l'implantation de l'anneau, travail qui a permis d'obtenir que les butons qui relient un panneau en "té" sur deux de la paroi périmétrique à l'anneau évitent tous les noyaux et presque tous les poteaux des futurs bâtiments. En

Figure 1
Système de précontrainte -
- Vue de dessus
Prestressing system -
Plan view

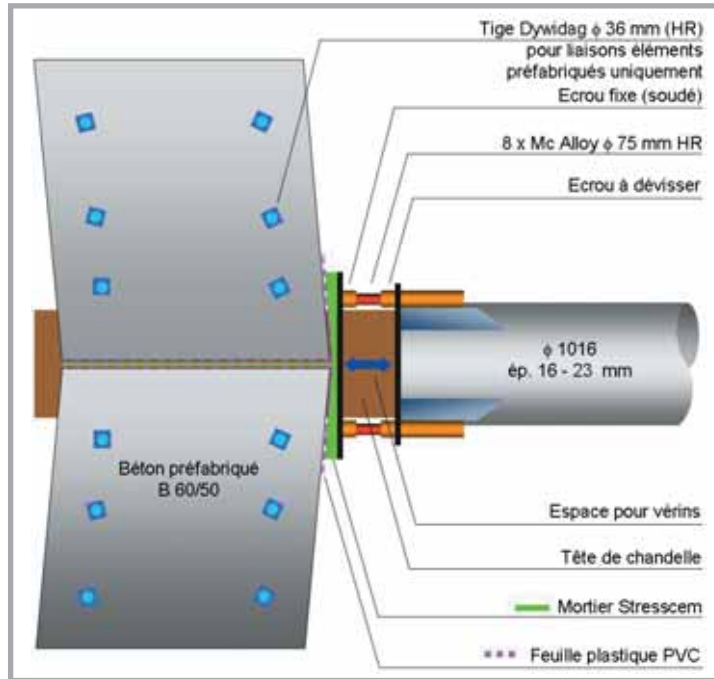


Figure 2
Système de précontrainte -
Section
Prestressing system -
Cross section

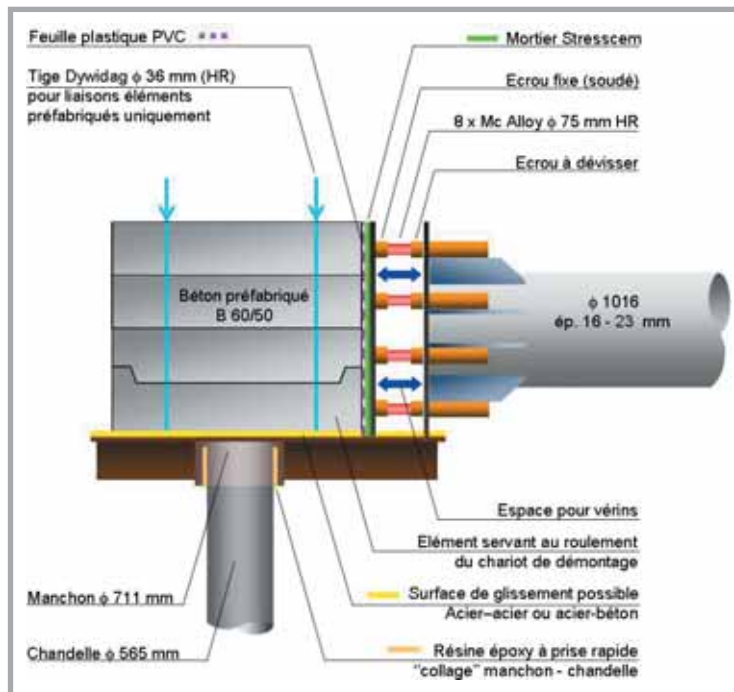


Photo 4
Détail console
Detail of bracket



effet, pour des raisons d'optimisation du planning global de l'opération, la construction d'une partie importante de la structure porteuse des bâtiments devait commencer avant la dépose du système de soutènement.

Pour rendre à l'anneau un certain monolithisme et permettre l'introduction des efforts ramenés par les butons, les quatre éléments préfabriqués constitutifs de chacun de ses côtés ont été liaisons entre eux par des barres Dywidag précontraintes à 870 kN. Au total, 800 de ces barres sont réparties tout au long de l'anneau. Entre deux travées adjacentes seul un coulis de mortier permet d'assurer la transmission des efforts de compression.

Les côtés de l'anneau reposent à chacune de leurs extrémités sur une "console" métallique (figures 1 et 2 et photo 4) qui coiffe les "chandelles" fichées dans la paroi moulée circulaire implantée à la verticale de l'anneau, comme nous le verrons plus loin.

Les butons sont de plusieurs types :

- ◆ 4 plots en béton non armé situés de part et d'autre des deux contacts de l'anneau avec la paroi périmétrique ;

- ◆ 46 butons métalliques (photo 5), dont 42 disposent d'un système de mise en précontrainte. Leurs longueurs varient d'environ 1 m à plus de 41 m. Ils sont constitués de platines et de tubes métalliques Ø 1020 mm dont l'épaisseur varie de 16 à 23 mm selon les efforts à reprendre. Les butons les plus sollicités ont été dimensionnés pour un effort de service de 12000 kN.

Pour optimiser le dimensionnement des butons les plus longs, des appuis intermédiaires (poteaux préfondés) ont été réalisés, et pour limiter l'influence de l'effet thermique tous les butons ont été peints en blanc.

Ces butons relient la paroi périmétrique et l'anneau. - *Côté anneau*, ils se terminent par une tête de mise en précontrainte qui repose sur les mêmes consoles qui supportent les éléments préfabriqués constitutifs de l'anneau.

Comme on le voit sur la figure 2, le système de précontrainte a été réalisé par un jeu de deux platines libres en translation l'une par rapport à l'autre. Le transfert des efforts entre chaque buton et l'anneau est assuré par huit barres Mac Alloy Ø 75 mm qui sont fixées d'un côté sur une platine et qui de l'autre côté coulisent librement dans des tubes soudés sur l'autre platine. Des écrous viennent en butée sur la platine et transmettent les efforts aux barres Mac Alloy. L'introduction de la précontrainte est réalisée à l'aide de deux vérins annulaires de capacité unitaire 400 t placés entre les deux platines. C'est ensuite un ensemble de raidisseurs qui permet le transfert de ces efforts au tube du buton.

- *Côté paroi périmétrique*, les butons s'appuient directement sur les panneaux en té par l'intermédiaire de platines métalliques pour éviter d'avoir à réaliser des massifs d'appui en béton armé.

Les butons présentent des angles allant jusqu'à 55° par rapport à la perpendiculaire à la paroi, (figure 3). Compte tenu de l'importance des efforts tangentiels, il a fallu mettre au point des dispositifs très particuliers... et pour certains très probablement inédits.

Un butonnage "passif" en pied

Le blocage du pied de la paroi moulée périmétrique est obtenu à la fois par une amélioration des caractéristiques de butée du sol en place confiné par la paroi moulée circulaire et par un "sous-radier" susceptible de reprendre une partie importante des efforts que le sol ne reprendrait pas en butée².

La paroi moulée circulaire fait partie intégrante du système de butonnage. Implantée à la verticale de l'anneau, elle sert aussi à fonder les 52 tubes métalliques qui le supportent.

Cette paroi moulée a été forée sur 23 m de hauteur, dont 9 m seulement bétonnés sous le fond de fouille. Pour pouvoir reprendre pendant les terrassements les efforts (compression) que lui transmettait le sol mis en butée par la paroi périmétrique ainsi que les efforts (flexion) que le sous-radier était susceptible de lui transmettre, elle a dû être réalisée en épaisseur 1 200 mm et bétonnée sous le fond de fouille avec du béton B28/38 (équivalent B30 en France).

Entre le niveau de la plate-forme de travail et le fond de fouille, le forage a seulement été rempli par de la grave ciment dosée à 80 ou à 175 kg de ciment par mètre cube en fonction du type de panneau réalisé (primaire, secondaire ou successif). Seule la partie située sous le fond de fouille a été armée. Pour faciliter la démolition ultérieure de la grave ciment, les cages d'armatures ont été mises en place et maintenues avec toute la précision nécessaire pendant le bétonnage à l'aide de gabarits spécialement mis au point par Spie Fondations, évitant ainsi d'avoir à mettre en place des cagettes d'armatures dans la partie supérieure de la paroi comme le veut la pratique courante en la matière...

Le sous-radier couvre toute la surface du fond de fouille. Il est constitué d'une dalle béton continue de 25 cm d'épaisseur faiblement ferrillée surmontant une couche drainante également de 25 cm d'épaisseur.

A l'intérieur de la paroi moulée circulaire, le sous-radier a pour but d'éviter l'altération du fond de fouille par les agents atmosphériques, de limiter les soulèvements liés au gonflement de l'argile, et de permettre la circulation des engins de chantier qui aurait été tout à fait impossible sans cela. La réalisation de la couche drainante et le bétonnage suivent alors au plus près le terrassement, sans toutefois avoir de véritable contrainte de délai entre les phases de travaux.

² - 600 kN/ml selon certains calculs.



Photo 5
Détail buton
Detail of strut

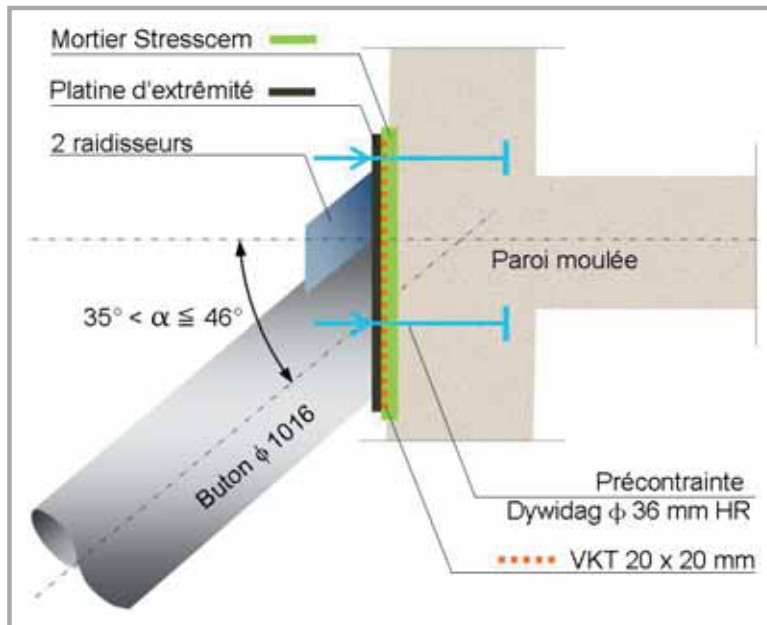


Figure 3
Exemple d'appui buton sur paroi périmétrique
Example of strut bearing on perimeter wall



Photo 6
Risberne - Réalisation du sous-radier
Berme - Execution of the sub-foundation raft

Par contre, à l'extérieur de la paroi moulée circulaire, et plus particulièrement le long de la paroi moulée périmétrique, sa mise en œuvre fait l'objet de contraintes fortes de phasage et de qualité. En effet, dans cette zone, le sous-radier en plus des fonctions qu'il assure en zone courante de la fouille, sert également de buton de pied entre la paroi périmétrique et la paroi moulée circulaire. Une banquette d'argile minimale de 3 m de hauteur et de 5 m de largeur moyenne (photo 6), est mainte-

Photo 7
Butons
d'angle

Angle
struts



Photo 8
Pose
de l'anneau

Installing
the ring



► nue le long de la paroi moulée périmétrique pour en limiter les déplacements. Le terrassement de cette banquette ne pouvait intervenir qu'à la double condition expresse de pouvoir réaliser le sous-radier (forme drainante et bétonnage) le même jour que le terrassement et d'assurer sa continuité jusqu'à la paroi moulée circulaire. En effet, le comportement de l'argile autorisait temporairement à se passer de l'appui en pied mais ne permettait pas de justifier une attente trop longue.

Le complément de butonnage pour les points singuliers de la fouille

Le système de butonnage décrit ci-dessus a permis de terrasser les zones courantes de la fouille avec un seul lit de butons métalliques.

Cependant, localement, au niveau des angles de la fouille, il a été nécessaire de rajouter un lit intermédiaire de butons en raison à la fois des surapprofondissements locaux pour les galeries techniques (qui portent la hauteur excavée à 19 m!) et de l'éloignement entre la paroi circulaire et la paroi périmétrique.

Seize butons ont ainsi été mis en œuvre, constitués de tubes métalliques de diamètres 560, 810

et 1020 mm pour des épaisseurs de 16 à 23 mm. Leur longueur varie de 6 à 37 m (photo 7) et seuls deux ont dû être précontraints.

Une autre zone a demandé une adaptation du système. Il s'agit du côté de la fouille où la paroi circulaire est la plus éloignée de la paroi périmétrique. A cet endroit, il a fallu mettre en œuvre deux parois de blocage pour buter le pied de la paroi périmétrique sur la paroi circulaire, car il était difficile de pouvoir compter sur le confinement du sol à cet emplacement.

LE DÉROULEMENT DES TRAVAUX

Pour la réalisation des travaux spéciaux et des terrassements, deux consortium ont été formés :

- ◆ le premier pour la réalisation des parois moulées, du butonnage et du pompage rassemblait Spie Fondations (pilote), Infra 2000 (la filiale suisse de Spie Batignolles), et un groupement d'entreprises suisses conduit par Zschokke-Locher ;

- ◆ le second pour le terrassement, la réalisation du sous-radier et les galeries techniques, piloté par Losinger.

Les travaux préparatoires

Le chantier a débuté en septembre 2001 par quelque 20 000 m³ de préterrassements et par la réalisation d'une plate-forme de travail dont la cote moyenne se situait environ 2 m en dessous du niveau des rues avoisinantes. Une couche de 50 cm de terrain a été traitée au ciment et à la chaux, ce qui a permis d'obtenir un plate-forme pérenne tout au long des travaux de fondations et de terrassement. L'intérêt du chantier était en effet de maintenir le plus longtemps possible cette plate-forme en état et d'exécuter à partir de celle-ci le maximum de travaux car l'argile rencontrée dès 3 ou 4 m de profondeur ne permettait absolument aucune circulation d'engins.

Dans la continuité, les murettes de guidage des deux différentes parois (périmétrique et circulaire) ont été réalisées. Elles représentent à elles seules plus d'un kilomètre de murettes doubles.

Parois moulées périmétrique et circulaire

Fin septembre 2001, les travaux spéciaux débutaient. Parois moulées et puits de pompages ont été menés en parallèle.

La paroi moulée périmétrique est constituée par l'alternance de panneaux en "té" et de panneaux droits, ayant une profondeur respective de 21,25 et 17,25 m. Les panneaux les plus profonds atteignent 26,60 m dans les zones de contact avec les galeries techniques.



Photo 9
Terrassement -
Vue panoramique
Earthworks -
Panoramic view

Les 20 000 m² de forage en épaisseur 1 000 mm ont été réalisés à la benne à câbles et ont nécessité l'utilisation de quatre ateliers de forage pour respecter le planning d'ensemble.

Les panneaux ont été forés sous boue bentonitique depuis la plate-forme à - 2,00 m. Les volumes de béton mis en œuvre par panneau variaient de 136 à 170 m³ pour les panneaux en "té", et de 40 à 82 m³ pour les panneaux droits. Une centrale à béton a été installée spécialement pour ce chantier à une centaine de mètres de la fouille.

Quant aux aciers, ce sont plus de 2 000 t qui ont été mis en œuvre pour cette seule paroi moulée. Les cages d'armatures ont été entièrement fabriquées sur site dans la zone centrale du chantier qui était libre de toute autre activité.

Cette paroi moulée est surmontée par une poutre de couronnement de section 1,80 x 2,10 m², équipée de nombreuses réservations pour les passages des réseaux techniques du futur bâtiment.

La paroi moulée circulaire a été exécutée lorsque la majeure partie de la paroi moulée périmétrique eut été réalisée. En effet, la zone centrale de la plate-forme de travail étant occupée par l'aire de fabrication des cages et une des deux centrales à boue utilisées pour ces travaux, il a fallu maintenir le plus longtemps possible les voies de circulations internes au chantier qui se trouvaient au droit de la paroi circulaire.

Comme pour la paroi périmétrique, les 10 000 m² de cette paroi moulée ont été forés sous boue bentonitique, à la benne à câbles. Les cages d'armatures ont également été fabriquées sur site, et quatre de ces cages ont été équipées de fibres optiques pour suivre l'évolution de la contrainte normale et des moments de flexion dans la paroi durant le terrassement.

Les tubes métalliques supports de l'anneau ont été mis en place en fin de bétonnage selon la technique des poteaux profondés, avant le remplissage de la partie supérieure du forage en grave ciment.

Les puits de pompage

Réalisés à la tarière à partir de la plate-forme à - 2,00 m et protégés par des tubages au niveau de la couche superficielle, 52 puits de diamètre 800 mm, équipés de crépines de diamètre 600 mm, ont été mis en œuvre. Des pompes immergées fixes ont été installées dans treize d'entre eux, et des pompes mobiles ont été utilisées dans les autres en fonction de l'importance des venues d'eau.

Mise en œuvre de l'anneau et des butons

La mise en œuvre de l'anneau a débuté après avoir terrassé la zone périphérique de la plate-forme jusqu'à la cote - 4,50.

Dégagés de la grave ciment sur une hauteur d'environ 2 m, les tubes profondés fichés dans le béton de la paroi moulée circulaire, ont été recépés puis coiffés par les consoles métalliques destinées à supporter l'anneau. Une différence entre les diamètres intérieur et extérieur des parties à emboîter, ont permis un réglage précis de la position de la console. Le vide restant a été rempli avec une résine époxy, qui, une fois son durcissement fait, liaisonnait parfaitement les consoles aux profondés.

Ensuite, les 208 éléments de l'anneau (1 700 m³ de béton préfabriqué) ont été positionnés sur les consoles à l'aide d'une grue à flèche treillis de 80 t et l'espace conservé entre deux tronçons de l'anneau a été rempli par du coulis. Ainsi, de proche en proche, l'anneau a commencé à prendre forme (photo 8).

La mise en œuvre des butons a démarré avant que l'anneau soit refermé. Pour respecter les gabarits routiers et contraintes d'accès, les butons ont été livrés par morceaux n'excédant pas 11 m de longueur et assemblés sur le chantier avant d'être mis en place.

Au vu de l'importance des sollicitations auxquelles ces éléments étaient soumis, il a fallu apporter un soin tout particulier au choix des matériaux utilisés dans leur fabrication mais également à la qualité de réalisation des soudures.

Comme les éléments de l'anneau, les butons ont été mis en position depuis la plate-forme de travail avec la même grue qui servait à la pose des éléments préfabriqués de l'anneau et avec l'appoint, pour les butons les plus longs, d'une grue télescopique de 100 t. Chaque buton a été clavé à ses deux extrémités avec le même coulis utilisé pour l'anneau.

Sans attendre la fin de la pose des butons et de l'anneau, les terrassements en pleine masse ont démarré à cadence élevée en plongeant d'entrée au fond de fouille pour mettre en place une rampe métallique (photo 9). La présence de la paroi moulée circulaire permettait en effet de terrasser à l'intérieur du volume qu'elle délimitait sans craindre de générer des déformations de la paroi périmétrique.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

*Délégués du maître d'ouvrage -
Réalisation des bâtiments industriels*

G. Gendre - G. Guscetti - J. Roulet

Architecte

Atelier d'architecture R. Brodbeck & J. Roulet

Ingénieurs civils

Guscetti et Tournier SA

Ingénieurs civils travaux spéciaux

Thomas Jundt Ingénieurs Civils avec la collaboration de Philippe Annen Structures

Géotechnique

- Géotechnique appliquée Deriaz SA
- Decerenville Géotechnique SA

Parois moulées

Consortium piloté par Spie Fondations

Terrassements et sous-radier

Consortium piloté par Losinger SA

*Auteur de la solution technique,
et réalisation du système de butonnage*

Spie Fondations

Photo 10
Terrassement -
Vue aérienne
*Earthworks -
Aerial view*



Photo 11
Terrassement -
Vue de détail
*Earthworks -
Detail view*



Photo 12
Terrassement -
Rupture circulaire
*Earthworks -
Circular break*



Photo 13
Galeries techniques
*Main services
ducts*



Mise en précontrainte

Le 26 mars 2003 a commencé la phase de mise en précontrainte du système de butonnage, qui a duré 10 jours. Cette opération a été une étape cruciale dans l'or-

ganisation du chantier puisqu'il n'était pas possible de terrasser à l'extérieur de la zone délimitée par la paroi circulaire avant que la mise en précontrainte ne soit terminée.

Un phasage précis a été mis au point consistant à introduire, par paliers et par zones, les efforts calculés pour correspondre à une poussée horizontale de 500 kN/m de paroi périmétrique. La mise en précontrainte a été réalisée par Spie Fondations à l'aide de 12 paires de vérins de 400 t chacun, toujours positionnés de manière symétrique pour maîtriser les sollicitations et déformations de l'anneau. Cette phase a aussi été le point de départ du suivi, par différentes méthodes de mesures, des efforts et déformations dans l'enceinte périmétrique et le système de butonnage.

Terrassement en pleine masse - Sous-radier - Galeries techniques

Après le préterrassement réalisé au tout début des travaux et qui représentait quelque 20 000 m³, restait à terrasser et évacuer environ 250 000 m³ en pleine fouille et 30 000 m³ pour les galeries techniques.

Compte tenu de l'espace libéré par la solution de butonnage (plus de 60 % de la surface de la fouille) (photo 10), les terrassiers ont pu déployer dès le début de leur intervention d'importants moyens (photo 11) et leur assurer un fonctionnement rationnel et efficace.

Les caractéristiques géotechniques de l'argile lui donnent un caractère très rassurant pour la conduite des travaux et incitent à terrasser sur de grandes hauteurs. Mais une importante rupture circulaire³ (photo 12) est venue rappeler dès les premiers jours du terrassement ce que "court terme" peut vouloir dire en géotechnique, et les hauteurs de talus ont été limitées pour toute la suite du chantier. Un maximum de terres ont pu être chargées et évacuées directement depuis la plate-forme à - 1,90. Le reste a été terrassé depuis le sous-radier mis en œuvre à l'avancement de la libération du fond de fouille, et sorti de la fouille par des camions de 18 t qui empruntaient une rampe pentue à 30 %. En pointe, quelque 4 500 à 5 000 m³ de matériau ont pu être évacués par jour et la réalisation de la totalité du terrassement a pris moins de 6 mois. Le terrassier avait également à sa charge le sou-

3 - Restée sans conséquence pour la stabilité de la paroi moulée périmétrique du fait de l'existence de la paroi moulée circulaire...

tènement des galeries techniques par un rideau de palplanches (photo 13). Les 9 000 m² de ce rideau ont été vibrofoncés depuis le sous-radier pendant le délai d'exécution des terrassements précité.

Réalisation du radier

La réalisation du radier général (1 m d'épaisseur, ferrailage à 110 kg/m³) a été effectuée en un peu plus de 4 mois par plots de 500 m² environ. Les premiers plots ont été ferrillés et bétonnés alors que le terrassement n'était pas encore achevé à l'autre bord de la fouille.

Dépose du système de butonnage

La dépose de l'anneau et des butons a débuté le 11 novembre 2002 alors que les structures du bâtiment étaient déjà hors sol sur 1/3 de la fouille. Cette configuration a obligé à travailler de deux manières différentes selon que l'on se trouvait à ciel ouvert ou sous couverture de plancher.

Il a d'abord fallu libérer la précontrainte des butons et de l'anneau. A l'instar de la phase de mise en précontrainte, un phasage de dévérinage a permis par le biais du même système déjà utilisé pour la mise en précontrainte des butons, de relaxer petit à petit les efforts emmagasinés dans le système. Une fois la précontrainte des butons supprimée, l'anneau n'étant plus sollicité, sa dépose ainsi que celle des butons a pu commencer.

La première opération a alors consisté à scier l'un des joints de clavage de l'anneau pour libérer un premier tronçon.

Dans la zone à ciel ouvert, l'anneau et les butons ont été déposés directement depuis l'extérieur de la fouille à l'aide d'une grue télescopique de 500 t ou d'une grue de 200 t selon le poids et l'éloignement des éléments.

Dans l'encombrement des structures du bâtiment, la dépose a demandé la mise en œuvre de moyens particuliers car, comme le montre la photo 14, le système de butonnage était vraiment imbriqué avec les voiles et noyaux du bâtiment.

Les butons ont été découpés en position et descendus sur le radier morceau par morceau, à l'aide de treuils ancrés sur le radier et de poulies de renvois s'appuyant sur les poutres du plancher au niveau 0,00 du bâtiment.

Pour la dépose de l'anneau, le poids des éléments (pour certains plus de 100 t) a nécessité l'utilisation d'un gros "élévateur" capable de reprendre 75 t à 8 m de hauteur et de se déplacer en charge sur le radier.

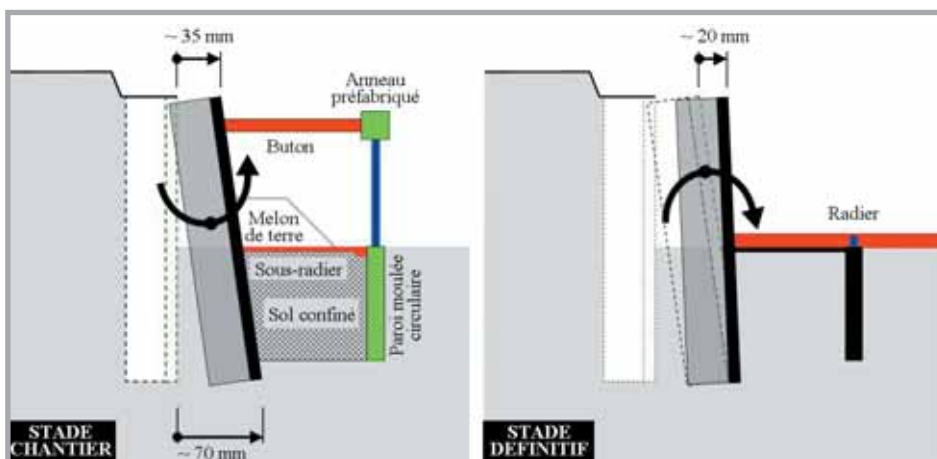
Dans certaines zones, la présence de voiles construits au droit de l'anneau a nécessité l'utilisation d'un matériel complémentaire, à savoir des "béquilles hydrauliques" capables de supporter chacune une charge de 40 t, pour pouvoir lever et translater les tronçons de l'anneau (photo 15).



Photo 14
Dépose -
Encombrement
*Laying down
Space requirement*



Photo 15
Dépose -
Descente éléments
*Laying down
Lowering of elements*



Les éléments d'anneau et de butons ainsi déposés ont été chargés sur semi-remorques et évacués sur le champ pour encombrer le moins possible le chantier.

Figure 4
Fonctionnement
du système de butonnage
*Operation of the staying
system*

■ LA MODÉLISATION ET L'AUSCULTATION DE L'OUVRAGE

Une première modélisation a été réalisée au stade de la soumission par le bureau d'études de Spie Fondations à l'aide du logiciel EIFFEL. Elle a permis de prédimensionner les éléments de la solution et d'approcher les valeurs des déplacements prévisionnels.

Au stade des études d'exécution, différentes approches et le recours à plusieurs autres modèles de calcul complémentaires ont permis d'améliorer la prévision du comportement du système de butonnage et d'affiner les prévisions en terme d'efforts et de déplacements pour les différentes phases de travaux (figure 4). Ces études ont été faites es-

► sentiellement par le bureau d'ingénieurs civils genevois Thomas Jundt, en étroite collaboration avec Philippe Annen Structures, le bureau de Géotechnique G.A.D.Z. et le bureau d'études de Spie Fondations. Le bureau Guscetti et Tournier SA a assuré le pilotage de l'ensemble des études.

Compte tenu du caractère novateur de la solution, la fouille ainsi que le système de butonnage ont été très largement instrumentés :

◆ suivi topographique : un théodolite automatique a mesuré, en continu, depuis la phase de mise en précontrainte jusqu'au démontage de l'anneau, plus de 80 prismes répartis sur la paroi, l'anneau, mais aussi en fond de fouille et sur certains bâtiments du voisinage. Le suivi et l'analyse de cette représentation dans l'espace du système ont permis de s'assurer en permanence du bon comportement de l'ensemble ;

◆ suivi inclinométrique : une vingtaine d'inclinomètres ont été installés dans la paroi périmétrique, quatre dans la paroi circulaire et un à l'extérieur de la fouille ;

◆ mesures de contraintes : quatre panneaux de la paroi moulée circulaire, deux plots du sous-radier et deux plots du radier ont été équipés de fibres optiques ;

◆ mesures d'efforts dans 16 butons à l'aide de jauges de contrainte ;

◆ contrôle du niveau piézométrique et des éventuelles mises en charge - Cellules Glötz.

■ CONCLUSIONS

A l'heure des bilans, nul doute que cette solution élégante de butonnage a su répondre à toutes les attentes qu'elle avait suscitées, tant en termes d'efficacité et de fiabilité que de planning. Depuis le début décembre 2002, la paroi périmétrique fonctionne en console butonnée par le radier et il est incontestable que le comportement de l'ensemble a été très proche des prévisions apportées par les modélisations, que ce soit pour les efforts ou les déformations mesurées.

Reste aussi pour les hommes des équipes de conception, calcul et exécution qui se sont investis dans cette réalisation, la satisfaction d'avoir pu démontrer toute l'efficacité qu'une véritable synergie entre eux peut apporter pour surmonter dans les meilleurs conditions les inévitables difficultés d'un chantier.

Pour l'avenir, l'exploitation des informations accumulées grâce à l'instrumentation conséquente qui a été mise en œuvre pendant les travaux permettra de mieux comprendre encore le fonctionnement de certains éléments et d'améliorer conception et réalisation des futures réalisations.

ABSTRACT

Construction of a watchmaking factory in Geneva

R. Degeorge, G. Krüger

Typical example of a large excavation (160 m x 140 m and maximum depth 19 m) for which the CAS® supporting system developed and patented by Spie Fondations was used. This innovation, especially suitable for large excavations when the use of anchoring tie rods proves impossible, is based on the principle of a bicycle wheel whose spokes are directed outward. In this case, the "wheel" consists of a prefabricated concrete girder of cross section 4 m² and developed length 428 m, having a compressive force of about 66,000 kN. The "spokes" are metallic stays 1,020 mm in diameter and from 1 to 41 m long, sized to withstand forces of up to 12,000 kN in service. This "wheel" is carried by steel columns pre-set in foundations in a circular diaphragm wall which is levelled under the bottom of excavation and which confines the ground situated between itself and the outer diaphragm wall, thereby limiting the wall's movements.

RESUMEN ESPAÑOL

Construcción de una planta relojera en Ginebra

R. Degeorge y G. Krüger

Se trata de un ejemplo típico de una excavación de grandes dimensiones (160 m x 140 m y 19 m de profundidad máxima) en la cual se ha implementado el sistema de entibación CAS® desarrollado y patentado por Spie Fondations. La innovación, particularmente adaptada para las grandes excavaciones en las cuales el empleo de los tirantes de anclaje resulta imposible, se funda en el principio de una rueda de bicicleta, cuyos radios se encuentran orientados hacia el exterior. En el caso presente, "la rueda" está formada por una viga de hormigón prefabricado de 4 m² de sección y 428 m de longitud desarrollada, que transporta unos 66 000 kN en compresión. Los radios corresponden a cordales metálicos de 1.020 mm de diámetro y de 1 a 41 m de longitud, calculados para equilibrar hasta 12 000 kN en servicio. Esta "rueda" va soportada por postes metálicos previamente cimentados en una pantalla continua circular que va enrasada bajo el fondo de la excavación y que confina el terreno situado entre ésta y la pantalla continua exterior, con lo cual se limitan los desplazamientos de esta última.

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Surface totale de la fouille : 22 000 m²
- Surface forée pour la paroi moulée périmétrique : 20 000 m²
- Surface forée pour la paroi moulée circulaire : 10 000 m²
- Anneau :
 - 428 m de longueur développée
 - 208 éléments préfabriqués en béton B60
 - 1 700 m³ de béton préfabriqué
- Surface intérieure : 13 000 m²
- Butons et platines : 650 t
- Terrassements : 300 000 m³
- Palplanches pour les galeries techniques : 9 000 m²

Des fondations records à Hong Kong

Les spécialistes français de fondations spéciales Soletanche Bachy, chef de file du groupement, et Intrafor ont de nouveau profondément marqué de leur empreinte

l'embouchure de la rivière des Perles. Le septième et ultime des développements immobiliers qui poussent autour de Airport Railway Kowloon Station contient Union Square

Mega Tower, le gratte-ciel prestigieux destiné à figurer aux premières places dans le club fermé des plus hauts édifices du monde. La démesure du projet suffit à expliquer la démesure des fondations qui le supportent.

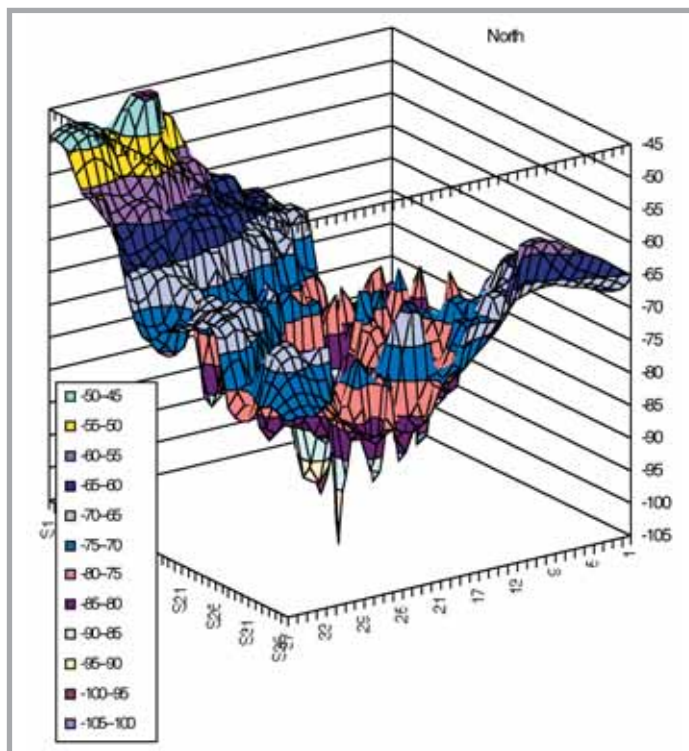


Mega Tower dominera la baie de Hong Kong. Sur fond brumeux on devine sa petite sœur aînée (North Basement, 380 m seulement!) en cours de construction et fondée elle aussi par Soletanche Bachy

Mega Tower will overlook the Hong Kong Bay. Against a misty background one can make out its little elder sister (North Basement, only 380 metres!) undergoing construction and likewise with foundations built by Soletanche Bachy

Sous Mega Tower, l'horizon rocheux est très chaotique. Cette situation qui est courante à Hong Kong explique la nécessaire importance qui est donnée ici aux sondages de reconnaissance (40 000 ml pour le profil ci-contre qui couvre une surface de 5 000 m² seulement). Les particularités de cet horizon ont été déterminantes pour le choix de la solution flottante, sans ancrage dans le granite grade II

Under Mega Tower, the rock horizon is very chaotic. This situation, which is common in Hong Kong, explains the importance that must be assigned here to reconnaissance boring (40,000 linear metres for the opposite profile which covers an area of only 5,000 m²). The special features of this horizon were decisive for the choice of the floating solution, without anchorage in the grade II granite



Lors de son achèvement en 2007, la Mega Tower culminera à 480 m au-dessus du bras de mer qui sépare Kowloon de l'île de Hong Kong. Elle est une création de l'architecte new-yorkais Kohn Pederson Fox et Sun Hung Kai Properties Limited en est le promoteur. La surveillance des travaux est assurée par Ove Arup & Partners Hong Kong Limited.

Le groupement dénommé Bachy Soletanche Group

- Intrafor Joint Venture a été adjudicataire du lot fondations dont le budget est de 650 millions de HKD (environ 80 millions d'euros). Les travaux ont démarré en janvier 2002 et leur achèvement est prévu en mai 2003.

LE PROGRAMME

Le programme contractuel prévoyant une livraison des travaux de fondation pour mai 2003 sera respecté. Le promoteur, à l'image de ses compatriotes de Hong Kong, est un homme pressé. L'écologie et la protection de l'environnement sont à Hong Kong des réalités dont on tient le plus grand compte. En conséquence, les horaires de travail sont strictement restreints à 12 heures par jour et 6 jours par semaine, et cela complique la tâche des entrepreneurs qui ne disposent ainsi d'aucune flexibilité pour respecter les programmes toujours très tendus exigés par le client.

LA CONCEPTION ET LES ETUDES

Face aux solutions concurrentes des pieux forés de grand diamètre ancrés au rocher, méthode très courante à Hong Kong, ou des pieux H battus, la solution proposée par Bachy Soletanche Group - Intrafor Joint Venture a consisté en une paroi moulée associée à des barrettes flottantes affleurant le rocher, dont les performances sont améliorées par une injection de peau.

Cette solution est basée sur l'exploitation des sondages existant à l'appel d'offres qui dévoilaient un horizon rocheux extrêmement chaotique aux pendages semi-verticaux et pouvant se situer à plus de 105 m de profondeur. Elle est également basée sur l'expérience acquise lors de l'exécution des tours Petronas à Kuala Lumpur.

LES TRAVAUX

Travaux préliminaires

Ils consistent en :

- ◆ 40 000 m de sondage de reconnaissance pour justifier les profondeurs de chaque élément de fondation ;
- ◆ 5 barrettes d'essai testées jusqu'à 4 500 t, soit 2,5 fois leur charge de travail, au moyen d'une mas-

pour Mega Tower

se de 575 m³ d'acier, pour valider la capacité portante des barrettes améliorée par la technique de l'injection de peau;

◆ préalablement aux travaux, la totalité des installations, ouvrages et immeubles mitoyens a été placée sous surveillance stricte par le biais d'instrumentations récupérant des données en temps réel.

La paroi circulaire et les 240 barrettes

La paroi circulaire de 1,5 m d'épaisseur et de 75 m de diamètre permettra l'excavation générale d'une fouille de 25 m de profondeur sous la future Mega Tower. La paroi moulée de 76 m de profondeur est traitée par "shaft grouting" car elle participe à la reprise des charges. Cet ouvrage a absorbé 30000 m³ de béton avec un panneau record de 1000 m³ coulé dans un temps limité à 12 heures.

Les 240 barrettes qui comprennent 87 barrettes de section 2800 x 1500 et 153 barrettes de section 2800 x 1000 sont forées à 83 m de profondeur moyenne avec un maximum de 104 m. Le béton est arasé à 24 m de profondeur et surmonté de béton maigre jusqu'à la surface. Leur capacité portante optimisée par "shaft grouting" s'associe à celle de la paroi pour supporter la charge de la Mega Tower. Les barrettes représentent 64000 m³ d'excavation sous bentonite.

Un radier général de 8 m d'épaisseur (35000 m³) solidaire des barrettes et encastré dans la paroi assurera la transmission et la répartition des charges.

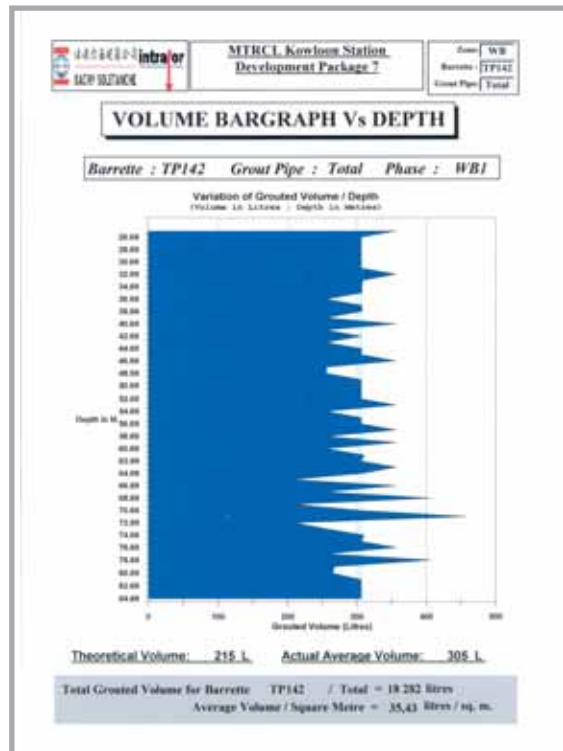
Injection de peau ou "shaft grouting"

Ce procédé consiste à placer par injection à travers des tubes à manchettes un film de coulis sur la surface latérale des fondations. Cette opération augmente de 50 % au moins la capacité portante des barrettes par amélioration du frottement latéral.

5000000 de litres de coulis ont été injectés à travers les 12000 manchettes installées sur des tubes à l'extérieur des cages d'armature des barrettes. Le contrôle précis de cette vaste opération a pu se faire grâce au système d'acquisition et d'enregistrement de données SINNUS développé par Soletanche Bachy.

Les autres travaux

A la limite de propriété est réalisée une paroi plastique en coulis bentonite/ciment de 0,8 m d'épais-

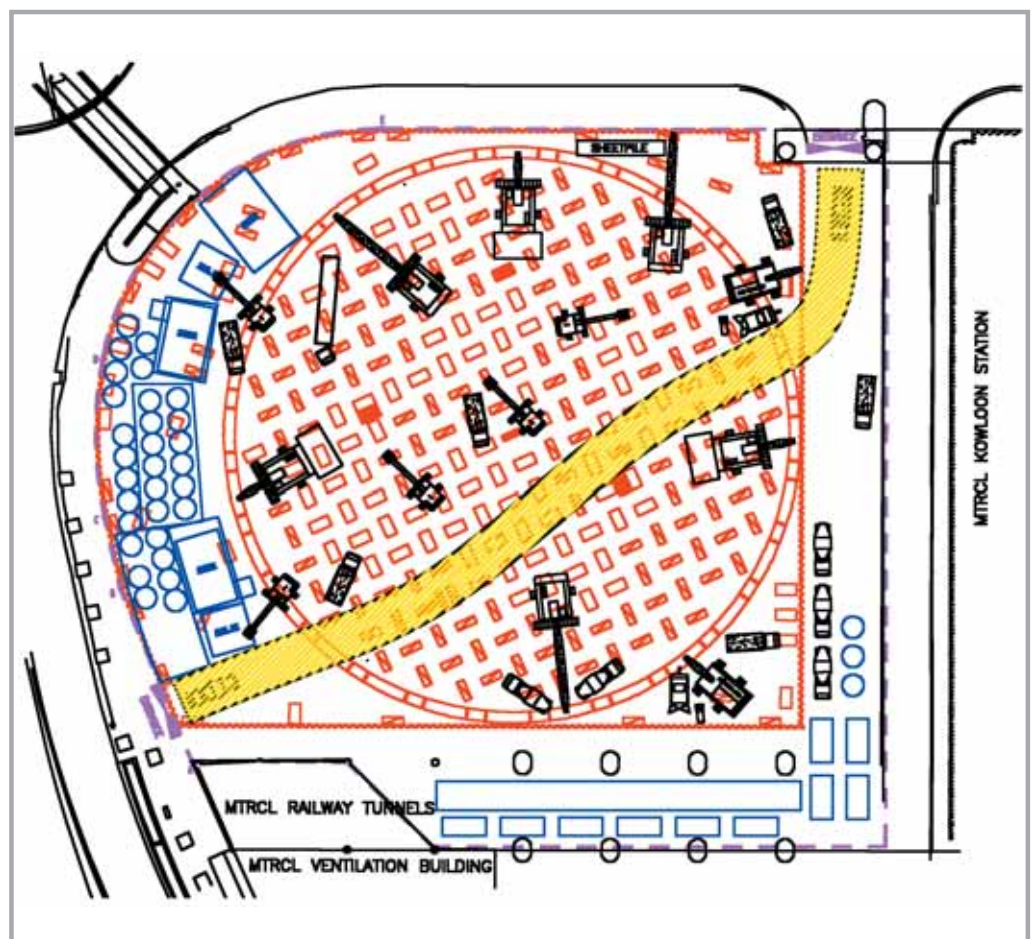


Le SINNUS, sur la base d'instructions reçues, pilote les pompes d'injection et capture les données en temps réel. Il peut ensuite les restituer à la demande ou sous forme de rapport

The SINNUS, based on instructions received, controls the injection pumps and captures data in real time. It can then retrieve them on demand or in report form

Cette maquette, mise à jour en temps réel avec des silhouettes à l'échelle a participé aux moyens mis en œuvre pour prévoir et gérer les problèmes de trafic sur la plate-forme

This model, updated in real time with true-to-scale silhouettes, was part of the means employed to predict and manage traffic problems on the platform



CK. Siu



SITE MANAGER
Bachy Soletanche Group

Claire Doby



ENGINEER
Bachy Soletanche Group

Germain Viroles



WORKS MANAGER
Bachy Soletanche Group

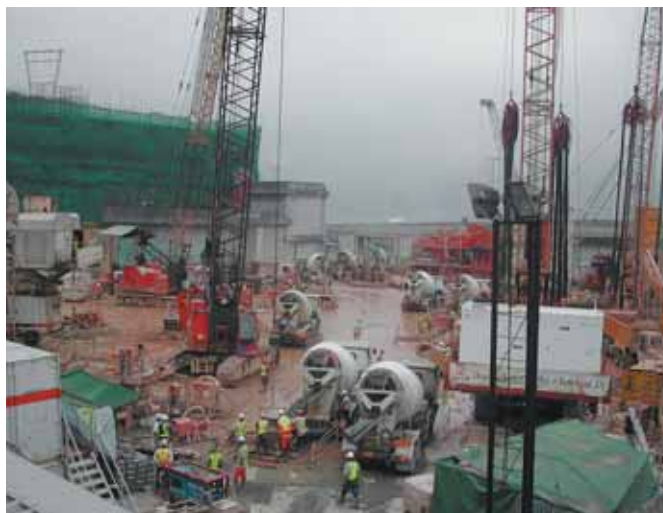
Les "Josephs".
Les obturateurs doubles
sont acheminés à 100 m
de profondeur
*The "Josephs". The double
piles are taken down
to a depth of 100 metres*



Vues d'ensemble
du chantier
*Overall views
of the site*



Trafic intense
mais toujours
sous contrôle
Package 7
*Intense traffic
but always under
control Package 7*



► seur forée à 30 m de profondeur. Elle comprend un rideau de palplanches descendu à 20 m de profondeur qui assure le soutènement de l'enceinte pendant la phase d'excavation à 9 m de profondeur de l'ensemble de la fouille à l'extérieur du noyau central. Cet ouvrage représente 10 000 m² d'excavation et 350 m de périmètre.

Cinquante barrettes et leur 9 000 m³ à l'extérieur de la paroi circulaire assureront les fondations du podium supportant le jardin périphérique de la Mega Tower.

Les contrôles pendant et après

Ils comprennent :

- ◆ 40 000 slump tests passés avec succès dans 99,9 % des cas ;
- ◆ 128 000 m de profils d'excavation Kodex pour vérifier la géométrie de l'excavation avant bétonnage ;
- ◆ 150 000 m d'auscultation sonique ;
- ◆ 400 fois la preuve par carottage que le contact de fond est conforme ;
- ◆ 2 essais de pompage ;
- ◆ 4 essais de chargement a posteriori, à la charge de travail.

■ LA PLATE-FORME DE MEGA TOWER

L'essentiel du défi à relever tient dans ces chiffres : il fallait mettre en place 130 000 m³ de béton dans un délai très court de 11 mois et, qui plus est, à partir d'une plate-forme de travail exigüe de 6 500 m² seulement créant les conditions d'un risque élevé de paralysie.

Une maîtrise satisfaisante du problème a pu être obtenue grâce aux dispositions suivantes :

- ◆ les 6 500 m² de plate-forme sont recouverts d'une dalle en béton de 0,30 m d'épaisseur ;
- ◆ dans cette dalle sont incluses les réservations et murettes guide des ouvrages à construire ;
- ◆ chacune de ces réservations et murettes guide est dotée d'un couvercle résistant aux charges de matériels lourds, permettant ainsi de rendre au trafic chaque pied carré de plate-forme entre deux opérations successives sur les fondations ;
- ◆ les réseaux de distribution d'eau, d'air, de bentonite, d'électricité, de coulis sont enterrés préalablement et se fauillent entre les ouvrages ;
- ◆ il est strictement interdit de stocker des matériaux sur la plate-forme et d'y laisser un matériel en stationnement lorsqu'il n'est pas en service ;
- ◆ les sous-ensembles sont réparés hors du chantier ;
- ◆ les colisages sont prévus pour permettre des déchargements instantanés ;
- ◆ la préfabrication est réalisée à l'extérieur ;
- ◆ la compacité des centrales de préparation et de recyclage des boues et des coulis est repensée et optimisée ;
- ◆ le lavage des véhicules sortants est réalisé par des automates.

Ces quelques règles d'organisation ont rendu possibles 100 000 entrées ou sorties de camions au rythme de 40 par heure ! (une entrée toute les 3 minutes) dans des conditions de sécurité raisonnable.



Les tours voisines des packages précédents vont paraître lilliputiennes à l'ombre de Mega Tower

The neighbouring towers of the preceding packages will seem tiny in the shadow of Mega Tower

■ LES ÉQUIPEMENTS

La production de 405 m³ d'excavation par jour nécessaire pour exécuter les quantités prévues dans le délai imparti est obtenue avec deux hydrofraises et un cutter BC 40. A ces trois machines principales sont associés les équipements satellites suivants :

- ◆ 3 centrales de recyclage de la bentonite ;
- ◆ 1 centrale de fabrication de bentonite ;
- ◆ 1 centrale de fabrication de coulis ;
- ◆ 1 centrale de traitement des eaux usées ;
- ◆ 3 grues de manutention ;
- ◆ 4 bennes à câble ;
- ◆ 6 à 12 sondeuses légères ;
- ◆ 2 foreuses SM 400 ;
- ◆ 1 centrale d'ouverture des manchettes ;
- ◆ 3 centrales d'injection ;
- ◆ 32 enrouleurs de flexibles d'injection.

■ LES HOMMES

Bachy Soletanche Group - Intrafor Joint Venture mobilise sur ce chantier, en régime de croisière, pas moins de 130 opérateurs spécialisés. Cet effectif est nécessaire pour produire la quantité de travail requise, qui se monte à 350 000 heures de travail sur le lieu des travaux proprement dits et à 50 000 heures de travail sur les aires de préparation et de préfabrication.

L'expérience et le savoir-faire sont évidemment des facteurs déterminants du succès d'une opération d'une telle envergure.

Grâce à une présence liée à une activité continue à Hong Kong depuis bientôt un demi-siècle, le groupe Soletanche Bachy et le groupe Bouygues ont su chacun former et fidéliser des générations de collaborateurs locaux d'une grande compétence qui travaillent en parfaite harmonie avec un nombre réduit d'expatriés.

ABSTRACT

Record foundations for Mega Tower in Hong Kong

CK. Siu, C. Doby, G. Viroles

The foundations contract for Mega Tower, located on the West of Kowloon Peninsula with an uninterrupted view over the Hong Kong bay, was awarded to Bachy Soletanche Group - Intrafor Joint Venture.

The composite concrete/steel tower will be used for hotel and office space and will be the world's tallest tower at 480 m high (that's 102 floors and a total weight of 560,000 tons).

The works include :

- a circular d-wall shaft, 1,5 m thick, 75 m deep, 76 m diameter, allowing a 28 m deep excavation ;
- 240 barrettes of 2,8 m x 1,5 m, up to 100 m deep, i.e. a total diaphragm wall and barrettes excavation of 92,000 m², and 91 000 m³ of concrete ;
- the general earthworks/bulk excavation and capping beams construction ;
- the 8 m thick base slab ;
- the monitoring of the excavation and its surroundings.

The plant mobilised by Bachy Soletanche Group - Intrafor Joint Venture will include 2 Hydrofraises, 1 cutter BC 40 and 4 cables grabs.

The contract duration is 600 calendar days beginning on 11 January 2002.

RESUMEN ESPAÑOL

Cimientos récord para Mega Tower, en Hong Kong

CK. Siu, C. Doby, G. Viroles

El contrato para la ejecución de cimientos para Mega Tower, ubicada al oeste de la península de Kowloon, ha sido atribuido al grupo Bachy Soletanche Group - Intrafor Joint Venture.

Esta torre, de hormigón y acero, destinada a un hotel y oficinas, será la más alta del mundo con sus 480 m de altura (102 niveles, 560.000 toneladas).

Las obras incluyen :

- una pantalla continua circular de 1,5 m de espesor, 75 m de profundidad y 76 m de diámetro, que permiten una excavación de los terrenos hasta una profundidad de 28 m,
- 240 pilas de 2,8 m x 1,5 m hasta 100 m de profundidad, o sea, un total de 92,000 m² y 91,000 m³ de hormigón,
- los movimientos de tierras generales y la viga de coronación de la pared,
- una solera de 8 m de espesor,
- la auscultación de la excavación y de los terrenos circundantes.

Los medios en cuanto a equipos de excavación correspondientes al grupo Bachy Soletanche Group - Intrafor Joint Venture están formados por 2 hidrofresadoras, 1 cutter BC 40 y 4 excavadoras de cables.

El plazo contractual es de 600 días naturales, a partir del 11 de enero de 2002.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

Harbour Vantage Management Ltd

Architectes

Wong & Ouyang (HK) Ltd

Coordinateur QS

WT Partnership (HK) Ltd

Bureau d'études

Ove Arup & Partners (HK) Ltd

Bureau de contrôle

Benaïm (China) Ltd

Entrepreneur principal

BSGL - Intrafor Joint Venture

Instrumentation

Soldata - FT Joint Venture

l'institut Thalazur

Michel Malard



CONDUCTEUR
DE TRAVAUX
Heaven Climber -
Travaux d'accès difficile

Jean-Philippe



Depardon
INGÉNIEUR TRAVAUX
Heaven Climber -
Travaux d'accès difficile

placements d'engins ou des travaux proches des cibles. Les mouvements enregistrés étaient inférieurs à 8 mm et n'ont engendré aucun désordre nécessitant une prise de mesures correctrices ou de sécurité.

Ceci a été confirmé par les relevés des inclinomètres, qui révélaient des mouvements des têtes de pieux lors du terrassement et une stabilisation de l'ensemble lors de la réalisation des clous. La déformée en tête n'excédant pas 5 mm.

Plan de phasage

Semaines 43 et 44

- ◆ Installation de chantier.
- ◆ Réalisation d'une piste avec bande de roulement par le sud du bâtiment pour permettre l'accès des engins, l'approvisionnement des matériaux et l'évacuation des terres.
- ◆ Comblement d'une piscine en bord de talus par un remblai allégé de type polystyrène de forte densité.
- ◆ Réalisation des essais préalables.

Semaines 45 et 46

- ◆ Réalisation des micropieux de reprise en sous-œuvre.
- ◆ Comblement partiel d'un grand bassin pour l'accès de la foreuse de pieux.

Semaines 47 à 51 (date butoir)

- ◆ Réalisation des 960 ml de pieux.
- ◆ Terrassement pour la paroi : 700 m³.
- ◆ Réalisation de 50 % de la paroi.
- ◆ Forage et mise en œuvre de 45 % des clous : 800 ml (photos 2, 3, 4 et 4b).

Semaines 02 à 06

- ◆ Fin de la paroi épinglée.

QUELQUES CHIFFRES DU PROJET

(Hors réhabilitation des bassins)

- Micropieux de reprise en sous œuvre : 1 000 ml
- Pieux berlinois : 960 ml
- Ancrages : 1 780 ml
- Paroi béton : 550 m²



Photo 2
Terrassement en mode rétro
Earthworks, old-fashioned style



Photo 3
Poste ferrailage profil 2
Reinforcement station profile 2



Photos 4 et 4b
Poste de travail profil 3 et poste de clouage
Work station profile 3 + nailing station

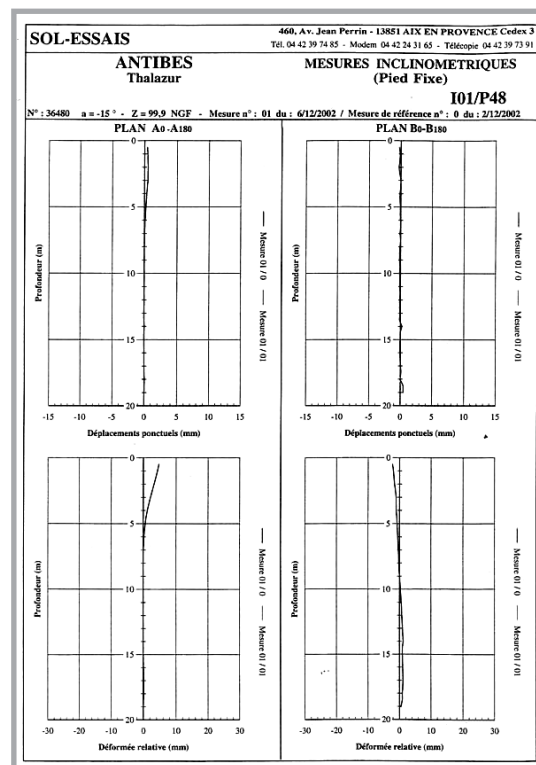


Figure 2
Graphique des inclinomètres
Graph of inclinometers

Photo 5
Foreuses à poste
Drill stations



Photo 6
Extraction
des terres (tarière)
Earth
extraction (auger)



Photo 7
Des visiteurs pas tout à fait comme les autres...
Some rather special visitors...

taient au technicien de vérifier les niveaux de sol traversés et la qualité des bulbes d'ancrage. Effectivement, la foreuse était équipée d'un enregistreur numérique à quatre paramètres : VIA ; PO ; CR et PI :

- ◆ VIA : vitesse instantanée d'avancement ;
- ◆ PO : pression sur l'outil ;
- ◆ CR : couple de rotation ;
- ◆ PI : pression d'injection.

La nature et les profondeurs des couches de sols ont également pu être vérifiées en parallèle grâce à la réalisation des pieux qui ont été exécutés avec une tarière pleine télescopique.

Le fluide de forage était un coulis de ciment injecté à l'avancement par le biais de la barre creuse. Le coulis utilisé en forage courant était assez fluide avec un C/E = 1 (rapport poids de ciment sur poids en eau). Dès que l'outil atteignait la zone d'ancrage (chute de la VIA et augmentation de la PI) le premier coulis était substitué par un coulis plus dense avec un C/E = 2.

Le matériel mis à poste comprenait :

- ◆ une foreuse de pieux de 40 t ;
- ◆ deux foreuses IPC et Puntel pour les micropieux ;
- ◆ une foreuse IPC équipée d'un marteau hydraulique hors trou pour les clous ;
- ◆ un groupe d'injection avec un double turbo-malaxeur un bac d'attente et une pompe à grand débit ;
- ◆ un poste de projection ;
- ◆ un poste de projection en voie sèche (photo 6).

Cette méthode qui oblige une mise en œuvre conséquente de ciment représente cependant un certain **intérêt économique** du fait de sa rapidité d'exécution.

CONCLUSION

Ce chantier d'une conception "traditionnelle" (berlinoise, paroi en béton armé, clouage) a abouti grâce à la mise en œuvre d'une technique de forage

MÉTHODOLOGIE

Le délai imparti, l'espace restreint, le volume de travail à réaliser a contraint l'entreprise à proposer une méthode en auto-forage (plutôt qu'une méthode traditionnelle par forage à outil récupérable et mise en œuvre ultérieure d'une armature).

Les essais préalables ont confirmé que cette technique permettait de mettre en œuvre les armatures voulues tout en garantissant la qualité et le résultat mécanique escomptés (photo 5).

Les micropieux étaient des tubes de diamètre 127 mm équipés d'un outil perdu de type trilame d'un diamètre 165 mm et les clous des barres creuses équipées d'un taillant de 160 mm.

Cette technique présente l'avantage de ne pas déstabiliser le terrain ni par l'air comprimé ni par l'eau et surtout évite une manœuvre de train de tige et d'équipement, d'où un gain de temps à la réalisation. Dans le contexte du site de Thalazur, les natures de terrain étaient difficilement observables, seuls les enregistrements de paramètres permet-

adaptée et ce malgré un délai restreint, tout en respectant les règles de sécurité.

Cependant, le forage n'était pas seulement le point critique de l'opération, puisque la bonne articulation des autres postes était primordiale pour l'exécution des clous. C'est pourquoi lors de cette opération, l'entreprise a choisi de créer des équipes spécialisées (ferraillage, projection, forage...) afin que les différentes phases d'exécution s'enchaînent rapidement.

Ce chantier intéressant sur l'ensemble de sa durée, a permis également de satisfaire la curiosité des élèves de BTS Génie civil au lycée d'Antibes, tout proche, qui ont bénéficié pendant leur visite de toutes les explications nécessaires, au grand plaisir de notre personnel (photo 7). Une expérience à renouveler !

ABSTRACT

Consolidation of the Thalazur Institute in Antibes

M. Malard, J.-Ph. Depardon

As part of the contract for revamping the beaches and ponds of the Thalazur Institute (thalassotherapy centre) in Antibes (Alpes-Maritimes region), the contractor Heaven Climber was entrusted the work section for underpinning three ponds and consolidating the entire slope on which the various swimming pools rest.

A methodology and technique using "self-drilling" studs and micropiles enabled the work to be performed rapidly, effectively and efficiently (photo 1).

RESUMEN ESPAÑOL

Consolidación del Instituto Thalazur, en Antibes

M. Malard y J.-Ph. Depardon

Operando en el contexto de la refacción de playas y piscinas del Instituto Thalazur (centro de talasoterapia) de Antibes (departamento de los Alpes Marítimos), la empresa Heaven Climber ha obtenido el contrato de recalce de cimientos de tres piscinas y la consolidación del conjunto de taludes en que toman apoyo las diversas piscinas del establecimiento.

Una metodología y una técnica por enclavamiento y micropilotes "auto-perforados", han permitido una ejecución rápida, eficaz y de elevadas prestaciones. (fotografía 1).

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

Thalazur - M. Bertheau

Maîtrise d'œuvre

Geothys

Bureau d'études

Monetec

Principaux sous-traitants

Terrassements : Roatta

Métropole Lilloise

Remblai d'accès à un ouvrage compressible

Dans la métropole lilloise a lieu actuellement la construction d'une nouvelle voie routière dans le but de d'améliorer la circulation urbaine.

Une des particularités techniques de ce projet géotechnique complexe est de réaliser un remblai d'accès à un ouvrage d'art enjambant une voie ferrée, sur des terrains compressibles. La technique des drains plats verticaux a été choisie par le maître d'œuvre pour accélérer la consolidation des terrains.

Après appel d'offres ouvert, Lille Métropole Communauté Urbaine a confié à l'agence Nord de Razel la réalisation des remblais d'accès et de préchargement à l'ouvrage d'art franchissant la voie ferrée industrielle.

La zone traversée, située sur des sols compressibles saturés, nécessite un phasage de chantier bien précis : réalisation des pistes et des chemins de désenclavement, construction d'un ouvrage hydraulique, drainage par drains plats verticaux sous l'emprise du remblai, drainage horizontal de la plate-forme, réalisation de talus verticaux renforcés par nappes géotextiles au droit de la voie ferrée, réalisation de remblais en craie.



Photo 1
Piste et chemin en recyclé
Track and path of recycled materials

SITUATION GÉOGRAPHIQUE - INTRODUCTION

Dans la métropole lilloise a lieu actuellement la construction d'une nouvelle voie routière entre les villes d'Armentières - La Chapelle d'Armentières - Erquinghem Lys dans le but d'améliorer la circulation urbaine.

Une des particularités techniques de ce projet géotechnique complexe est de réaliser un remblai d'accès à un ouvrage d'art type Pipo enjambant une voie ferrée, l'ensemble sur terrains compressibles. Le présent article traite des solutions techniques mises en œuvre pour accélérer la consolidation de terrain et réaliser le remblai.

ferrée industrielle. La zone traversée, située sur des sols compressibles, nécessite un phasage de chantier bien précis :

- ◆ réalisation des pistes et des chemins de désenclavement ;
- ◆ construction d'un ouvrage hydraulique ;
- ◆ drainage par drains plats verticaux sous l'emprise du remblai ;
- ◆ drainage horizontal de la plate-forme ;
- ◆ réalisation de talus verticaux renforcés par nappes géotextiles au droit de la voie ferrée ;
- ◆ réalisation de remblais en craie.

Les pistes et chemins de désenclavement

Une piste d'accès et des chemins de désenclavement ont été réalisés pour se trouver correctement hors d'eau et permettre aux agriculteurs de toujours accéder à leurs champs.

Après décapage des terres végétales, une épaisseur de 70 cm de concassé béton recyclé 0/60 a été mise en œuvre. Ce produit, issu de la démolition des usines Sollac à Dunkerque, associe de bonnes capacités structurelles et un pouvoir drainant non négligeable.

De plus, l'utilisation de matériaux recyclés participe à la mise en œuvre du développement durable et doit rentrer dans les habitudes de prescription dans la mesure où les produits proposés par le négociant sont de qualités géotechniques et de traçabilité correctes (photo 1).

L'ouvrage hydraulique

Afin de réaliser le remblai, il a fallu passer au-dessus d'un cours d'eau dénommé "Becque" dans le Nord de la France. Un dalot hydraulique en béton armé B25 de 2 m x 2,50 m d'environ 40 m de longueur a été réalisé avec des éléments préfabriqués et clavetés sur site.

Après déviation de la Becque, le fond de fouille a été curé des vases sur 1 m de profondeur et le dalot a ensuite été posé sur un béton de propreté armé de 15 cm d'épaisseur.

L'étanchéité de l'extrados de l'ouvrage a été réalisée avec des feuilles bitumineuses collées à chaud. Il est nécessaire d'insister sur la protection indispensable de cette étanchéité immédiatement après réception contradictoire avec le maître d'œuvre pour s'affranchir des divers soucis de poinçonnement et de déchirures diverses occasionnées par le trafic de chantier (photo 2).

DESCRIPTION DES TRAVAUX

Après appel d'offres ouvert, Lille Métropole Communauté Urbaine a confié à l'agence Nord de Razel et à son sous-traitant Cofra France la réalisation des remblais d'accès et de préchargement à l'ouvrage d'art.

La future voie aura en section courante deux chaussées de 3,5 m, deux bandes cyclables de 1,5 m, un terre-plein central de 1,0 m et deux trottoirs de 1,5 m, soit un largeur totale de 14 m hors accotement.

Les travaux à réaliser consistent à exécuter les remblais d'accès au futur pont franchissant une voie

d'art ferroviaire sur terrain

Sondages géologiques

Les études de sol commandées par le maître d'œuvre font état de terrain de mauvaise qualité avec une nappe située à - 1,00 m/TN environ. En moyenne de - 1 à - 10 m, on trouve des silts sablonneux, de - 10 à - 22 m une argile plastique gris vert appelée "argile des Flandres" et au-delà un sol porteur constitué par un sable vert.

Les essais pressiométriques réalisés ont permis de montrer que les pressions limites étaient inférieures à 1 MPa et les modules de déformations inférieurs à 10 MPa, soit un sol de médiocre qualité. Compte tenu de la hauteur du remblai de l'ordre de 8 m maximum, il a été calculé un tassement théorique de 40 cm sur une durée de consolidation de 20 ans ce qui n'est évidemment pas compatible avec les contraintes de mise en service.

Afin d'accélérer la durée de consolidation, il a été dimensionné un maillage de drains plats verticaux en application de la théorie de Hansbo à partir du degré de consolidation naturelle de Terzaghi de manière à satisfaire la condition de tassement résiduel limité à 5 cm au bout de 1,5 année et imposée par le maître d'œuvre.

La maîtrise d'œuvre a donc fait le choix de recourir à la technique de drainage vertical.

Traitement des zones compressibles (figure 1)

La consolidation de sols à l'aide de drains verticaux est appliquée aux sols compressibles et saturés d'eau, du type argileux ou limoneux. Ces sols sont caractérisés par un squelette mou et une grande porosité.

La maille calculée pour accélérer la consolidation est de 1,5 m x 1,5 m. Le drain est fiché par fonçage jusqu'à une profondeur de 22 m.

La capacité de fonçage du mât est de 32 t. La pelle hydraulique utilisée est une Liebherr 954.

Lors de la mise en œuvre de remblai sur sol à fortes teneurs en eau, des tassements importants sont prévisibles. L'importance de ces tassements, ainsi que la durée consolidation, dépendent des caractéristiques géotechniques des sols en place. La contrainte amenée par le remblai entraîne une mise en pression de l'eau interstitielle.

La durée du tassement dépend essentiellement de la durée d'évacuation de cette eau. Dans le cas de sols à faibles perméabilités (type argile ou limon), on peut accélérer les durées de consolidation par la mise en place d'un drainage vertical.

A l'aide des drains verticaux la durée de consolidation va passer de 20 ans à 1,5 an pour atteindre le même degré de consolidation. Environ 80000 m de drains type "Mebradrain®" ont été mis en place sur le chantier par Cofra (Mebradrain est une marque déposée de Geotechnics Holland BV). Il est composé d'une âme drainante à forte transmissivité entourée d'un géotextile filtrant très perméable en



Photo 2
Dalot
Box culvert



Figure 1
Principe de drains
verticaux
Vertical drain
principe

1 - Vice-président de l'Association des ingénieurs territoriaux de France - Région Nord AITF : www.aitif.asso.fr

Laurent Brouet
RESPONSABLE
D'EXPLOITATION
Razel



Kees de Kroes
GÉRANT
Cofra France

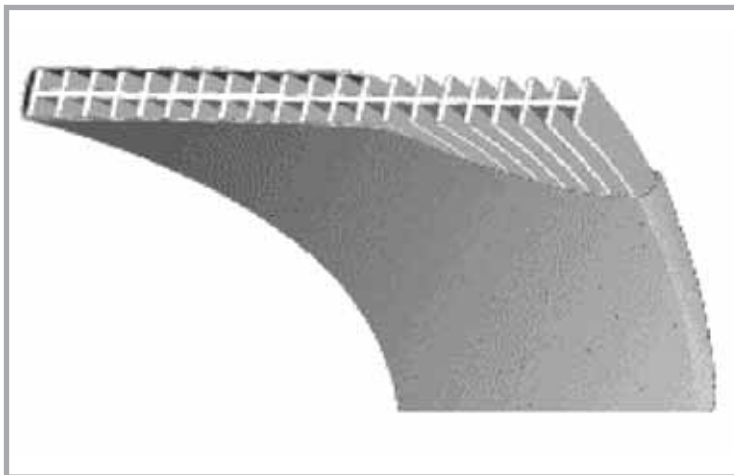


Vincent Lecendre¹
SERVICE GRANDES
INFRASTRUCTURES -
MAÎTRE D'ŒUVRE
Lille Métropole Communauté
Urbaine



► polypropylène (figure 2). La production du Mebra-drain® est rigoureusement contrôlée selon un programme d'assurance qualité certifié ISO 9001.

Figure 2
Détail de la structure
du drain
Detail of the drain
structure



Photos 3 et 4
Mise en œuvre
des drains
Drain laying



Les principaux avantages de ce type de drain sont :

- ◆ remaniement très faible du sol en place ;
- ◆ évacuation de l'eau interstitielle accélérée ;
- ◆ possibilité d'adaptation du produit à chaque étude ;
- ◆ rapidité de mise en œuvre : 4 000 à 8 000 m par jour et par engin ;
- ◆ période de consolidation raccourcie en utilisant un maillage serré ;
- ◆ mise en place par fonçage ne nécessitant pas d'apport d'eau ;
- ◆ installation des drains possible jusqu'à une profondeur de 40 m.

Le filtre du drain est une composante essentielle du système de drainage.

Il est composé par un géotextile non tissé aiguilleté polypropylène de forte résistance à la traction et de porosité adaptée. L'ouverture de filtration et la permittivité du filtre permettent le passage de l'eau vers le drain en évitant tous risques de colmatage. La perméabilité du drain vertical doit être au minimum égale à la plus forte perméabilité des couches traversées par le système. La rigidité du filtre permet de conserver les capacités hydrauliques de l'âme drainante même sous forte contrainte.

La forte transmissivité du drain, permet d'assurer un drainage performant de la plupart des sols rencontrés (photos 3 et 4).

Ce drainage vertical est associé à un drainage horizontal (Somtube Afitec) assurant l'écoulement des eaux vers des fossés latéraux. Une forme en toit de 3 % a également été donnée à la plate-forme.

Le géocomposite de drainage est constitué :

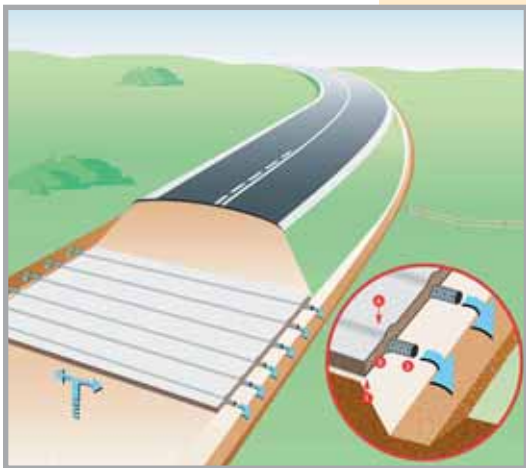
- ◆ d'une nappe filtrante non tissée aiguilletée (filtre inférieur) ;
- ◆ d'une nappe drainante non tissée aiguilletée ;
- ◆ de mini-drains perforés régulièrement selon deux axes alternés à 90° ;
- ◆ d'une nappe filtrante non tissée aiguilletée (filtre supérieur) (figures 3, 4 et 5).

■ REMBLAI DE PRÉCHARGEMENT EN CRAIE

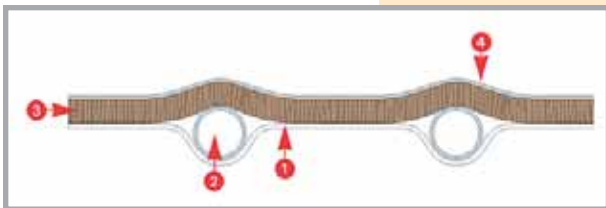
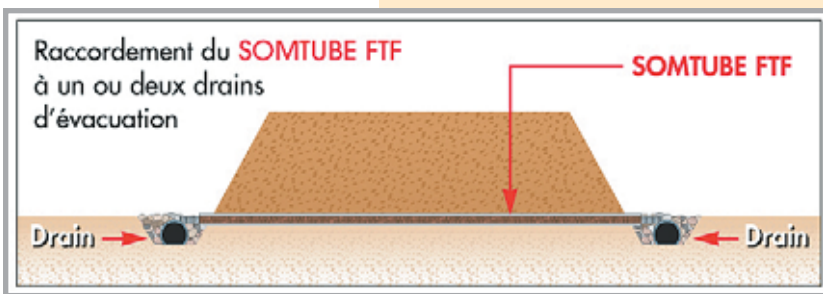
Concernant les remblais courants, Razel a choisi une craie en provenance du Pas-de-Calais qui présentait le meilleur compromis technico-économique. Sa mise en œuvre est réalisée au bouteur à raison d'une cadence de 3 000 à 4 000 t/j. Son compactage est réalisé avec un compacteur "pied de mouton".

Par ailleurs, en complément des remblais courants vient s'ajouter la mise en place d'une surcharge de 1,00 m au-dessus de la cote théorique permettant d'augmenter la pression au sol.

Le maître d'œuvre a prévu une surlargeur de compactage de façon à atteindre les compacités en rive.



Figures 3, 4 et 5
Principe de drainage
horizontal
*Horizontal drainage
principle*



Photos 5 et 6
Mise en œuvre de la craie
Laying chalk

Les caractéristiques demandées pour les essais à la plaque dans le corps de remblai sont $EV2 > 50$ MPa, rapport $EV2/EV1 < 2$.

Ces dispositions constructives sont assorties d'une instrumentation sous remblai au moyen de cellules tassométriques et de piges métalliques installées au fur et à mesure de la montée du remblai.

Cette instrumentation permettra ainsi de mesurer le tassement du sol support dans le temps (photos 5 et 6).

Ouvrage de soutènement vertical renforcé par géotextile

L'emploi de cette technique a pour but de consolider les sols au plus près de la voie ferrée. Cet ouvrage est constitué de deux parements dont un est provisoire (celui situé au droit de la future culée) et l'autre définitif.

La technique employée consiste à monter les remblais par couche et d'intercaler des nappes de géotextiles.

Les matériaux compactés sont ainsi enveloppés dans le géotextile et afin d'obtenir un parement vertical, on utilise un coffrage amovible et des "big-bags". L'empilement de ces boudins permet alors d'échafauder une butée massive qui, bien que résistante, s'accommodera des tassements différentiels attendus sur ces sols compressibles.

Les "big-bags" sont maintenus dans le coffrage mobile par trois unités à l'aplomb du parement et ils sont remplis de matériaux 0/100 à l'aide d'une pelle mécanique. Le remplissage s'effectue simultanément dans les trois sacs avec des levées d'environ 30 cm de hauteur.

Après l'implantation des parements par le géomètre, le suivi de la verticalité est assuré au moyen d'une règle et d'un niveau par le chef d'équipe.

Le compactage en partie arrière est exécuté au V5 ou à la plaque vibrante dans les zones de proximité des "big-bags".

Au préalable, des calculs de stabilité interne et externe ont été réalisés compte tenu du caractère compressible des matériaux du site.



Photos 7 et 8
Réalisation du mur
de soutènement
*Construction
of the supporting
wall*

► Les caractéristiques géométriques de ces murs sont les suivantes :

- ◆ largeur de la base : 5,5 m ;
- ◆ hauteur du mur : 7,10 m en phase provisoire et 8,10 m en phase définitive ;
- ◆ surcharge routière : 20 kN/m² ;
- ◆ nombre de nappes : six nappes de géotextile polyester 100 kN de 12,80 m pour le mur provisoire, sept nappes de 12,80 m pour le mur définitif (photos 7 et 8).

ABSTRACT

Lille metropolitan area.
Embankment for access to
a bridge over the railway
track on compressible
ground

L. Brouet, K. de Kroes, V. Lecendre

In the Lille metropolitan area a new road is currently being built with a view to improving urban traffic.

One of the special technical features of this complex geotechnical project is the construction of an access embankment to a bridge crossing a railway track, on compressible ground.

The flat vertical drain technique was chosen by the project manager to accelerate consolidation of the ground.

Following an open invitation to tender, Lille Métropole Communauté Urbaine entrusted to Razel's northern agency the execution of access and preloading embankments for the bridge crossing the industrial railway track.

The area passed through, located on saturated compressible soils, requires very precise site scheduling : execution of access tracks and paths, construction of a hydraulic structure, drainage by flat vertical drains under the area covered by the embankment, horizontal drainage of the platform, execution of vertical banks reinforced by geotextile layers at the level of the railway track, execution of chalk backfills.

RESUMEN ESPAÑOL

Metrópoli de Lille.
Terraplén de acceso a una
estructura ferroviaria sobre
terreno compresible

L. Brouet, K. de Kroes y V. Lecendre

Se está llevando a cabo actualmente, en la metrópoli de Lille, la construcción de una nueva vía de circulación, con objeto de mejorar el tráfico automovil urbano.

Una de las particularidades técnicas de este proyecto geotécnico complejo consiste en construir un terraplén de acceso a una gran estructura que pasa por encima de una vía férrea, sobre terrenos compresibles.

Se ha adoptado por parte del autor del proyecto la técnica de drenes planos verticales para acelerar la consolidación de los terrenos. Tras una licitación abierta, Lille Métropole Commu-

nauté Urbaine ha encargado a la agencia Norte de la empresa Razel la ejecución de los terraplenes de acceso y de precarga de la estructura que salva la vía férrea industrial.

La zona atravesada, ubicada en suelos compresibles saturados requiere proceder por etapas de obra perfectamente precisas : ejecución de las pistas y de los caminos de desenclavamiento, construcción de una estructura hidráulica, drenaje por medio de drenes planos verticales en la zona ocupada por la estructura final, drenaje horizontal de la plataforma, ejecución de taludes verticales reforzados por medio de capas de geotextiles a la perpendicular de la vía férrea, ejecución de rellenos cretáceos.

Colonnes à Module (Pays de Galles)

Depuis le milieu de l'année 2002 Morgan (Vinci JV) travaille à la construction d'une route périphérique à Newport : la Southern Distributor Road (SDR). La partie relative au traitement de sol dans les zones portuaires et la décharge attenante a été confiée à Ménard Soltraitement.

Le sol y est constitué d'une couche de 10 à 12 m d'alluvions de mauvaise qualité surmontée d'un matériau hétérogène apporté par l'homme et par endroit pollué. Sous les alluvions se trouve une couche de graviers dense à très dense.

Outre la pollution de certaines zones, de nombreux réseaux câblés et canalisations complexifient le projet.

Pour améliorer le sol et lui permettre de recevoir un remblai routier de 2 à 9 m de haut, Ménard Soltraitement met en place un réseau de plus de 7 000 colonnes de 10 à 16 m de longueur.

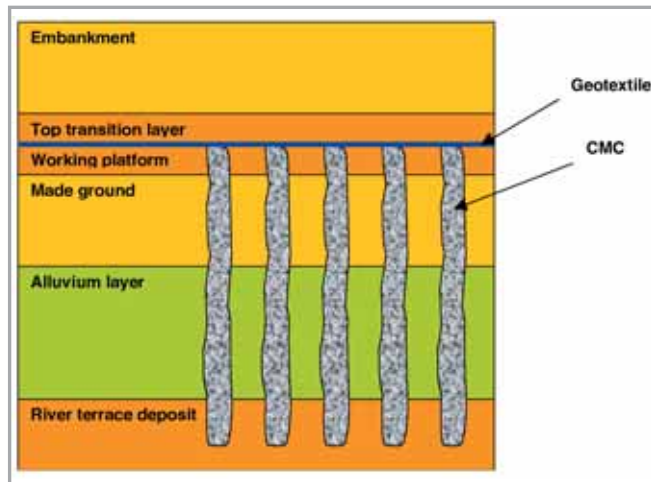


Figure 1
Coupe schématique du terrain
Schematic cross section of the land

rait donc potentiellement être contaminée par la haute si elles étaient mises en contact. Pour cette raison les inclusions ne traverseront pas la couche alluvionnaire au niveau de la décharge. Les Colonnes à Module Contrôlé® (CMC) n'étant pas ancrées dans la couche dure la densité du réseau devra être supérieure. Malgré cette mesure des tassements plus importants sont attendus dans cette zone (de l'ordre de 10 cm à 15 cm sur 15 ans).

■ PRINCIPE GÉNÉRAL

La stratégie d'amélioration de sol consiste à :

- ◆ assurer la stabilité du remblai routier et réduire les tassements post-construction ;
- ◆ protéger les réseaux, canalisations et structures existantes ;
- ◆ préparer le sol à accueillir différentes structures nouvelles : ponts, buses, murs de soutènement.

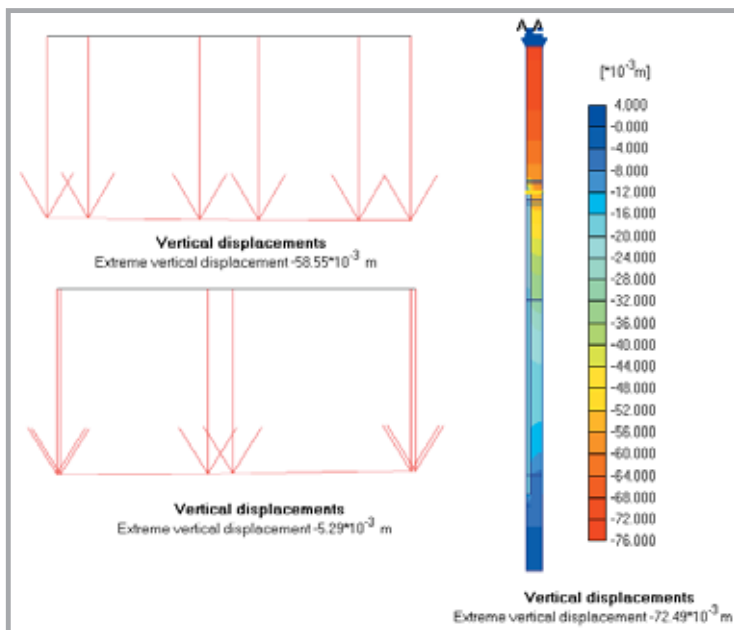


Figure 2
Calcul axisymétrique :
exemple de tassement
d'un ensemble sol
+ Colonnes à Module
Contrôlé®
Axisymmetric calculation :
example of subsidence
of a soil + Controlled
Modulus Column®
assembly

■ CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES

Sur une portion longue de 350 m la couche supérieure du sol est constituée par une ancienne décharge. L'adaptation du traitement à cette zone a nécessité une modélisation de la décomposition des matériaux.

Au-delà des considérations de tassements, la présence de la décharge induit un problème environnemental. Deux nappes d'eau se superposent en effet à cet endroit du projet. La nappe basse pour-

LES COLONNES À MODULE CONTRÔLÉ® EN BREF

Les Colonnes à Module Contrôlé® sont des inclusions semi-rigides cimentées dont les modules de déformation sont de 5 à 30 fois plus faibles que ceux du béton. Elles sont mises en œuvre comme procédé de renforcement de sol.

Ce type de traitement ne vise pas à réaliser des pieux devant supporter la totalité de la charge apportée par l'ouvrage mais à réduire la déformabilité globale du sol à l'aide d'éléments semi-rigides régulièrement répartis. Les procédés de réalisation, de dimensionnement et de contrôle ont été développés par Ménard Soltraitement pour obtenir les meilleurs résultats.

Cette technique est à utiliser, de préférence aux colonnes ballastées, lorsque le sol est trop mou ou organique et n'offre pas d'étreinte latérale suffisante ainsi que dans les cas où les charges sont élevées ou les tolérances de tassement sévères.

Elles sont généralement réalisées par une vis spéciale à refoulement.

Cette technique ne comporte ni vibration ni battage. Elle est sans incidence sur l'environnement.



Contrôlé® à Newport

Le principe de base de l'amélioration de sol effectuée à Newport est d'exécuter un réseau de CMC depuis le niveau du sol jusque dans une couche raide. Une couche de transition constituée de matériau de bonne qualité, bien compacté, est ensuite installée au-dessus de ces inclusions pour assurer le bon transfert des charges au réseau de renforcement et au sol traité.

L'ensemble sol + CMC se comporte alors comme un sol amélioré ayant un meilleur module élastique. Dans le cadre du projet de Newport l'utilisation de la technique de CMC présente des avantages substantiels :

- ◆ pas de vibration et donc pas de risque d'endommager des structures existantes ;
- ◆ le sol est poussé latéralement donc aucun matériau pollué n'est à évacuer ;
- ◆ haute vitesse d'exécution.

La densité des colonnes dépend de la charge appliquée ainsi que des caractéristiques de la couche de transition.

■ CARACTÉRISTIQUES DES CMC

Sur le projet de Newport les CMC ont les caractéristiques suivantes :

- ◆ diamètre 420 mm ;
- ◆ ancrage de 1 m dans la couche dure ;
- ◆ chargement des CMC à environ 40 t ;
- ◆ maillage carré variant de 1,30 m x 1,30 m à 2,50 m x 2,50 m en fonction de la charge (figure 1).

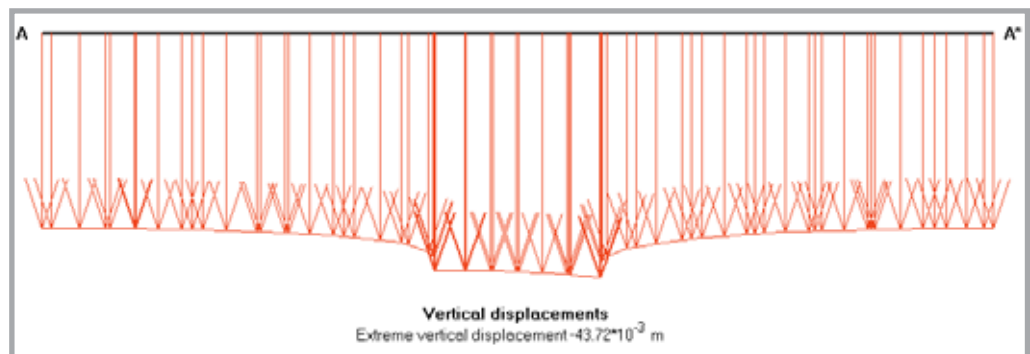
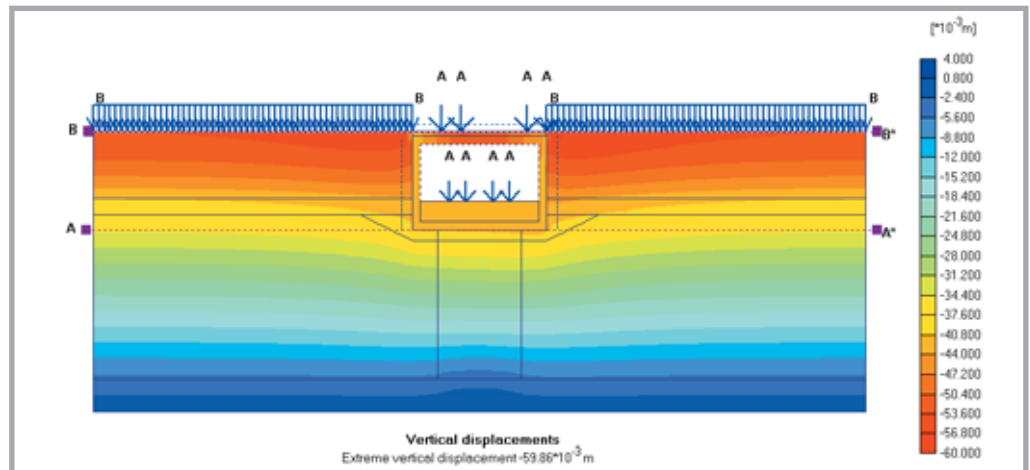
■ DIMENSIONNEMENT

Un prédimensionnement est calculé en considérant qu'une colonne reprend 40 t (facteurs de sécurité inclus).

Ce dimensionnement est vérifié en utilisant un calcul aux éléments finis permettant d'évaluer le comportement global du remblai, les tassements et les efforts dans les colonnes et le géotextile (figures 2, 3 et 4).

■ TRAVAUX

Trois machines travaillent actuellement sur le projet. Elles sont équipées d'outils à refoulement permettant de déplacer le sol au lieu de l'extraire. Les paramètres de forage sont enregistrés par des



Figures 3 et 4
 Calcul aux éléments finis en 2D :
 stabilité globale et tassement
 du remblai au niveau d'un pont cadre
 2D finite-element calculation : overall
 stability and subsidence
 of the embankment at the level
 of a bridge frame



Atelier de CMC
 et toupie béton
 CMC equipment
 and ready mix concrete
 truck



Toupie et pompe
 à béton
 Ready mix truck
 and concrete pump

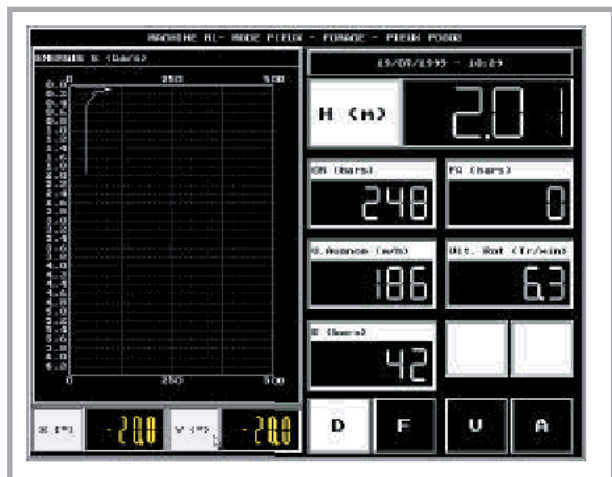


Figure 5
Ordinateur de bord
On-board computer

ordinateurs spéciaux. Ils permettent pour chaque colonne de vérifier les vitesses de pénétration et de rotation de l'outil, le couple, etc. Le bétonnage a lieu à la remontée de l'outil. L'ordinateur de bord permet à l'opérateur de contrôler la vitesse d'extraction et le bon remplissage des colonnes (figure 5).

CONCLUSION

La production du chantier, commencé en novembre 2002 avec une machine de type Fondex, a fortement augmenté depuis le début de l'année suite à l'arrivée de deux nouvelles machines à CMC. Malgré des conditions atmosphériques difficiles le planning global des travaux devrait être respecté. Ménard SolTraitement devrait ainsi finir son deuxième chantier important de CMC au Royaume Uni en août 2003.

ABSTRACT

Controlled Modulus Columns (CMC)[®] in Newport (Wales)

M. Lacazedieu

Since mid-2002 Morgan (Vinci JV) has been working on the construction of a ring road in Newport : the Southern Distributor Road (SDR). The section relating to soil improvement in the port areas and the adjacent landfill was entrusted to Ménard SoilTreatment.

To improve the soil and enable it to receive a road embankment between 2 and 9 metres high, Ménard SoilTreatment is setting up a network of more than 7,000 columns between 10 and 16 metres long.

Two CMC machines are currently working on the treatment of approximately 1,5 km of road.

Over the greater part of the site the columns will be conventionally anchored 1 metre deep in the hard layer.

At the level of the landfill, on the other hand, the environmental constraints are very restrictive. The columns cannot pass through the alluvial clays. The meshing chosen is therefore more dense and the expected subsidence slightly greater.

The CMC technique is expected to be used again later on the road alignment.

RESUMEN ESPAÑOL

Columnas de módulo controlado[®] en Newport (país de Gales)

M. Lacazedieu

Desde mediados del año 2002, Morgan (Vinci JV) procede a la construcción de una carretera periférica en Newport : la Southern Distributor Road (SDR). La sección relativa al tratamiento del terreno en las zonas portuarias y la descarga adyacente ha sido encargada a Ménard SolTraitement.

Para mejorar el terreno y permitirle soportar un terraplén viario de 2 a 9 m de altura, Ménard SolTraitement instala una red de más de 7.000 columnas de 10 a 16 m de longitud. Dos máquinas de CMC trabajan actualmente para el tratamiento de, aproximadamente, 1,5 km de carretera.

En la mayor parte de las obras, las columnas estarán normalmente ancladas a 1 m en la pared resistente.

A nivel de la descarga, las tensiones medioambientales son, por el contrario, sumamente restrictivas. Las columnas no pueden atravesar las arcillas aluviales. Por consiguiente, la malla adoptada es más densa y los asentamientos esperados ligeramente más importantes.

La técnica de las CMC se debería aplicar de nuevo más adelante, en el trazado de la carretera.

Penny's Bay (Hong Kong) Etude géotechnique, instrumentation et

Penny's Bay est un projet de grande envergure situé à Hong Kong. Il s'agit de gagner des terrains sur la mer pour y construire un parc d'attraction international.

Les travaux comportent :

- ◆ l'élimination des sols mous du fond marin par dragage ;
- ◆ la mise en place d'un remblai sableux sur le fond dragué ;
- ◆ le compactage du remblai par la technique du vibrocompactage ;
- ◆ la mise en place d'un système d'auscultation géotechnique et son exploitation.

Le niveau final du fond marin varie de - 15 à - 35. Dans certaines zones, le niveau de remblai s'établit à + 20 avec surcharge temporaire de 10 m d'épaisseur. Ailleurs, le niveau de remblai atteint + 9 m avec une surcharge temporaire de 4 m d'épaisseur (figure 1 et photos 1 et 2).

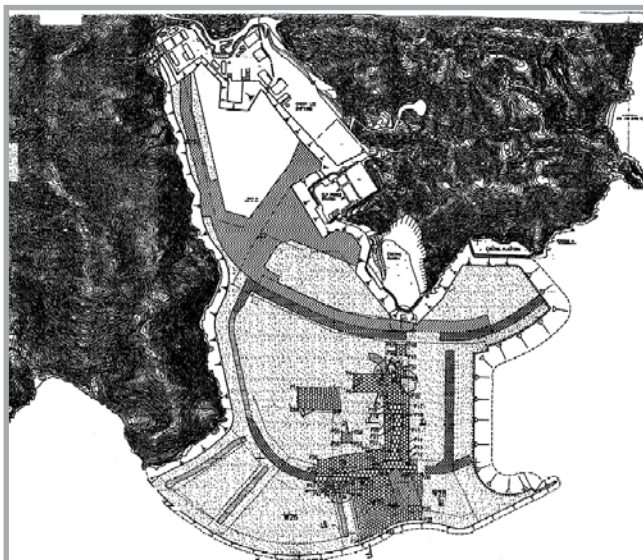


Photo 1
Vue générale aérienne du site en été 2001
Over all aerial view of the site as in summer 2001



Photo 2
Outillages en production
Rigs in production

Figure 1
Plan général du site
Over all plan view of the site



LES TRAVAUX

Le phasage de travaux d'une telle envergure est délicat. Il s'agit d'assurer la coordination de nombreux intervenants. Un résumé du phasage des travaux est donné ci-après. Pour en faciliter la lecture, les points d'arrêt et les contraintes du projet n'ont pas été mentionnés bien qu'ils aient une importance déterminante dans l'établissement du phasage.

Phasage des travaux

- 1) Etude du fond marin par essais CPPT (pénétration continue au piézocône) afin de fixer le niveau limite des dragages.
- 2) Dragages (par drague ou par benne preneuse) jusqu'au niveau ainsi fixé.
- 3) Mise en place des plaques formant repères de tassement sur le fond.
- 4) Mise en place des remblais par remblaiement hydraulique et clapage.
- 5) Equipement des repères de tassement par des tiges remontées en surface, au moyen de forages.
- 6) Mise en place du remblai sableux, en couches d'épaisseur contrôlée.
- 7) Lors de la mise en place du remblai sableux, mise en place des plaques de tassement.
- 8) Compaction profonde par vibrocompactage.
- 9) Mise en place des autres appareils de mesure (extensomètres, piézomètres à corde vibrante, piézomètres ouverts).



vibrocompactage, auscultation

10) Elimination des remblais de surcharge.

11) Mise en place des autres appareils de mesure (plaques de tassements en surface) selon les instructions du maître d'œuvre, protections diverses. Cet article se limitera à la description des travaux de compaction profonde, ainsi que des instruments d'auscultation mis en place.

■ VIBROCOMPACTAGE

Matériaux de remblai

La partie inférieure des remblais est mise en place par simple déversement à partir des engins de dragage. Cependant, pour le remblai sableux au-dessus de la cote - 2 environ, la mise en place est faite par la technique de jet dite "rainbow", ou par transport hydraulique en conduite.

Selon les spécifications, le matériau de remblai doit être un sable marin ou fluvial. Il doit présenter une granulométrie grossière. Il doit être propre, dur, durable et exempt de matières organiques ou de tout autre matériau impur. Sa granulométrie doit être inférieure à 37,5 mm, et une fois le remblai mis en place, le pourcentage d'éléments inférieurs à 63 microns est limité à 10 % en poids.

La courbe granulométrique du sable, déterminée sur échantillons pris dans les dragues avant mise en place, est illustrée sur la figure 2. Ce sable est un matériau essentiellement siliceux à faible teneur en carbonate (moins de 5 %).

Résultat imposé

Le compactage du remblai sableux doit permettre d'obtenir la courbe de résistance en pointe en fonction de la profondeur (selon l'essai CPPT standard) indiquée sur la figure 3. En outre, il est requis un tassement en surface supérieur à 5 % de l'épaisseur de la couche soumise à la compaction profonde.

La méthode de compaction profonde

La technique de vibrocompactage vise la densification *in situ* de sols essentiellement granuleux au moyen d'une sonde vibrante lourde. La mise en vibration horizontale de la pointe de la sonde est réalisée par rotation d'un balourd placé dans la partie inférieure de la sonde.

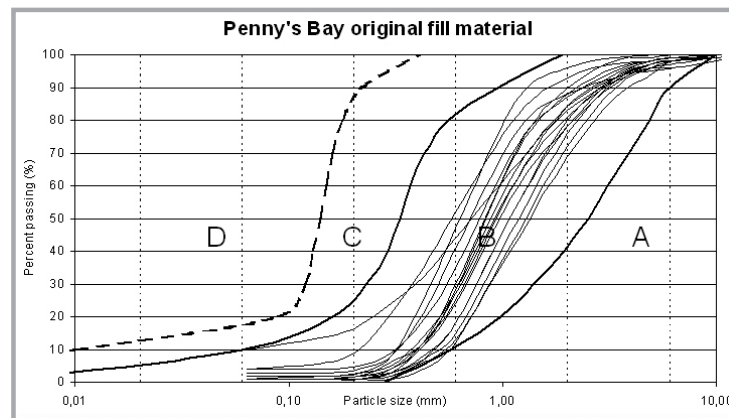


Figure 2
Courbe granulométrique
Particule size distribution graph

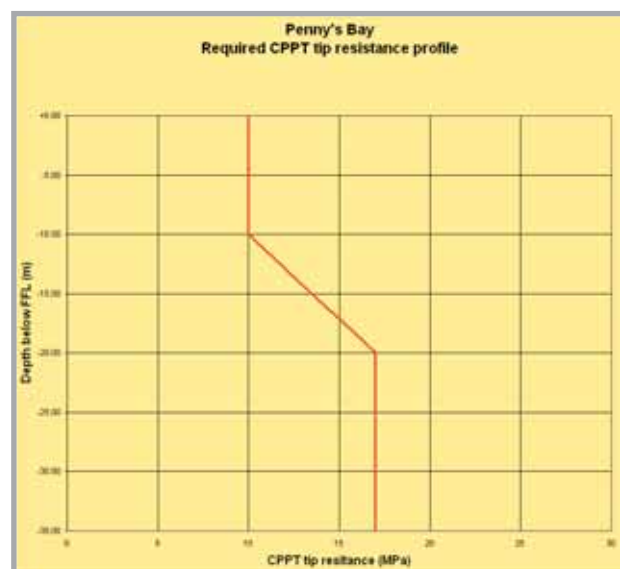


Figure 3
Résultat imposé
Required performance

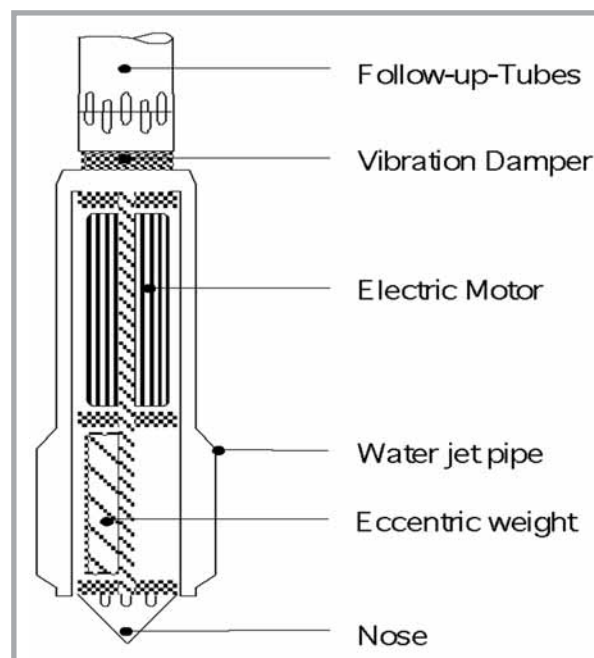
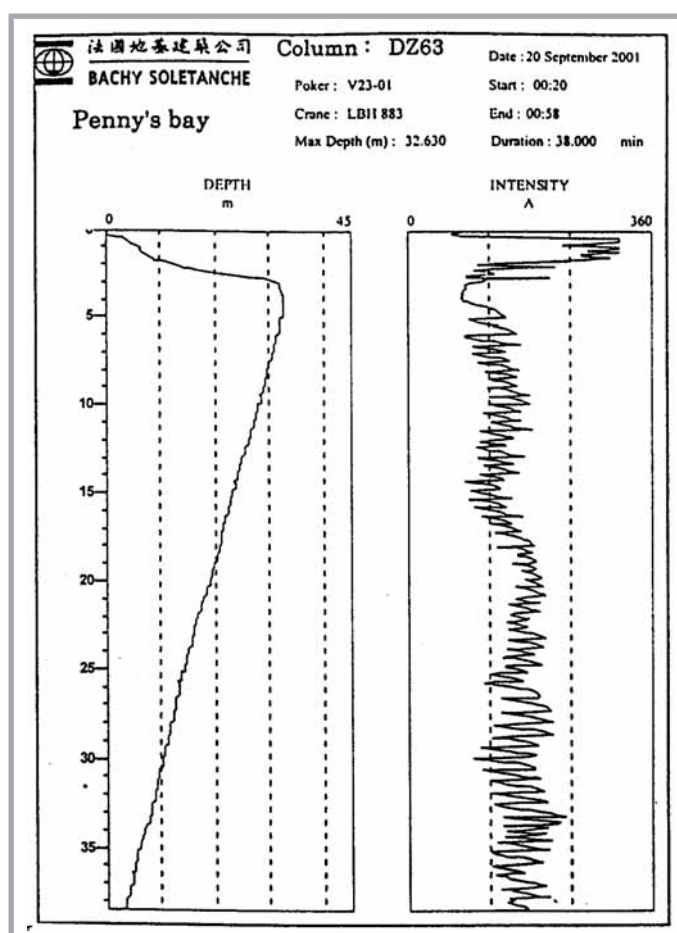


Figure 4
Sonde vibrante
Vibro poker

Photo 3
Vibreux
en action
A vibrator
at works



Figure 5
Enregistrement
électronique
Electronic
record



► La puissance et l'amplitude des vibrations dépendent de la masse du balourd, de son excentricité, et de la forme de la partie inférieure de la sonde. Pour optimiser la compaction, la sonde est conçue de telle façon que les vibrations sont limitées à sa seule partie inférieure, celle-ci étant séparée de la partie supérieure par un joint flexible (appelé "isolateur"). Le principe d'une sonde de vibrocompactage est illustré sur la figure 4. L'aspect réel de celle-ci apparaît sur la photo 3.

La descente jusqu'à la profondeur voulue est obtenue par l'effet combiné de l'action des vibrations de la sonde et celle des jets d'eau sous pression sortant du nez. Lorsque le niveau voulu est atteint, on arrête les jets, et la sonde vibrante est relevée par passes de 0,5 m. A chaque palier, la sonde est immobilisée pour permettre le compactage du sable. A mesure que le taux de compaction augmente, la rotation du balourd devient plus difficile, comme en témoigne l'intensité du courant appelé par le moteur électrique. Le contrôle de la qualité de la compaction est effectué par enregistrement de l'intensité électrique en fonction du temps à chaque profondeur (figure 5). Les travaux de vibrocompactage sont entrepris depuis la limite supérieure du remblai de surcharge jusqu'à 42 m de profondeur. Le volume total compacté est d'environ 40 millions de m³ (photo 3).

Phasage des travaux de compaction profonde

Avant le début des travaux, on a effectué des essais destinés à vérifier l'adéquation de la méthode et du matériel utilisé. Différentes machines ont été essayées, les points de compaction étant disposés en quinconce et espacés de 4,0 m, 4,3 m et 4,6 m sur différentes planches d'essai. Ces essais ont permis de conclure que les vibreurs les plus efficaces dans les conditions du chantier étaient le V23 et le V281 (puissance : 130 kW), avec un espacement de 4,3 m entre les points de compactage en quinconce.

Ayant ainsi défini le maillage et l'espacement des paliers, on a pu commencer les travaux de compaction profonde, selon le phasage suivant :

- 1) Nivellement initial de la surface du remblai à compacter.
- 2) Essais CPPT avant compactage afin d'évaluer la qualité du sable, sa densité initiale et le taux d'amélioration nécessaire.
- 3) Compactage.
- 4) Essais CPPT après compactage afin de juger si le résultat escompté est atteint.
- 5) Nivellement de la surface finale de la plateforme.
- 6) Evaluation des tassements pour confirmer l'obtention du résultat imposé.

Le matériel

Le matériel utilisé dans la technique de vibrocompactage se compose notamment des éléments suivants :

- ◆ grue de service sur chenilles pour manutention de la sonde vibrante et des tubes allongés ;

- ◆ tubes allongés, permettant la descente de la sonde jusqu'aux profondeurs nécessaires. Leur rôle essentiel est de permettre le passage jusqu'au nez de la sonde de l'eau provenant d'un réservoir en surface et des câbles électriques depuis le groupe électrogène en surface ;
- ◆ un groupe électrogène ;
- ◆ une pompe de relevage qui alimente le réservoir d'eau ;
- ◆ une pompe haute pression entre le réservoir et le nez de la sonde vibrante ;
- ◆ un compresseur d'air, pour injection d'air facilitant la pénétration de la sonde dans les couches denses ;
- ◆ un chargeur sur pneus, pour alimenter l'orifice du trou en sable pendant le compactage (photo 4).

■ ÉTUDE DES SOLS, AUSCULTATION ET INSTRUMENTATION

Ces prestations interviennent avant, pendant et après les travaux de vibrocompactage.

Essais de pénétration continue CPPT (*Continuous Piezocone Penetration Test*)

Les essais CPPT du fond marin sont réalisés à partir de barges. Ces essais sont d'une importance vitale car c'est à partir de ces mesures que le maître d'œuvre détermine à l'avance le niveau d'arrêt des dragages. L'implantation de ces essais est définie selon un maillage théorique de 50 m. Un dispositif GPS embarqué localise les points d'implantation.

Repères de tassement (type marin)

Après dragage jusqu'au niveau fixé, et avant mise en place des remblais sableux, une série de plaques en béton formant repères, de dimensions 2,5 x 2,5 m, est placée sur le fond. Une fois le remblai sableux monté jusqu'à un mètre au-dessus du niveau de l'eau, ces plaques sont recherchées par des forages.

Les forages sont équipés d'un tube de revêtement externe et d'une tige axiale solidaire de la plaque et isolée du frottement du remblai. Le tassement des plaques est mesuré par nivellement des têtes des tiges en surface.

Instrumentation

Au cours des travaux de mise en place du remblai sableux, divers types de plaques de tassement sont placés à des cotes différentes, pour mesurer les tassements du remblai. De plus, divers autres appareils de mesure (extensomètres, piézomètres)



Photo 4
Vibrocompactage en cours au moyen de trois machines
Vibrocompaction in progress with three Rigs working together

Tableau I
Table I

Appareil	Fréquence des relevés
Repères de déplacement superficiels	1 fois par semaine pendant 10 mois, 1 fois tous les 15 jours par la suite
Repères de tassement enfouis et profonds (tous types)	1 fois par semaine pendant 12 mois, 1 fois tous les 15 jours par la suite
Piezomètres (tous types)	1 fois par semaine pendant 12 mois, 1 fois tous les 15 jours par la suite. (Plusieurs séries de lectures tous les 15 mn pendant un cycle de marée seront demandées par le maître d'œuvre).
Extensomètres	1 fois par semaine pendant 12 mois, 1 fois tous les 15 jours par la suite
Inclinomètres / extensomètres	1 fois par semaine pendant 10 mois, 1 fois par mois par la suite

sont installés afin de suivre l'évolution des paramètres représentatifs du comportement du matériau et des talus.

Ces mesures ont pour objet :

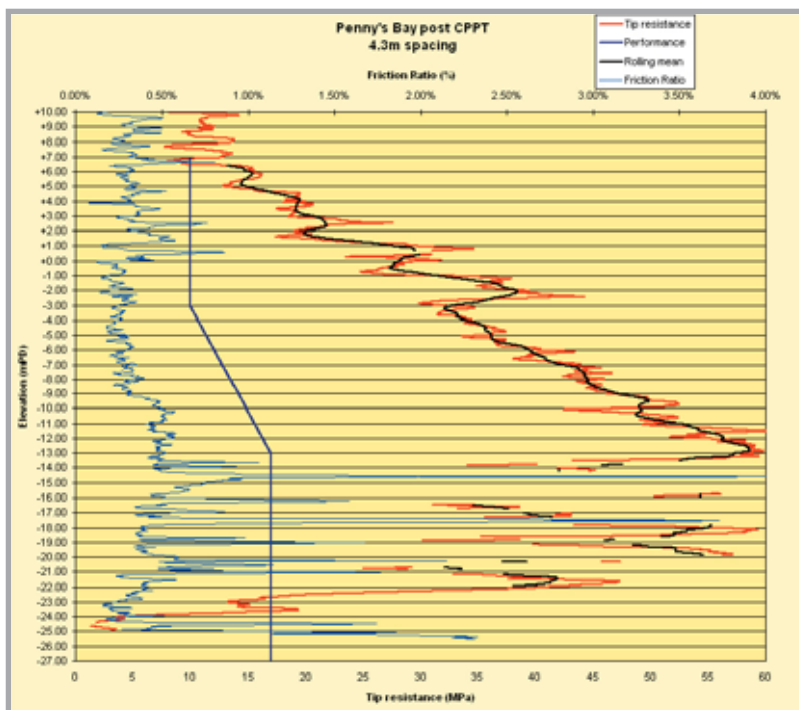
- ◆ le suivi des tassements des couches de sol sous-jacentes ;
- ◆ l'analyse *a posteriori* des paramètres des sols.

Auscultation

Le relevé des appareils est fait à des intervalles appropriés pour permettre l'évaluation du comportement des paramètres du sol en fonction du temps. Une série de valeurs initiales est recueillie en relevant chaque appareil une fois par jour pendant les sept premiers jours ; ensuite, la fréquence des relevés est celle indiquée dans le tableau I.

Figure 6
Filtrage
des valeurs

Filtering
the data



Le nombre total des appareils est supérieur à 1 500, ce qui nécessite une base de données spécifique et une procédure appropriée d'édition des rapports.

Carottage par vibration

L'interface entre le remblai sableux et le fond marin dragué est vérifiée par prise de carottes. Ce sont des échantillons de 65 mm de diamètre récupérés sous gaine plastique à l'aide d'un carottier simple descendu au fond d'un trou foré et vibrofoncé.

Ces carottes sont divisées pour la réalisation des différents essais. Les carottes sont prises systématiquement selon un maillage carré de 50 m de côté, ainsi qu'à des endroits choisis par le maître d'œuvre.

ORGANISATION DE CHANTIER

Les défis à relever

Un chantier d'une telle envergure exige une organisation adaptée. L'équipe de projet comporte un chef de projet principal et son adjoint, avec le soutien d'un chargé d'affaire et d'un ingénieur géotechnicien principal.

Un chef de chantier et un surveillant s'occupent des opérations sur le terrain. Des équipes spécifiques sont respectivement constituées pour l'instrumentation, le forage, les essais CPPT, la documentation et le contrôle qualité.

En pointe, on dénombre un effectif de 240 per-

sonnes toutes activités confondues.

Le chantier, situé dans une zone éloignée d'accès difficile, est autonome en ce qui concerne la logistique et l'entretien du matériel. Un atelier complet d'entretien est implanté pour veiller à la bonne marche des 14 outillages de vibrocompactage, ainsi que des équipements annexes (grues, chargeuses, groupes électrogènes, compresseurs d'air, pompes...).

Parmi les défis à relever, on peut citer :

- ◆ la mise au point de matériel et de procédures permettant la mise en place des plaques de tassement au rythme de 10 par 24 heures ;
- ◆ la mise au point de procédures de maintenance des sondes vibrantes d'une longueur unitaire de 45 m ;
- ◆ la qualité de compaction du remblai sableux de granulométrie hétérogène ;
- ◆ la mise au point de procédures permettant la traversée de couches plus denses, en particulier, celles situées au-dessus de la nappe ;
- ◆ la qualité de la compaction à l'interface entre remblai sableux et argile sous-jacente ;
- ◆ la gestion des relevés de plus de 1 500 appareils de mesure ;
- ◆ la gestion et le dépouillement des informations relevées sur 120 000 points de compaction ;
- ◆ l'accès aux zones de travaux, pendant la première phase, par la mer uniquement et l'exécution avec des moyens nautiques.

■ CONTRÔLE QUALITÉ ET ÉVALUATION DES RÉSULTATS

Contrôle qualité

L'élément clé pour la réussite du projet est, comme toujours, le contrôle qualité.

Pour les travaux de compaction profonde, il fallait tenir à jour une documentation importante pour s'assurer du respect des contraintes contractuelles :

- ◆ compaction profonde : rapports journaliers ;
- ◆ chaque point de compaction : enregistrements électroniques ;
- ◆ essais CPPT : résultats d'essais avant et après compaction ;
- ◆ nivellements de surface ;
- ◆ forages, avec prise d'échantillons.

Le moyen principal d'évaluation de la qualité de la compaction est l'enregistrement électronique de la puissance absorbée à chaque palier de profondeur sur chaque point de compaction. Une équipe spécifique est affectée à cette tâche du contrôle qualité.

On réalise des essais CPPT après compaction afin de s'assurer du respect du critère Q_c .

En cas de doute quant à l'interprétation des résultats des essais, on réalise des forages pour

prendre des échantillons en vue de leur analyse en laboratoire.

Évaluation des résultats

Interprétation des résultats d'essais CPPT

Il peut exister, au sein du remblai, des lentilles limoneuses ou argileuses, par suite de la méthode de remblayage utilisée. Tant que ces lentilles sont d'extension et d'épaisseur limitées, leur présence ne nuit pas au comportement à long terme des sols compactés. Pour les sols qui présentent une fraction fine supérieure à 10 %, il est impossible d'obtenir le même niveau de compaction que pour ceux contenant moins d'éléments fins. Si l'on fait abstraction des valeurs de résistance en pointe des sols jugés comporter plus de 10 % d'éléments fins, on peut évaluer l'amélioration générale du comportement du sol (figure 6).

Tassements induits

Afin de pouvoir évaluer l'amplitude des tassements induits par les travaux de vibrocompactage, on relève les niveaux avant et après compaction selon un maillage de nivellement, les tassements induits correspondant à la différence de niveau avant et après travaux.

■ LES PRINCIPAUX INTERVENANTS ET REMERCIEMENTS

Le contrat CV/99//12 "Penny's Bay Reclamation, Stage 1" est financé par le Service génie civil de la **région administrative spéciale de Hong Kong**.

Le **maître d'œuvre** est Scott Wilson Hong Kong Limited. L'**entreprise générale** est le groupement HAM - HKC JV entre Hollandsche Aanneming Maatschappij BV (HAM) et Hong Kong Construction Holding Limited (HKC).

Bachy Soletanche Group Limited intervient comme sous-traitant de HAM pour les travaux de vibrocompactage, d'étude des sols, d'instrumentation et d'auscultation.

Les auteurs remercient le Service génie civil de la région administrative spéciale de Hong Kong de les avoir autorisés à publier cet article.

ABSTRACT

Penny's Bay (Hong Kong).
Geotechnical study,
vibratory compacting,
instrumentation, detailed
analysis

A. Abinader, D. Johnson

Penny's Bay, in Hong Kong, is a large-scale project which involves winning back land from the sea by backfilling to build an international amusement park.

Bachy Soletanche Group Limited acts as subcontractor to Hollandsche Aanneming Maatschappij BV (HAM) for the work of vibratory compacting, soil studies, instrumentation and detailed analysis.

The works involve :

- Removal of soft soils from the sea bottom by dredging ;
- Laying a sandy backfill on the dredged bottom ;
- Compaction of the backfill by the vibratory compacting technique. The vibratory compacting work is performed from the upper level of the backfill overburden down to depths of up to 42 metres. The total volume compacted is approximately 40 million cu. m ;
- Installation of a system of detailed geotechnical analysis and its operation, these services being performed before, during and after the vibratory compacting work.

RESUMEN ESPAÑOL

Penny's Bay (Hong Kong).
Estudio geotécnico,
vibrocompactación,
instrumentación
y auscultación

A. Abinader y D. Johnson

Penny's Bay -situada en Hong Kong- constituye un proyecto de gran envergadura que consiste en recuperar sobre el mar, por medio de relleno de terrenos, y construir un parque de atracciones internacional. Bachy Soletanche Group Limited interviene a título de subcontratista de Hollandsche Aanneming Maatschappij (HAM), para proceder a las obras de vibrocompactación, de estudios de los suelos, de instrumentación y de auscultación.

Las obras incluyen :

- la eliminación de los suelos blandos del fondo marino, por dragado,

- la implantación de un relleno arenoso sobre el fondo dragado,
- la compactación del relleno por la técnica de vibrocompactación. Las obras de vibrocompactación se ejecutan desde el nivel superior del relleno de sobrecarga hasta 42 m de profundidad. El volumen total compactado se eleva, aproximadamente, a unos 40 millones de metros cúbicos.
- la implantación de un sistema de auscultación geotécnica y su explotación, prestaciones que intervienen antes, durante y después de las obras de vibrocompactación.

Station d'épuration de Réalisation d'une paroi avec vibreur

Dans le cadre de l'extension et de la mise aux normes de la station d'épuration des eaux usées de Clermont-Ferrand, Keller Fondations Spéciales s'est vu confier, par le groupement Dumez-Lagorsse, la réalisation d'une paroi d'étanchéité permettant d'assurer la mise hors d'eau du site durant la phase de construction des ouvrages.

Les moyens mis en œuvre furent les suivants :

- une foreuse type Keller dotée d'un vibreur à ailes de 1,30 m d'envergure, équipée d'un enregistreur Keller M4 (verticalité, profondeur, pression sur l'outil, volume injecté, etc.);
- une centrale à coulis automatique (coulis employé : Doroflow, perméabilité $C_v = 10^{-9} \text{ m/s}^2$).

Le personnel nécessaire aux travaux se composait d'un chef de chantier, d'un foreur, d'un centraliste et d'un aide.

La paroi, d'une surface totale de 5 680 m² (périmètre 810 m, profondeur moyenne 7 m) a été réalisée en 13 jours ouvrables avec un seul poste, soit une cadence moyenne de plus de 400 m²/jour.

■ LE PROJET

Dans le cadre de l'extension et de la mise aux normes de la station d'épuration des eaux usées de Clermont-Ferrand, Keller Fondations Spéciales s'est vue confier par le groupement Dumez-Lagorsse, la réalisation d'une paroi d'étanchéité permettant d'assurer la mise hors d'eau du site durant la phase de construction des ouvrages (photo 1).

La technique utilisée par Keller est celle du voile mince vibré, dont les phases d'exécution sont les suivantes :

- ◆ réalisation d'une tranchée de 0,40 m sur 0,50 m de profondeur, destinée à guider l'outil et à canaliser les surplus de coulis;
- ◆ fonçage d'un vibreur à ailes jusqu'à atteindre le refus dans la couche étanche;
- ◆ remontée du vibreur en injectant du coulis dans l'empreinte formée sous les ailes;
- ◆ mise en station et fonçage dans la lamelle suivante, avec recouvrement sur 1 m dans l'empreinte précédente pour garantir une parfaite continuité de la paroi.

■ LE CHANTIER

Les moyens mis en œuvre furent les suivants :

- ◆ une foreuse Keller de type TR04;
- ◆ un vibreur de type L à aile (diamètre du corps 0,40 m, envergure 1,30 m, épaisseur des ailes 8 cm);
- ◆ une centrale à coulis automatique (coulis de type Doroflow, perméabilité $C_v = 10^{-9} \text{ m/s}^2$);
- ◆ un enregistreur Keller M4 (profondeur, verticalité, pression sur l'outil, volume injecté, etc.).

Le personnel nécessaire aux travaux se composait d'un chef de chantier, d'un foreur, d'un centraliste et d'un aide.

Le plan de contrôle a été réalisé par relevés piézométriques situés de part et d'autre de la paroi.

Quelques chiffres

Cette paroi, d'une surface totale de 5 680 m² (périmètre 810 m, profondeur moyenne 7 m) a été réalisée en 13 jours ouvrables, soit une cadence moyenne de plus de 400 m²/jour à un poste.

■ LE VOILE MINCE VIBRÉ

Description du vibreur

Il se compose d'un cylindre contenant un moteur électrique entraînant des balourds excentrés. La rotation à très grande vitesse de ces balourds permet d'obtenir une vibration d'amplitude et de fréquence données.

Deux ailes sont disposées de part et d'autre à la base du vibreur. L'empreinte qu'elles laissent dans le sol sert de guide pour le fonçage suivant, garantissant un parfait chevauchement d'une lamelle sur l'autre.

Enfin, le vibreur est équipé de deux buses d'injection situées sous les ailes suivant le même axe, de manière à remplir de coulis l'empreinte laissée par ces dernières.

On peut noter les dimensions courantes d'une lamelle de voile mince vibré :

- ◆ largeur : 1,30 m environ, soit une largeur utile par passe de 1,00 m pour un recouvrement entre lamelles de 30 cm;
- ◆ épaisseur : 7 à 8 cm (épaisseur des ailes), avec un fût central de 30 cm (diamètre du vibreur) (figure 1).

La bonne exécution des lamelles est conditionnée par le diamètre des buses d'injection, la pression,



Photo 1
Foreuse Keller
Keller drill



Clermont-Ferrand d'étanchéité au coulis

le débit et la composition du coulis, ainsi que la vitesse de remontée du vibreur, dont les dimensions permettent de garantir une épaisseur minimale en tout point de la membrane.

La vitesse de remontée du vibreur est activée manuellement par le foreur, qui peut ainsi l'adapter en fonction des couches de sol traversées.

L'opérateur peut disposer dans sa cabine d'informations instantanées le renseignant sur :

- ◆ la profondeur de l'outil ;
- ◆ la consommation électrique du vibreur dans le sol ;
- ◆ le débit de coulis (afin de détecter tout risque de bouchon dans les buses d'injection) ;
- ◆ l'inclinaison de son mât.

Dans le cadre d'un précédent plot d'essai le long d'un canal dans le Nord de la France, le foreur a ainsi détecté de la sorte la présence du renard, caractérisé par une surconsommation locale de coulis (figure 2).

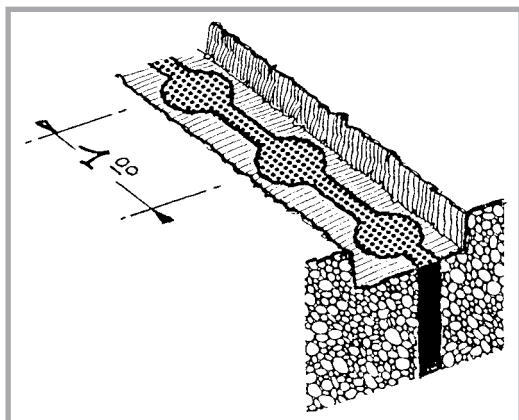
Le procédé présente plusieurs avantages :

- 1 - Il a une plus faible perméabilité résiduelle que les palplanches (de 10^{-7} à 10^{-8} m/s) ;
- 2 - Sa mise en œuvre s'accompagne d'une consolidation du sol en place ;
- 3 - Son coût est faible.

Le coulis

Le coulis, de type thixotropique, est composé d'eau, de ciment, de fillers et de bentonite. L'entreprise privilégie les produits prêts à l'emploi comme le Doroflow®, qui est un liant hydraulique à base de schiste bitumineux calciné durcissant hydrauliquement.

Figure 1
Géométrie du voile mince
Thin shell geometry



De très haute résistance aux sulfates et à la corrosion alcaline, il est extrêmement dense, et donc étanche à l'eau.

Son temps de prise est tel qu'il est possible de replonger dans un panneau confectionné la veille sans l'endommager.

La finalité du voile mince vibré

Le voile mince vibré permet de reprendre des efforts hydrostatiques ainsi que les déformations naturelles du terrain. En revanche, sa faible épaisseur ne lui confère aucune résistance vis-à-vis de charges à reprendre.

Il ne pourra donc pas être utilisé comme élément porteur, ni a fortiori comme soutènement.

L'utilisation de l'eau

Etant donné qu'aucune résistance mécanique de la membrane n'est à attendre, n'importe quelle source d'eau peut être utilisée pour la confection du coulis. Le seul critère à vérifier avant l'utilisa-

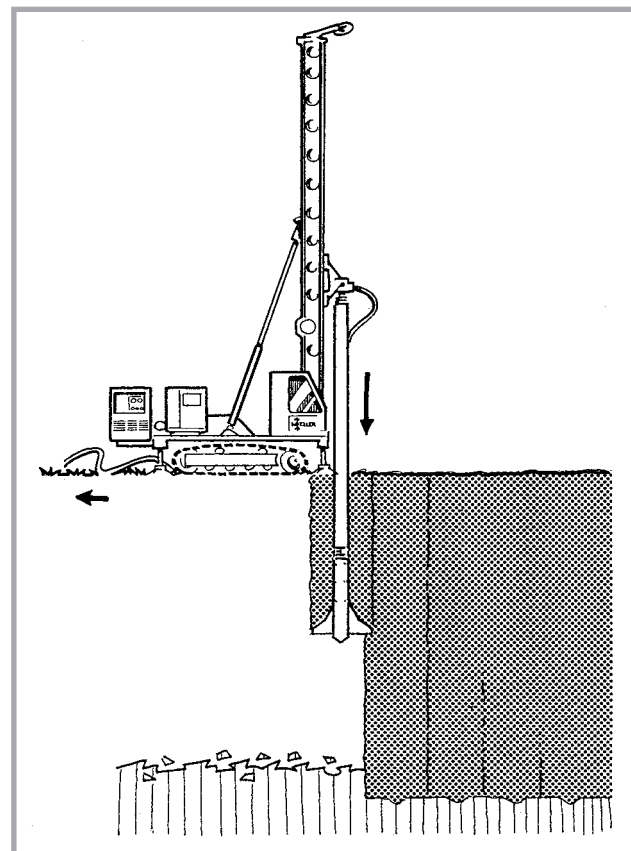


Figure 2
Séquence de forage
Drilling sequence



Photo 2
 Détail du voile en fin de travaux
 Detail of the shell at the end of the works

tion de l'eau est que celle-ci ne contienne pas de substances susceptibles d'empêcher la prise du coulis.

Le rendu des travaux

Aucune évacuation ou terrassement (outre la tranchée de guidage et les surplus de coulis) n'est à prévoir. Le procédé s'effectue sans extraction de sol ni évacuation de matériaux pollués (photo 2).

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage
 Clermont Communauté

Maître d'œuvre
 Direction des Services Techniques de la Ville de Clermont-Ferrand

Gros œuvre
 Groupement Ondeo - Dumez - Lagorsse
 BET : Ingerop

ABSTRACT

Clermont-Ferrand sewage treatment plant.
 Construction of a grouted cutoff wall with vibrator

J.-M. Dumazert, N. Deryckère

As part of the extension and backfitting work for the Clermont-Ferrand sewage treatment plant, Keller Fondations Spéciales was commissioned by the Dumez-Lagorsse consortium to construct a sealing wall enabling the site to be kept free of water during the civil works construction phase.

The means employed were as follows :

- a Keller type drill provided with a vibrator having wings of 1.30-metre span, equipped with a Keller M4 recorder (verticality, depth, pressure on the tool, volume injected, etc.);

- an automatic grouting unit (grout employed : Doroflow, permeability Cv = 10⁻⁹ m/s²).

The personnel required for the work consisted of a site foreman, a drill operator, a grout plant operator and an assistant.

The wall, of total surface area 5,680 m² (perimeter 810 m, average depth 7 m) was constructed in 13 working days with a single work shift, i.e. an average rate of more than 400 m²/day.

RESUMEN ESPAÑOL

Estación depuradora de Clermont-Ferrand.
 Ejecución de una pared de hermeticidad mediante lechada aplicada con vibrador

J.-M. Dumazert y N. Deryckère

Operando en el marco de la ampliación y de la adaptación a las normas de la estación depuradora de aguas residuales de Clermont-Ferrand, Keller Fondations Spéciales ha recibido el encargo, por parte del grupo Dumez-Lagorsse, relativo a la construcción de una pared de hermeticidad capaz de permitir la protección contra la invasión de las aguas del emplazamiento de la estación, durante la etapa de construcción de las estructuras.

Los medios puestos en aplicación han sido los siguientes :

- una perforadora tipo Keller, dotada de un vibrador de aletas de 1,30 m de envergadura, dotada de un registrador

de datos Keller M4 (verticalidad, profundidad, presión ejercida sobre la herramienta, volumen inyectado, etc.)

- una central automática de producción de lechada (lechada empleada : Doroflow, permeabilidad Cv = 10⁻⁹ m/s²). El personal necesario para la ejecución de estas obras estaba formado por un encargado responsable de las obras, un perforador, un operario de central y de un ayudante.

La pared, de una superficie total de 5 680 m² (perímetro : 810 m - profundidad de promedio : 7 m) se ha ejecutado en siete días laborables y un sólo turno, o sea un ritmo de promedio de más de 400 m² por día.

National City Marine Terminal à San Diego (Californie)

Extension du prolongement sud du quai 24-4

Charles Spaulding
INGÉNIEUR D'AFFAIRES
Ménard Soltraitements



Samuel Briet
INGÉNIEUR TRAVAUX
Ménard Soltraitements



Les travaux d'extension comprennent l'élargissement du littoral par fonçage de caissons de palplanches et remblaiement en arrière de ce rideau. Un ponton sera construit au-dessus et à l'extérieur de cette emprise. Le nouveau ponton sur pieux battus mesurera 340 m de long sur 25 m de large et permettra de décharger quotidiennement des navires contenant chacun plus de 4000 véhicules européens.

■ DES CONDITIONS GÉOTECHNIQUES DIFFICILES

Les travaux se déroulent dans la "San Diego Embayment", un bassin sédimentaire limité par une faille. Du point de vue sismique, le site est situé sur la zone de la faille de Rose Canyon dont la ramification principale la plus active est la faille de Silver Strand à environ 4 km à l'Est. Les analyses sismiques effectuées en partant des premiers relevés géologiques indiquent que la majorité des remblais et dépôts existants dans la baie présentent un fort potentiel de liquéfaction jusqu'à 18 m de profondeur. Les manifestations de liquéfaction des sols se traduisent par des pertes de portance et de frottement latéral pour les fondations, des tassements en surface et des risques de rupture circulaire dans le talus situé sous la mer et adossé au rideau de palplanches.

Pour assurer la stabilité du système et la bonne tenue du nouveau ponton il a été jugé primordial d'améliorer les caractéristiques des matériaux de remplissage des caissons et du talus sous le ponton à l'aide de la méthode de vibro-remplacement.

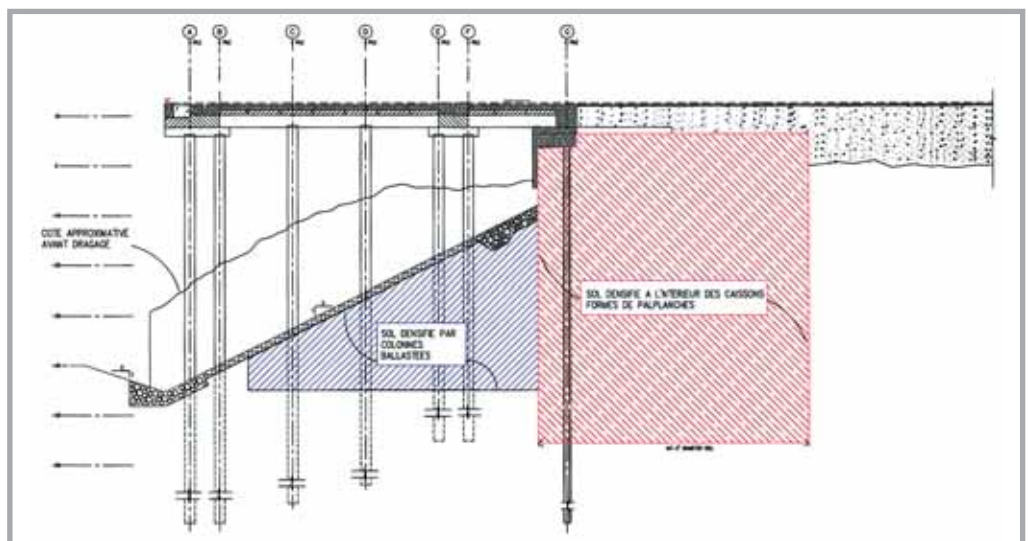
■ UNE CONCEPTION INNOVANTE

La réalisation des caissons par battage a permis de gagner du terrain sur la mer sans battre un nombre important de pieux. La zone située entre les caissons et la rive est remblayée avec du matériau d'apport. Les pieux sont nécessaires uniquement pour la réalisation de l'extrémité du quai. Une zone d'essai dans les caissons et dans le talus a été réalisée afin de définir le maillage adapté afin d'obtenir les critères de réception requis entre les colonnes ballastées. L'ensemble du chantier représente 492 colonnes dans les caissons et 1382 colonnes dans le talus. La profondeur est de 18 m dans la partie terrestre et de 3 à 14 m dans la partie maritime.



Vue aérienne du site
Aerial view of the site

Coupe type du quai
Typical cross section of the quay



Maillage colonnes ballastées
Ballasted column meshing

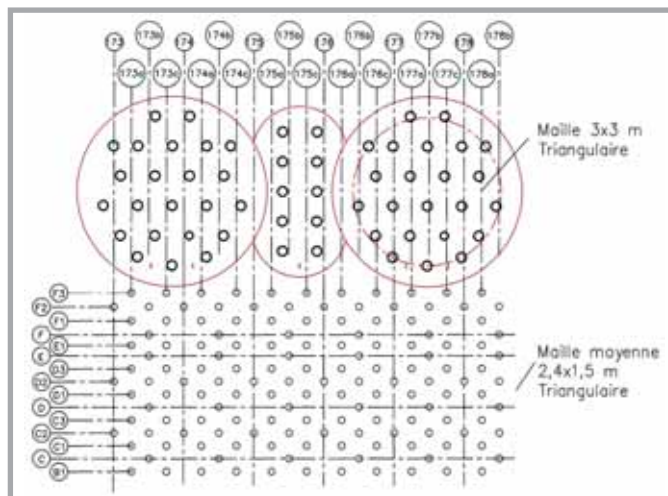
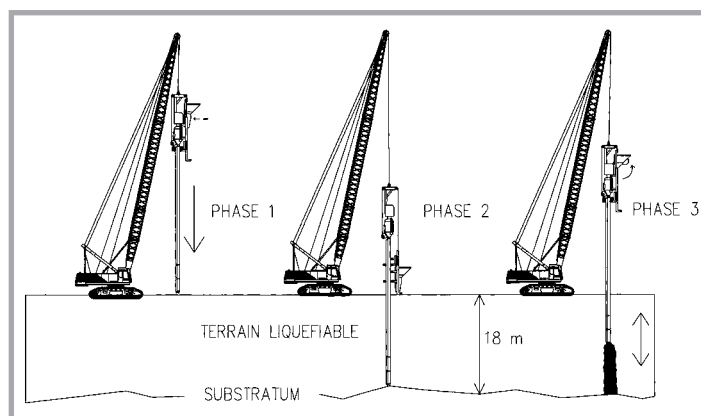


Schéma de phasage d'une colonne ballastée
Scheduling diagram for a ballasted column



Le tapis roulant de 30 m de portée achemine les granulats
The conveyor belt 30 m long transports aggregates



Contrôle de l'exécution, par enregistrement de paramètres et télésurveillance
Control of construction, by recording of parameters and remote monitoring



POUR UNE NOUVELLE TECHNIQUE

Une colonne ballastée est réalisée en trois phases :

- ◆ phase 1 : fonçage du tube à l'aide du vibreur situé en pied de celui-ci. Le lançage à l'eau ou à l'air peut être utilisé pour traverser les horizons plus compacts ;

- ◆ phase 2 : remplissage du cailloux. Un chariot mobile "Hopper" coulissant sur le tube permet d'alimenter en granulats le réservoir pressurisé situé en tête de l'équipement ;

- ◆ phase 3 : réalisation de la colonne. Le cailloux est introduit par l'intérieur du tube et sous pression d'air à la base du vibreur. Des phases successives de montée/descente de 1 m environ permettent de déposer du cailloux dans l'espace créé par le vibreur puis de le compacter au refus.

STABILISATION DU SOUS-SOL MARIN

L'amélioration du talus adjacent aux caissons de palplanches constitue la majeure partie du chantier.

L'utilisation d'une grue de 250 t permet de réaliser des colonnes ballastées éloignées de plus de 20 m de la rive. Un camion équipé d'un tapis roulant de 30 m de portée achemine les granulats dans le "Hopper". Ce dernier coulisse sur le tube principal et alimente le réservoir pressurisé.

Afin d'éviter toute rupture pendant la phase de densification, les colonnes sont réalisées suivant un phasage précis en remontant depuis la partie inférieure du talus.

Un système de GPS différentiel (positionnement par satellite) monté en tête de flèche permet de positionner l'aiguille vibrante avec une précision de l'ordre de 3 cm.

UN CONTRÔLE CONTINU DE L'EXÉCUTION

Une instrumentation spécifique a été développée permettant d'enregistrer les paramètres d'exécution de la colonne ballastée : profondeur, pression hydraulique de la sonde vibrante, consommation de cailloux, vitesse d'avancement, courbe de pénétration... Ces informations sont synthétisées et enregistrées en temps réel sur un écran tactile situé dans la cabine de l'opérateur. Enfin, une assistance à l'exécution peut aussi être programmée à chaque chantier suivant la nature du terrain. D'autre part, un système de télésurveillance et de détection de granulats permet de mieux se rendre compte du taux de remplissage en cailloux de l'ensemble et donc de diminuer les pertes en fin de colonne.



Cone penetration test
Cone penetration test

■ QUALITÉ CONTRÔLE

L'ensemble du chantier a fait l'objet d'un contrôle continu de la densification du sol entre les colonnes à raison d'un essai tous les 300 m².

Le *Cone Penetration Test* électrique a été retenu afin d'obtenir un maximum de données sur les caractéristiques mécaniques du sol (acquisition de la résistance de pointe, du frottement latéral et de la pression interstitielle tous les 2,5 cm).

Les essais dans les caissons ont été réalisés avec un pénétromètre statique classique sur camion. Les essais offshore ont été réalisés à l'aide d'une sondeuse fixée à une barge afin d'obtenir la réaction suffisante.

■ RÉSULTATS OBTENUS

L'utilisation d'un vibreur hydraulique nouvelle génération a permis de satisfaire les critères de réception en terme de résistance de pointe en fonction du friction ratio à savoir :

- ◆ $FR < 0,5$ $Q_c > 110$ bars ;
- ◆ $0,5 < FR < 1$ $Q_c > 80$ bars ;
- ◆ $1 < FR < 1,5$ $Q_c > 55$ bars.

La courbe bleue correspond au terrain avant densification alors que la courbe rose correspond aux caractéristiques du sol après traitement.

Les couches de sable "propres" ($FR < 0,5$ %) sont améliorées considérablement alors que les couches sablo-argileuses ($1,5 \% > FR > 1$ %) bénéficient d'une amélioration plus faible mais présentent un risque de liquéfaction moindre. Enfin, les couches ayant un friction ratio supérieur à 1,5 % (argile) ne sont pas améliorées mais ne présentent pas de risque de liquéfaction.

L'amélioration obtenue entre les colonnes a permis d'obtenir une stabilité de l'ensemble caissons + talus en cas de séisme et de diminuer la section des pieux béton.

ABSTRACT

National City Marine Terminal in San Diego (California).
Southern extension of quay 24-4

Ch. Spaulding, S. Briet

The extension works involve widening the coastline by sinking sheet piling caissons and by backfilling to the rear of this screen. A pontoon will be built above and outside this area. The new pontoon on driven piles will measure 340 m long by 25 m wide and will make it possible to unload daily ships with a unit capacity of more than 4,000 European vehicles.

RESUMEN ESPAÑOL

National City Marine Terminal de San Diego (California).
Ampliación de la prolongación sur del muelle 24-4

Ch. Spaulding y S. Briet

Las obras de ampliación corresponden al ensanchamiento del litoral por medio de cajones formados por tablestacas y relleno por la parte posterior de este muro. Se procederá a la construcción de un pontón por encima y por el exterior de esta obra. El nuevo pontón sobre pilotes hincados tendrá 340 m de longitud y 25 m de anchura y permitirá descargar, cada día, los buques con un contenido unitario de 4.000 vehículos europeos.

Le tombeau de Khéops et Une vérification peu coûteuse

Notre revue a publié, dans son numéro 792 de décembre 2002, un article consacré à la Grande Pyramide. Ses deux auteurs, Jean-Pierre Houdin, architecte DPLG, et Henri Houdin, ingénieur des Arts et Métiers, y présentaient leur thèse sur les méthodes qui furent utilisées pour la construire.

Ils ont également présenté leur théorie dans le cadre d'une conférence organisée le 12 décembre dernier au siège de la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP), à l'initiative de la Commission technique de cette fédération, du Comité génie civil du Conseil national des ingénieurs et scientifiques de France (CNISF), de l'Association française du génie civil (AFGC) et de l'Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil (IREX).

Cette conférence comportait deux volets bien distincts. Nous sommes heureux de publier le deuxième d'entre eux et laissons à Jean Berthier, président du Comité génie civil du CNISF, le soin de présenter ce deuxième volet.

Roland Girardot



"Peu de science a éloigné d'Hérodote, davantage de science y ramène"
(Jacqueline de Romilly, la grande helléniste) ²

Figure 1
La seule représentation connue du pharaon Khéops

The only known representation of the Pharaoh Cheops

1. - Génie et Démesure d'un pharaon : Khéops. Stock, 1986, réédité ;
- La Pyramide à travers les âges. Presses des Ponts, 1991 ;
- Le Nil : l'espoir et la colère. Presses des Ponts, 1999 ;
- The Nile and its masters ; Past, Present and future. Balkema, Rotterdam, 2001 ;
- The tomb of Cheops and the testimony of Herodotus, Discussions in Egyptology. Oxford, 53, 2002.
2. Introduction aux œuvres complètes de Hérodote et de Thucydide. Gallimard, La Pléiade, 1964.

La conférence du 12 décembre dernier était placée sous la présidence du professeur Jean Kerisel, éminent spécialiste de la mécanique des sols qui a présidé la Société internationale de mécanique des sols et travaux de fondation, mais aussi grand connaisseur de l'Égypte des pharaons, à laquelle il a consacré plusieurs ouvrages¹.

Dans la première partie de la conférence, le professeur Jean Kerisel a abordé un des grands mystères de la pyramide, celui de l'emplacement du tombeau de Khéops. Sa déduction s'appuie principalement sur le témoignage d'Hérodote, sur des livres des premiers grands chercheurs, sur certaines anomalies dans le plan des espaces intérieurs de la pyramide et sur la logistique du chantier. Il propose ainsi une solution à ce mystère et, en bon ingénieur, une description des méthodes utilisées pour construire le tombeau en secret, dès le début du règne, afin d'en assurer la décoration, et pour conduire le pharaon à sa dernière demeure.

Son exposé a passionné l'assistance très nombreuse (à l'extrême limite de la capacité d'accueil de la salle du centenaire de la FNTP !), qui mêlait ingénieurs, égyptologues et curieux de cette civilisation fascinante. En particulier, M. Jean Leclant, secrétaire perpétuel de l'une des cinq Académies, celle des Inscriptions et Belles Lettres, a honoré la conférence de sa présence et a bien voulu en tirer quelques conclusions. Nous l'en remercions vivement.

L'exposé complet de Jean Kerisel suscitera sans nul doute le plus grand intérêt des lecteurs de la revue *Travaux*.

Jean Berthier

INGÉNIEUR GÉNÉRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES (E.R.)
PRÉSIDENT DU COMITÉ GÉNIE CIVIL DU CNISF

■ INTRODUCTION

La Grande Pyramide comporte trois chambres : la chambre dite du Roi, celle de la Reine (on ne sait guère pourquoi) et une troisième chambre souterraine, non dénommée, mais qui ressemble à une carrière abandonnée. A quoi bon en chercher une quatrième, se demandera le lecteur, surtout s'il a entendu parler de la malédiction des pharaons ? Cette malédiction ne fut-elle pas terrible, en mars 1923, lorsque Howard Carter viola la sépulture du pharaon Toutankhamon ! Le secrétaire du découvreur, Richard Bethell, meurt subitement, âgé de 48 ans. "On trouva Bethell mort dans son lit, le visage marqué d'épouvante. Lorsque son père, Lord Wesbury, apprit la mort de son fils unique, il se jeta par la fenêtre. Lors de l'enterrement, le corbillard écrasa un petit garçon sur la route du cimetière. La mort abattra de ses ailes quiconque dérange le repos du pharaon." Vandenberg (1976). Vous vous inquiétez : la malédiction pourrait-elle s'étendre aux lecteurs de ces lignes et à ceux qui en parlent ? Eh bien, rassurez-vous : Howard Carter survécut seize ans à la violation de la sépulture. Si une malédiction le frappa, ce fut celle de l'alcoolisme : il mourut d'une cirrhose du foie...

Le témoignage d'Hérodote à distance de la pyramide

Après avoir étiqueté et mis tout en ordre au musée du Caire, il se mit en effet à fréquenter assidûment le bar du Winter Palace à Louqsor, où il passait ses journées avec des touristes fortunés et des écrivains à la mode (D^r Lucien Giacomoni, *Bulletin de l'Aeamba*, 37).

Avant de revenir au cœur du sujet, je tiens à remercier tout particulièrement la revue *Travaux* d'accueillir ces lignes. Ses lecteurs ne seront pas, je crois, particulièrement dépaysés par le sujet, car ils retrouveront ci-après des questions de logistique de chantier (sujet qui passionnait manifestement le grand pharaon Khéops), d'hydraulique, de murs de soutènement de grande hauteur, de souterrains, de liants, etc.

LE RÈGNE DU PHARAON KHÉOPS

Il y a 45 siècles, sous la IV^e dynastie égyptienne, le règne du pharaon Khéops a été tout à fait extraordinaire : en vingt-deux ans, il a élevé la Grande Pyramide, différente de toutes celles qui la précèdent et de celles qui vont la suivre.

Ce fut le plus grand chantier des temps anciens, un élan de foi véritable, mais aussi un chantier sur-humain qui se termina dans un cri de souffrance et par le bris de toutes les statues du tyran.

Voici néanmoins une statuette, retrouvée par le plus grand hasard, à 500 km de Gizeh, de 7,5 cm de hauteur (figure 1), portant le cartouche du pharaon Khéops. C'est là sa seule représentation connue. Un rien sardonique, autoritaire et pétillant d'intelligence, à l'avance il sourit de nos commentaires.

L'ÉVOLUTION DES PYRAMIDES

Les pharaons ont bâti une centaine de pyramides, dont une dizaine avant Khéops, d'une hauteur moyenne de 70 à 80 m ; ils sont obsédés par le désir de construire plus grand, plus haut et plus secret. Fini, pour les monuments royaux, le règne de la brique crue séchée au soleil : on va tirer toutes les possibilités de ces belles pierres dont, plus que tout autre pays, l'Égypte regorge. Les ingénieurs inventeront pour leur pharaon des liants au plâtre, qui permettront de vaincre les poussées au vide et de réaliser la pyramide lisse de grande hauteur avec l'inclinaison de 51 degrés et 50 minutes sur l'horizontale, traduction du nombre d'or (figure 2).

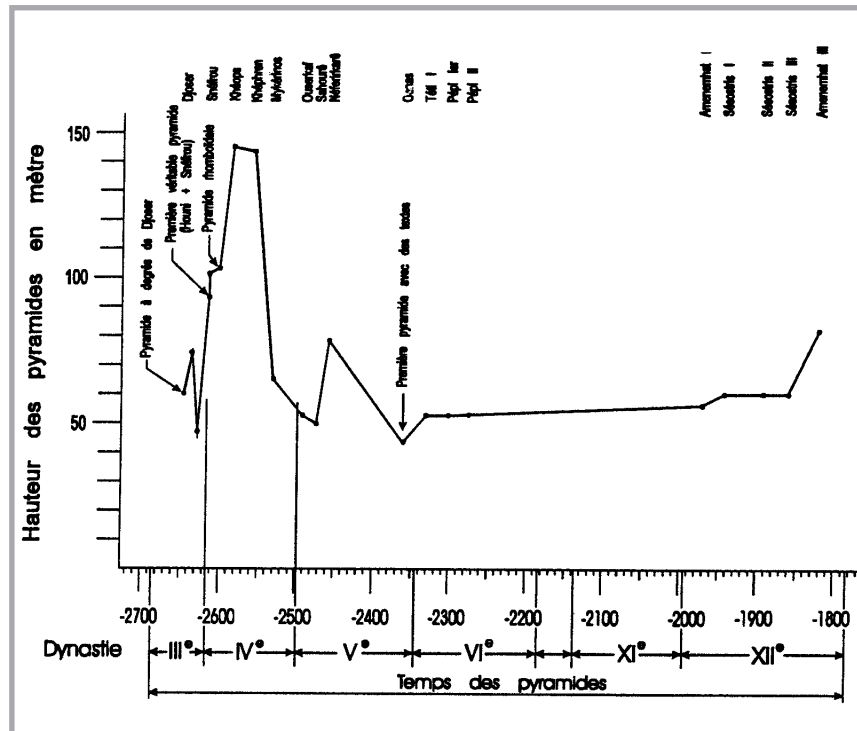


Figure 2
Evolution de la hauteur des principales pyramides au cours des 800 ans de leur édification

Change in the height of the main pyramids over the 800 years during which they were built

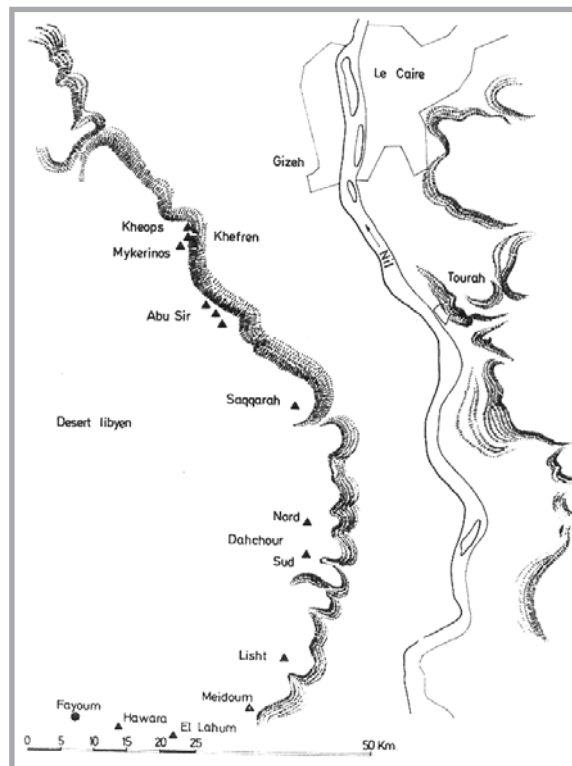


Figure 3
L'emplacement des principales pyramides, du sud au nord sur la rive ouest. Etat actuel du Nil qui a dérivé vers l'est

The location of the main pyramids, from the south to the north on the west bank. Current state of the Nile which has shifted eastward

La pyramide de Khéops atteint une hauteur de 147,50 m. La montée en puissance est considérable par rapport aux pyramides antérieures. Or, quand la hauteur double, le volume octuple et la superficie des faces quadruple. Pour la pyramide de Khéops, cette superficie des faces est de 8,55 ha, la superficie d'une petite exploitation agricole... (figures 3 et 4).

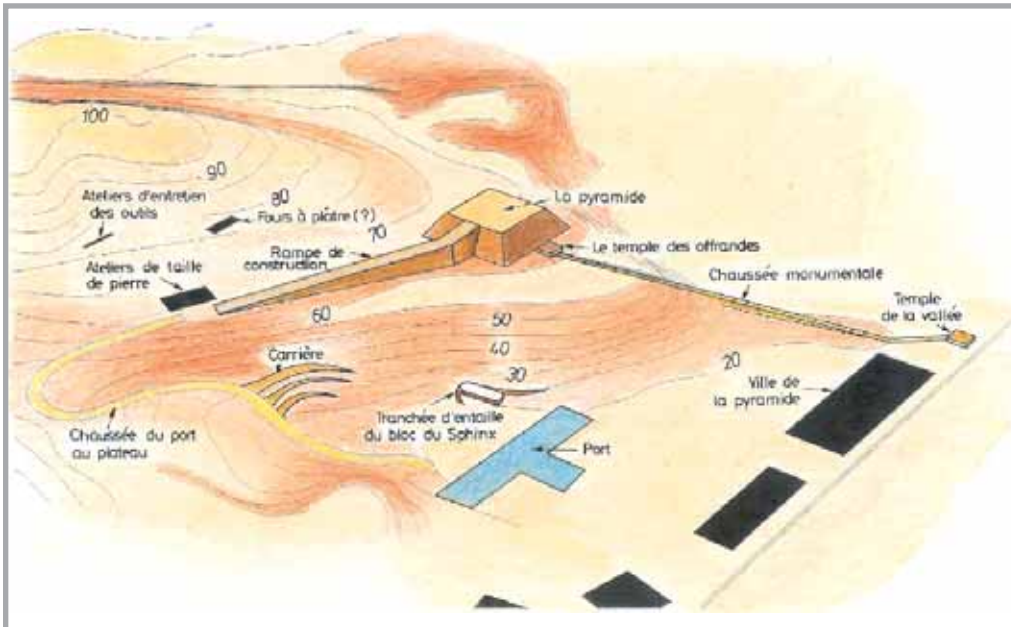


Figure 4
Plan-masse simplifié
du site de Gizeh
*Simplified layout plan
of the Gizeh site*

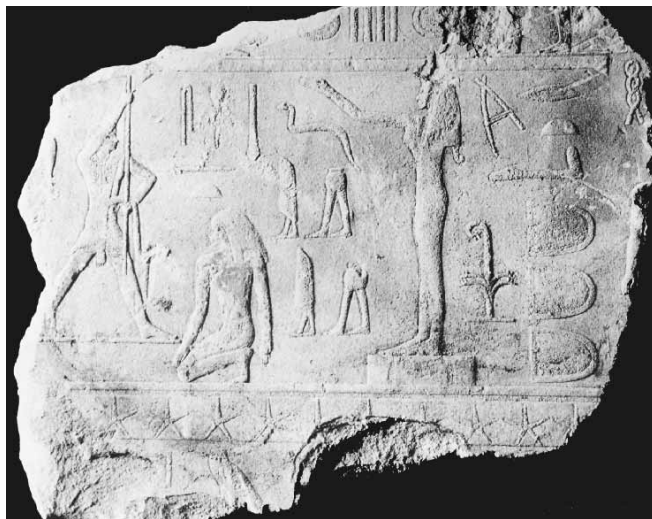


Figure 5
Relief sur les murs
de soutènement
*Relief
on the supporting
walls*



Figure 6
Akouit
la blanche
*Akouit,
the luminous*

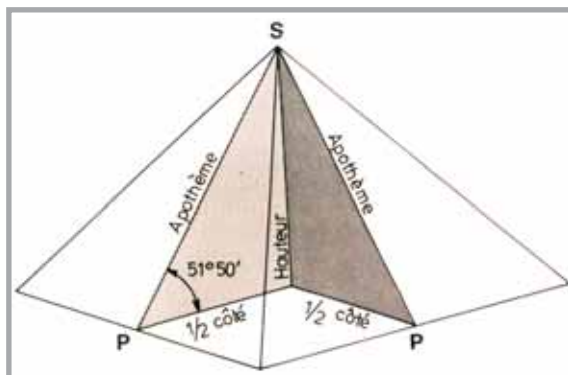


Figure 7
Le nombre d'or : l'apothème
est à la hauteur
dans le même rapport
que la hauteur au demi-côté
*The Golden Number : The ratio
between the apothem
and the height is the same
as between the height
and the half-base*



Le site est en bordure de falaise, à la cote 60³, soit à 40 m au-dessus de la plaine, elle-même à la cote 20. Retenons bien ces chiffres. Ils ont quatre conséquences importantes :

- ◆ le plateau, en son bord, doit supporter, sans céder, cinq millions de tonnes. Il supporta effectivement cette masse considérable. Khéops est un excellent géologue et ne veut pas répéter les erreurs de son père, le pharaon Snéfrou, à Dahchur-sud ;

- ◆ le peuple d'Egypte est condamné à hisser ces cinq millions de tonnes sur une hauteur de 40 m, avant toute mise en œuvre ;

- ◆ les pentes des chaussées ne peuvent dépasser un chiffre important, pour des raisons d'ergonomie. Celle qui va relier le temple de la vallée au temple d'accueil sera donc de grande longueur et aura plus précisément une pente de 6 % ; quant à sa longueur, elle sera de 825 m. Les murs de soutènement, en calcaire décoré, atteignent dans leur hauteur finale presque 40 m. Qui ferait mieux de nos jours ? (figure 5) ;

- ◆ cette chaussée restait d'apparat puisque le port n'est pas à son pied : elle fera double emploi avec celle partant du port dont nous parlons ci-après, mais le parti architectural est remarquable. Dans une superbe perspective ascendante, au soleil levant, on aperçoit, grandissante, la pyramide : revêtue de calcaire blanc de Tura, "Akouit la Blanche", ainsi qu'on la nomme, étincelle de lumière (figures 6 et 7).

Tout ceci, c'est le côté fastueux de Khéops, qui dévoile aussi sa personnalité et ses qualités d'architecte, composant admirablement avec le site et alliant le réel au symbolique.

La pyramide qu'il édifie fait partie d'un complexe plus vaste, s'articulant au sud autour d'un port. Ce port était le terminal d'un canal tracé à peu de distance du pied de la falaise ouest où se couche le soleil et s'élèvent les pyramides abritant le tombeau des pharaons. Le canal a été creusé à l'araire, à partir des entrelacs des grands fossés d'irrigation, les déblais étant évacués au couffin : un travail considérable. Ce canal était indispensable à la construction des pyramides du passé et du futur, le Nil lui-même n'ayant cessé de dériver vers la falaise Est opposée (figure 3). Le canal comportait des biefs successifs, desservant les ports des temples d'accueil de chacune des pyramides, à commencer par celles des pyramides de Meidum et de Dashur, les plus éloignées au sud.

Chacun des biefs était en communication avec le Nil et en reproduisait le niveau. De plus, des glissières en troncs de bois de palmier⁴, posées côte à côte, permettaient aux bateaux, déchargés au-

3. Cote au-dessus du niveau moyen de la mer, utilisée par notre I.G.N. dans ses levés de la partie nord de la plaine d'Egypte.

4. Son bois, très abondant, est impropre à la menuiserie ; mais, quand ses fibres sont mouillées, il reste imputrescible.

tant que nécessaire, le passage direct d'un bief à l'autre.

Le bief de Khéops, à Gizeh, a connu, quant à lui, un transit énorme : 2 500 t de granite d'Assouan, 7 000 t de calcaire de Tura, 300 000 t de pierre à plâtre, la diorite, tous les outils en cuivre, le ravitaillement quotidien, l'electrum, l'or, l'argent, l'antimoine, les bois de cèdre, etc.

Du port de Khéops partait vers le plateau une chaussée de hissage, à 5 % de pente, contournant d'abord au sud la carrière d'où furent extraits les 5/6^{es} des matériaux de la pyramide ; la chaussée se retournait vers le nord pour se terminer par une rampe d'accès à la pyramide sur son côté sud. Les traîneaux se croisaient sur la chaussée du matin au soir.

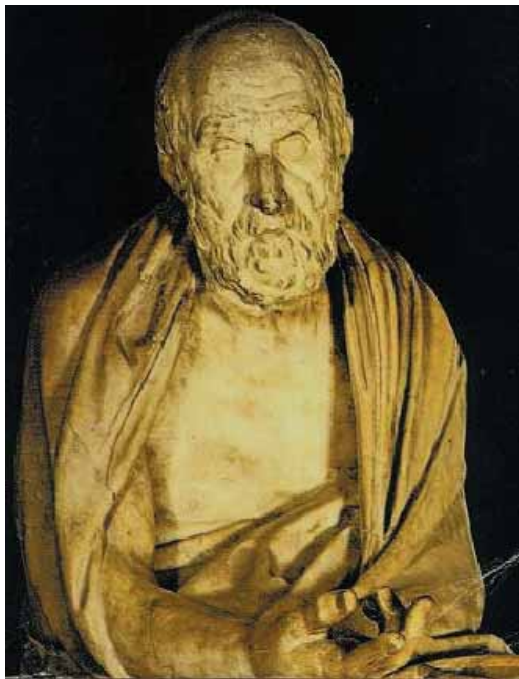
■ LA CHAMBRE FUNÉRAIRE

Du port partait aussi, telle est ma conviction, un **canal souterrain** menant au tombeau. Une pyramide, c'est d'abord un tombeau : la qualité d'un pharaon se mesure à l'habileté de sa réalisation et à son secret. Plus encore que la majesté du monument de Khéops, c'est son mystère qui attire les visiteurs, notamment le développement des espaces internes que l'on ne trouve nulle part ailleurs ; de nombreux tours de force techniques témoignent de l'état d'esprit de ce pharaon foncièrement **épris d'innovation** : à tout ceci répond aussi le canal funéraire conduisant à la chambre dont parle Hérodote.

Les archéologues restent assez vagues lorsqu'ils parlent du tombeau de Khéops et, s'ils en parlent, c'est plutôt pour se moquer des indications fournies par Hérodote, pourtant qualifié à juste titre de "premier reporter de l'histoire" (Cicéron l'appellera même le père de l'histoire). C'est là profonde injustice. Canal et chambre ne sont pas du tout une vue de l'esprit, comme je vais essayer de le montrer. Mais auparavant, je voudrais insister sur le personnage d'Hérodote et montrer que son témoignage n'a pas été écrit à la légère. Il a vécu au V^e siècle av. J.-C., le siècle de Périclès. D'une curiosité insatiable, il parcourt 4 000 km d'est en ouest et autant du nord au sud pour rédiger les neuf volumes de son *Historia*. L'œuvre offre un tableau complet de toute l'humanité alors connue. Le livre II (*Euterpe*) est consacré à l'Égypte : il remporta un succès éclatant (figures 8 et 8 bis).

La rédaction du volume Euterpe va plus spécialement le passionner. A Babylone, il a vu la Tour de Babel, la "tour de l'arrogance", comme l'ont appelée les Hébreux déportés. Elle avait 90 m de hauteur, mais des marchands grecs lui assurent qu'il existe chez les barbares d'Égypte un monument presque deux fois plus haut, construit vingt siècles avant Babel.

Les Grecs ont l'esprit de grandeur et sont imbus



Figures 8 et 8 bis
Hérodote et son *Historia* publiée en neuf volumes portant chacun le nom d'une muse

Herodotus and his Historia published in nine volumes each bearing the name of a muse

de leur supériorité, ayant l'impression de dominer le monde et tous les barbares qui les entourent. Quand, vers 450 av. J.-C., Hérodote arrive d'Halicarnasse à Athènes, on lui propose de visiter l'Égypte, le pays des barbares du sud. Il y va et converse avec les prêtres des Maisons de la Vie qui jouxtent les grands temples et demeure confondu par leur culture et la richesse de leurs archives. Après le retour d'Hérodote, Platon, dans un de ses livres, prête à l'un des prêtres égyptiens la déclaration suivante : "*Vous autres, Grecs, vous êtes des enfants, car vous n'avez pas d'histoire ancienne, alors qu'ici rien ne s'est accompli de grand ou de beau sans que la mémoire n'en ait été conservée dans nos temples.*" Les barbares, pour les Égyptiens, ce sont les Grecs.

Rendu plus humble, Hérodote va réagir, questionnant sans relâche, tantôt compilateur, tantôt archéologue, tantôt épigraphiste. C'est un véritable historien, critique comme il convient. "*Je suis tenu de rapporter ce qui se raconte, mais je ne suis nullement tenu d'y ajouter foi.*" C'est pourquoi il ne cesse de s'informer et ce ne sera pas du tout à la légère qu'il va écrire ce qui suit.

■ LE TÉMOIGNAGE D'HÉRODOTE : UN REGRETTABLE MANQUE DE CURIOSITÉ DES EGYPTOLOGUES

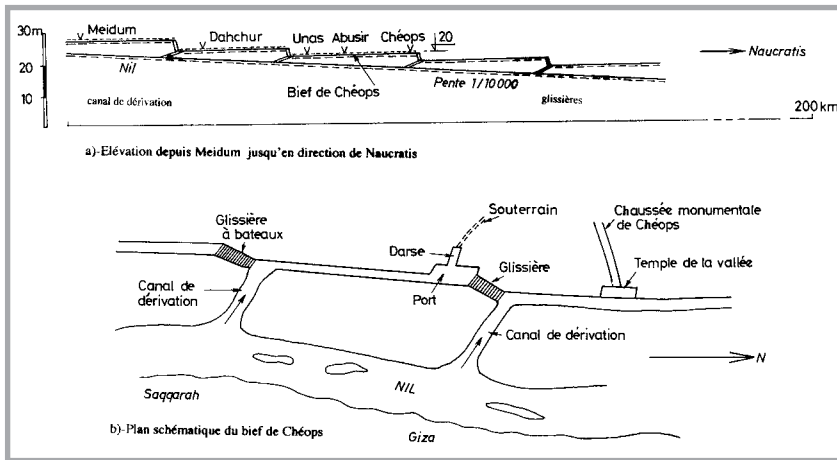
Hérodote s'exprime ainsi au sujet du tombeau de Khéops :

(Livre II, 124). "*Les dix premières années se passèrent à construire la chaussée (de la Grande Pyramide) ainsi que les chambres souterraines creusées dans la colline sur laquelle sont bâties les pyramides ; le roi destinait ces chambres à sa sépulture et, pour qu'elles fussent dans une île, il fit venir l'eau du fleuve par un canal.*" (Traduction A. Barget 1964, la Pléiade).

Pour donner plus de force à cette affirmation, parlant cette fois de la pyramide de Khefren, il ajoute :

(Livre II, 127). "*Elle n'a ni chambres souterraines*

Figure 9
Le canal
en bordure ouest
de la vallée
*The canal
on the western
edge
of the valley*



ni canal qui lui amène l'eau du Nil, comme dans l'autre où des conduits spécialement construits introduisent l'eau du fleuve pour former une île dans laquelle, dit-on, repose le corps de Khéops (ibid.)." Les égyptologues ont délibérément écarté cette double affirmation : la chambre souterraine, selon eux, ne pouvait être exécutée qu'à sec, c'est-à-dire au-dessus de la nappe qui, sous la colline, alimente le fleuve ; ceci est exact⁵. Or cette nappe est à un niveau supérieur à celui du fleuve en face ; en conséquence, les eaux du Nil ne pouvaient remonter dans la sépulture par quelque moyen que ce soit. Conclusion de ce parfait syllogisme : Hérodote n'est pas crédible et même, pensent méchamment ses contradicteurs, il se montre là d'une très grande crédulité.

En fait, par sa concision, Hérodote a induit en erreur ses lecteurs. Il ne nous a jamais dit de quelle eau du Nil il s'agissait. Or, depuis Assouan jusqu'à la mer, le cours du grand fleuve se déroule sur mille kilomètres ; il descend alors de cent mètres environ, avec une pente moyenne qui est donc de dix centimètres au kilomètre. Khéops en tire profit et décide de dérouter les eaux du fleuve, à partir de Saqqara par exemple⁶, dans un canal à niveau constant s'écartant peu du pied de colline sur la rive gauche du Nil. Ce canal, de plus en plus en contre-haut de la vallée, arrive à Gizeh, là où il va construire sa grande pyramide : l'eau du canal au port de la pyramide est, dans cette hypothèse, à un niveau de l'ordre de 3 m supérieur à celui du Nil en face dans la vallée⁷, en raison de la pente du fleuve (0,0001) et de la longueur de la dérivation (environ 30 000 m).

Tout au long du bief de Khéops, on retrouve les restes des embarcadères des temples de la vallée des pyramides construites avant et après Khéops à la cote 19 ou 20 environ, presque dans le même plan horizontal, prouvant qu'il existait un plan d'eau de 16 à 18 pendant l'étiage : ceci ne peut être le fruit du hasard. En raison du manque d'entretien et de l'apport considérable des vents de sable du désert, le canal a disparu, mais non les vestiges des quais des ports principaux parce qu'on a dégagé les chaussées et leurs accès inférieurs. Ce canal a aussi disparu de la mémoire de bien des égyptologues qui contredisent Hérodote⁸. A Gizeh, il y avait donc trois niveaux d'eau, à savoir :

5. On ne savait pas alors dérocter sous l'eau.
6. Plusieurs dérivations du Tigre et de l'Euphrate ont été réalisées en Mésopotamie très tôt dans l'histoire.
7. Et même davantage, la pente dans cette vallée rétrécie étant supérieure à 10 cm au kilomètre. Aujourd'hui, les dérivations ont parfois une dénivellée finale par rapport au fleuve, de 30 m.
8. A l'exception de G. Goyon (*Le secret des bâtisseurs des grandes pyramides*, Pygmalion, 1977) et M. Lehner (*The development of the Giza Necropolis. The Khufu project*. Afo 32, 1985).

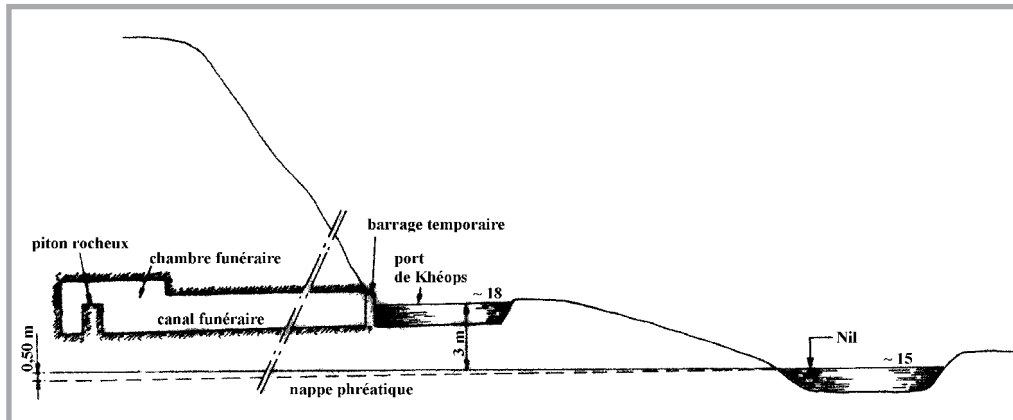
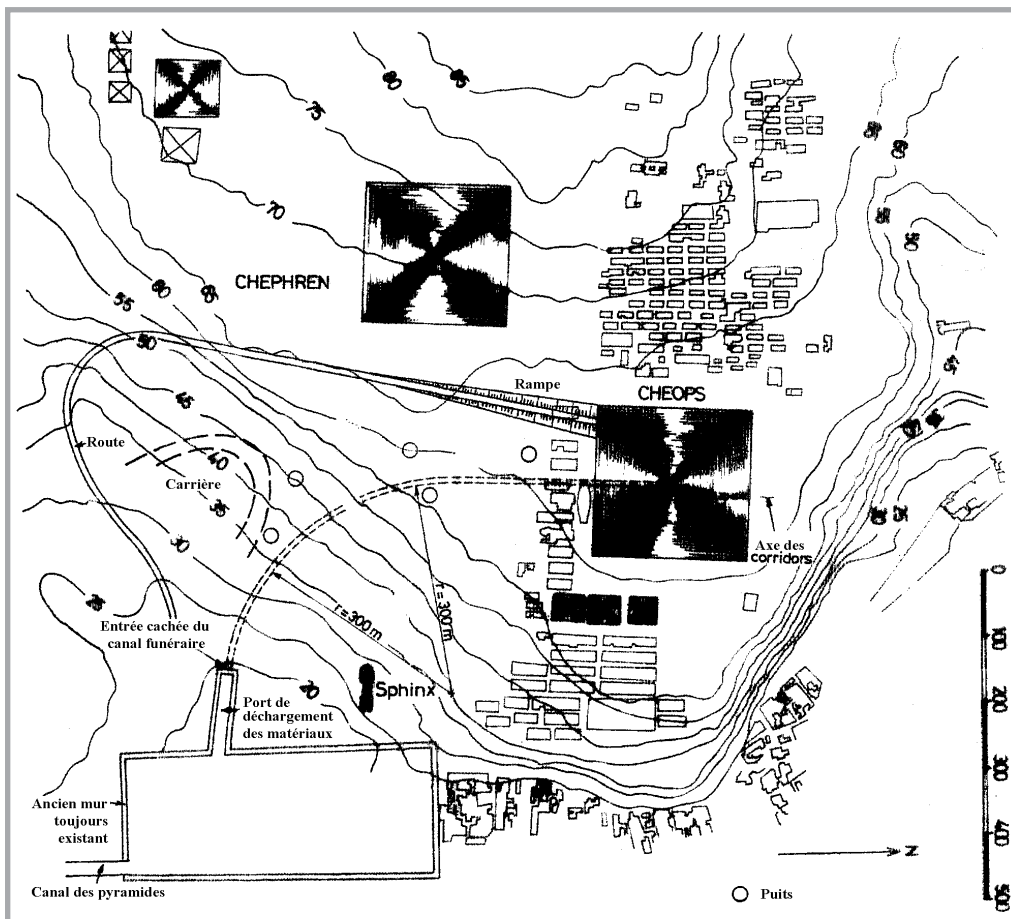


Figure 10
Le canal funéraire, exécuté à sec, derrière un petit barrage provisoire
The funeral canal, constructed on dry land, behind a small temporary dam

Figure 11
Le tracé du canal souterrain (double ligne pointillée)
The route of the underground canal (double discontinuous line)



- ◆ celui du Nil à l'étiage à Saqqara, qui est aussi celui du canal et celui du port de Khéops ;
- ◆ celui de l'étiage à Gizeh, 3 m plus bas ;
- ◆ celui de la nappe phréatique à Gizeh, à peine supérieur au précédent, comme l'a montré Perring en 1837⁹ (figure 9).

■ UN CANAL FUNÉRAIRE EXÉCUTÉ À SEC

En bordure du port, dissimulé derrière un petit mur barrage, Khéops, dès le début de son règne, a fait construire, au-dessus de la nappe phréatique, donc à sec, un tunnel aboutissant à la caverne-tombeau dont parle Hérodote. A la mort du pharaon, sur les instructions de celui-ci, les prêtres font sauter le petit mur barrage : le conduit souterrain devient alors aqueduc, avec le même niveau d'eau qu'au port. C'est sur ce canal que va naviguer la barque funéraire depuis le port jusqu'à la caverne, pour y déposer le sarcophage sur un piton rocheux devenu l'île dont parle Hérodote "Pharaon qui êtes dans les ténèbres, les eaux du fleuve sacré que vous avez dérivé ont d'abord servi à construire votre pyramide, la plus grande de l'histoire, et ensuite à porter la barque qui vous a déposé à la verticale de votre monument" (figure 10).

Pour éviter tout pillage de la sépulture, le canal funéraire devait rester secret, réalisé en souterrain, et, pour que la chambre soit décorée en temps voulu, il sera exécuté **dès le début du règne**. A l'inverse, s'il avait suivi le flanc du plateau, il eut alerté les futurs pillards.

Le tracé à faible courbure, représenté sur la figure 11, aboutit au côté sud de la pyramide. C'est le seul possible pour les raisons indiquées, mais aussi pour celles que nous développons ci-après.

■ LE DÉPART DU CANAL FUNÉRAIRE : RO SETAOU

Le canal comportait une cunette centrale bordée par deux passages pour le halage et les porteurs de torches. Selon les philologues, *ro setaou*, en copte¹⁰, désignerait l'entrée du souterrain, à bateaux : *ro* est l'ouverture et *setaou* le secteur de traction, c'est-à-dire le halage.

■ L'ARRIVÉE DU CANAL FUNÉRAIRE : VALEUR SACRÉE DU PLAN DE SYMÉTRIE NORD-SUD DE LA GRANDE PYRAMIDE

Tous les couloirs internes de la pyramide, y compris la grande galerie, ont été déportés de 7,20 m sans qu'aucune raison valable ait jamais été four-

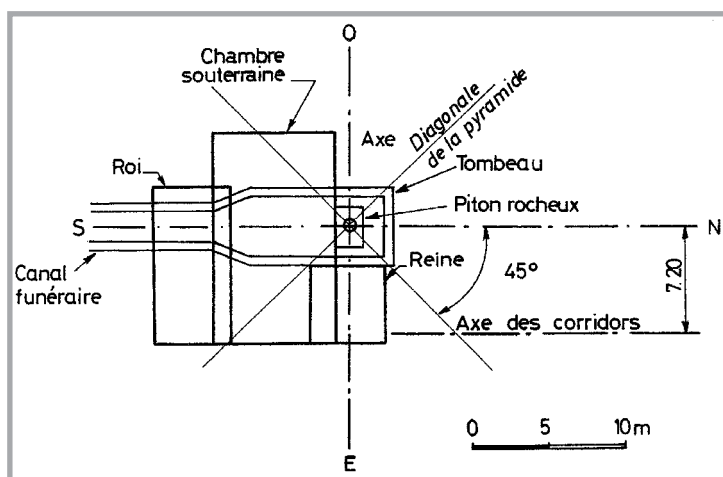


Figure 12
Le point de passage sur le sol de l'axis mundi

The point of the Axis Mundi's passage over the ground

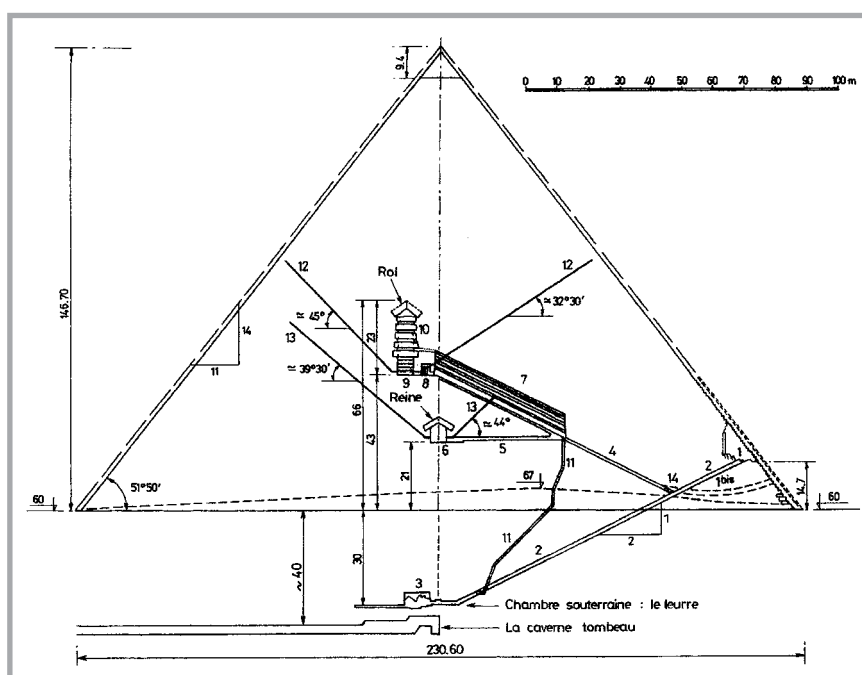


Figure 13
Le canal s'inscrit dans la partie sud du plan de symétrie nord-sud

The canal comes within the southern part of the North-South plane of symmetry

nie. Dans la caverne, la momie repose sur un piton rocheux taillé exactement dans le plan de symétrie nord-sud, le plan réservé pour la sépulture.

■ L'AXIS MUNDI

Sous Khéops, tout comme les Grecs, les Egyptiens se considèrent comme la nation dominante : l'axe de la Grande Pyramide sera donc l'axe du monde (figure 12).

Au départ, le point a été fixé et inscrit sur le sol par un grand prêtre, qui détermine le nord, par visée du lever et du coucher d'une étoile¹¹ ; le point sera aussi le point de rencontre des deux diagonales du carré de la base ; enfin, la verticale passant par le sommet de la pyramide passera par ce point et par le centre du piton rocheux sur lequel dormira de son dernier sommeil le grand pharaon.

Le canal funéraire trouve son départ vers le sud à partir du piton rocheux et il suit la partie sud du plan médian N.-S. de la pyramide réservé par le pharaon. En sortant de la pyramide, au sud, **symbole puissant**, le canal passe sous le point médian des deux fosses à grandes barques solaires découvertes au milieu du siècle dernier (figures 13 et

9. J.S. Perring 1839-42, *Pyramids of Gizeh*, vol. I.

10. Cf. Gérard Roquet, professeur de copte à l'E.P.H.E. au Collège de France.

11. Voir fig. 80, p. 231, Kerisel, op. cit.

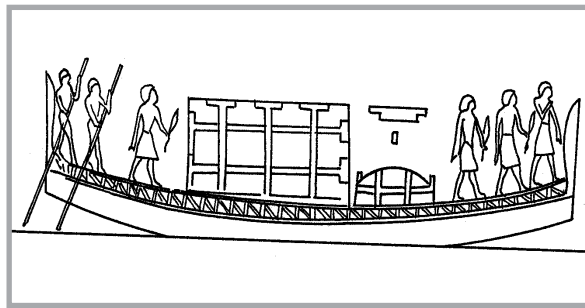


Figure 14 bis
La barque funéraire d'un notable
The funeral boat of an important person

Figure 14
La barque funéraire reconstituée
à partir des éléments retrouvés
dans la fosse : c'est une barque symbolique
*The funeral boat reconstructed on the basis
of items found in the pit : it is a symbolic boat*

Figure 15
Puits à eau
et leurs positions
probables
*Water wells
and their likely
positions*

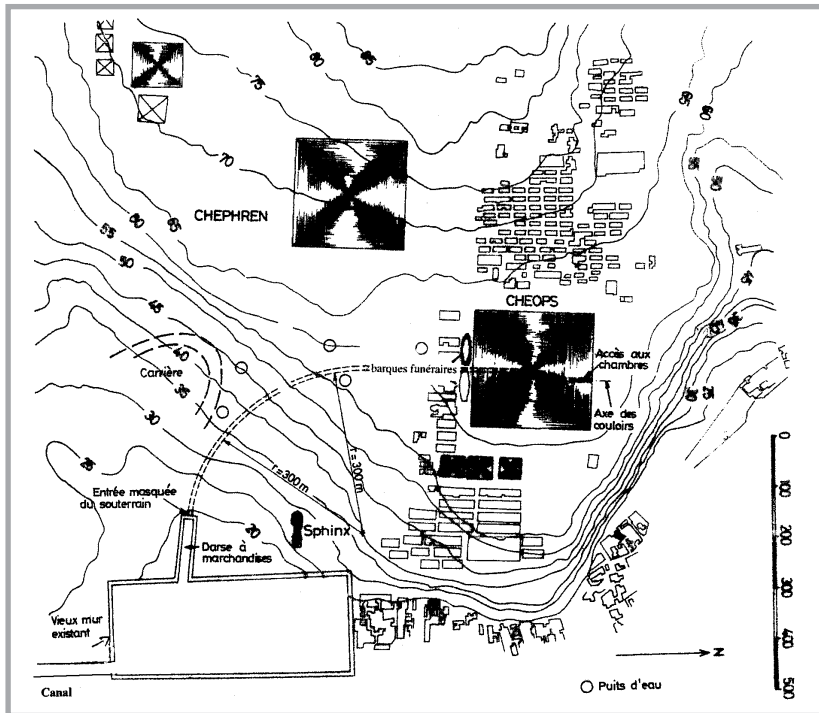
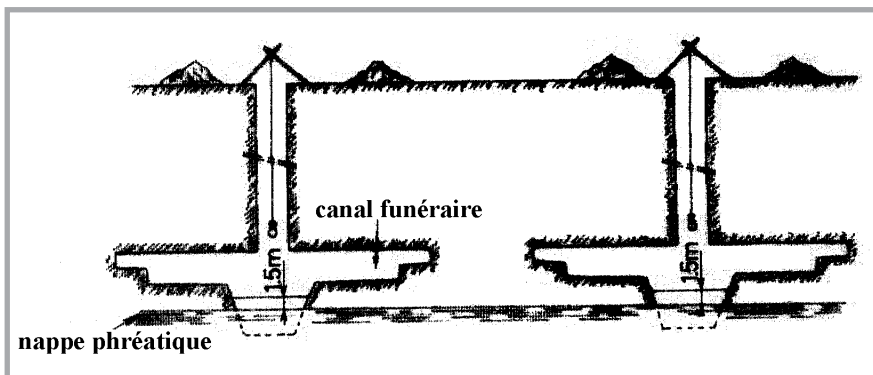


Figure 15 bis
Exécution du canal funéraire par tronçons
Construction of the funeral canal by sections



14). Le lecteur comparera avec la barque funéraire d'un notable (figure 14 bis).

■ SYNERGIE
ENTRE LES CHANTIERS
DE LA PYRAMIDE
ET CELUI DU CANAL

Khéops est un excellent entrepreneur et veille à ce qu'il y ait synergie entre les chantiers de la pyramide et celui du canal. Les besoins en eau du premier dans la zone sud de la pyramide sont énormes : il faut étancher la soif des travailleurs et plus encore assurer la prise des liants au plâtre ; il faut aussi étancher la soif des carriers. Ces besoins en eau considérables ont été satisfaits en puisant l'eau dans la nappe phréatique d'eau douce au fond de puits profonds entre lesquels le canal a été exécuté, **par tronçons**. Les puits suivent un tracé en zigzag, dont seuls le pharaon et les maçons de la mort connaissent les raccordements avec le tracé réel (figures 15 et 15 bis).

■ UNE TRADITION ARABE,
AUTRE PREUVE DU TRACÉ
PROPOSÉ

Dans le traité de Vyse et de Perring (datant déjà de plus d'un siècle et demi) "*Operations carried out at Gizeh, in 1837*", on trouve des renseignements sur les puits existant à cette époque. Il y avait alors un puits appelé "*Campbell's tomb*"¹² au nord du Sphinx (puits profond existant encore à ce jour dans lequel Zahi Hawas se plaît à voir le tombeau d'Osiris).

Mais, en dehors de ce puits, toujours ouvert, Perring, en 1837, localisa trois autres puits¹³, dont un très intéressant, portant le numéro 1, situé entre celui de Campbell et l'emplacement futur de la pyramide de Khephren (figure 16).

Ce puits n'existe plus sur les cartes ; il a donc été remblayé. Il est décrit par Vyse dans son livre. Plus profond que celui de Campbell, il partait de la cote 48 (au lieu de 37) et aboutissait aussi à la nappe d'eau douce, la nappe phréatique. "*From the grotto at the bottom of the first shaft a second descended to a lower chamber, in which square pillars had been left to support the roof ; a third shaft in this apartment was full of water, which was perfectly fresh and covered the floor to the depth of four or five inches. The level of the water was one hundred and thirteen feet several inches below the*

12. Du nom du consul anglais de l'époque ; il déblaya la majeure partie de ce puits et en retira 10 000 m³.

13. Perring J.S. 1839-1842, *The Pyramids of Gizeh*, vol. I, II, III. Les emplacements des puits figurent dans le volume III dans les planches XIX à XXII. C'est dans les quatre puits que Perring mesura le niveau de la nappe.

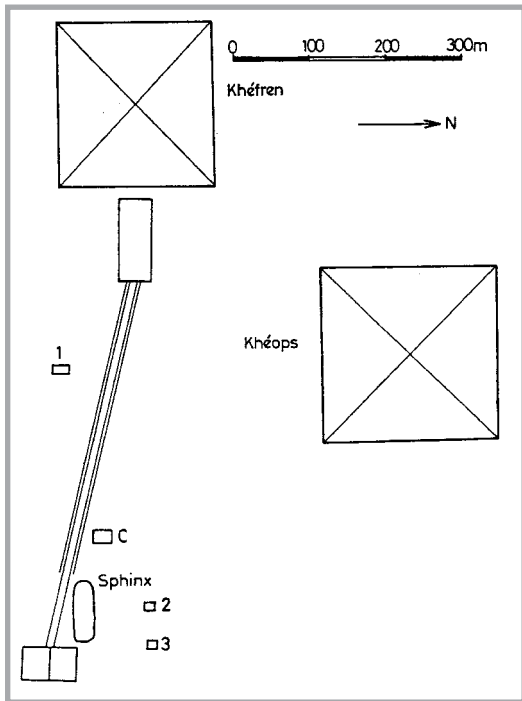


Figure 16
Position des quatre puits visités par Perring et Vyse en 1837 et en particulier du puits 1
Location of the four wells visited by Perring and Vyse in 1837 and in particular well 1

top of the upper shaft. **The Arabs said that an horizontal passage proceeded to the northward from these chambers through the side of the rock.**" (page 4, tome II).

Avec quelle satisfaction ai-je pu constater en reportant le puits numéro 1 qu'il s'inscrivait parfaitement (figure 17) sur le tracé proposé du canal funéraire.

■ UNE VÉRIFICATION QUI S'IMPOSE

Toutes ces affirmations sont acquises par voie déductive. La méthode est très recommandable, mais rien ne vaut une vérification directe. Trois d'entre elles sont possibles (figure 18).

Déblaiement du puits 1

On pourrait se proposer, en premier lieu, de déblayer le puits 1 et de retrouver latéralement le canal lui-même. Mais il est à craindre que la complexité des parois du puits et les maçonneries qui cachent maintenant le départ vers le nord rendent le travail difficile.

Des miroirs sismiques

La mécanique des sciences de la terre vient de s'enrichir du procédé *cross-hole* qui permet de détecter les cavités dans le sol : les recherches pétrolières en ont provoqué un développement spectaculaire. Deux sondages parallèles sont exé-

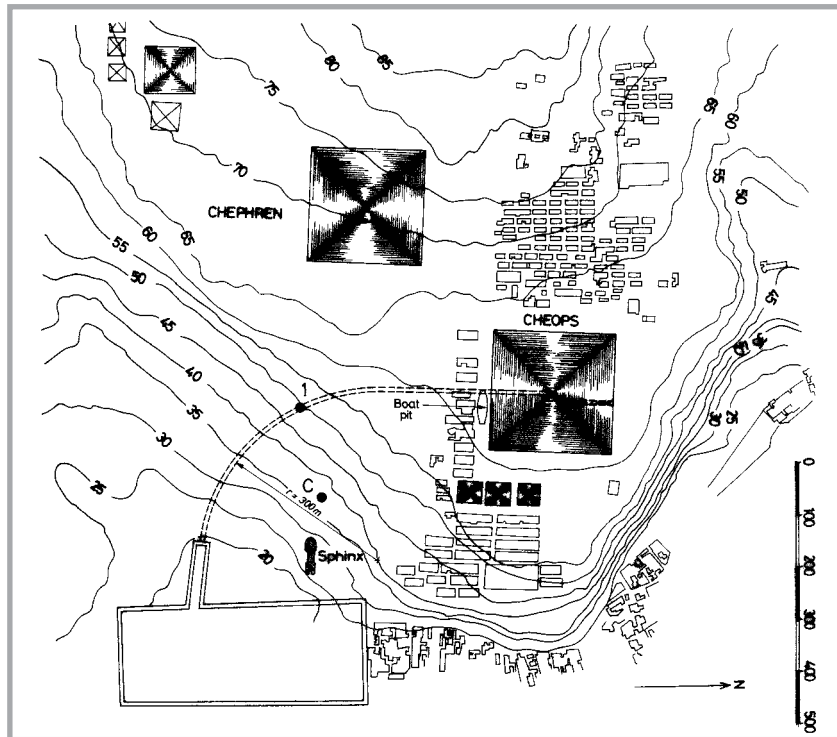


Figure 17

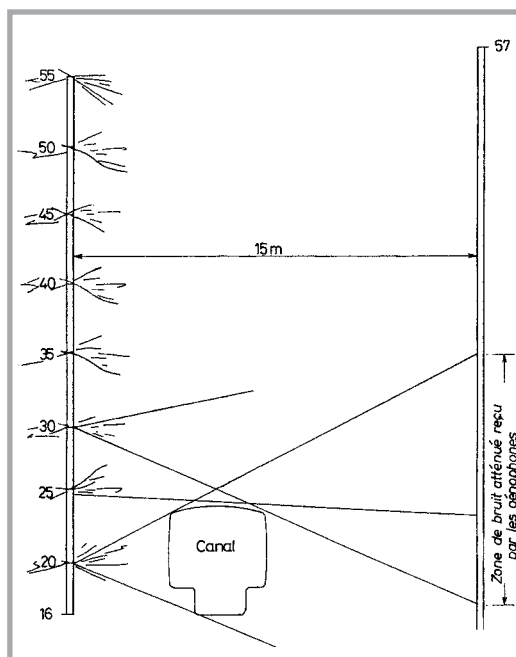


Figure 18
Le procédé *cross-hole*, pour la détection d'un souterrain

The cross-hole process, for detecting an underground passageway

cutés de part et d'autre de la cavité à détecter, l'un dans lequel est provoqué, à des profondeurs croissantes, un ébranlement acoustique, l'autre dans lequel sont à l'écoute divers géophones.

Les ondes étant ralenties par une cavité, l'analyse des enregistrements permet de localiser celle-ci. Tout se passe donc comme si on avait un miroir sismique entre deux sondages. Ici, le procédé sera simplifié puisque, à quelques mètres près, on connaît la profondeur de la cavité : c'est donc exclusivement à cette profondeur que l'on provoquera les ébranlements. La distance des sondages dépend évidemment de l'importance de la cavité et en particulier de sa hauteur : plus grande est celle-ci, plus distants ils peuvent être et inversement.

La distance des sondages, d'après les spécialistes de la méthode *cross-hole*, pourrait être d'une quin-

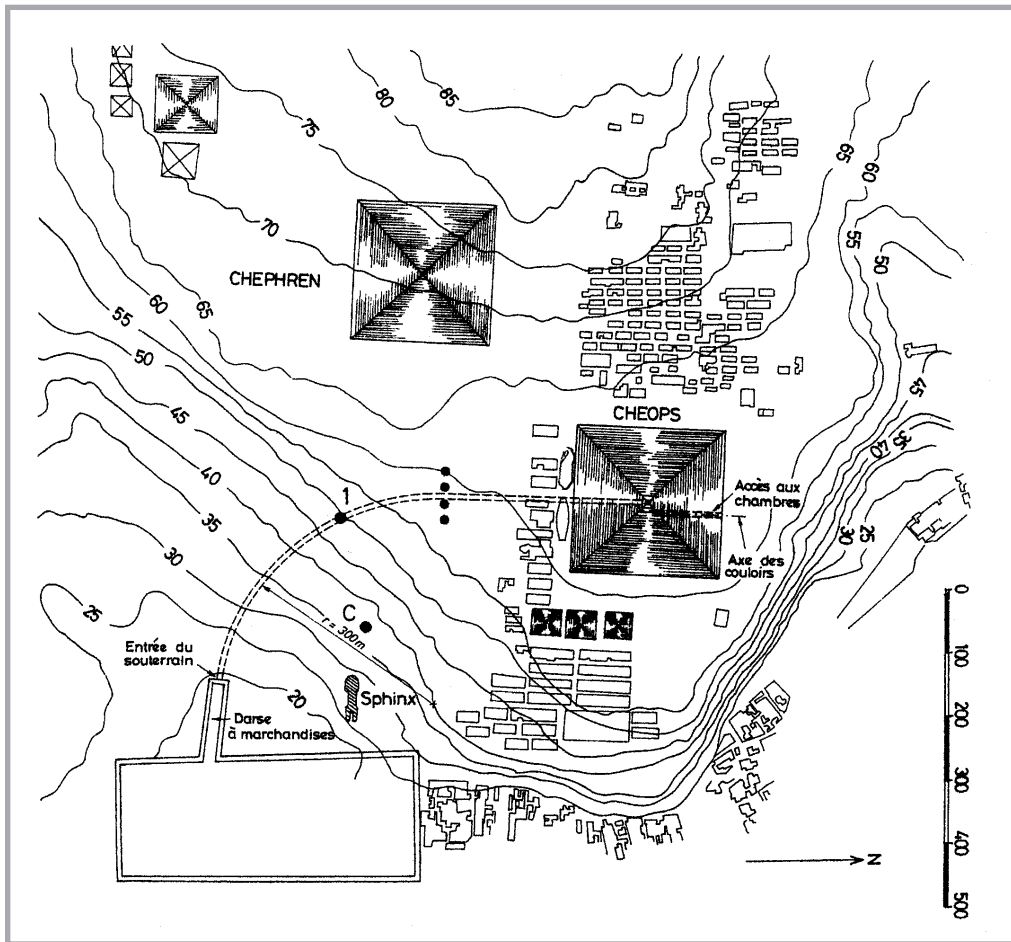


Figure 19
Position des quatre sondages *cross-holes* à exécuter pour vérifier le témoignage d'Hérodote

Location of the four cross-holes to be bored to verify the testimony of Herodotus

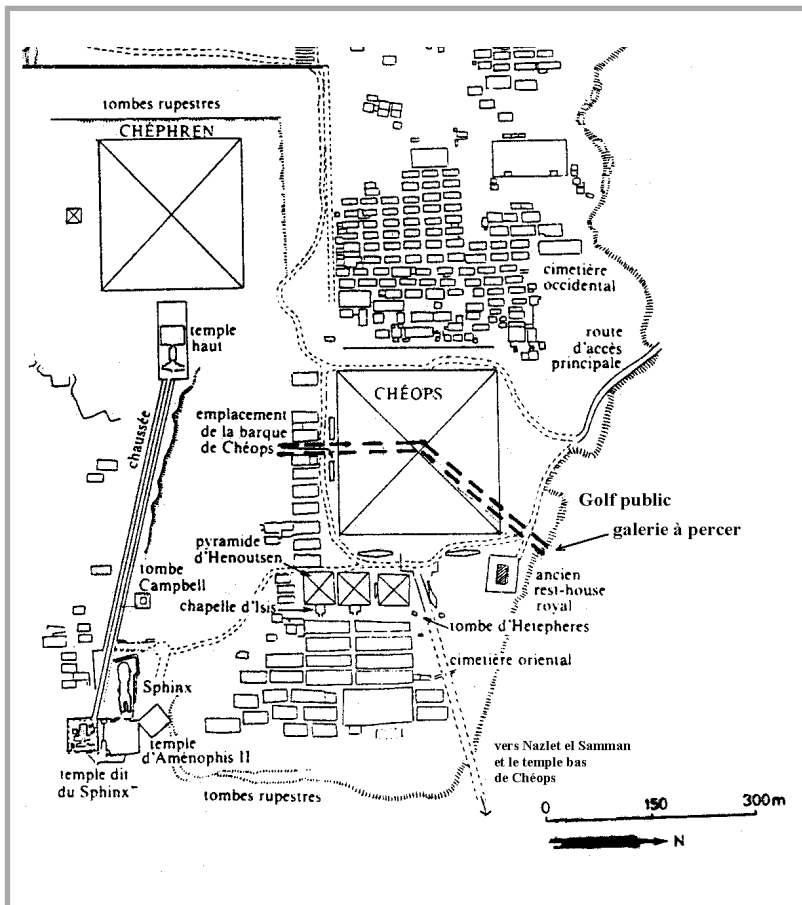


Figure 20
La courte galerie de reconnaissance

The short reconnaissance gallery

zaine de mètres : on en exécuterait deux du côté ouest et deux du côté sud du tracé supposé, permettant d'avoir trois miroirs sismiques.

Les sondages ne porteraient nullement atteinte à la pyramide ; ils seraient exécutés de nuit, à partir d'un camion, et les relevés de géophones de jour ou même de nuit si nécessaire. Les trous des quatre sondages seraient rebouchés ultérieurement.

Une fois repéré l'emplacement du conduit entre deux des *cross-holes*, on pénétrera dans celui-ci au moyen d'un puits, grâce auquel on cheminera à pied jusqu'au tombeau sous l'apex de la pyramide (figure 19).

Une courte galerie sous la diagonale nord-est de la pyramide

Un terrain de golf, d'ailleurs assez médiocre, borde à nord-est la colline sur laquelle est bâtie la pyramide et où celle-ci s'approche assez près du bord abrupt de la falaise (figure 20).

A partir de ce terrain de golf, une petite galerie, d'environ 300 m de longueur seulement et de 3 m de diamètre, serait percée, dirigée vers l'axe vertical de la pyramide, à sec dans un calcaire analogue à celui au-dessous du Sphinx, de qualité excellente. Cette galerie rencontrera le canal et la chambre funéraires cités par Hérodote ; elle comporterait des cintres métalliques pour ne pas provoquer le moindre tassement. Elle partirait du niveau de terrain 23 pour aboutir au niveau 16, cote supposée du fond du canal funéraire, 14 m au-dessous de la carrière abandonnée, le leurre. Le percement de la galerie apparaît comme beaucoup plus facile que ceux du métro du Caire, auxquels j'ai eu l'honneur de participer comme conseil : cavité plus petite et terrain bien meilleur.

Les visiteurs traverseraient la caverne du tombeau, puis suivraient le canal funéraire, dégagé à cet effet, et sortiraient près de l'emplacement du son et lumière : visite exceptionnelle donnant un coup de fouet énorme à un tourisme un peu languissant. Les droits de visite rembourseraient d'abord les emprunts souscrits par les entrepreneurs. Pour diminuer ces derniers, une publicité bien ciblée, au départ, permettrait certainement l'obtention de quelques dons. Le reste des droits bénéficierait au gouvernement égyptien.

CONCLUSION

La solution la moins coûteuse est la deuxième, celle des miroirs sismiques. Elle ne pourrait porter quelque atteinte que ce soit à la pyramide. Si, comme je l'espère, elle dévoile la présence du canal funéraire, il y aurait lieu alors d'étudier plus précisément le financement de la réalisation de la petite galerie évoquée en solution 3.

historique

Planète-TP

Un site nouveau sur les Travaux Publics

Il y a 3 ans, le ministère de l'Équipement et la Fédération nationale des Travaux publics ont confié l'élaboration de ce site à ASCO-TP, Association pour la Connaissance des Travaux Publics, initialement créée en 1989 pour sauver les restes du Musée des Travaux Publics qui avait ouvert ses portes en 1939, place d'Iéna à Paris, avant de les refermer en 1955.

Il y a 2 ans, une maquette de ce musée virtuel, Planète-TP, le musée vivant des travaux publics, avait été réalisée sous forme de CD. Ce projet est aujourd'hui devenu une réalité dont cet article présente quelques éléments.

Planète-TP a été réalisé, avec le soutien constant de ses tuteurs, par une équipe réduite s'appuyant sur des prestataires compétents et surtout avec la participation de nombreux bénévoles, en particulier du monde de l'entreprise. C'est ici l'occasion de les remercier tous de leur action.

Des compagnons travaillant dans les haubans du Pont de Normandie, une autoroute en exploitation, une nouvelle aérogare en construction à Roissy : voici quelques-uns des nombreux aspects des Travaux Publics que vous pouvez découvrir sur la page d'accueil de ce site Internet : www.planete-tp.tm.fr.



■ LES OBJECTIFS

Planète-TP s'adresse en priorité aux jeunes, mais aussi au grand public et à tous les "mordus" des travaux publics, auxquels beaucoup ont consacré leur vie professionnelle. Tous y trouveront une mine de renseignements, et pourront y découvrir la richesse de ce monde souvent méconnu.

Planète-TP, véritable plate-forme d'informations sur l'univers des travaux publics, veut contribuer à valoriser leur image, faire mieux connaître l'utilité de ces travaux et souvent la beauté des ouvrages réalisés, attirer les jeunes vers leurs

professions, nombreuses, diverses et porteuses d'avenir. Elle s'attache aussi à mettre en valeur les nombreuses compétences françaises de ce secteur.

■ LA NAVIGATION

Le site, organisé à la manière d'une grande exposition, comprend déjà plus de 800 écrans. Et ce chiffre ne cesse de croître, tout en se gardant de l'encyclopédisme. Il est tourné vers le présent autant et parfois plus que vers le passé. C'est pourquoi il a été appelé musée vivant.



Un logiciel performant est utilisé pour permettre une mise à jour aisée grâce à l'utilisation d'une base de données très élaborée. Et la navigation a été voulue simple et agréable : richesse, simplicité d'utilisation, précision et esthétique ont été les préoccupations constantes des réalisateurs du projet.

Après la page d'accueil, de grandes rubriques structurent l'espace. Chacune ouvre sur des "Halls" ; puis des "Salles" présentant les articles qui sont la vraie richesse du site.

Dans chaque article : *En savoir plus* pour approfondir ses connaissances ; une navigation transversale pour aller de façon intuitive à d'autres articles connexes : *Visitez* pour parcourir le contenu de la "Salle" ; *Voir également* pour des articles ailleurs dans Planète-TP.

■ LES CONTENUS

Planète-TP met d'abord l'accent sur **les hommes et leurs métiers**.

Montrer concrètement la diversité des possibilités professionnelles est un élément essentiel du site.

historique

Les divers *métiers* sont abordés en relation avec la diversité des types d'ouvrages, les étapes de leur réalisation, les témoignages d'acteurs actuels de la profession. De nombreux métiers y sont décrits, regroupés en grandes catégories, avec les fonctions exercées, les lieux d'activité,



les qualités souhaitables, les interlocuteurs principaux. Le renvoi sur le site emploi de la FNTP, metiers-tp.fr est évidemment prévu en bonne place.

Les *formations* préparant aux divers métiers ne sont pas oubliées. Classées par niveau, leur description précise les conditions d'accès et de scolarité, souvent les débouchés, et renvoie aussi sur les sites spécifiques des centres de formation. Un clic permettra d'accéder depuis la page d'accueil à une recherche de sites spécialisés dans les offres d'emplois dans les TP.



Témoins de l'Histoire, les Grands Hommes des travaux publics figurent dans la galerie des **Portraits**. Ils ne sont qu'une dizaine actuellement, mais leur nombre va s'accroître progressivement. **L'évolution au fil des siècles** des *ouvrages* et des *techniques* est traitée, aujourd'hui pour les routes et les ponts, demain dans d'autres secteurs.

Planète-TP présente aussi des **entreprises** du secteur, petites, moyennes et grandes, à partir des indications qu'elles ont fournies. D'où une diversité des informations et de la présentation. Planète-TP met en valeur les nombreux **types d'ouvrages**, en chantier et en service, leur fonction, leur insertion dans leur environnement, ain-

si que les techniques d'autrefois, d'aujourd'hui et même de demain. Au fil des "Halls" et des "Salles", aéroports, barrages, génie électrique, ponts, tunnels, voies ferrées, etc. sont présentés et seront complétés dans l'avenir par les matériels et les matériaux utilisés. Le site est ainsi l'occasion de valoriser les multiples aspects de ce secteur, ainsi que l'innovation.

Sous l'appellation **Parcours**, de grands ouvrages actuels ou passés font l'objet de dossiers plus complets pour prendre toute la mesure de la complexité des chantiers, qu'il s'agisse, par exemple, du pont de Normandie ou du viaduc de Millau, de la construction du château de Versailles ou du stade de France. Une approche géographique sera possible ultérieurement.

Des **expositions temporaires** (virtuelles toujours), des **Actualités** sur les travaux publics, et bien d'autres informations viennent compléter les services offerts à l'internaute.

Musée virtuel mais surtout site vivant, Planète-TP ne cessera aussi de bouger au fil du temps : le monde des travaux publics est toujours en changement ; notre site le sera donc également. A chacune de vos visites, certaines rubriques au-



ront été ajoutées, d'autres actualisées ou enrichies. Les actualités des TP seront mises à jour grâce aux acteurs du secteur.

Planète-TP est encore dans sa première jeunesse ; de ce fait toutes les rubriques ne sont pas activées, et plusieurs sont incomplètes. Tout ceci s'améliorera progressivement dans les semaines qui viennent.

Vous pouvez voir Planète-TP dès aujourd'hui sur www.planete-tp.tm.fr ; vous le pourrez aussi prochainement sur www.planete-tp.com.

Notre souhait est que Planète-TP vous convienne, et que vous nous aidiez à faire vivre ce site qui est d'abord le vôtre.

Venez donc régulièrement le visiter, puis faites-nous part de votre point de vue et de vos suggestions. Pour cela, une boîte aux lettres est accessible directement sur le site.

Vous pouvez aussi nous écrire à :

> **ASCO-TP**
28, rue des Saints-Pères
75007 Paris
e-mail : asco-tp@enpc.fr.

