

Travaux

n° 819

- L'ouvrage Masséna du TMA
- Passerelle Bercy-Tolbiac
- Stabilisation du "Grand Littoral" à Marseille
- Rénovation et extension des quais du port de Pasajes
- LGV Est : franchissement des carrières de gypse
- Surveillance des voies ferrées lors de travaux souterrains
- La Ganguise. Une paroi en béton plastique pour étancher les rives d'un barrage
- Le décanteur de Montmorot
- Méré : un bassin de relevage clés en main
- Neuilly-sur-Seine. Mise en œuvre du Cutter pour un chantier urbain
- Grenoble : le projet de la SCI Le Galilée
- Le préécépage : un procédé novateur
- A51. Rencontre avec les argiles du Trièves
- Confortement des Catacombes de Paris
- Clermont-Fd. Le tramway assure sa maintenance sur colonnes ballastées

Sols et fondations



sommaire

Travaux
numéro 819

mai 2005

Sols et fondations



Notre couverture

Ouvrage Masséna
du TIMA

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

Roland Girardot

RÉDACTION

Roland Girardot et André Colson
3, rue de Berri - 75008 Paris
Tél. : (33) 01 44 13 31 83
colsona@fntp.fr

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 ABBONEMENTS

Agnès Petolon
10, rue Clément Marot - 75008 Paris
Tél. : (33) 01 40 73 80 05
revuetravaux@wanadoo.fr

France (11 numéros) : 180 € TTC
Etranger (11 numéros) : 225 €
Etudiants (11 numéros) : 75 €
Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)

MAQUETTE

T2B & H
8/10, rue Saint-Bernard - 75011 Paris
Tél. : (33) 01 44 64 84 20

PUBLICITÉ

Régie Publicité Industrielle
Martin Fabre
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



éditorial

Patrick Bernasconi

1

actualités

6

techniques et matériaux

14

matériels

16

PRÉFACE

Christian Besson

21

◆ L'ouvrage Masséna du TIMA. Une Rotoforeuse découpe le terrain à grande profondeur
- *The Masséna tunnel for TIMA. A Rotoforeuse rotary drill cuts out the ground at great depth*

Tr. Cassier, P. Fauvet, Ch. Touboulic, J. Vernet, B. Walbron

◆ Passerelle Bercy-Tolbiac : des fondations complexes pour franchir la Seine avec élégance et ingéniosité
- *Bercy-Tolbiac foot bridge : complex foundations to cross the Seine elegantly and ingeniously*

Br. Clerc, D. Feichtinger

◆ Stabilisation du "Grand Littoral" à Marseille
- *Stabilisation of the "Grand Littoral" in Marseilles*

E. Robert, J.-M. Rescoussier

◆ Rénovation et extension des quais du port de Pasajes en Espagne. Pieux en site maritime
- *Renovation and extension of the docks in Pasajes harbour (Spain). Piles in a maritime site*

J.-P. Volcke

◆ Quand la LGV Est européenne franchit les carrières de gypse, il faut construire sur du solide
- *Where the East European High-Speed Train Line passes through gypsum quarries, it must be constructed on firm ground*

Fr. Kissling, D. Facchetti

◆ Evolution des techniques de surveillance des voies ferrées lors de travaux souterrains
- *Development of technology for monitoring railway tracks during underground work*

M. Bourdon

◆ La Ganguise. Une paroi en béton plastique pour étancher les rives d'un barrage
- *The Ganguise. A wall of plastic concrete to seal the edges of a dam*

Cl. Doby, E. Vuillermet, M. Laugier

◆ Le décanteur de Montmorot : un ouvrage clés en main intégré dans une paroi moulée circulaire

22

30

34

40

42

47

50

53

Sommaire

mai 2005

Sols et fondations

Dans les prochains numéros

- Spécial A86
- Recherche et innovation
- Travaux souterrains
- Route des Tamarins
- Terrassements
- Plates-formes aéroportuaires
- Routes et travaux urbains
- Ponts
- International



- *The Montmorot clarifier : a turnkey structure incorporated in a circular diaphragm wall*

D. Marchand, P. Guasp, A. Morin

◆ Méré : un bassin de relevage clés en main, en deux temps trois mouvements

- *Méré : a turnkey raising tank, in very quick time*

Cl. Doby, E. Piana

◆ Neuilly-sur-Seine. Mise en œuvre du Cutter pour un chantier urbain sensible

- *Neuilly-sur-Seine. Use of the cutter for a sensitive urban project*

Ch. Allenoz, A. Michel

◆ Grenoble : le projet de la SCI Le Galilée

- *Grenoble : The SCI Le Galilée project*

Th. Bret

◆ Le préécépage : un procédé novateur pour recéper les pieux

- *Precutting-off : an innovative process for cutting off piles*

P. Wyniecki, D. Fonfrede

◆ A51 - Coynelle/Col du Fau. Rencontre avec les argiles du Trièves

- *A51 - Coynelle/Col du Fau. The Trièves clays*

J. Martin, D. Allagnat, Ch. Chapeau

◆ Le confortement des catacombes de Paris

- *Consolidation of the Paris Catacombs*

J.-L. Stouvenel, B. Jean Antoine

◆ Clermont-Ferrand. Le nouveau tramway assure sa maintenance sur colonnes ballastées!

- *Clermont-Ferrand. Maintenance for the new tramway is provided on ballasted columns!*

I. Ponchart



ABONNEMENT TRAVAUX

Encart après p. 48

répertoire des fournisseurs

59

62

66

71

75

88

91

94

INDEX DES ANNONCEURS

AMMANN	57	IHC	39
ARCELOR RPS	20	KELLER FONDATIONS	69
ATLAS FONDATIONS	17	LEDUC	9
BALINEAU	10	MENARD SOLTRAITEMENT	12
BOTTE FONDATIONS.....	8	PRO BTP	4
COLBOND GEOSYNTHETICS.....	39	SEFI INTRAFOR	65
EUROFOR.....	45	SITES	19
GTS - GÉOTECHNIQUE ET TRAVAUX SPÉCIAUX	2 ^E DE COUVERTURE	SOLETANCHE BACHY	4 ^E DE COUVERTURE
HOLCIM	13	SOTRES	45
HYDROCONCEPT.....	57	SPIE FONDATIONS	2
		SYNDICAT DES ÉRUPTIFS	3 ^E DE COUVERTURE

Au moment de transmettre la présidence du SOFFONS, qu'il me soit permis dans un premier temps de survoler les événements qui ont marqué le témoin que je fus de près de 35 années de fondations spéciales et dans un deuxième temps d'y ajouter quelques réflexions sur le futur.

Regard sur le passé

Pendant cette période, la profession a subi, et c'est un premier constat douloureux, un renouvellement important de ses acteurs : un grand nombre de disparitions, de changements d'actionnaire et une concentration dont la fusion entre ses deux "majors", Solétanche et Bachy, a été l'événement le plus marquant.

Ceci n'a que peu affecté la mentalité et l'état d'esprit des hommes qui ont conservé la passion de leur métier, l'amour de la technique et l'esprit d'équipe.

Le matériel quant à lui est devenu plus compact, plus puissant, plus sûr, plus "électronique" mais il n'est toujours pas entièrement automatique.

Plus que les eurocodes en matière de réglementation, c'est l'apparition des calculs aux éléments finis et des méthodes de dimensionnement aux déformations qui marqueront cette période.

S'appuyant sur le développement des infrastructures de transport en site urbain l'évolution des techniques et des technologies s'est traduite par la naissance, vers la fin des années 70, de l'hydrofraise et l'arrivée en provenance du Japon via l'Italie du jet grouting. Celui-ci annonçait d'une certaine façon le développement des techniques d'amélioration de sol rendu nécessaire, entre autres, par la mauvaise qualité des terrains "bons marchés" retenus pour l'implantation des grandes surfaces industrielles et de commerce. Apparaissaient ou se développaient ainsi la consolidation par mise en place de toutes sortes d'inclusions, les techniques de sol mixing, de compaction par vibration et par injection solide. La gamme des pieux s'élargissait avec le développement des pieux à tarière continue et certain type d'ouvrage "à refoulement". Une période riche en évolutions pendant laquelle apparaissaient également les enregistrements de paramètres de forage et une première approche du positionnement de l'outil de forage dans l'espace, une aide précieuse pour qui travaille en aveugle.

Les relations entre les intervenants à l'acte de construire ont évolué quant à elles défavorablement. Partant d'un dialogue qui avait pour objectif commun de construire un ouvrage et de gagner un challenge ensemble, s'installent des situations extrêmes comme le système des acheteurs ou l'appel d'offres sur Internet. Qui plus est, le risque du sol échoue souvent chez l'entreprise de travaux spéciaux ! Heureu-

sement d'autres formes de marché apparaissent (mieux-disant, partenariat, notamment au niveau des risques...) qui devraient permettre d'améliorer cette situation.

Quelques réflexions pour l'avenir

Les années n'y ont rien changé, sur les quelques dizaines de mètres d'épaisseur de croûte terrestre qui nous intéressent, le sol est resté hétérogène et anisotrope. Les fondations ou l'amélioration des caractéristiques que l'on y inscrit, peuvent être, si elles sont inefficaces, à l'origine de graves conséquences. Les ruptures de structure, les débousses ou les fontis sont des risques majeurs pouvant générer des surcoûts financiers considérables, des retards de délais conséquents mais aussi mettre en péril la sécurité des personnes. Nul doute que dans les décennies à venir, si, comme il se doit, les marges et les budgets auto-

risent un véritable effort de recherche, la connaissance des sols en termes de déformation et de loi de comportement va progresser, la reconnaissance géotechnique s'améliorer, l'instrumentation sera de plus en plus fiable et fidèle, le matériel gagnera en performance et en précision. Tous ces progrès conduiront à une meilleure maîtrise et donc progressivement à un automatisme grandissant. Toutefois l'entrée des travaux spéciaux dans le secteur industriel "classique" n'est pas encore envisageable et la modestie face aux aléas et incertitudes du sol doit rester de mise. Alors restons convaincus que ce métier se "joue" sur le terrain, par les hommes qui le pratiquent, que l'expérience et la technique en restent les fondements. Ne nous cachons pas, pour masquer nos ignorances, derrière des normes et règlements, des procédures d'assurance qualité, et des logiciels de calcul rassurants. Utilisons au contraire ces outils indispensables avec lucidité, utilisons la méthode observationnelle avec intelligence, conser-

rons notre esprit d'analyse et d'adaptabilité, car les réalités sont tenaces et quand on persiste à les ignorer les punitions sont sévères. Dans une époque où le confort du virtuel peut séduire et où tous les acteurs économiques recherchent le risque zéro, le secteur des fondations spéciales reste, de par la nature de son domaine d'intervention, un monde d'entrepreneurs amenés à prendre des risques. Mais ceux-ci doivent l'être dans un cadre précis où chaque intervenant à l'acte de construire prend ses responsabilités, depuis le maître d'ouvrage (à qui appartiennent le terrain et le projet) jusque et y compris les assureurs, en passant par le maître d'œuvre (et/ou) leurs conseils et le cas échéant les bureaux de contrôle.

Enfin que les jeunes qui parcourront cette revue soient convaincus que les champs qui restent à défricher permettent encore l'assouvissement de toutes les passions.



■ CHRISTIAN
BESSON

Président
du SOFFONS

L'ouvrage Masséna

Une Rotoforeuse découpe profondeur

Dans le cadre du plus grand chantier de travaux souterrain en cours, le TIMA 1 pour le SIAAP, Spie fondations a mis en œuvre son outil de perforation le plus adapté aux contraintes environnementales du site : la Rotoforeuse.

En effet, le voisinage de la Seine et d'ouvrages anciens et sensibles (une conduite de gaz à environ 3 m de distance, la culée rive gauche du Pont National à une dizaine de mètres), ajouté à la grande profondeur à atteindre par l'engin de forage (55 m), ne permettait pas d'envisager un autre moyen d'excavation.

Le premier challenge dans lequel se sont engagés les intervenants dans cette opération d'envergure est en passe d'être réussi, les travaux de parois moulées étant annoncés à l'heure, à la grande satisfaction de la Maîtrise d'ouvrage.

Soucieux d'augmenter de manière significative la capacité de stockage des eaux excédentaires de temps de pluie, le SIAAP (Syndicat Interdépartemental de l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne) a lancé un vaste programme d'ouvrages, dont le TIMA (Tunnel de stockage Ivry - Masséna - Austerlitz) est un chaînon essentiel.

C'est le groupement Bouygues TP (mandataire) - Campenon Bernard TP - Razel - Spie fondations qui a été choisi par le SIAAP pour réaliser le tronçon du tunnel de stockage compris entre le puits existant des Cormailles, à Ivry-sur-Seine, et l'ouvrage Masséna à créer en rive gauche de Seine, quai Panhard et Levassor, en contrebas du Pont National. Le présent article concerne uniquement les travaux que Spie fondations est en train de réaliser sur cet ouvrage Masséna, notamment les parois moulées à grande profondeur, à la Rotoforeuse, et les injections d'étanchéité des fonds de fouille.

■ PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE L'OUVRAGE ET DE SON ENVIRONNEMENT

Comment gérer le stockage et l'écoulement des eaux excédentaires de temps de pluie de l'agglomération parisienne lors de violents orages ? Comment éviter la saturation des réseaux d'évacuation ? Tel est le problème auquel est confronté le SIAAP et qu'il a entrepris de résoudre en repensant et réadaptant tout son réseau afin d'en accroître la capacité de stockage.

En même temps qu'il achève son programme de traitement de la totalité des eaux usées de temps sec, le SIAAP s'engage en effet dans la voie du traitement des eaux excédentaires de temps de pluie dont les déversements ont parfois des effets dévastateurs sur le milieu récepteur.

Les usines d'épuration sont en général dans l'impossibilité de faire face à ces pointes hydrauliques en raison de la trop grande sensibilité des procédés de traitement aux variations de débits et de charge.

Pour faire face aux situations de temps de pluie sans multiplication prohibitive des capacités de transport et d'épuration, la solution consiste donc à stocker les eaux excédentaires dans l'attente d'un retour à la normale, ces eaux étant ensuite acheminées jusqu'aux usines d'épuration dès que leur capacité disponible le permet.

Le tunnel de stockage Ivry - Masséna (TIMA 1) recevra, en temps de pluie, les eaux excédentaires actuellement rejetées directement dans le milieu naturel (la Seine ou la Marne). Il s'inscrit dans un vaste complexe de stockage d'une capacité totale de 240000 m³, concernant le secteur "Seine Amont", et qui comprend les principaux ouvrages suivants (figure 1) :

◆ le TIMA :

- le tronçon Ivry - Masséna (TIMA 1) entre le puits des Cormailles à Ivry-sur-Seine et l'ouvrage Masséna, implanté en rive gauche de Seine au niveau du Pont National à Paris et collectant le déversoir d'orage (DO) Bièvre-Watt,

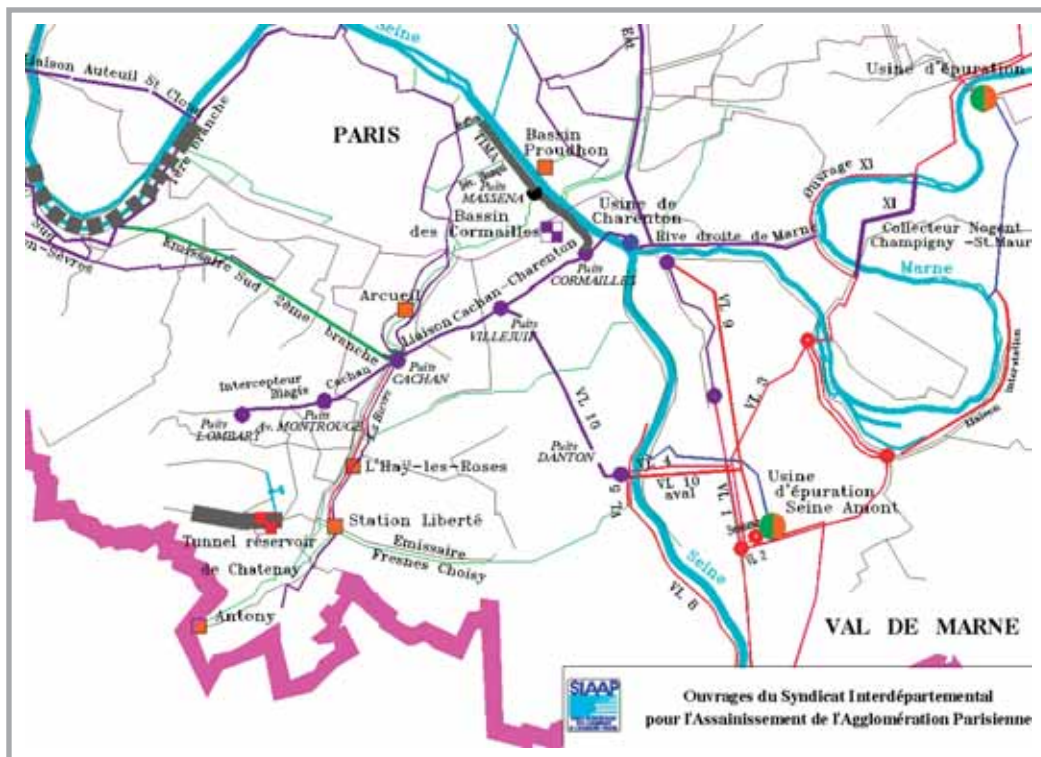
- le tronçon central (TIMA 2) collectant les effluents actuellement rejetés en Seine par les déversoirs d'orage dénommés Vincennes-Charenton et Périphérique,

- le tronçon amont Masséna - Austerlitz (TIMA 3), projeté entre le puits Masséna et le puits d'Austerlitz implanté au niveau du pont du même nom, en rive gauche de Seine à Paris. Il recevra les effluents actuellement rejetés en Seine par le déversoir d'orage dénommé Buffon ;

◆ le maillage Cachan - Charenton :

- le tronçon MCC1 entre Cachan et Villejuif, qui reçoit les eaux de la vallée de la Bièvre,
- le tronçon MCC2 entre Villejuif et le puits des Cormailles à Ivry-sur-Seine, qui peut être alimenté soit

Figure 1
Cartographie du secteur Seine Amont
Map of the Upstream Seine sector



du TIMA le terrain à grande

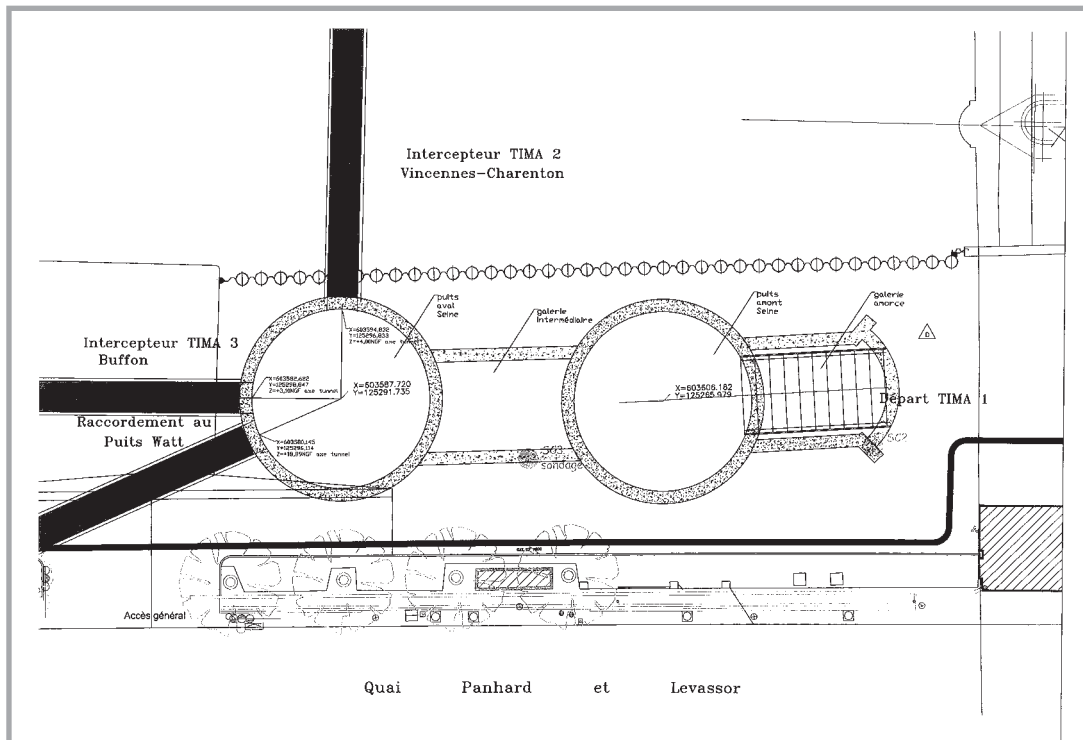


Figure 2
Vue en plan des parois moulées
de l'ouvrage Masséna
*Plan view of the diaphragm walls
of the Masséna tunnel*

depuis Villejuif par les eaux de la vallée de la Bièvre, soit depuis les Cormailles par les déversoirs de l'Est parisien (TIMA) ou par les effluents convergeant à l'île Martinet (MCC4),

- le puits des Cormailles (MCC3) à Ivry, nœud de liaison entre TIMA, la liaison Cachan-Charenton et le bassin des Cormailles,

- le tronçon MCC4 entre le puits des Cormailles et l'île Martinet à Charenton, où convergent les surverses du secteur Charenton - Ivry - Alfortville;

- ◆ le bassin du parc des Cormailles à Ivry, dont la vocation première est de récupérer les eaux excédentaires du réseau local d'Ivry afin d'éviter les inondations;

- ◆ l'intercepteur Blagis - Cachan dont la vocation est de récupérer les eaux excédentaires du bassin versant du ru des Blagis.

Ainsi, selon l'importance et la localisation de l'événement pluvieux, le tunnel de stockage TIMA 1 pourra recevoir les effluents provenant des quatre déversoirs de l'Est parisien, ou être alimenté depuis le puits des Cormailles par les surverses de l'île Martinet, et éventuellement celles du bassin des Cormailles d'Ivry-sur-Seine, en cas d'événement pluvieux particulièrement important. Sa capacité de stockage a été fixée à 80000 m³.

Par ailleurs, afin de faire face à toutes les situations exceptionnelles, aussi bien en termes d'événements pluvieux que de panne ou chômage d'un

des éléments du dispositif, il fallait prévoir un déversoir de sécurité du complexe de stockage.

Ce déversoir est prévu à l'ouvrage Masséna qui présente l'avantage d'être implanté en bordure de Seine et d'être relié au nœud principal du complexe de stockage, le puits des Cormailles, par un tunnel de grand diamètre, donc non limiteur de débit. Une étude hydraulique complète du système Seine Amont a précisé le dimensionnement hydraulique de ce déversoir et son incidence sur le milieu récepteur.

Cet ouvrage n'engendrera pas de déversements supplémentaires à ceux observés actuellement sur les déversoirs parisiens; il joue avant tout le rôle d'organe de sécurité du système et ne sera sollicité que de façon exceptionnelle. Globalement, les déversements en Seine seront très sensiblement réduits puisque TIMA permettra de stocker des pluies de période de retour 2 ans.

■ DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

L'ouvrage comprend le déversoir, deux puits liaisonnés par une galerie basse et des locaux techniques d'exploitation, dont un certain nombre au-dessus d'une galerie d'amorce créée spécialement pour permettre au tunnelier d'attaquer le creusement de la galerie principale (figure 2).

Tristan Cassier

INGÉNIEUR D'AFFAIRES
Spie fondations



Patrick Fauvet

INGÉNIEUR EN CHEF -
CHEF DU SERVICE
RÉSEAUX
SIAAP/DGT



Christian Touboulis

INGÉNIEUR EN CHEF -
ADJOINT AU DIRECTEUR
DES GRANDS TRAVAUX
SIAAP/DGT



Jean Vernet

INGÉNIEUR
DIVISIONNAIRE -
RESPONSABLE
D'OPÉRATION
SIAAP/DGT



Bernard Walbron

DIRECTEUR
COMMERCIAL
Spie fondations



Photo 1
La plate-forme de travail
avec en premier plan,
le rideau autostable

*The work platform with,
in the foreground,
the free-standing screen*



Photo 2
La Rotoforeuse s'installant
sur la plate-forme, à l'abri
des inondations

*The Rotoforeuse rotary drill
being installed on the platform,
sheltered from flooding*



Il servira :

- ◆ pendant la phase travaux, à l'introduction du tunnelier de 6,80 m de diamètre utilisé pour le creusement sur 1 850 m du tronçon TIMA 1, et à l'évacuation des déblais ;
- ◆ pendant l'exploitation future de TIMA, essentiellement à la ventilation et à l'entretien du tunnel ;
- ◆ pendant l'exploitation du complexe de stockage Seine Amont, de déversoir de sécurité.

Il permettra en outre le raccordement des DO sur le tunnel de stockage. Ces raccordements seront en effet réalisés grâce à des ouvrages profonds :

- ◆ un ouvrage de 2,50 m de diamètre pour le DO Bièvre-Watt et qui est en cours de réalisation (au tunnelier, avec sortie par le puits aval) ;
- ◆ un ouvrage commun de traversée sous-fluviale pour les DO de la rive droite, Vincennes - Charenton et Périphérique, qui sera réalisé en 4 m de diamètre à l'aide d'un tunnelier qui arrivera et sortira par le puits aval ;
- ◆ une galerie de 3 m de diamètre en rive gauche de Seine pour le DO Buffon qui sera réalisée à l'aide d'un tunnelier qui arrivera et sortira également par le même puits.

L'implantation de cet ouvrage, sur le port de Tolbiac, à l'aval immédiat du Pont National présente le double avantage :

- ◆ d'être aisément accessible depuis la Seine, ce qui permettra d'utiliser la voie fluviale pour la plupart des transports liés aux chantiers (évacuation des déblais notamment) ;
- ◆ d'être suffisamment distant des habitations (l'activité autour du puits sera immergée dans l'activité portuaire du quai).

Les puits ont un diamètre intérieur de 17,50 m et une profondeur de 30 m au niveau du radier. Ils sont réalisés en parois moulées de 1,22 m d'épaisseur fichées à environ 55 m de profondeur.

La réalisation de ces travaux a nécessité au préalable l'alignement de la berge au droit du Pont National, pour rétablir la continuité entre les quais existants et disposer d'une largeur suffisante pour l'implantation de deux puits de grands diamètres, compte tenu de la présence d'une conduite de gaz côté voirie et à proximité du Pont National.

Ce réaligement de berge a été réalisé par battage en site fluvial d'un rideau autostable en phase provisoire, constitué de palplanches et de tubes métalliques de diamètre 1,22 m ancrés à la cote 7 NGF dans les argiles plastiques, un remblai compacté étant ensuite mis en place derrière le rideau pour constituer une plate-forme de travail stable et protégée des inondations (photos 1 et 2). En phase définitive, des tirants accrochés à la paroi seront disposés en tête de rideau pour en assurer la stabilité.

Le rideau accueillera en fin de chantier des parements permettant la continuité esthétique du quai depuis l'aval.

Après réalisation des parois moulées des puits, le déversoir d'une ouverture de 12 m par 1,70 m, ainsi que la chambre devant accueillir la vanne d'isolement de la Seine, seront terrassés entre la paroi et le rideau mixte.

■ CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Les différentes campagnes de sondages géotechniques réalisées sur le site entre 1999 et 2002 ont permis d'établir la coupe des terrains suivante (à partir d'une plate-forme à 30,50 NGF) :

- ◆ des remblais et des alluvions modernes sur environ 4 m d'épaisseur ;
- ◆ les alluvions anciennes jusqu'à la cote 21/22 NGF ;
- ◆ un reliquat de calcaire grossier (altéré) sur 3 à 4 m d'épaisseur ;
- ◆ les fausses glaises sur 5 à 7 m d'épaisseur ;
- ◆ les argiles plastiques jusqu'à une cote variant de 0 à 5 NGF (d'aval en amont) ;
- ◆ les sables de Bracheux sur 3,5 m à 6,5 m d'épaisseur ;
- ◆ le marno-calcaire du Montien jusqu'à une cote variant de - 12,70 NGF à - 13,70 NGF ;
- ◆ la craie blanche à silex du Campanien.

Les fonds de fouille varient en altitude entre - 3,75 NGF, au droit du puits aval, et - 0,70 NGF au droit de la galerie amorce et de la galerie intermédiaire, et devraient donc se développer au sein des sables de Bracheux.

Les terrains du site sont baignés par l'aquifère des alluvions anciennes et du calcaire grossier, qui est en communication directe avec la Seine, et par l'aquifère des sables de Bracheux, du marno-calcaire du Montien et de la craie, dont la nappe est en charge sous l'argile plastique, et qui est lui aussi en communication avec la Seine (là où l'argile disparaît).

■ DISPOSITIONS TECHNIQUES

Ces éléments ont conduit à arrêter les choix techniques suivants (figure 3) :

- ◆ pour les puits, réalisation de parois moulées de 1,22 m d'épaisseur descendues jusqu'aux cotes - 24,50 NGF (puits aval) et - 22,50 NGF (puits amont), avec une étanchéité des fonds de puits assurée par des bouchons injectés de 8 m d'épaisseur ;
- ◆ pour les galeries de liaison (14 m x 8,8 m) et d'amorce (12 m x 8,8 m), réalisation par parois moulées de 1,22 m d'épaisseur descendues jusqu'à la cote - 20 NGF, avec bouchons injectés de 7 m d'épaisseur.

Les deux puits seront excavés sur 33,30 m et 34,25 m de profondeur, les deux galeries n'étant terrassées que sur environ 10 m de hauteur à partir des fonds de fouille des puits, après percement des parois moulées, et sur 7 m en tête, libérant ainsi un emplacement pour des locaux techniques.

■ CHOIX DU MATÉRIEL

Le matériel utilisé sur ce chantier pour le forage du terrain est la Rotoforeuse qui est un engin de forage à circulation inverse de boue, constitué d'un châssis métallique de type treillis sur lequel sont installés deux tambours équipés de dents au carbure de tungstène (photo 3). Ce choix de l'engin de forage des parois moulées a résulté d'une pro-

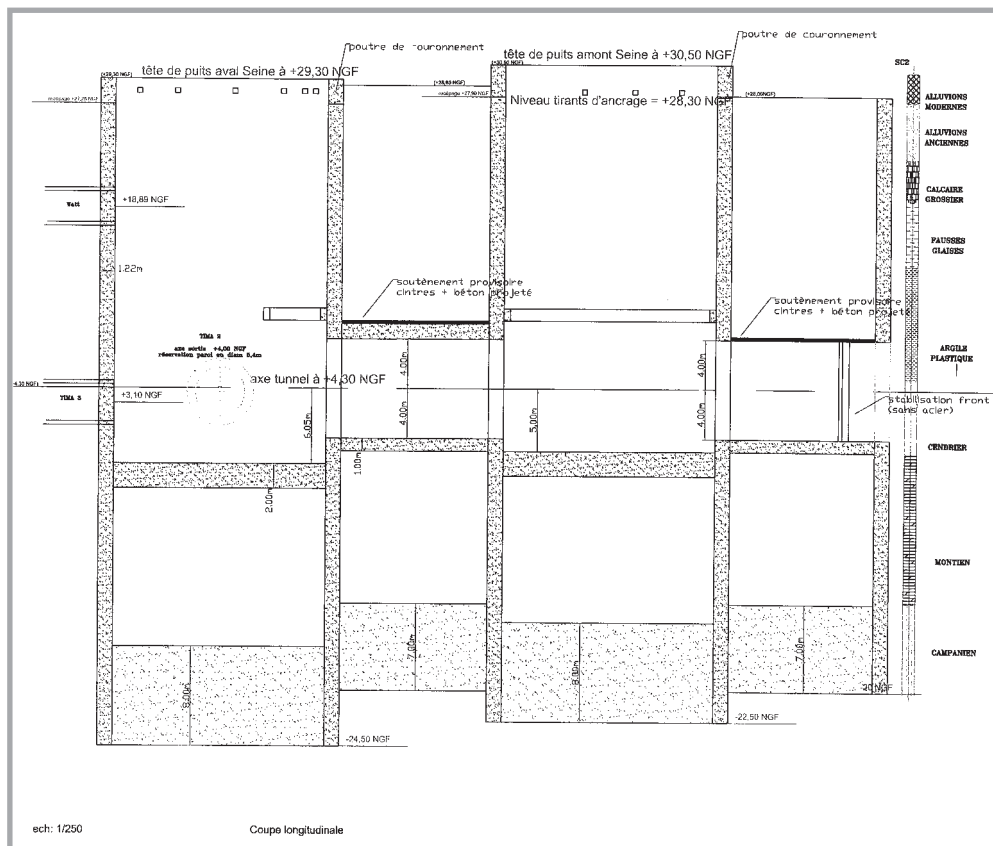


Figure 3
La coupe en long
de l'ouvrage Masséna
*Longitudinal section
of the Masséna tunnel*



Photo 3
A gauche la benne spéciale,
à droite la Rotoforeuse,
au fond le Pont National
*On the left the special grab,
on the right the Rotoforeuse
rotary drill, in the background
the "Pont National" bridge*

fonde réflexion, tant les facteurs d'incertitude étaient nombreux.

Le premier critère de choix était naturellement lié à la géologie rencontrée (succession d'alluvions, de calcaire glauconieux, de fausses glaises et d'argiles plastiques, de sables d'Auteuil, de marno-calcaire, et enfin de craie), l'alternance de terrains raides, voire très raides, militait pour l'emploi de la Rotoforeuse, alors que d'autres, très argileux, semblaient constituer un obstacle à l'utilisation de tambours fraisants.

Photo 4
Forage des premiers mètres d'un panneau primaire, à la benne à câbles, dans une emprise déjà bien encombrée

Drilling the first metres of a primary panel, by cable grab, on land that is already very cluttered

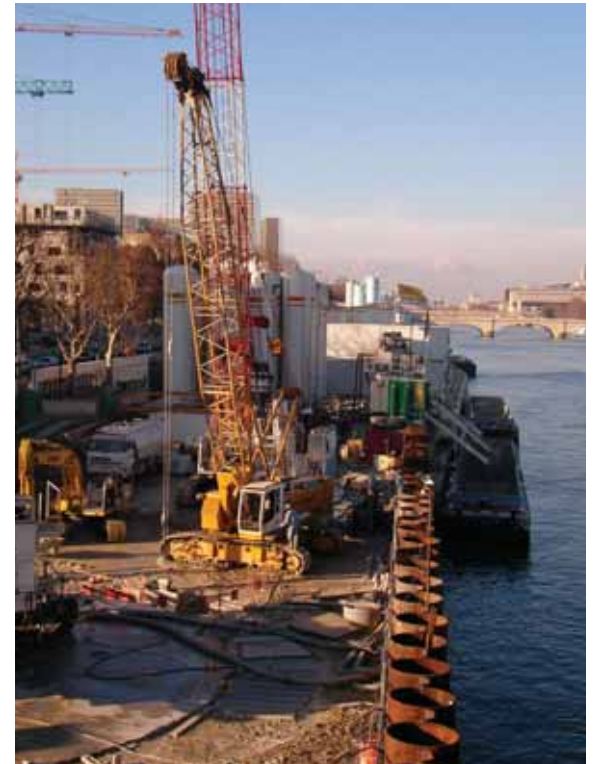


Photo 6
Alignées le long du quai, les barges à déblais attendent que les dessableurs crachent les rebuts de recyclage

Aligned along the quay, the excavation barges wait for the desilting machines to spit out the recycling rejects

Photo 5
L'optimisation de l'occupation de l'espace est un art maîtrisé par les équipes de Spie fondations

Optimisation of the occupancy of space is an art mastered by the Spie foundations personnel



► Deux autres facteurs plaident pour l'utilisation de la Rotoforeuse :

- ◆ la profondeur tout d'abord, jusqu'à 55 m, nécessitant du matériel de haute précision afin de limiter les défauts de verticalité ;

- ◆ la proximité d'ouvrages extérieurs très sensibles aux vibrations et aux ondes de choc.

On a d'abord eu à prendre en compte la présence d'une conduite Ø 600 de gaz haute pression, située à environ 3 m des murettes-guides les plus proches (cela en trois endroits), et ne tolérant quasiment aucune vibration lors du forage. Une première précaution a consisté à approfondir les murettes-guides pour constituer un voile de protection de la conduite descendant jusqu'à 2 m sous le niveau de la plate-forme.

Le Pont National ensuite, assujéti aux contraintes de la SNCF, est également un ouvrage très sensible aux vibrations des outils d'excavation (sa culée rive gauche est fondée sur des pieux en bois

dont les plus proches sont situés à une dizaine de mètres de la paroi moulée).

C'est donc l'ensemble de ces facteurs qui a conduit à la mobilisation d'une Rotoforeuse pour traverser les bancs de terrains indurés tout en garantissant une déviation inférieure à 0,5 % et en limitant les vibrations au droit des ouvrages avoisinants. Le forage s'effectue donc par panneaux primaires-secondaires, l'engin venant remordre, en une seule passe secondaire, les extrémités des deux panneaux primaires précédemment bétonnés.

Une benne à câbles spécialement adaptée (largeur réduite à 1,80 m) a d'ailleurs été fabriquée par Spie fondations afin de faciliter le forage des panneaux secondaires, là où les tambours fraisants peinaient à remordre le béton des panneaux primaires adjacents en même temps que les terrains argileux sans consistance. On peut voir sur la photo 3 la benne spéciale posant à côté de la Rotoforeuse.

■ ADAPTATION DU CHANTIER À UN ENVIRONNEMENT CONFINÉ

Le choix de ce type de matériel conduit inévitablement à des installations de chantier conséquentes pour assurer son fonctionnement. Outre la présence d'un porteur de 100 t pour la Rotoforeuse, deux autres grues sont nécessaires à la bon-

ne marche de l'atelier : un porteur pour la benne à câbles ainsi qu'une grue de manutention. A cela s'ajoute une centrale à boue imposante, équipée de dessableurs et dessilteurs, ainsi que 24 silos de stockage de bentonite. Tout ce matériel est à agencer dans une emprise très réduite (75 m x 30 m) et un contexte urbain très dense (photos 4 et 5).

Afin de limiter au maximum les circulations d'engins de chantier autres que les grues, il a été décidé que seuls le béton et les cages d'armatures seraient approvisionnés par camion. Le chantier étant situé en bordure de Seine, la centrale de fabrication et de recyclage de la bentonite a été implantée de façon à pouvoir vider, directement dans des barges, les déblais de forage acheminés en continu par le fluide de perforation (circulation inverse), pour évacuation ultérieure par voie fluviale (photos 6 et 7).

■ AUTRES SPÉCIFICITÉS TECHNIQUES

Parmi les spécificités techniques que l'on peut également noter sur cet ouvrage, deux sont à souligner :

- ◆ le fonctionnement en voûte du front d'attaque du tunnelier dans la galerie d'amorce, afin de le stabiliser avant son confinement. A cet effet, les panneaux formant le front sont disposés suivant un arc de cercle de 6,50 m de rayon et s'appuient, aux naissances de la voûte, sur deux barrettes de réaction prenant appui sur le terrain ;

- ◆ la prise en compte de nombreuses futures ouvertures dans les parois moulées au droit des jonctions avec les galeries devant déboucher dans l'ouvrage.

Afin de ne pas entraver le percement de la paroi par les tunneliers, aucun acier n'est toléré au droit de ces ouvertures. Certaines cages ont dû être équipées avec des levées d'armatures en fibres de verre, afin de garantir leur bonne mise en place sur toute leur hauteur tout en assurant ainsi l'absence totale d'armatures métalliques aux endroits concernés (voir la jonction entre les deux types de cages sur la photo 8).

■ SUIVI ENVIRONNEMENTAL

Pour l'ensemble du projet TIMA 1, le SIAAP a choisi de confier à un bureau spécialisé une étude de l'incidence des travaux d'excavation sur les ouvrages environnants, qui débouchera sur la validation des méthodes d'exécution, sur l'identification des zones à instrumenter en surface et sur les procédés de suivi environnemental tout au long du chantier.

D'autre part le SIAAP a prévu, autour de l'emprise principale et au droit des zones urbanisées tra-



Photo 7
Vue d'ensemble du chantier pendant le poste de nuit, avec les barges à déblais en attente sous la centrale de recyclage

General view of the project during the night shift, with the excavation barges waiting under the central recycling unit



Photo 8
Vue de la zone de recouvrement entre les armatures métalliques et celles en fibres de verre

View of the overlap zone between the steel reinforcements and glass fibre reinforcements

versées par le tunnelier, un dispositif de suivi topographique automatisé des ouvrages (Pont National, quai) qui permettra de localiser et quantifier en temps réel toute déformation ponctuelle.

Concernant les travaux de parois moulées, bien que le choix de la Rotoforeuse limite de façon considérable le risque d'impact négatif sur l'environnement, une structure de suivi des déformations des ouvrages mitoyens a malgré tout été mise en place, avec pose de cibles et relevés périodiques des déformations.

■ PRINCIPALES DIFFICULTÉS RENCONTRÉES

Comme cela a déjà été signalé ci-dessus, une des plus grosses difficultés du chantier résidait dans la faible emprise au sol disponible pour les équipes

Photo 9
La pointe d'un pieu
préfabriqué en béton
rencontré lors du forage
d'un panneau

*The tip of a prefabricated
concrete pile
encountered
when drilling a panel*



► de Spie fondations, à la fois pour s'installer et pour évoluer entre les aires de travail. Ici encore, l'encadrement du chantier a su faire preuve d'ingéniosité et de sens de l'organisation pour permettre aux acteurs d'œuvrer dans un environnement sécurisé où chaque chose a pu trouver sa place. Autre difficulté, liée aux activités antérieures des hommes au droit du site, la rencontre, lors de la réalisation des murettes-guides et lors du forage de certains panneaux, d'obstacles non naturels tels que d'anciennes galeries désaffectées ou des pieux de fondations en bois et en béton armé (ancien appontement), comme l'élément de pieu visible sur la photo 9. Pour les obstacles rencontrés lors de la réalisation des murettes-guides, il a été nécessaire de purger les zones concernées et de remblayer ensuite les fouilles avec de la gravement, avant de reprendre la construction des murettes. Pour les obstacles rencontrés lors du forage des parois moulées, il a fallu utiliser la benne à câbles pour extraire les éléments de pieux, ce qui a ralenti l'avancement de l'atelier de forage. Enfin, et cela a certainement été la plus grosse difficulté sur ce chantier, Spie fondations a dû faire face à la présence de terrains argileux (fausses glaises et argiles plastiques), intercalés entre des

terrains plus compacts à très compacts, dont la découpe a nécessité l'utilisation de dents spéciales sur les tambours fraiseurs. En effet, pour les panneaux primaires forés en pleine terre, les dents ont été choisies de telle sorte qu'elles puissent découper à la fois des terrains de consistance molle et des terrains très compacts comme les marnocalcaires. Par contre, pour les panneaux secondaires, Spie fondations a utilisé deux types d'appareils de forage :

- ◆ une benne à câbles spécialement fabriquée dans ses ateliers, de 1,80 m de largeur, dont le rôle est de forer en pleine terre, entre deux panneaux primaires, et sur la hauteur des argiles et terrains meubles ;

- ◆ la Rotoforeuse pour remordre le béton d'extrémité des deux panneaux primaires après le passage de la benne spéciale, puis terminer le forage dans la zone de terrain dur. Dans cette configuration, les tambours de la machine doivent être changés, les dents prévues pour la découpe de l'argile ne pouvant pas forer dans le béton.

La présence de terrains argileux a également représenté une difficulté pour le recyclage de la boue bentonitique, et les premières passes de forage ont été utilisées à tester des systèmes de séparation des cuttings qu'il a fallu mettre au point *in situ*. Cela a permis de limiter les pertes de fluides et de travailler avec des boues correctement régénérées.

■ CONCLUSION

Avec une cadence moyenne de forage avoisinant 80 m²/jour ouvrable, l'avancement du chantier de parois moulées est conforme au planning prévisionnel redéfini au démarrage des travaux, pour tenir compte d'une demande de la Maîtrise d'ouvrage de prendre des mesures d'accélération destinées à ne pas retarder les travaux préparatoires au débouché du tunnelier de l'ouvrage Bièvre-Watt

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- 178 ml de murettes-guides
- 9 400 m² de parois moulées de 1,22 m d'épaisseur
- 35 panneaux de 152 à 437 m² de surface excavée
- 1 280 t d'armatures, dont 8 t en fibres de verre
- 11 470 m³ de béton
- 9 000 ml de forage pour injections
- 1 300 m³ de coulis bentonite-ciment
- 520 m³ de gel de silicate

dans le puits aval (passage à deux postes de travail au lieu d'un poste prolongé).

Le traitement d'étanchéité des fonds de fouille doit démarrer ensuite en présentant un recouvrement d'environ trois semaines avec les travaux de parois moulées, de façon à permettre, après terrassement des puits et des galeries, la mise en place, dans les meilleures conditions et dans les délais prévus, du tunnelier dont la mission sera de creuser sur 1 850 m la galerie de TIMA 1.

Mais cela sera une autre histoire...

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

SIAAP

Maître d'œuvre

SIAAP - Direction des Grands Travaux

C.S.P.S.

Apave Paris

Groupement d'entreprises

Bouygues TP (mandataire) - Campenon

Bernard TP - Razel - Spie fondations

ABSTRACT

The Masséna tunnel for TIMA. A Rotoforeuse rotary drill cuts out the ground at great depth

T. Cassier, P. Fauvet, Ch. Touboullic, J. Vernet, B. Walbron

As part of the largest underground works project currently underway, TIMA 1 tunnel for Paris drainage authority SIAAP, Spie Fondations has employed its drilling tool best suited to the environmental constraints of the site : the Rotoforeuse rotary drill.

In particular, given the vicinity of the Seine and of old, sensitive structures (a gas pipeline at approximately 3 metres' distance, the left-bank abutment of the "Pont National" bridge about ten metres away), together with the great depth to be reached by the drilling machine (55 m), it was not possible to consider any other means of excavation.

The first challenge taken up by those involved in this large-scale project is nearing successful completion, with the diaphragm wall work announced as being on schedule, to the great satisfaction of the Owner.

RESUMEN ESPAÑOL

La obra Masséna del TIMA. Una Rotoperforadora recorta el terreno a gran profundidad

T. Cassier, P. Fauvet, Ch. Touboullic, J. Vernet y B. Walbron

En el marco de la obra más importante de trabajos subterráneos actualmente en curso, el TIMA 1 para el SIAAP, Spie fondations ha puesto en aplicación su equipo de perforación más adaptado a los imperativos medioambientales del emplazamiento : la Rotoperforadora. Efectivamente, la proximidad del río Sena y de antiguas estructuras sensibles (una tubería de gas de aproximadamente 3 metros de distancia, el pilar orilla izquierda del Puente Nacional a unos diez metros), y además la gran profundidad que se trata de alcanzar por el equipo de perforación (55 m), no permitían considerar otro medio de excavación.

El primer reto en el cual se comprometieron las empresas participantes en esta operación de suma amplitud se

está logrando en la actualidad, ya que las obras de pantalla continua acaban de ser anunciados, para la entera satisfacción de la entidad contratante.

Passerelle Bercy-Tolbiac : complexes pour franchir et ingéniosité

La passerelle de Bercy-Tolbiac sur la Seine à Paris, conçue par l'architecte Dietmar Feichtinger, est un ouvrage élégant et original qui repose sur des appuis complexes réalisés par Solétanche Bachy France. Ces appuis associent les technologies de barrettes, parois moulées, parois berlinoises et tirants d'ancrage à du génie civil de précision. La structure métallique est réalisée par le groupe Eiffel - Joseph Paris.

Figure 1
Vue d'artiste
Artist's view

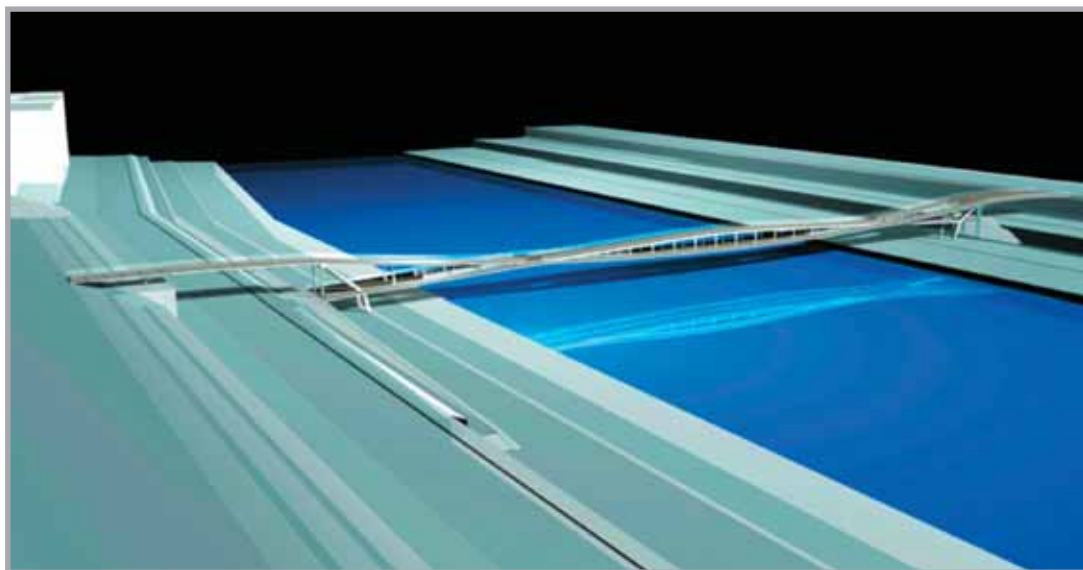
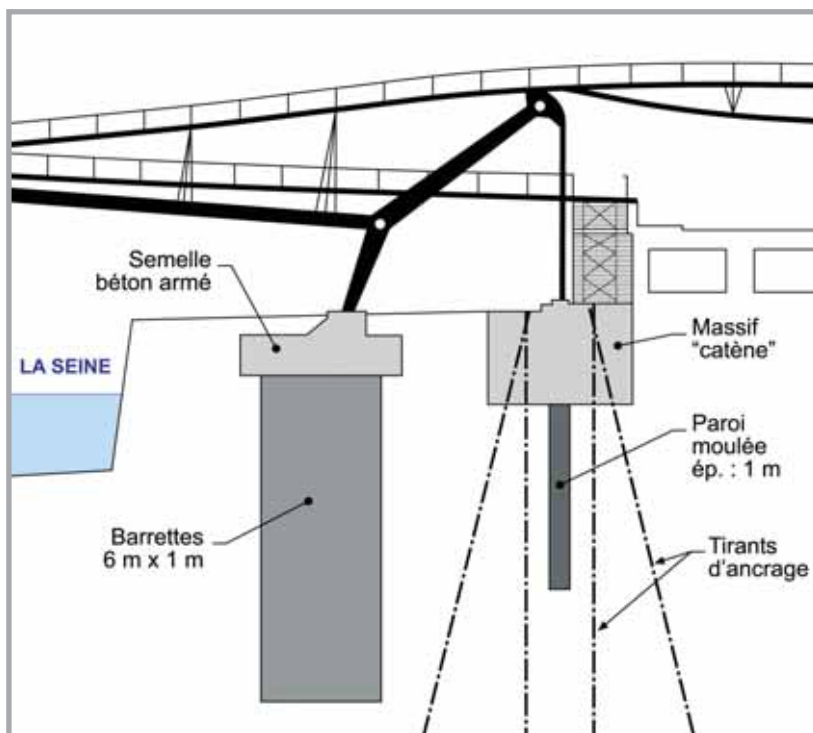


Figure 2
Coupe de principe
des fondations
en rive droite
Schematic cross
section
of the foundations
on the right bank



Implantée entre le pont de Bercy et le pont de Tolbiac, la passerelle Bercy-Tolbiac reliera en 2006 la Bibliothèque Nationale de France sur la rive gauche de la Seine et le parc de Bercy sur la rive droite. La Mairie de Paris réalise ainsi le trait d'union nécessaire entre les habitants des XII^e et XIII^e arrondissements et rapproche deux quartiers aux activités complémentaires : habitat, bureaux, université, art, culture et loisirs (figure 1). Dessinée par le cabinet d'architecture Feichtinger

Architectes installé à Paris depuis 1993, cette passerelle piétonne en acier a une longueur totale de 304 m dont une portée libre de 190 m. Sa largeur maximum est de 12 m. La travée centrale franchit le fleuve tandis que les travées latérales franchissent, en plus, les voies à grande circulation qui le bordent : la voie express en rive droite et le quai François Mauriac en rive gauche. Solétanche Bachy France a réalisé, entre septembre 2004 et avril 2005 les deux appuis en rive, comprenant les travaux de fondations spéciales et de génie civil qui font l'objet de cet article.

■ PRINCIPE DES FONDATIONS

La structure de la passerelle est composée de deux éléments synergiques : un arc très élancé et une suspente caténaire tendue. Ses courbes sont associées à trois tabliers parallèles, avec platelage en chêne, l'un s'élevant au centre avec l'arc, les deux autres, de part et d'autre, suivant la cambrure des caténaïres.

Ce parti induit sur les deux appuis des efforts complexes conduisant à une conception qui tranche avec celle des culées de pont traditionnelles.

La figure 2 montre la coupe de principe en rive droite. On y voit la béquille coudée, en forme de boomerang, en extrémité de la portée libre, qui s'appuie en pied sur le massif de fondation et dont l'extrémité haute renvoie, vers le bas, la traction des suspentes caténaïres. Le schéma 3D sur la figure 3 donne des boomerangs une représentation très parlante.

des fondations la Seine avec élégance

Bruno Clerc

DIRECTEUR DE PROJET
Solétanche Bachy France



Dietmar Feichtinger

ARCHITECTE



Photo 1
Pose des "marteaux" du massif "catène" en rive gauche

Installing "hammers" for the catena soil mass on the left bank

Le massif de fondation de chaque appui est constitué de quatre barrettes de 1 m d'épaisseur, de 6 m de long dans le sens de l'axe du pont, ancrées dans le substratum calcaire, et liaisons en tête par une forte semelle.

Les efforts de traction dans les caténaires sont renvoyés verticalement par la béquille et sont repris par les massifs "catènes" sur chaque rive. Chaque massif est ancré par 16 tirants précontraints de 260 t scellés dans le substratum calcaire. Le massif s'appuie sur deux éléments de paroi moulée de 7 m de long, eux-mêmes ancrés dans le substratum calcaire, supportant le poids propre du massif ainsi que l'effort de précontrainte des tirants avant qu'il ne soit compensé par la traction ascendante provenant des suspentes.

La traction des suspentes est transmise aux massifs "catènes" par des pièces métalliques mécano-soudées appelées "marteaux", d'un poids unitaire de 13 t, qui sont placées dans des logements en creux réservés dans les massifs "catènes", avec de très strictes tolérances de positionnement (photo 1).

De plus, en prévision d'un aménagement futur du quai rive gauche, est réalisée une paroi moulée à contreforts qui participera ultérieurement à la créa-



Figure 3
Schéma de la structure métallique montrant les "boomerangs" en bout

Diagram of the steel structure showing the "boomerangs" at the end

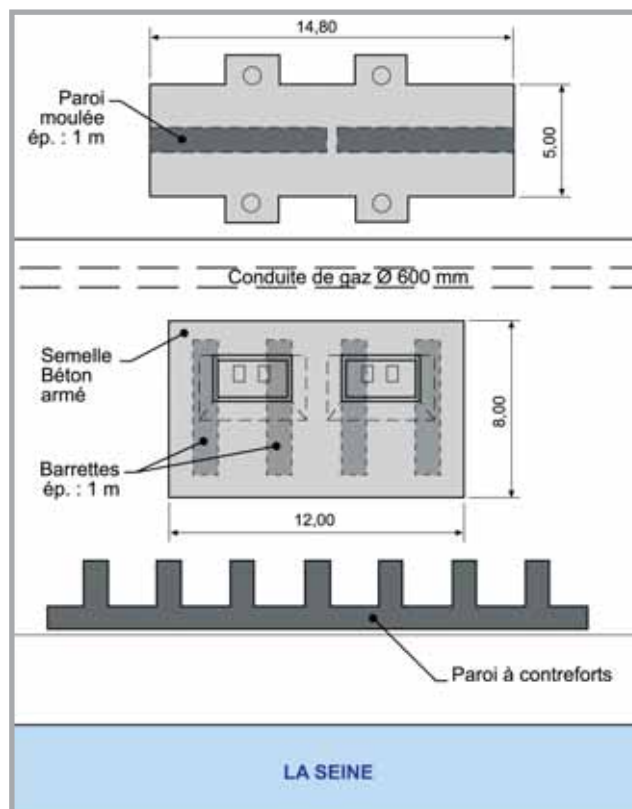


Figure 4
Vue en plan des fondations en rive gauche

Plan view of the foundations on the left bank

tion d'une rampe pour la mise à l'eau des bateaux à la Seine (figure 4).

■ TRAVAUX DE FONDATIONS SPÉCIALES ET DE GÉNIE CIVIL

Solétanche Bachy France, titulaire du lot "Fondations et génie civil" a réalisé un ensemble de travaux comprenant le repérage et la déviation des réseaux, les fondations par barrettes et parois mou-

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Paroi moulée : 1 800 m³, 150 t d'armatures
- Terrassement : 2 500 m³
- Remblais : 1 500 m³
- Béton armé pour massifs : 730 m³, 125 t d'armatures
- Paroi berlinoise : 70 HEB 160 de 8 m, 70 m² de béton projeté, 24 clous
- Tirants en service : 32 u 19 T15 de 260 t précontraints, avec cellule de contrôle de tension
- Tirants en réserve : 8 u
- Tirants d'essai : 4 u

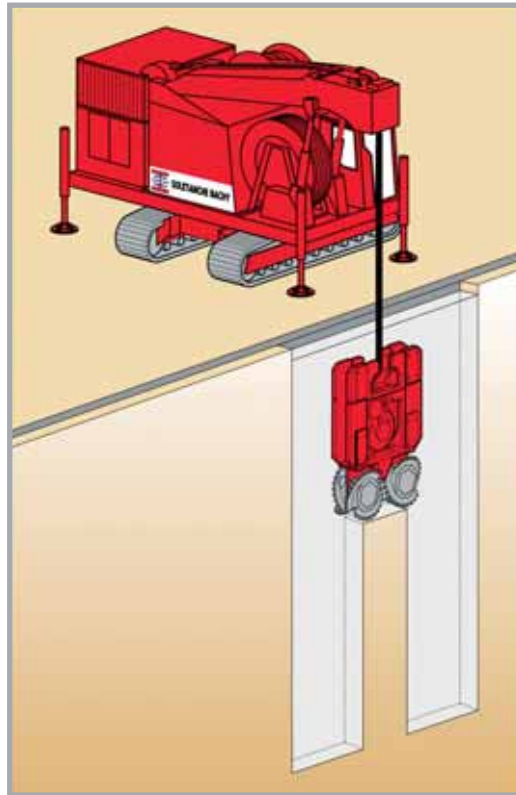


Figure 5
Hydrofraise HC03
HC03 hydro-cutter



Photo 4
Ferrailage du massif "catène" en rive droite, les tubes de couleur verte sont les réservations pour les tirants

Reinforcement of the catena soil mass on the right bank; the green-coloured tubes are the grout pockets for the tension members

Photo 2
Vue des installations pour l'exécution des parois moulées et des barrettes

View of the facilities for construction of diaphragm walls and barrettes



Photo 3
Fouille du massif "catène" en rive gauche, protégée par une paroi berlinoise

Excavation of the catena soil mass on the left bank, protected by a Berlin-type retaining wall



lées, les confortements provisoires en paroi berlinoise, les tirants d'ancrage, les massifs d'appuis en béton armé, la reconstruction d'un mur quai et enfin la remise en état des quais.

Le sol est constitué de remblais sur 4 à 5 m, contenant des obstacles divers, d'alluvions modernes sur 1 m, d'alluvions anciennes sur 3 à 4 m, et enfin du calcaire grossier sur environ 16 m d'épaisseur, formation dans laquelle sont ancrés les barrettes, les parois et les tirants définitifs.

Des sujétions particulières doivent être prises en compte pour l'exécution : des murs de quai en maçonnerie pour lesquels il n'est pas toléré plus de 3 mm de déplacement, ainsi qu'une conduite de transport de gaz de 600 mm en rive gauche qui coupe en deux le chantier.

Aussi, pour garantir l'absence de vibration et la précision lors du forage des fondations, le cahier des charges impose-t-il que les fondations soient réalisées avec un atelier hydrofraise. Solétanche Bachy France a mis en œuvre une hydrofraise HC03 (hydrofraise "latine") (figure 5) dont le gabarit réduit facilite le transfert d'une rive à l'autre. Cet atelier est servi par une centrale à boue de 450 m³/h (photo 2). Les manutentions sont assurées par une grue Liebherr 841.

Le massif dit "catène" recevant les tirants est complexe (photo 3), avec une hauteur de 5 m et sa forme en creux au niveau des pièces de liaison. Sa conception a été confiée au bureau d'études SO-



Photo 5
Dispositif pour les essais de tension sur les tirants
System for tension tests on the tension members

GREAH Best. L'exécution est réalisée par levées de 1 m en utilisant des coffrages manutentionnés à la main, en raison de l'encombrement de la fouille par les butons des berlinoises. Il s'agit d'un ouvrage de haute précision dont tous les points fonctionnels font l'objet d'une implantation par les soins d'un géomètre, et notamment les réservations pour les tirants visibles sur la photo 4.

Les forages pour les tirants sont exécutés en diamètre 200 mm, sous boue bentonitique, à travers ces réservations dans le génie civil. Les tirants définitifs sont constitués de 19 T15 pour une traction nominale de 260 t.

Chaque tête de tirant est équipée d'une cellule de contrôle de tension, nécessaire pendant la phase de montage de la structure métallique et ensuite pendant toute la vie de l'ouvrage.

Pour la sécurité, quatre "tirants de réserve" sont réalisés sur chaque massif, constitués de tubes métalliques scellés au terrain par injection, dans lesquels pourront être ultérieurement scellés des torons au cas où une défaillance serait constatée sur les tirants en service.

Deux tirants d'essai sont en plus réalisés pour chaque massif "catène" (photo 5).

Les parois moulées sur lesquelles reposent les massifs "catènes" sont instrumentées par des cellules à corde vibrante, permettant également leur auscultation permanente.

Toutes les précautions sont donc prises pour que ces appuis hors du commun soient conçus et exécutés avec toutes les garanties de qualité et de fiabilité.

Les travaux avec l'hydrofraise ont été réalisés en deux semaines sur la rive gauche et en trois semaines sur la rive droite (qui comportait une paroi moulée en plus), avec une semaine de transfert du matériel d'une rive à l'autre.

Les conditions de respect de l'environnement, particulièrement draconiennes, ont été parfaitement respectées et pas une particule de bentonite n'est venue se déverser dans les eaux de la Seine.

ABSTRACT

Bercy-Tolbiac foot bridge : complex foundations to cross the Seine elegantly and ingeniously

Br. Clerc, D. Feichtinger

The Bercy-Tolbiac foot bridge over the Seine in Paris, designed by the architect Dietmar Feichtinger, is an elegant and original structure resting on complex supports built by Solétanche Bachy France. These supports combine the barrette, diaphragm wall, Berlin retaining wall and anchoring tension member technologies with precision civil engineering. The steel structure is constructed by the Eiffel - Joseph Paris consortium.

RESUMEN ESPAÑOL

Pasarela Bercy-Tolbiac : cimentaciones complejas para salvar el río Sena con elegancia e ingeniosidad

Br. Clerc y D. Feichtinger

La pasarela de Bercy-Tolbiac sobre el río Sena en Paris, diseñada por el arquitecto Dietmar Feichtinger, constituye una estructura elegante y original que toma apoyo sobre diversos estribos complejo ejecutados por Solétanche Bachy France. Estos estribos combinan las tecnologías de presillas, pantalla continua, pantalla de unión entre pilares y tirantes de anclaje con la ingeniería civil de precisión. La estructura metálica se ha realizado por parte de la agrupación Eiffel - Joseph Paris.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

Mairie de Paris

Architecte mandataire

Feichtinger Architectes

Bureau d'études structure

RFR

Bureau d'études fondations

SEPIA

Coordonnateur général

Comobat

Coordonnateur sécurité

Veritas

Lot structure métallique

Groupement Eiffel - Joseph Paris

Lot fondations - génie civil

Solétanche Bachy France

Stabilisation du "Grand

La partie sud-ouest du centre commercial "Grand Littoral" construit en 1996 au Nord de Marseille a subi d'importants désordres de structure provoqués par l'instabilité des remblais qui forment une partie de l'assise. Les travaux de confortement définitif, d'une ampleur et d'une complexité inhabituelles, ont été confiés par Lesseps Promotion à Solétanche Bachy France en 2002. Un système de pieux et de micropieux a été réalisé pour limiter le fluage des remblais sur lesquels est implanté le complexe et asséoir les nouvelles fondations sur le substratum stable à grande profondeur.

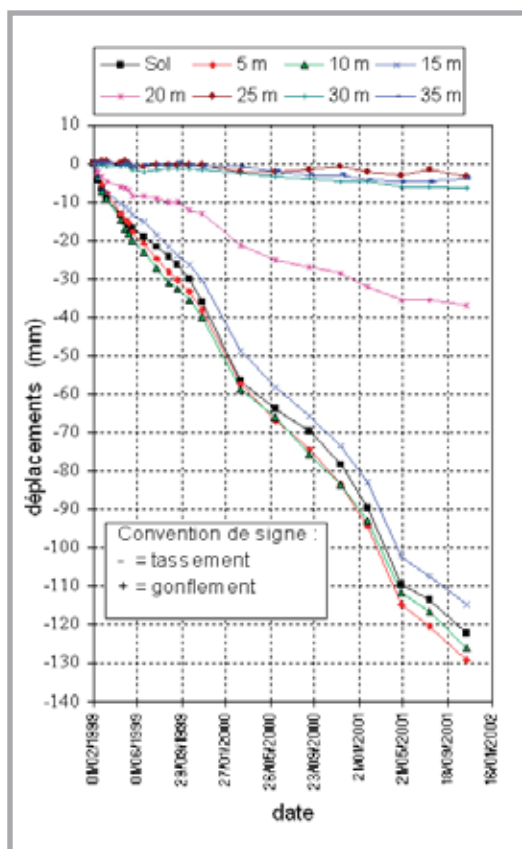


Figure 1
Tassements observés
en fonction de la profondeur
et du temps

*Subsidence observed as a function
of depth and time*

D'une surface totale de 140000 m², le centre commercial "Grand Littoral", situé à Saint-André, à quelques kilomètres du cœur de Marseille, peut être considéré comme l'un des plus grands d'Europe.

Ouvert au public en 1996, il a été bâti sur une plate-forme principalement constituée de remblais non stabilisés provenant essentiellement de stériles issus des fabriques de tuiles et de briques installées sur le site.

Peu de temps après son inauguration, le centre a connu des problèmes de structures et les premiers sinistres sont apparus. Si l'expertise est encore en cours, il semble que des changements de caractéristiques de remblais, en présence d'eau, soient à l'origine de ces désordres.

D'impressionnantes fissures sont apparues sur les murs et aux plafonds des magasins de la partie Sud, conduisant à la fermeture pure et simple des plus touchés afin d'assurer la sécurité des personnes. Une première campagne de consolidation du sous-sol à l'aide de micropieux a ainsi dû être lancée dès l'année 2000. Cette dernière s'étant révélée insuffisante pour contrôler les phénomènes, une seconde, portant sur une centaine de mètres en partant de l'extrémité Sud des bâtiments, a démarré fin décembre 2002, avec un délai d'exécution de 22 mois.

Les désordres constatés (tassements importants, mouvements horizontaux ou autres décompressions et défauts de portance) ont conduit à élaborer un projet de confortement définitif répondant aux objectifs suivants :

- ◆ les tassements affectant la structure ;
- ◆ offrir un système de fondation pérenne :
 - limitant les frottements négatifs,
 - acceptant des mouvements horizontaux modérés sans induire d'efforts parasites dans la structure ;
- ◆ ne pas entraîner une accélération de la déstructuration des terrains lors des travaux.

LES ÉTUDES

Données géologiques et géotechniques

Le centre commercial est construit sur une ancienne carrière d'argile. Avant la construction du centre commercial, le site était recouvert par des couches de stériles des tuileries et briqueteries, sur une épaisseur atteignant 50 m. Il y avait aussi de très grands trous dont la base

se situait à 40 NGF alors que le niveau actuel du centre commercial est à 109 NGF.

En fonction de la topographie du site avant construction, plusieurs types de fondation ont été prévus :

- ◆ dans la partie centrale où il reste des argiles et des marnes très raides du stampien non remaniées : fondations superficielles ;

- ◆ dans la partie Est, la carrière a été remplie avec des argiles, des marnes et des sables provenant du site et compactés avec soin. Pour accélérer la consolidation des remblais sous leur propre poids, des couches drainantes ont été disposées tous les 4 m. Le parking au-dessus de cette zone est fondé sur semelles superficielles. Comme un tassement résiduel était attendu, un dispositif de vérinage a été mis en place pour remonter la structure et compenser les tassements différentiels ;

- ◆ dans la partie Ouest qui fait l'objet de cet article, le niveau initial des terrains avant l'exploitation de la carrière se situait 10 à 20 m plus haut que le niveau final actuel du centre. Le poids du bâtiment étant inférieur au poids des matériaux extraits, il a été décidé d'utiliser des fondations superficielles à l'exception d'une petite zone à l'angle ouest prévue fondée sur pieux ;

Dans la partie sud-ouest, de nombreux mouvements verticaux et horizontaux ont été observés dès le début des travaux.

Mouvements

Les mouvements apparus dès l'origine dans la partie Sud-Ouest avaient conduit à reprendre les semelles de cette partie d'ouvrage par des micropieux de 15 à 19 m de profondeur.

En novembre 1999 on relevait déjà plus de 180 mm de tassement différentiel. Une instrumentation ultérieure du terrain a montré que le siège principal des tassements se situait entre 15 m et 25 m (figure 1). Les premiers micropieux arrêtés à 15 m ne pouvaient donc être efficaces.

Il a été observé que les mouvements horizontaux se produisent sur les 20 premiers mètres avec une amplitude atteignant 70 mm, et se combinent avec des tassements allant jusqu'à 200 mm.

Projet de confortement

L'étude a montré qu'il était possible de concevoir des micropieux pour soutenir la structure, à condition que ces micropieux ne soient pas exposés à des mouvements horizontaux.

Littoral" à Marseille

Emmanuel Robert
DIRECTEUR DE TRAVAUX
Solétanche Bachy France



Jean-Michel



Rescoussier
DIRECTEUR RÉGION
MÉDITERRANÉE
Arcadis

Les différentes zones à reprendre en sous-œuvre sont présentées sur la figure 2.

Stabilisation des terrains par des inclusions solides

Les mouvements horizontaux et verticaux ont été étudiés d'une part à l'aide d'un programme aux éléments finis en 2D, dans lequel ont été introduits les modules des différents horizons (marne en place, remblais non remaniés, remblais déstructurés), et d'autre part en 3D (laboratoire de Grenoble). Pour prévenir un glissement et réduire les déplacements horizontaux dont le calcul a montré qu'ils pouvaient atteindre 200 mm, il a été imaginé un confortement à l'aide d'inclusions par pieux forés de 800 mm de diamètre.

Une modélisation permettant d'étudier la sensibilité aux différents paramètres a conduit à des pieux de 55 m ancrés dans le substratum, capables de limiter les mouvements horizontaux des terrains instables à un maximum de 50 mm.

Ainsi, 260 inclusions solides de 55 m de profondeur, ferrillées toute hauteur, sont-elles disposées suivant une maille de 3 m x 3 m autour de la pointe Sud du bâtiment. Ces inclusions traversent les remblais anciens sur les 47 premiers mètres et sont ancrées dans le substratum marneux.

Reprise en sous-œuvre des fondations par micropieux

Les mouvements horizontaux étant limités à 50 mm grâce aux inclusions solides, il est alors possible de concevoir des micropieux. Ceux-ci doivent être protégés contre les efforts horizontaux dus au fluage des remblais et contre le frottement négatif dû à leur tassement.

Charges verticales

L'utilisation de tubes d'armature de 168 mm de diamètre extérieur et d'épaisseur allant de 10 mm à 25 mm permet de reprendre des charges verticales comprises entre 100 t et 300 t. Jusqu'à 50 m (profondeur moyenne du substratum), les tubes sont recouverts d'un enduit bitumineux pour limiter les frottements négatifs (un frottement résiduel de 15 kPa a été mesuré lors d'essais de chargement). D'autre part, pour absorber le raccourcissement élastique dû à une longueur libre de micropieux de 50 m, des groupes de deux vérins plats sont placés en partie haute des micropieux.

Le deuxième vérin a une fonction de vérin de secours et permet aussi de compenser des tassements ultérieurs.

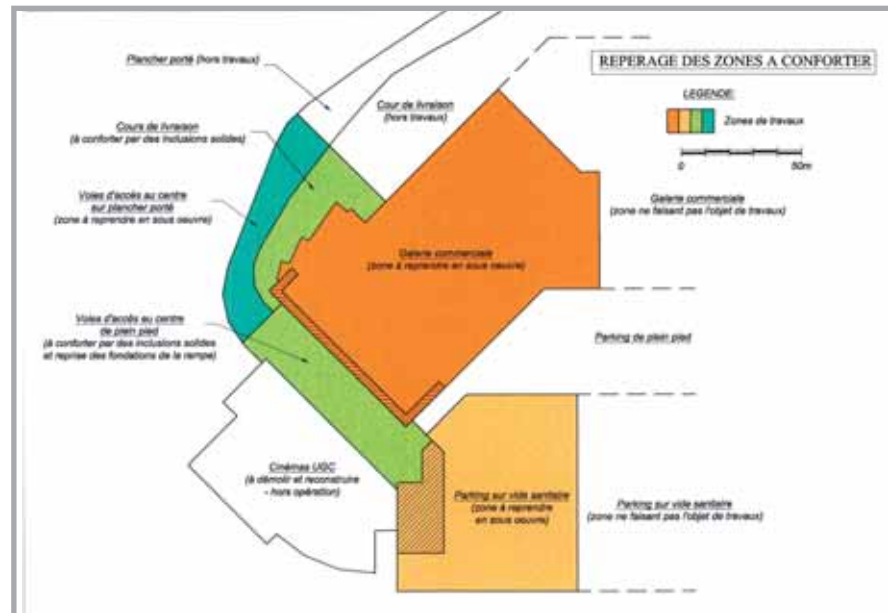


Figure 2
Zones à conforter
Areas to be consolidated

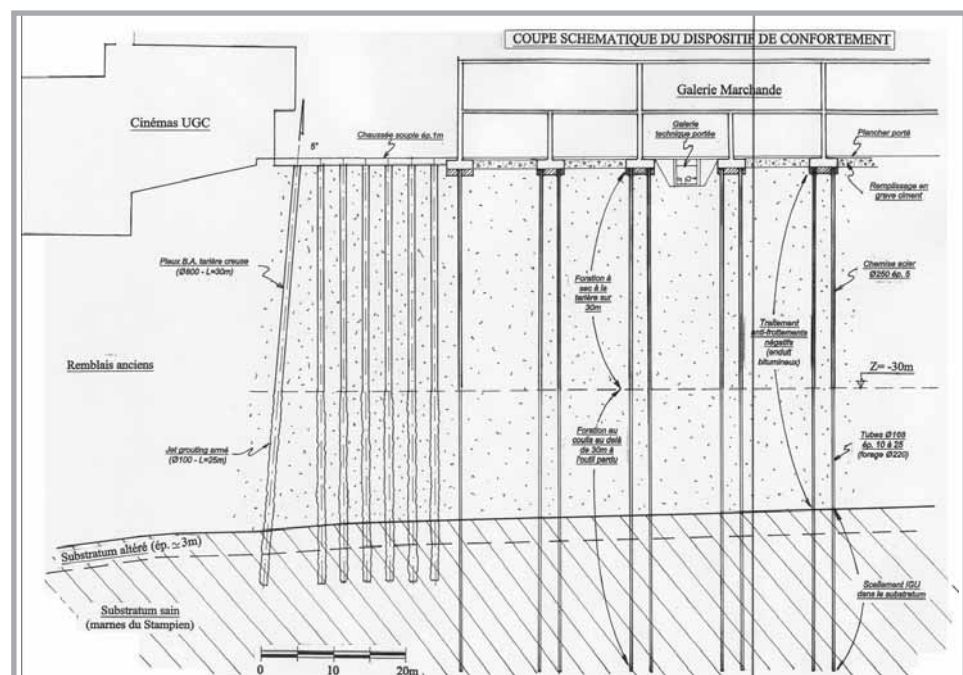


Figure 3
Coupe schématique du confortement
Schematic cross section of consolidation

Mouvements horizontaux

Pour s'affranchir des contraintes résultant des mouvements horizontaux du terrain, les micropieux en sont désolidarisés sur les 4 m supérieurs, en ménageant un espace annulaire libre de 50 mm.

LE PROJET

Le principe du projet est défini sur la figure 3.



LES TRAVAUX

Les inclusions solides

Méthodologie

Entre 0 et 30 m

Les pieux en béton armé de diamètre 800 mm sont réalisés à la tarière creuse. En pratique le forage est mené jusqu'à 14 m à la tarière de diamètre 1 000 mm, sans fluide de forage. Ce trou est chemisé par un tube diamètre 963 mm. La perforation reprend en diamètre 920 mm jusqu'à 30 m. Un second tube de diamètre de 863 mm est alors télescopé à l'intérieur du premier et ancré en pied à 30 m.

De 30 à 55 m

Les trente premiers mètres étant ainsi entièrement tubés pour protéger les couches sensibles du fluide de forage, la perforation en diamètre 800 mm s'effectue jusqu'à la fiche demandée.

Les contraintes d'exécution

On peut voir l'allure du chantier d'exécution des inclusions sur la photo 1. Les travaux doivent s'adapter aux contraintes suivantes :

- ◆ emprises en demi-chaussées afin de maintenir l'accès existant au centre commercial ;
- ◆ livraisons limitées à des tranches horaires strictes (de 6 à 8 heures le matin) ;
- ◆ maintien de la voie pompiers ;
- ◆ réalisation de certaines inclusions au droit d'un plancher porté ne pouvant supporter les engins (nécessitant la mise en place d'un platelage fondé sur micropieux) ;
- ◆ prise en compte des clous et tirants réalisés lors des opérations de confortements précédentes et dont la localisation est incertaine (notamment suite aux différents tassements et mouvements) ;
- ◆ rencontre d'obstacles ou de vides tels que les anciens casiers à tuiles qui servaient au drainage de la carrière.

Deux bétonnages par jour ont pu être réalisés malgré l'extrême exigüité des aires de travail, grâce notamment à l'utilisation d'un enrouleur de bétonnage, encore appelé "escargot" (photo 2), afin de pouvoir descendre jusqu'à 55 m de profondeur.

Les micropieux

Les tubes d'armature des micropieux

Afin de rendre stable et pérenne le dispositif de fondation de la partie sinistrée de l'ouvrage, il est nécessaire de mettre en place des micropieux très longs (jusqu'à 82 m de profondeur) ancrés dans le substratum marneux, en employant des tubes à très forte inertie pour résister au flambement :

- ◆ diamètres 168,3 mm et 177,8 mm ;
- ◆ épaisseur comprise entre 15 et 30 mm.

Photo 1
Vue du chantier
réalisant les inclusions

*View of the site producing
inclusions*



Photo 2
Bétonnage
à l'"escargot"

*Concreting
with the "snail"*



Photo 3
Forage
sous hauteur
limitée

*Boring under a limited
clearance*



LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- 260 inclusions (pieux) de 55 m de profondeur, soit 12 000 m³ de béton et 900 t d'acier
- 511 micropieux, comprenant 15 000 m de chemise, 2 700 t de tube d'armature et 800 vérins

Ces micropieux sont sollicités en appui simple sous de nouvelles semelles, après avoir désolidarisé les anciennes fondations des massifs.

Les 2700 t représentant plus de 38000 m de tubes sans soudure se répartissent en deux grandes catégories :

- ◆ 30000 m en MPV 80 ;
- ◆ 8000 m en MPV 110 (traitement thermique par trempe et revenu).

Cette impressionnante quantité équivaut à plus de 10 % des besoins annuels français de tubes pour micropieux. La variété des tubes étant importante et chaque tube étant renforcé dans sa partie supérieure, il a fallu confectionner tous types de manchons afin de raccorder des tubes d'épaisseur et de section différentes.

La méthodologie

Préparation des appuis

Certains travaux se sont déroulés sous des commerces encore en activité et le cahier des charges du chantier imposait alors de limiter les interventions hors des heures d'ouverture du centre commercial.

Une fois tous les équipements – tels qu'escalators et ascenseurs – enlevés, il a été procédé aux démolitions nécessaires pour abaisser le niveau de la plate-forme d'environ un mètre et de mettre à jour les massifs de fondation. A ce stade, se sont également déroulées les déviations des réseaux (sprinkler, eau, électricité, ventilation).

Cette préparation accomplie, on a procédé aux carottages en diamètre 360 mm. A certains emplacements, il a fallu carotter jusqu'à 7 m de béton ; cette épaisseur surprenante correspond vraisemblablement à des purges remblayées avec du béton lors de la construction.

Chemisages

Un procédé de perforation à sec a été utilisé, comme pour les inclusions. De manière à éviter l'introduction d'eau sur les 30 premiers mètres, ceux-ci sont perforés à la tarière de diamètre 300 mm (photo 3).

Une fois ce forage terminé et la tarière ressortie, le chemisage est alors mis en place : le diamètre 250 mm en partie courante est élargi à 280 mm sur les six premiers mètres.

Micropieux

Le forage est alors poursuivi en diamètre 220 mm au coulis léger, avec un outil perdu. Les paramètres de forage sont enregistrés pour détecter de manière précise le toit du substratum (photo 4). La profondeur requise étant atteinte, le tube d'armature est scellé en substituant un coulis de ciment de scellement, fortement dosé, au coulis de forage. Les importants volumes de coulis à produire et à stocker nécessitent une centrale élaborée munie

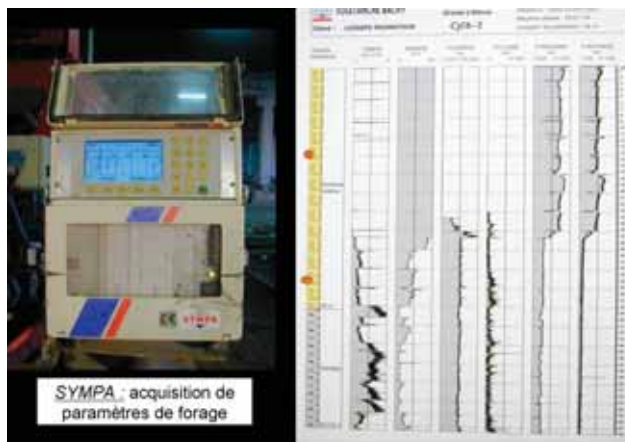


Photo 4
Enregistrement des paramètres de forage
Recording boring parameters



Photo 5
Centrale de préparation des coulis
Grout preparation plant



Photo 6
Pose des vérins en tête des micropieux
Placing jacks on the heads of the micropiles

de nombreux bacs de décantation (photo 5). Les tubes sont équipés d'un dispositif antifriction à base de bitume sur toute la hauteur correspondant aux remblais.

Têtes de micropieux

Juste après le scellement des micropieux on procède aux opérations suivantes :

- ◆ lavage de l'espace annulaire entre le tube d'armature et la chemise sur 6 m ;
- ◆ calage en tête du micropieu de façon à anticiper le tassement attendu des remblais ;
- ◆ mise en place d'une platine de dimensions 500 mm x 500 mm x 80 mm en tête ;
- ◆ remplissage par de la graisse de tout l'espace annulaire autour du micropieu sur les 6 mètres supérieurs ;
- ◆ mise en place des doubles vérins (photo 6) surmontés d'une plaque de fond de coffrage afin de laisser ensuite le champ libre aux équipes de génie civil pour la réalisation des nouvelles semelles.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

- Maître d'ouvrage*
Lesseps Promotion
- Maître d'œuvre lot 1*
Arcadis
- Maître d'œuvre lot 2*
BET Garnier
- Maître d'œuvre lot 3*
Spie Infra
- Lot 1 Fondations*
Solétanche Bachy France
- Lot 2 Gros-œuvre*
Léon Grosse
- Lot 3 VRD*
Guigues
- AMO/Economiste/OPC*
Gecamex
- Contrôle technique*
Bureau Veritas

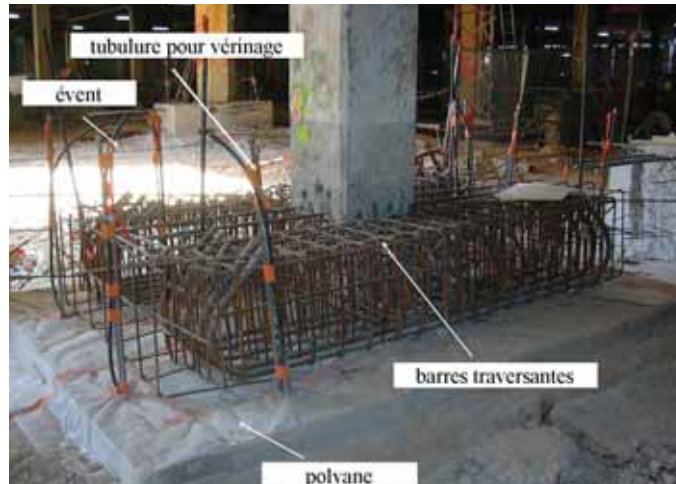


Photo 7
Ferrailage des semelles

Reinforcing the foundation slabs

Le vérinage en tête des micropieux permet d'absorber le raccourcissement élastique lors de la mise en charge. La majeure partie des micropieux fonctionne en compression sauf quelques unités dans la zone du plancher porté qui travaillent en traction parce qu'ils n'ont pu être disposés, pour des raisons d'accessibilité, de manière à travailler en compression.

Phasages

La reprise en sous-œuvre doit répondre à un phasage très précis afin d'assurer à tout moment la stabilité, et donc la reprise correcte des efforts au droit de chaque appui.

A cet effet, une fois les micropieux réalisés et les têtes confectionnées, des étaielements sont mis en place pour reprendre les descentes de charges des poteaux concernés. Cette opération s'accompagne d'un vérinage destiné à éviter le tassement de la structure lors de la démolition du pied de poteau. Le sciage de l'appui, accompagné du recépage partiel de la semelle existante, permet de déconnecter les anciennes fondations du poteau. Un nouveau massif, posé sur les vérins et broché au poteau, est alors réalisé (photo 7). Des tubulures de réservation sont incorporées aux massifs de façon à permettre les opérations futures de vérinage, les vérins ayant été rendus inaccessibles par la réalisation des semelles.

On actionne alors le premier vérin de chaque micropieu, ce qui permet ensuite de déposer les étaielements des poteaux. Ces opérations, qui valident en quelque sorte la bonne exécution des micropieux, se sont toutes déroulées de manière totalement satisfaisante.

CONCLUSION

Il s'agit bien d'un chantier hors norme, à la fois par les quantités totales, les dimensions des pieux et micropieux réalisés, la configuration extrêmement contraignante du site et les sévères sujétions d'exécution qui ont conduit à fabriquer des équipements spécifiques. Le résultat est un succès confirmé par les résultats de l'ensemble des essais de chargement (photo 8).

Photo 8
Essai de chargement de micropieu

Micropile loading test



ABSTRACT

Stabilisation of the "Grand Littoral" in Marseilles

E. Robert, J.-M. Rescoussier

The southwest part of the "Grand Littoral" shopping centre built north of Marseilles in 1996 has sustained major structural damage caused by the instability of the backfills forming part of the foundation. The final consolidation work, of uncustomary scale and complexity, was entrusted by Lesseps Promotion to Solétanche Bachy France in 2002. A system of piles and micropiles was produced to limit creep of the backfills on which the complex is located and to support the new foundations on the stable substratum at great depth.

RESUMEN ESPAÑOL

Estabilización del "Grand Littoral" en Marsella

E. Robert y J.-M. Rescoussier

La parte suroeste del centro comercial "Grand Littoral" que se construyó en 1996 al Norte de Marsella ha sufrido importantes perturbaciones de estructura derivadas de la inestabilidad de los rellenos que forman una parte de la base. Las obras de consolidación definitiva, cuya amplitud y complejidad presentan un carácter inhabitual, fueron encargadas por Lesseps Promotion a la empresa Solétanche Bachy France en 2002. Un sistema de pilotes y de micropilotes se ha ejecutado para limitar la deformación de los rellenos sobre los cuales se ha implantado el conjunto y ejecutar las nuevas cimentaciones en el basamento estable situado a gran profundidad.

Rénovation et extension de Pasajes (Espagne)

Pieux en site maritime

Photo 1
Réalisation des pieux
depuis une barge
*Construction of piles
from a barge*



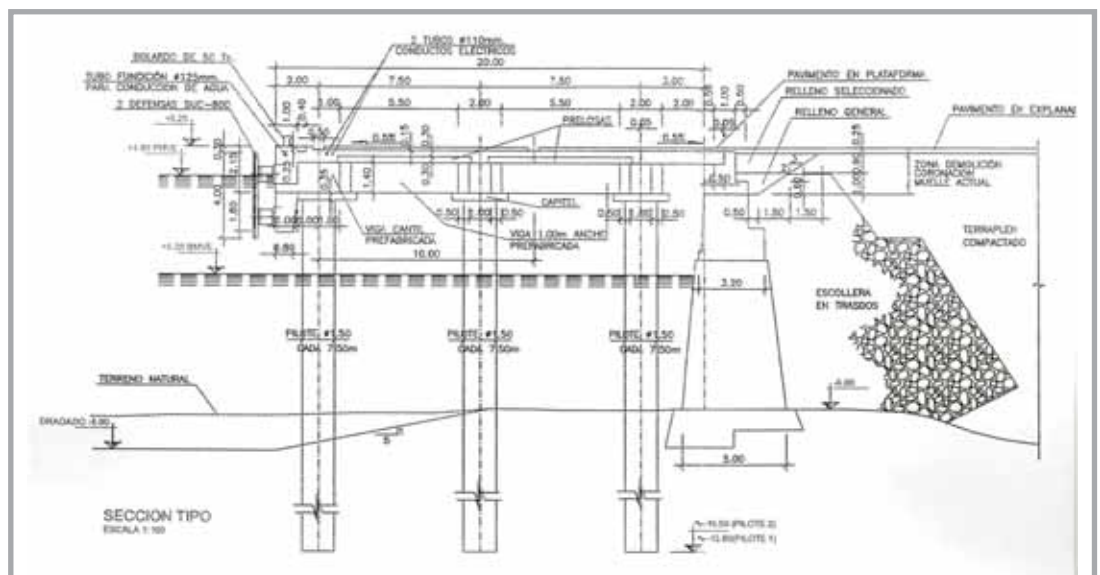
Les autorités du port de Pasajes (Pays Basque Espagnol) se sont engagées dans une opération de rénovation et d'extension des quais. Pour le quai ouest, cela se traduit par la réalisation de trois files de pilotis pour élargir le quai existant d'environ 20 m (figure 1).

Avant de rencontrer le substratum rocheux, on trouve cependant une couche de dépôts alluvionnaires et de la roche altérée, horizons impropres à la fondation superficielle de ces pilotis.

Comme les efforts à reprendre sont importants, le bureau d'études de l'opération a conclu à la nécessité de pieux de diamètre 1,50 m, ancrés de trois diamètres dans la roche saine, chemisés en tête.

La société Corsam Corviam adjudicataire du génie civil a confié à Franki la réalisation de ces pieux. Nous avons donc mobilisé une foreuse portée de type CMV 35/21, montée sur un porteur NCK 605.2B, et une Liebherr 855 qui, outre l'équipement des

Figure 1
Coupe type
du projet
*Typical cross section
of the project*



des quais du port

pieux, manipulait un vibrofonneur PTC 60 HD utilisé pour la mise en place et l'arrachage des tubes de travail (photo 1).

L'avantage de la foreuse portée était de permettre la réalisation de la première file de pieux (pourtant à 3,5 m du bord du quai existant) en laissant le matériel sur terre, donc sans subir les influences des marées ou les pertes de temps liées au déplacement de la barge, aléas qui ont été le lot des pieux des deux autres files (photo 2).

Les profondeurs des pieux se sont échelonnées entre 16 et 21 m ; ils ont été armés sur toute leur hauteur et équipés en tête d'une chemise de diamètre 150 cm d'épaisseur 4 mm.

Les difficultés ont été nombreuses : présence imprévue de ferrailles (plusieurs tonnes) au droit des pieux, qu'il a fallu purger, circonstances climatiques pas toujours optimales qui ont conduit jusqu'à des interruptions de chantier, fluctuations du toit du substratum qui ont requis de fréquentes adaptations de l'outillage, difficultés, enfin, inhérentes au travail sur barge avec les problèmes de stabilité des machines, d'oscillations de la plate-forme et d'approvisionnement des matériaux...

Malgré cela, Franki a mené à son terme ces travaux lourds et techniques (photo 3).



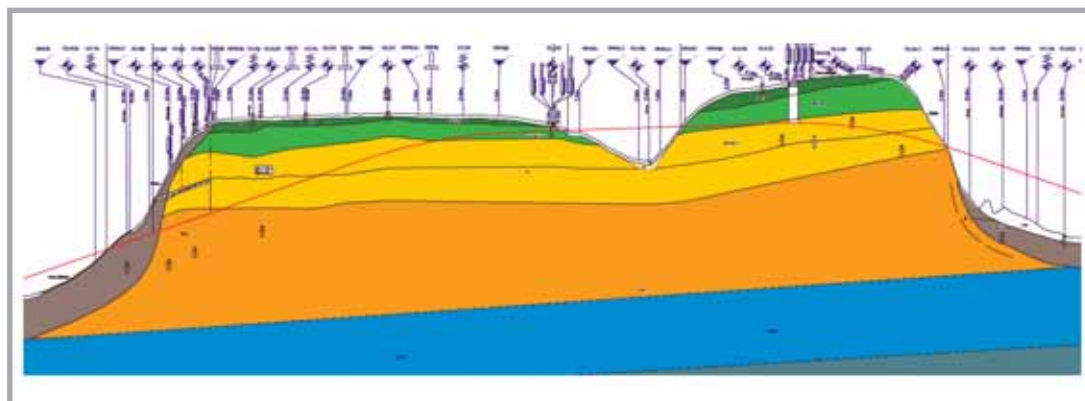
Photo 2
Réalisation des pieux
depuis le quai
*Construction of piles
from the dock*



Photo 3
Après la réalisation
des pieux, pose des éléments
préfabriqués qui porteront
le quai
*After construction of the piles,
laying of the prefabricated
elements that will carry
the dock*

La LGV Est européenne accueillera les trains français les plus rapides, dont la vitesse commerciale sera de 320 km/h. Dans l'Est parisien, la ligne doit franchir une butte témoin gypseuse, connue depuis l'antiquité romaine pour ses carrières produisant ce qui deviendra plus tard le fameux "plâtre fin de Paris". Ces formations recèlent également de karsts. Solétanche Bachy France a réalisé d'importants travaux de détection et de comblement des vides pour que soit assurée la stabilité demandée par Réseau Ferré de France.

Quand la LGV Est européenne franchit les carrières de gypse, il faut construire sur du solide



Profil géologique
Geological section

LEGENDE GEOLOGIQUE	
[Symbol]	Remblai anthropique
[Symbol]	Alluvions récentes
[Symbol]	Alluvions anciennes
[Symbol]	Alluvions résiduelles
[Symbol]	Limon des plateaux
[Symbol]	Colluvions de pente
[Symbol]	Formations de brie
[Symbol]	Argiles et marnes vertes
[Symbol]	Marnes supragypseuses
[Symbol]	Marnes de Paris
[Symbol]	Marnes d'Argenteuil
[Symbol]	Masses et marnes du gypse
[Symbol]	Calvados de St Ouen
[Symbol]	Sables de Beauchamp

Légende géologique
Geological legend

Le tracé de la LGV Est européenne, son profil, ses courbes, sa géométrie ont été définis par Réseau Ferré de France pour permettre aux trains d'atteindre une vitesse potentielle de 350 km/h. Lors de sa mise en service, en juin 2007, la LGV Est européenne sera exploitée à la vitesse commerciale de 320 km/h. Les TGV Est européens seront les trains français les plus rapides.

LES ROMAINS SONT RESPONSABLES

Le cahier des charges des entreprises est strict : aucun tassement n'est permis après la mise en service de la Ligne à Grande Vitesse. L'objectif est de stabiliser le sol.

Sur le tronçon A, le lot 11 B, long de 6,3 km, est situé en Seine-et-Marne entre l'estacade de Pomponne et la zone de raccordement sur la LGV d'interconnexion en Ile-de-France. Ce tronçon franchit sur 2,5 km une butte témoin, moins célèbre que les fameuses buttes parisiennes comme la butte Montmartre ou les buttes Chaumont, mais géologiquement comparable. Ces reliefs sont constitués par les masses et marnes du gypse, protégées de l'érosion par une couverture formée par les marnes supra-gypseuses, les argiles vertes et la formation de Brie au sommet.

Le passage de la LGV sur les masses du gypse présente un risque important vis-à-vis de sa stabilité. Ce risque est celui de l'effondrement des cavités d'origine anthropique (anciennes exploitations de gypse) ou naturelle (dissolution du gypse). Dès l'époque romaine, le sous-sol du Bassin parisien a été exploité pour en tirer différents maté-

riaux de construction. Les exploitations de gypse, la pierre à plâtre, ont constitué avec celles du calcaire grossier, les principales activités d'extraction dans le Nord et l'Est de Paris. Les qualités du gypse de la Seine-et-Marne sont à l'origine de la réputation du plâtre fin de Paris.

L'extraction était normalement conduite par la méthode des piliers tournés, avec un taux de défrêtement atteignant 75 %. Cette technique se fait selon un quadrillage plus ou moins régulier de galeries parallèles qui se croisent perpendiculairement ; cette façon conduit à laisser de place en place des piliers de masse appelés "piliers tournés". Les carrières leur donnent en général une structure ogivale ou trapézoïdale, en raison de la faible résistance et de l'altérabilité du gypse. Dans la région d'Annet-sur-Marne, traversée par la LGV, ces règles ne sont pas respectées. Les galeries sont taillées en forme de rectangle, dite "à pied droit", ce qui affaiblit considérablement le ciel des carrières. Leur effondrement et la remontée de fontis ne sont alors plus qu'une question de temps.

Le gypse est également un matériau très soluble dans l'eau. Un débit d'eau de 1 m³/h est capable de dissoudre 1,7 m³ de gypse en un an. D'une manière générale, on observe que lorsque les conditions hydrogéologiques sont invariables, le gypse est relativement intact.

Par contre, dès qu'un déséquilibre se produit, des phénomènes de dissolution très rapides surviennent. C'est ainsi que l'on peut trouver des karsts actuels et fossiles, principalement associés aux 1^{re} et 2^e masses du gypse.

Ainsi, le groupement d'entreprises titulaire du lot 11 B, a-t-il confié à Solétanche Bachy France les travaux de reconnaissance et de comblement de ces cavités.

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- 2000 forages
- 75000 m de perforation
- 60000 m³ de comblement



Perspective
d'un chantier linéaire
*Perspective view
of a linear site*

Frédéric Kissling



INGÉNIEUR TRAVAUX
Solétanche Bachy France

Dominique Facchetti



CHEF DU LOT 11B
SNCF Direction de l'Ingénierie

■ DÉTECTER LES VIDES ET LES COMBLER

La difficulté principale réside en l'absence de carte précise des carrières. Il ne s'agit pas d'opérer à l'aveuglette. On doit d'abord identifier les zones à risque élevé de présence de cavités et les délimiter, afin d'y concentrer le comblement. Une campagne de sondages carottés et destructifs, associée à une reconnaissance géophysique de la butte, ont permis à la maîtrise d'œuvre d'identifier deux zones à risques très importants. Elles représentent chacune un linéaire de voie de 600 m et sont séparées par une zone à risques importants de 1300 m. Les zones à risques très importants sont soumises à une reconnaissance systématique. La zone à risque important, quant à elle, fait tout d'abord l'objet d'une reconnaissance géophysique fine par sismique réflexion haute définition, pour déterminer la nécessité d'une reconnaissance mécanique systématique et localiser les anomalies.

Les travaux commencent au mois de novembre 2003. Solétanche Bachy France entame les forages systématiques des zones à risques très importants. La plate-forme de la future LGV est large d'environ 15 m. Celle-ci doit être préservée de toute remontée de fontis. Le cahier des charges préconise un maillage de 25 m² au droit des futures voies ferroviaires, ainsi qu'un maillage de 50 m² sous les talus, dans un cône de 30° par rapport à la verticale, afin d'endiguer toute remontée de fontis venant de part et d'autre du tracé.

Les forages sont équipés de tubes crépinés. L'analyse des enregistrements de paramètres de forages permet l'identification des cavités et l'adaptation du comblement en conséquence. En l'absence d'anomalie, le forage est simplement rebouché par un coulis de mortier (coulis de bentonite-ciment comprenant une charge de sablon). Dans le cas contraire, selon l'importance de l'anomalie, on procède soit à un comblement gravitaire au coulis de bentonite-ciment dans le cas d'une importante décompression, soit au comblement gravitaire au mortier, puis à un comblement sous pression



Forages de comblement
sur la plate-forme
et les talus

*Backfill drilling
on the subgrade
and the embankment
slopes*



Foreuse
*Drilling
machine*

au coulis de bentonite-ciment, dans le cas d'une cavité.

Grâce à une coordination stricte de la part de la maîtrise d'œuvre et de l'entreprise générale, les travaux de comblement sont planifiés de façon à minimiser leur impact sur le planning des mouvements de terres.

En 15 mois de travaux, plus de 75 km de forage et 60 000 m³ d'injection ont été réalisés. Pour maîtriser les délais de comblement, Solétanche Bachy



Centrale de fabrication des produits de comblement
Plant for production of filler products

France a mis en place une centrale de fabrication de coulis et de mortier à grande capacité spécifiquement conçue pour le chantier. Cet équipement a permis d'assurer une production allant jusqu'à 600 m³ par jour. Le coulis et le mortier ont pu être acheminés au moyen de pompes hydrauliques sur des distances allant jusqu'à 900 m.

Le chantier de comblement du lot 11 B est à tous égards un exemple de régularité et de rigueur, où la maîtrise d'œuvre, l'entreprise générale et leur sous-traitant Solétanche Bachy France ont conjugué leurs compétences et leurs efforts pour corriger l'héritage de la géologie et de l'histoire et construire sur du solide.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

Réseau Ferré de France

Maître d'œuvre

Groupement SNCF Direction de l'Ingénierie - Arcadis

Groupement d'entreprises

Roger Martin, Berthouly - Charier T, Semen TP, Rabot Dutilleul, SNCTP, Chagnaud TP

Sous-traitant

Solétanche Bachy France

Coordonnateur sécurité

Cossec

ABSTRACT

Where the East European High-Speed Train Line passes through gypsum quarries, it must be constructed on firm ground

Fr. Kissling, D. Facchetti

The East European High-Speed Train Line will receive the fastest French trains, which will run at a commercial speed of 320 km/h. In the eastern Paris region, the line must pass through a gypseous residual hill, known since the days of Ancient Rome for its quarries producing what would later become the famous "fine plaster of Paris". These formations also contain karsts. Solétanche Bachy France carried out major work for detection and filling in of voids to ensure the stability required by "Réseau Ferré de France".

RESUMEN ESPAÑOL

Cuando la LGV Este europea atraviesa las canteras de yeso, cabe construir sobre bases sólidas

Fr. Kissling y D. Facchetti

La Línea de Alta Velocidad Este europea recibirá a los trenes franceses más rápidos, cuya velocidad comercial alcanzará los 320 km/h. Por el Este de París, la línea debe atravesar un afloramiento de yeso, conocido desde la antigüedad romana por sus canteras que producen lo que pasará a transformarse en el famoso "yeso fino de París". Estas formaciones contienen también tierras de origen cárstico. Solétanche Bachy France llevó a cabo importantes trabajos de detección y de terraplenado para que esté garantizada la estabilidad solicitada por el establecimiento Réseau Ferré de France.

Evolution des techniques de surveillance des voies ferrées lors de travaux souterrains

Les travaux sous les voies ferrées ou à proximité de celles-ci soumettent ces dernières à des déformations qui doivent être parfaitement contrôlées. La SNCF notamment pose un niveau d'exigence très élevé, en rapport avec ses normes de sécurité. De récents progrès technologiques dans le domaine de la surveillance apportent une réponse appropriée qui autorise l'exécution de travaux en sous-œuvre délicats dans de strictes conditions de sécurité et sans interruption de trafic : il s'agit du système CYCLOPS® de SolData et du logiciel GEOSCOPE® développé en partenariat par SolData et l'IGN. Ces outils assurent une mesure continue de haute précision, en temps réel, transmise à distance, ainsi que la visualisation des résultats et le déclenchement d'alertes.

■ POURQUOI SURVEILLER LES VOIES PENDANT LES TRAVAUX ?

Malgré toutes les précautions prises par les entrepreneurs lorsqu'ils effectuent des travaux à proximité de voies ferrées, les risques restent trop importants pour qu'on puisse se reposer uniquement sur une bonne préparation et sur une exécution précautionneuse. Cela, aujourd'hui, ne suffit plus et il devient de pratique courante de s'équiper d'outils de surveillance qui alertent dès l'amorce de déformations anormales, et suffisamment tôt pour qu'on puisse les arrêter en faisant cesser leur cause et en se réservant le temps d'apporter des remèdes.

Les outils de surveillance des structures ont beaucoup évolué ces dernières années et les maîtres d'ouvrage ont compris la nécessité d'améliorer la sécurité des personnes et des ouvrages. Outre les accidents corporels qui sont par essence inacceptables, les sinistres ont des répercussions économiques qui peuvent être très graves : atteinte à l'image de marque, conséquences pénales, conséquences financières sous forme de frais supplémentaires, de perturbation de l'activité, de perte d'industrie, de malus sur les primes d'assurance, etc.

C'est le plus souvent le maître d'ouvrage qui impose la surveillance des structures et c'est en tout cas ainsi que pratique la SNCF, lorsque les travaux de fondation sont susceptibles de présenter un risque pour les voies et autres structures avoisinantes.

Le propos de cet article est d'informer sur les progrès qui ont été faits en matière de surveillance des voies ferrées.

■ LES PROCÉDÉS DE SURVEILLANCE TRADITIONNELS

Pendant longtemps le contrôle des tassements a été confié à des géomètres opérant par mesures ponctuelles avec des théodolites et des mires. La précision des mesures était excellente. Un inconvénient important de la méthode est que, sur voies en circulation, le relevé ne peut se faire qu'en interruption de trafic, donc le plus souvent la nuit. Cette méthode ne permet donc pas de détecter suffisamment tôt l'apparition de déformations pouvant mettre la structure en péril. Et c'est pourquoi, le plus souvent, les mesures topographiques manuelles ne permettaient principalement que de relever l'étendue et l'ampleur des déformations après l'incident.

Avec l'apparition du "laser tournant", les entreprises ont eu la possibilité de procéder à un contrôle continu. Cette technologie a d'ailleurs longtemps été préconisée. Le principe est assez simple : une borne émet un faisceau laser en rotation formant un plan horizontal, des cibles réceptrices sont positionnées sur le terrain à surveiller, au même niveau que ce plan dont elles contrôlent les variations d'altitude relative. Certains constructeurs d'appareils proposent aussi une gestion d'alerte avec signalisation de type "tout ou rien" sur chantier, système qui ne dispense pas du relevé topographique par les géomètres, lequel est un complément indispensable. En effet, le laser tournant, surtout en conditions de chantier, ne fournit ni une altimétrie précise, ni un rattachement à une référence absolue. L'inclinaison de la base émettrice et la dispersion du rayon en fait un moyen d'alerte satisfaisant jusqu'à 15 m de distance, par une dé-

Matthieu Bourdon

INGÉNIEUR D'AFFAIRES
SolData



Terminus gare du Nord à Paris :
électronivelles sur les voies du TGV

"Gare du Nord" terminal in Paris :
electronic level gauges on high-speed
train tracks



Vue rapprochée d'une électronivelles
Close-up view of an electronic level
gauge

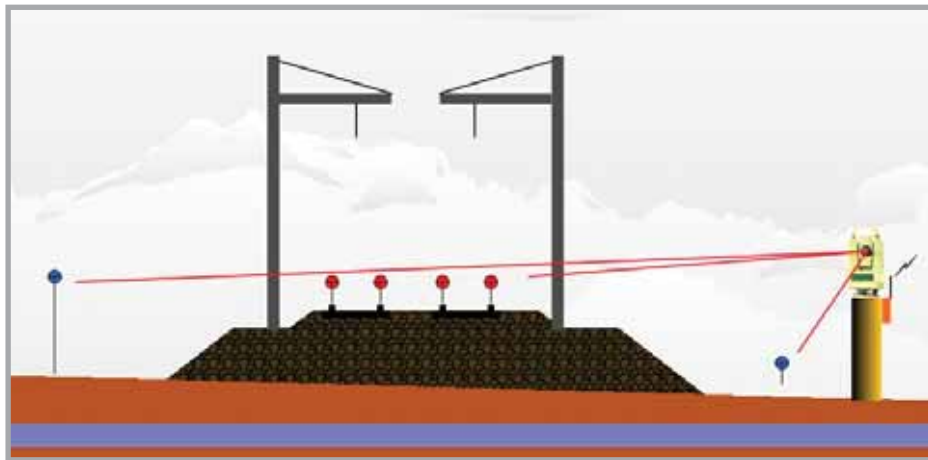


Schéma de principe du système de nivellement automatique CYCLOPS®

Schematic diagram of the CYCLOPS® automatic levelling system

Station CYCLOPS® dans un tunnel

CYCLOPS® station in a tunnel



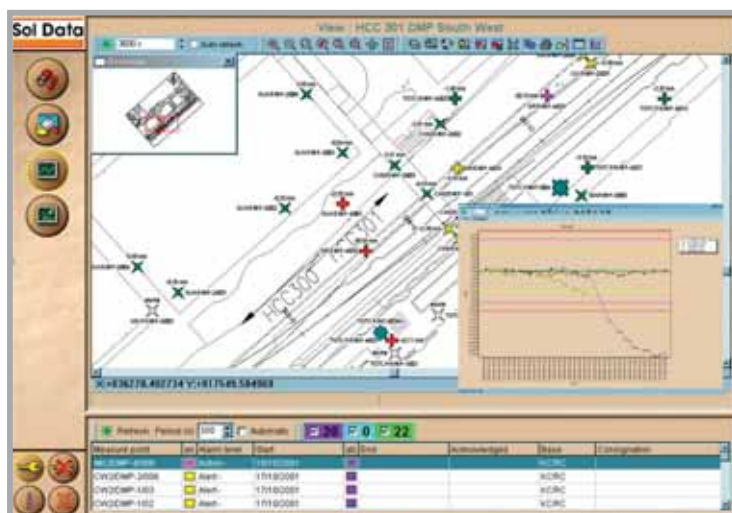
Station CYCLOPS® et son champ de visée, en plein air

CYCLOPS® station and its field of view, in the open air



Exemple de visualisation résultant du traitement par le logiciel GEOSCOPE®

Example of display resulting from processing by the GEOSCOPE® software



tection de mouvements centimétriques. Par conception, il s'agit bien plus d'un système de type "tout ou rien" que d'un appareil de mesure.

Afin d'améliorer la précision, une alternative consiste à équiper les voies ferrées d'instruments permettant une mesure localisée des tassements et des dévers. Il s'agit généralement d'"électronivelles" reposant sur une technologie robuste et éprouvée. L'instrument se présente sous la forme d'une barre métallique fixée sur une traverse. A l'intérieur se trouve un capteur constitué d'une sonde électrolytique fonctionnant comme un niveau à bulle. Le signal en sortie du capteur est proportionnel à l'inclinaison de la barre.

Par rapport au laser tournant, les électronivelles ont l'avantage de fournir en temps réel une mesure d'altimétrie au millimètre près dans le cas général, par incrémentation d'une chaîne de mesures. Cette technologie a été employée par exemple dans le cadre de travaux d'injection de régénération d'un collecteur situé à 0,80 m de profondeur sous une voie Eurostar à la gare du Nord à Paris. Pour ce projet, une transmission des données par radio a permis d'exercer une surveillance continue et en temps réel. Les travaux d'injection ont ainsi pu être réalisés en contrôlant les mouvements des voies.

■ LES NOUVELLES TECHNIQUES DE SURVEILLANCE

Depuis 1995, une nouvelle technologie est de plus en plus fréquemment employée dans le domaine de la surveillance de voies ferrées. Il s'agit des modules de topographie automatique CYCLOPS®. Cette technologie a été développée en partenariat par SolData et l'IGN (Institut Géographique National). Le principe repose sur l'utilisation de stations totalement robotisées qui mesurent en x, y et z la position de prismes installés sur les voies (ou sur n'importe quel type d'ouvrage). Le module a un fonctionnement totalement autonome. Il mesure en temps réel et de manière automatique les mouvements des points référencés et déclenche des procédures d'alerte dès qu'un seuil de tolérance est dépassé. Il est de plus possible, lorsque la zone à surveiller est importante, de réaliser un réseau de CYCLOPS® communicant entre eux.

Ce système est unique et il est totalement abouti. Il a déjà été utilisé sur des projets de très grande envergure et de longue durée tels que les métros d'Amsterdam et de Barcelone pour la surveillance des tassements de surface induits par les travaux souterrains. Il a aussi été utilisé pour de très nombreuses opérations de courte durée.

Dans le cadre de la surveillance des voies ferrées, la technologie CYCLOPS® est souvent recommandée par la SNCF, ou par ses homologues à l'étranger. Elle offre le cumul de nombreux avantages, notamment : l'acquisition en temps réel, une grande



Chantier de tunnel sous voies ferrées, avec très faible recouvrement (CSM Bessac à Montpellier)

Tunnel construction site under railway tracks, with very light covering (CSM Bessac in Montpellier)

précision de la mesure, le rattachement direct au référentiel du site, la robustesse, le déclenchement d'alarmes, etc.

Au début de l'année 2005, à Montpellier, sous une voie SNCF maintenue en exploitation, CSM Bessac a pu réaliser en trois jours et sans aucun incident une galerie de 42 m de long et d'un diamètre excavé de 3,30 m, avec une couverture de terrain très faible et sous le niveau de la nappe phréatique. Ce travail n'a pu être entrepris et mené à bien, dans des conditions de sécurité répondant aux exigences de la SNCF, que grâce à la mise en œuvre d'un Cyclops® permettant de visualiser en temps réel la déformation des voies ferrées.

Les progrès sont également considérables au niveau du traitement des données, qui bénéficie des nouvelles techniques de communication. Il est aujourd'hui courant de récupérer les données non seulement en temps réel mais encore à distance, pour visualiser de manière instantanée la situation de chantier en n'importe quel autre endroit de la planète (ou presque). En ce domaine, SolData a développé GEOSCOPE®, un logiciel de supervision simple et complet. Il permet notamment de visualiser en temps réel les lignes d'iso-tassement, l'évolution de points en particulier, ainsi que de gérer les seuils d'alerte et les actions qui en découlent. Toutes ces fonctions sont activées en se connectant simplement sur internet, l'utilisateur disposant d'un code d'accès sécurisé.

On est assez loin de la figure sympathique et nostalgique du géomètre avec son parasol et son calepin, fermant un œil pour mieux viser.

ABSTRACT

Development of technology for monitoring railway tracks during underground work

M. Bourdon

Works under or in the vicinity of railway tracks subject the tracks to strains which must be perfectly controlled. SNCF (French Rail) in particular lays down a very high level of requirements, in line with its safety standards. Recent technological progress in the area of monitoring provides an appropriate answer, enabling tricky underpinning work to be performed in strict safety conditions and without interrupting the traffic. The developments in question are the CYCLOPS® system from SolData and the GEOSCOPE® software developed in partnership by SolData and French national geographic institute IGN. These tools perform continuous high-precision measurement in real time, with remote transmission, display of results and tripping of alerts.

RESUMEN ESPAÑOL

Evolución de las técnicas de vigilancia de las vías férreas durante las obras subterráneas

M. Bourdon

Las obras bajo las vías férreas o a proximidad de éstas someten estas últimas a diversas deformaciones que se deben controlar perfectamente. Los ferrocarriles franceses (SNCF) determinan un nivel de exigencia sumamente elevado, por comparación con sus normas de seguridad. Diversos recientes progresos tecnológicos en el campo de la vigilancia aportan una respuesta adecuada que permite la ejecución de obras delicadas en recalce según condiciones estrictas de seguridad y sin interrupción de tráfico : se trata del sistema CYCLOPS® de SolData y del software GEOSCOPE® desarrollado en colaboración con SolData y el IGN. Estas herramientas permiten obtener una medición continua de alta precisión, en tiempo real, transmitida a distancia, así como la visualización de los resultados y de activación de alertas.

La Ganguise

Une paroi en béton plastique d'un barrage

Le barrage de la Ganguise, dans le Sud-Ouest de la France, fait l'objet d'une surélévation de 6 m pour doubler le volume stocké. Deux écrans étanches en paroi moulée de béton plastique sont réalisés sur les rives par Solétanche Bachy France au moyen d'un outillage hydrofraise Evolution 3 pourvu des derniers développements technologiques qui permettent le contrôler en temps réel et en continu la géométrie de la paroi. La filiale SolData de Solétanche Bachy réalise l'instrumentation du barrage et l'exploitation des résultats de l'auscultation.

L'hydrofraise Evolution 3 a posé ses chenilles sur le barrage de La Ganguise pour deux mois de travaux. La technologie avancée de la dernière née des machines d'excavation conçues et fabriquées par Solétanche Bachy est mise en œuvre pour réaliser deux parois plastiques en rives de l'impressionnant ouvrage de la Compagnie Nationale d'Aménagement de la Région du Bas-Rhône Languedoc (BRL) en cours de surélévation.

Le barrage de La Ganguise, près de Castelnaudary dans le département de l'Aude, offre, depuis sa construction en 1979, un plan d'eau de 268 ha destiné principalement au stockage des volumes d'eau nécessaires à l'irrigation du Lauragais audois et à la navigation sur le Canal du Midi.

Il s'agit d'une digue à noyau étanche en limon avec des recharges amont et aval en matériau marno-gréseux. Pour anticiper la croissance des besoins en eau, il a été décidé de doubler le volume de la retenue. C'est l'objet des travaux commencés en octobre 2003 (figure 1).

BRL et son maître d'œuvre BRL Ingénierie ont choisi, pour réaliser l'ensemble des travaux, Berthouly TP et Solétanche Bachy France réunis au sein d'un groupement.

L'augmentation de 24 à 44 millions de m³ de la capacité de stockage est obtenue par une surélévation de la digue de 6 m. Cette rehausse nécessite des terrassements importants de recharge du barrage (550 000 m³ empruntés dans des zones aux abords du lac), des compléments d'étanchéité en rives, des dispositifs de drainage et enfin l'aménagement des voiries et des ouvrages de génie civil existants.

Solétanche Bachy France a commencé en décembre 2004 les travaux d'étanchéité des appuis en rives liés à la modification de l'ouvrage (photo 1).

Cela consiste à réaliser, sur chaque rive, une paroi moulée en béton plastique longue de 100 m, épaisse de 1 m, profonde de 16,70 m en rive gauche et de 13,70 m à 27,20 m en rive droite (figure 2).

La formulation du béton plastique a été établie par le laboratoire de Solétanche Bachy spécifiquement pour ce chantier. En effet, afin de réaliser un ensemble paroi/digue homogène du point de vue de la déformabilité, il est nécessaire que l'écran étanche ait des caractéristiques mécaniques aussi proches que possible de celles du corps du barrage. Les caractéristiques fixées pour le béton plastique sont les suivantes :

- ◆ un module d'élasticité instantanée 100 à 200 MPa ;
- ◆ une déformation relative à la rupture > 5 % sous étreinte latérale de 0,5 MPa ;
- ◆ une perméabilité inférieure à 10⁻⁹ m/s ;
- ◆ une résistance à la compression simple comprise entre 0,8 et 15 MPa à 28 jours.

En raison de l'isolement du site et des exigences de cadence, une centrale à béton a dû être installée sur place (photo 2). Des échantillons de béton plastique sont prélevés chaque jour de coulage afin de contrôler la résistance et la perméabilité du matériau mis en œuvre.

Outre ses caractéristiques mécaniques évoquées plus haut, l'exactitude de la profondeur et la rigueur de la continuité sont deux caractéristiques essentielles de la paroi. C'est là qu'interviennent les propriétés de l'outillage d'excavation perfectionné que Solétanche Bachy France a mis en œuvre : l'hydrofraise EV3 avec contrôle et correction de trajectoire (photo 3).

Cet outillage possède des atouts exclusifs. Il est monté sur une grue porteuse puissante avec un en-

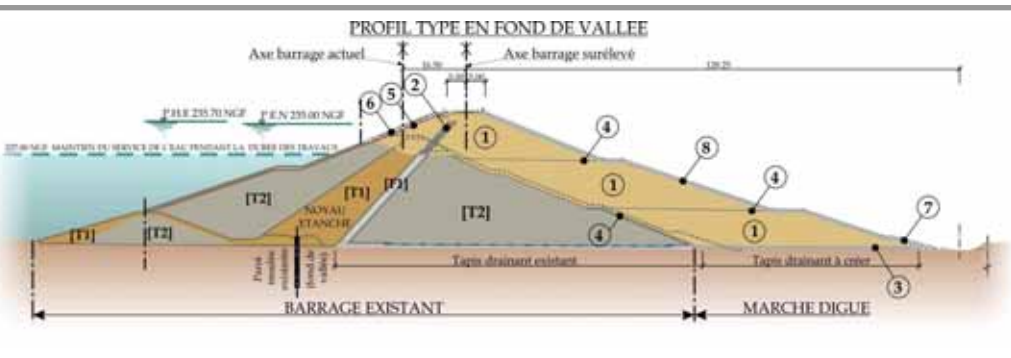


Figure 1
Coupe du barrage montrant la rehausse
Cross section of the dam showing the raised section



Photo 1
Vue du barrage, des installations en rive gauche et des ateliers de paroi moulée en rive droite
View of the dam, the installations on the left edge and the diaphragm wall equipment on the right edge

pour étancher les rives

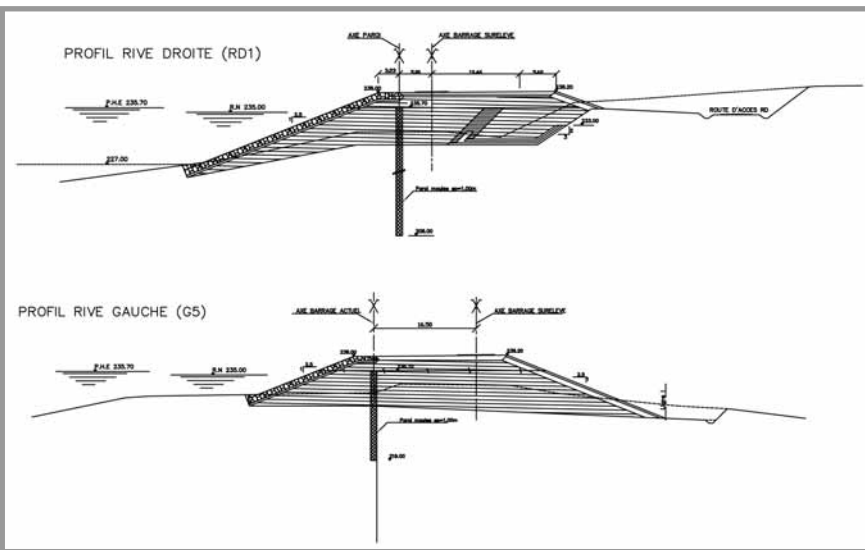


Figure 2
 Profils rive gauche
 et rive droite montrant
 la paroi moulée
 en béton plastique
*Left edge and right edge
 profiles showing
 the plastic concrete
 diaphragm wall*



combrement au sol minimal. Les circuits hydrauliques du porteur et des pompes et moteurs de perforation sont entièrement dissociés. Ces derniers peuvent être démontés et remontés très rapidement pour tout échange ou remplacement nécessaire dans le cadre de leur maintenance ou pour l'adaptation à un changement de nature de terrain. Enfin, l'outil de forage est équipé de capteurs permettant à l'opérateur de connaître en temps réel sa position (profondeur, verticalité, vrillage) et d'émettre des rapports précis d'excavation de la paroi.

Cette faculté permet de mettre à la disposition du maître de l'ouvrage BRL des enregistrements complets, définissant la géométrie réelle de l'ouvrage, garantants de sa conformité. Grâce à cette technologie, les travaux invisibles deviennent visibles, ce qui est un gage de qualité très apprécié du client pour des parties d'ouvrage qui participent autant à la fonction essentielle du barrage : être étanche. Entièrement constitué de mollasses sous forme de marnes et d'argiles avec des niveaux de grès, le terrain excavé présente une tendance à se déliter en particules très fines dont se charge la boue de forage. Pour maintenir cette dernière à un niveau de qualité satisfaisant, une centrale de traitement de boue très élaborée a été installée : elle traite 450 m³/h de fluide d'excavation et fonctionne 24 heures/24 (photo 4). La configuration du chantier induit des difficultés particulières qu'il faut surmonter grâce à un matériel adéquat : une dénivelée de 20 m et un éloignement de 800 m entre la centrale à boue et l'hydrofraise.

La réalisation de la paroi se fait en trois postes avec des moyens importants comportant notamment une benne d'excavation mécanique pour la réalisation des avant-trous, une grue de manutention pour le bétonnage et enfin l'hydrofraise



Photo 2
 La centrale à béton plastique
Plastic concrete mixing plant



Photo 4
 La centrale de traitement
 de boue
*The sludge treatment
 plant*



Photo 3
 L'hydrofraise Evolution 3
Evolution 3 hydro-cutter

consacrée à la perforation des panneaux de paroi en dessous des avant-trous (photo 5). La gestion des déblais d'excavation est un aspect important de la réalisation. Un tri est fait entre les déblais grossiers extraits sur le premier étage de criblage et les déblais fins et humides. Les déblais grossiers secs sont stockés sur place en vue d'une réutilisation en remblai dans les zones d'emprunt. Les déblais fins et silteux, à forte teneur en eau,



Photo 5
La benne mécanique et l'hydrofraise en poste de nuit
The mechanical grab and hydro-cutter working night shift

sont évacués en décharge tout comme la boue de forage usagée. En plus, un effort particulier est porté, tout au long des travaux, pour ne pas affecter les tapis drainants déjà mis en place au sein de la digue, et pour préserver la propreté de ce site magnifique.

Solétanche Bachy réalise également des forages de petit diamètre pour créer des puits de décharge sur la rive droite et en pied de digue, en aval, et installer des piézomètres. Les profondeurs de ces forages sont variables : une vingtaine de mètres pour les puits, de 10 à 20 m pour les piézomètres en pied de digue, et 40 m pour les piézomètres forés dans le barrage lui-même. Les forages pour piézomètres doivent en effet atteindre des couches de terrain perméables et drainantes pour observer les flux hydrauliques résiduels à travers le barrage. En plus des travaux de fondations, Solétanche Bachy, au travers de sa filiale SolData, assure les travaux d'instrumentation du barrage. SolData effectue la connexion des cellules de pression existantes, installe des extensomètres et des systèmes de mesure de convergence, puis procède aux relevés hebdomadaires des capteurs installés dans le corps et dans les galeries de la digue et en analyse les résultats.

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

Paroi, drains et piézomètres

- 3 800 m² de paroi plastique de 1,00 m d'épaisseur et d'une profondeur variant de 13,70 m à 27,70 m
- 700 m pour les 16 drains et 14 piézomètres

Montant des travaux

9 900 000 € HT

Durée des travaux

24 mois (octobre 2003 - octobre 2005)

ABSTRACT

The Ganguise. A wall of plastic concrete to seal the edges of a dam

RESUMEN ESPAÑOL

La Ganguise. Una pared de hormigón plástico para obtener la impermeabilización de los bordes de un embalse

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

BRL Aménagement, concessionnaire de l'Etat

Maître d'œuvre

BRL Ingénierie

Entreprises

Bertouly TP - Solétanche Bachy France

Coordinateur Sécurité

C.B.I.T.

Le décanteur de Montmorot : un ouvrage clés en main intégré dans une paroi moulée circulaire

Ce décanteur lamellaire a été réalisé par Solétanche Bachy France, mandataire de groupements pour le génie civil et les équipements. Le client est le syndicat intercommunal SIAAL pour la région de Lons-le-Saulnier, et le maître d'œuvre est SOGREAH. L'opération est exemplaire à plusieurs titres : un système de décantation performant, une réalisation parfaitement invisible, un ouvrage intégré dans une paroi moulée circulaire autostable, une affaire comportant une part significative de travaux géotechniques complexes traitée en entreprise générale par Solétanche Bachy France.

■ INTERCEPTION DE LA POLLUTION PLUVIALE

La pollution apportée lors d'épisodes pluvieux, par les rejets des collecteurs ou les surverses des déversoirs d'orage placés sur les réseaux unitaires, est aujourd'hui bien connue.

Le traitement de la pollution pluviale urbaine implique donc prioritairement l'interception des matières en suspension. Les matières polluantes peuvent être piégées après un temps de stockage suffisamment long dans un ouvrage de retenue, ou bien par simple décantation au fil de l'eau.

Les rejets urbains de temps de pluie représentent des volumes d'eau et des sources de pollution considérables comparés aux rejets de temps sec. C'est pourquoi la loi sur l'eau n° 92-3 du 3 janvier 1992 et ses décrets d'application en imposent une prise en compte accrue.

Les rejets pluviaux peuvent donc être traités dans des ouvrages de retenue, ou bien au fil de l'eau dans des ouvrages de traitement plus compacts comme les décanteurs lamellaires, ou bien encore par une combinaison des deux, comme c'est le cas ici pour le décanteur de Montmorot, près de Lons-le-Saulnier dans le département du Jura.

■ GENÈSE ET PRINCIPE DU PROJET

Le Syndicat d'assainissement SIAAL (Syndicat intercommunal pour l'assainissement de l'agglomération lédonienne), assisté par son maître d'œuvre SOGREAH, a lancé à l'automne 2002 un appel d'offres pour la construction d'un ouvrage de stockage et de traitement des eaux pluviales collectées sur l'agglomération de Lons-le-Saulnier.

Le projet consiste à traiter les eaux pluviales pour un débit en pointe de 1,2 m³/s au sein d'un ouvrage circulaire de 30 m de diamètre, fermé et en-

terré à 8 m de profondeur. Cet ouvrage comprend un étage de structures mobiles et un système de lavage automatique du fond de bassin par chasse d'eau. Dans un parfait respect de l'environnement, il est entièrement enterré près d'un stade, ne créant ainsi aucun encombrement au sol ni aucune nuisance visuelle.

Cette conception relève du procédé PIBOP (Puits Intégré pour Bassin d'Orage Profond) pour lequel Solétanche Bachy a reçu le 1^{er} Prix de l'Innovation de la FNTP en 2001. PIBOP se caractérise entre autres, par une paroi moulée autostable, sans appuis pendant les phases provisoires de construction, et formant l'enceinte définitive de l'ouvrage. La réalisation d'une telle structure souterraine autostable repose sur des avancées techniques en ce qui concerne les moyens de calcul pour la conception et en ce qui concerne le guidage des outils de forage pour la réalisation. L'épaisseur de la voûte inscrite dans la paroi dépend en effet de sa qualité d'exécution. La tolérance sur la déviation des panneaux de paroi moulée est donc en rapport avec l'épaisseur de ceux-ci. Les techniques de contrôle et de guidage de trajectoire des outils de perforation développés par Solétanche Bachy permettent d'obtenir le résultat recherché avec un minimum de volume d'excavation et de béton.

Dans le cadre d'une démarche rationnelle qui consiste à proposer une solution globale adaptée au projet en conservant strictement les principes de fonctionnement de l'ouvrage tels qu'ils ont été définis par le prescripteur, Solétanche Bachy a obtenu ce marché en tant qu'entreprise générale, en groupement avec Caniotti pour le génie civil et avec L'Eau Pure et Hydroconcept pour les équipements. Pour ce type d'ouvrage qui comporte une part significative de travaux dans le sol, l'intervention de Solétanche Bachy comme entreprise générale offre au maître de l'ouvrage une sécurité considérable. Dans cette configuration, c'est en effet avec ses moyens propres, donc sans avoir à les sous-trai-

Daniel Marchand



**DIRECTEUR
COMMERCIAL DU PÔLE
PROJETS INTÉGRÉS**
Solétanche Bachy France

Pascal Guasp



**PRÉSIDENT DIRECTEUR
GÉNÉRAL**
L'Eau Pure

Antoine Morin



GÉRANT
Hydroconcept

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Paroi moulée : 1 600 m²
- Micropieux : 74 u et 900 m
- Terrassement : 4 900 m³
- Génie civil : 1 300 m³

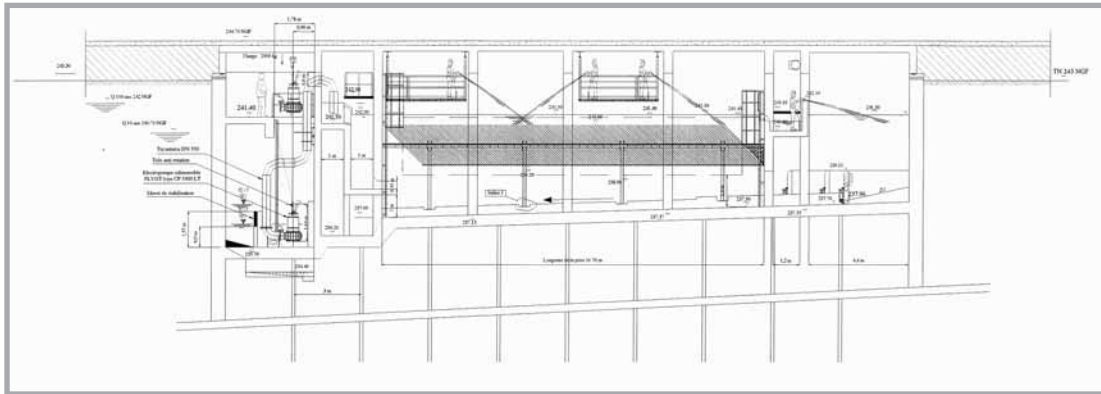


Figure 1
Vue en coupe du bassin
et des lamelles
du décanteur

*Cross-section view
of the tank
and the clarifier plates*

Photo 2
Le ferrailage
d'un panneau
de paroi moulée
*Reinforcement
of a diaphragm wall
panel*



Photo 3
Réglage du fond de fouille
avant construction
du radier, têtes
des micropieux
préalablement exécutés
depuis la surface

*Grading the bottom
of the excavation before
construction
of the foundation raft,
micropile heads executed
beforehand
from the surface*



Photo 4
Construction
de la structure
intérieure
*Construction
of the interior structure*



Photo 1
La benne d'excavation de paroi moulée
The diaphragm wall excavation bucket

ter, que Solétanche Bachy réalise les opérations les plus complexes liées à la géotechnique. La coupe de l'ouvrage est montrée sur la figure 1. Il est entièrement enterré, à l'abri de la paroi moulée. La nappe phréatique est très haute. Sont figurés les micropieux qui ancrent le radier pour s'opposer à la poussée d'Archimède.

■ LA PAROI MOULÉE ET LES MICROPIEUX

La structure périmétrale du bassin est réalisée en paroi moulée dans le sol, avec un ancrage dans le substratum marneux peu perméable. Les terrains traversés pour s'ancrer dans la marne sont constitués de limons et d'argiles limoneuses. Le toit du substratum étant irrégulier, il est nécessaire d'adapter le forage de la paroi à ses variations afin de réaliser une fiche hydraulique effective dans ces marnes.

La perforation est effectuée à la benne hydraulique (photo 1) par panneaux de 6,50 m équipés de trois cages d'armatures (photo 2). La liaison entre panneaux primaires et secondaires est assurée par la mise en place de joints plats verticaux CWS® permettant la mise en œuvre d'un joint "water-stop" d'étanchéité verticale.

La boue bentonitique de forage est fabriquée et traitée dans une centrale équipée de désableurs pour le nettoyage de la boue usée et de silos pour son stockage.

La stabilité du radier soumis aux sous-pressions de la nappe phréatique est assurée par 74 micro-pieux forés depuis le terrain naturel. La tête de ces micropieux est ensuite liée au radier lors de la construction de celui-ci après terrassement à l'intérieur de l'enceinte en paroi moulée (photo 3).

■ LE GÉNIE CIVIL

L'implantation du bassin à proximité immédiate d'un stade nécessite l'incorporation de la totalité des équipements à l'intérieur de l'ouvrage. Cela comprend tous les équipements électriques et électromécaniques ainsi que les treuils de maintenance, qui sont installés dans le local technique situé au-dessus des pompes de relevage.

Les divers éléments de génie civil de la structure intérieure sont réalisés dans des conditions confortables puisque le volume à l'intérieur de l'enceinte en paroi moulée autostable n'est encombré par aucun buton. Il n'y a même pas de tirants provisoires. Ainsi sont construits les radiers, puis les voiles et les poteaux qui soutiennent la dalle supérieure et le local technique. Ils reposent sur les murets des chenaux de nettoyage du fond du bassin (photo 4).

En phase d'exploitation, ces chenaux, au nombre de cinq, sont nettoyés lorsque cela est nécessaire par des clapets de chasse hydraulique retenant une réserve d'eau de rinçage.

Enfin, intervient la réalisation de la dalle supérieure (photo 5) sur les voiles et poteaux, préalablement à l'installation des équipements.

■ LE DÉCANTEUR LAMELLAIRE

Ce décanteur à structure mobile de type M.E.S.I. (Matières En Suspension Intercepteur) se caractérise par une alimentation de la structure lamellaire par le dessous. La circulation de l'eau à travers la structure lamellaire s'effectue depuis le bas vers le haut, alors que le déplacement des matières polluantes s'effectue en sens inverse pour les matières plus denses que l'eau, sous l'effet de leur poids. Ce type de décantation est appelé décantation lamellaire à contre courant (photo 6).

L'ouvrage décanteur comprend cinq couloirs de décantation. Dans chacun des couloirs, une structure lamellaire de 134 lames de 2,30 m de hauteur par 3,36 m de largeur a été installée.

La particularité des cinq structures lamellaires qui ont été installées dans l'ouvrage du SIAAL, réside dans le fait que ses lames sont dans une position verticale quand l'ouvrage est vide, et qu'elles viennent s'incliner jusqu'à l'angle voulu, fixé dans le cas présent à 45°, lorsque l'ouvrage se remplit d'eau.

De plus, le déplacement des lames sur leurs rails



Photo 5
Coulage de la dalle de couverture

Pouring the roof slab



Photo 6
Le décanteur lamellaire

The lamellar clarifier

support, permet si nécessaire de dégager un espace de travail, pour enlever et remplacer des lames qui pourraient être détériorées.

■ LES ÉQUIPEMENTS ÉLECTROMÉCANIQUES

L'installation dans le bassin circulaire de 30 m de diamètre et profond de 8 m, d'une batterie de pompes (sept principales), de deux dégrilleurs, d'un système de désodorisation, d'une série de vannes et de capteurs de mesure (débit, niveau, détecteurs de gaz...) et de quatre armoires électriques pour piloter le tout, est un exercice délicat qui demande de la rigueur dans l'organisation du chantier. D'autant plus que ces équipements sont répartis sur trois niveaux (photo 7).

L'ouvrage est, pour raison de sécurité, fermé dès le montage des équipements. Il faut alors placer les équipements lourds constitués de cinq unités de pompage d'eaux brutes de 300 l/s, pesant une tonne chacune, dans leur emplacement grâce à un monte-charge intégré à l'ouvrage et réserver un passage suffisant au sein des galeries de service. De même, dans la fosse d'arrivée d'eaux brutes, les pompes doivent pouvoir être relevées en permanence, sans effort humain.



Photo 7
Les conduites de refoulement des pompes
The pump discharge pipes

► Notons pour finir certains des objectifs de qualité imposés par le cahier des charges :

- ◆ l'ensemble des pièces métalliques et tuyauteries présentes dans l'ouvrage est en acier inoxydable ou en aluminium ;
- ◆ ventilation des locaux et traitement des gaz par voie biologique (désodorisation par charbon actif) ;
- ◆ niveau de sécurité élevé pour les personnels opérant dans cet espace confiné, avec une automatisation poussée du fonctionnement des ouvrages et une faible intervention des équipes de maintenance.

Les travaux ont été réalisés entre février et octobre 2003.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

SIAAL

Maître d'œuvre

SOGREAH

Entreprises

- Lot génie civil : groupement Solétanche Bachy France - Caniotti
- Lot équipement : groupement Solétanche Bachy France - L'Eau Pure - Hydroconcept

ABSTRACT

The Montmorot clarifier : a turnkey structure incorporated in a circular diaphragm wall

D. Marchand, P. Guasp, A. Morin

This lamellar clarifier was constructed by Solétanche Bachy France, civil engineering and equipment consortium leader. The client is the local authority joint board ("Syndicat intercommunal") SIAAL for the Lons-le-Saulnier region and the project manager is Sogreah. The project is exemplary in several respects : an efficient settling system, perfectly invisible construction, a structure integrated into a free-standing circular diaphragm wall, a job involving a significant proportion of complex geotechnical work handled as main contractor by Solétanche Bachy France.

RESUMEN ESPAÑOL

El decantador de Montmorot : una obra llaves en mano integrada en una pantalla continua circular

D. Marchand, P. Guasp y A. Morin

Este decantador lamelar se ha realizado por Solétanche Bachy France, mandatario de agrupaciones para la ingeniería civil y los equipos. El cliente es la mancomunidad de municipios SIAAL para la región de Lons-le-Saulnier y la entidad contratante es Sogreah. La operación constituye un ejemplo por diversas razones : un sistema de decantación de elevado rendimiento, una realización perfectamente invisible, una obra integrada en una pantalla continua circular autoestable, un negocio que incluye una parte significativa de trabajos geotécnicos complejos tratada en empresa general por Solétanche Bachy France.

Méré : un bassin de relevage clés en main, en deux temps trois mouvements

Claire Doby



INGÉNIEUR TRAVAUX
Solétanche Bachy France

Emmanuelle Piana



CHARGÉE D'OPÉRATION
Conseil général des Yvelines
DRT/SGT/ST2

Le bassin de relevage d'eaux pluviales de Méré, dans le département des Yvelines, a été réalisé en 5 mois par Solétanche Bachy France intervenant en entreprise générale. C'est un ouvrage intégré dans un puits en paroi moulée circulaire de 13 m de diamètre, selon le procédé PIBOP. Ce type de variante compétitive résulte de l'optimisation que permet, tant au niveau de la conception qu'à celui de l'exécution, la parfaite maîtrise de la partie géotechnique du projet avec les moyens propres de l'entreprise générale.

L'opération de suppression du passage à niveau PN 14 à Méré (78) comportait la construction d'un bassin et la pose des canalisations adjacentes, le tout réuni dans un lot assainissement. Cet ouvrage a été livré début 2005 au Conseil général des Yvelines par Solétanche Bachy France. Il n'est pas titanesque, loin s'en faut, mais il illustre remarquablement les vertus d'une variante élaborée et entièrement exécutée par Solétanche Bachy intervenant en entreprise générale, sur un projet comportant une part significative de travaux géotechniques, d'une part, et l'application du procédé PIBOP (Puits intégré pour bassin d'orage profond) pour lequel Solétanche Bachy a reçu le 1^{er} Prix de l'Innovation de la FNTP en 2001, d'autre part. La parfaite maîtrise de sa partie la plus complexe, celle des travaux dans le sol, garantit l'optimisation du projet et la sécurité de son exécution.

Pour la suppression du PN 14 situé à proximité de la gare de Montfort-l'Amaury - Méré, un ouvrage de franchissement a été construit sous les voies SNCF. L'évacuation des eaux pluviales de la future RD76 empruntant ce nouvel ouvrage, jusqu'au réseau existant, nécessitait la construction d'un bassin de relevage.

C'est la solution variante proposée par Solétanche Bachy France, regroupant tous les équipements hydrauliques à l'intérieur du bassin et permettant de travailler directement depuis la plate-forme de l'emplacement exigu dévolu à l'ouvrage, qui été retenue par la Direction des routes et des transports du Conseil général des Yvelines. Une étroite collaboration entre la maîtrise d'œuvre, la DRT-SGT-ST2 78, et Solétanche Bachy France, a permis, tout au long du projet, d'appliquer les meilleures solutions techniques et, notamment, de ne pas interrompre la circulation routière. Les travaux auront duré cinq mois.

La superficie du bassin n'étant que de 150 m², il n'est pas possible de scinder le chantier en plusieurs zones de travaux. Aussi, toutes les phases de travaux doivent-elles se succéder et intégrer,



Levage d'une cage d'armature de la paroi moulée
Lifting a diaphragm wall concrete reinforcing cage

à chaque fois, les difficultés d'accès aux plates-formes de travail. Le radier formant le fond est situé à 11 m sous terre.

■ LES TRAVAUX SPÉCIAUX

Le bassin est constitué d'une paroi moulée circulaire intégrée de 13 m de diamètre intérieur, profonde de 14,50 m, épaisse de 0,50 m. Cette paroi est excavée à la benne mécanique à travers le ter-



Terrassement à l'intérieur de la paroi moulée
Earthworks within the diaphragm wall



Fin du terrassement, la partie inférieure de la paroi moulée reste à raboter
End of earthworks, the lower part of the diaphragm wall remains to be planed



Dalle de couverture et trémies d'accès
Roofing slab and access shafts

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage
Conseil général des Yvelines
Maître d'œuvre
Conseil général des Yvelines - DRT/SGT/ST2
Entreprise
Solétanche Bachy France
Durée des travaux : 5 mois



rain marno-calcaire qui règne dans la région. Le terrassement du bassin est ensuite mené en trois phases entre lesquelles s'intercalent les opérations de recépage et de rabotage de la paroi.

LE GÉNIE CIVIL

Aussitôt les travaux de fondations spéciales terminés, s'enchaîne une multitude de phases courtes de génie civil. Un radier de 0,50 m d'épaisseur doté d'une petite fosse de relevage est coulé en premier. Il est liaisonné à la paroi par des barres de scellement deux rangs de joint hydrogonflant.

Les six poteaux sur lesquels repose, 11 m plus haut, la dalle de couverture, sont coulés en place en deux temps afin de permettre le montage rayonnant des tours d'étaie.

Un platelage sur mesure permet de ferrailer la dalle en toute sécurité et de l'ancrer à la paroi selon le même principe que le radier. Cette dalle de couverture contient deux trémies préfabriquées pour la remontée du panier de dégrillage et des pompes de relevage, ainsi qu'une large trémie où vient se loger le local technique.

Ce dernier comporte une dalle intermédiaire suspendue à 8 m au-dessus du fond du bassin par des ancrages dans la paroi et appuyée sur deux des poteaux. Les murs du local à l'intérieur du bassin sont réalisés en maçonnerie de parpaings. Les murs extérieurs sont des voiles en béton coulés en place. Ce local est coiffé de sa propre dalle de couverture, percée d'un trou d'homme.

Les seuls travaux sous-traités sont le cuvelage du bassin et l'application d'une étanchéité de surface sur la dalle de couverture avant son remblaiement, ainsi que la pose des canalisations, jusqu'à 6 m de profondeur.

LES ÉQUIPEMENTS HYDRAULIQUES DU BASSIN

Positionné juste derrière la vanne d'arrivée d'eau se trouve le panier de dégrillage qui permet de collecter les déchets grossiers véhiculés par le réseau des eaux pluviales. Le bassin est aussi équipé d'un système d'hydro-éjecteurs qui permet de conserver les eaux en mouvement et d'éviter les dépôts au fond. Deux pompes relèvent les eaux dans un débourbeur-déshuileur d'une capacité de 2 000 litres situé dans le local technique. Les pompes de relevage sont asservies au volume d'eau stocké dans le bassin et au débit de rejet dans le milieu naturel autorisé selon les conclusions de l'enquête publique. L'exploitant peut connaître, en temps réel et par télésurveillance, leur état de fonctionnement.

La vanne d'arrivée d'eau dans le bassin est commandée en ouverture-fermeture depuis une armoi-



Première phase du bétonnage des poteaux
Initial phase of column concretin

re installée dans le local technique. C'est également par ce local que l'on accède au fond du bassin.

■ CONCLUSION

L'affaire a été rondement menée, sans incident ni accident. C'est la conséquence d'une bonne intelligence entre intervenants, d'un projet bien ficelé et d'un chantier bien préparé conduit avec professionnalisme.

Pour ce qui est de l'intégration au paysage, l'opération camouflage est réussie : du bassin de Méré on ne peut finalement apercevoir aujourd'hui que la potence de relevage du panier de dégrillage, qui trône dans son enclos de verdure.

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- 800 m² de paroi moulée d'épaisseur 0,50 m
- 180 m³ de génie civil et maçonnerie
- 200 m de canalisations de diamètre 150, 300 et 500 mm
- 2 pompes de relevage
- 1 panier de dégrillage, 1 vanne d'arrêt d'eau électromécanique, 2 hydro-éjecteurs
- 1 débourbeur-déshuileur

Montant des travaux : 945 000 € HT

ABSTRACT

Méré : a turnkey raising tank, in very quick time

Cl. Doby, E. Piana

The rainwater raising tank at Méré, in the Yvelines Department, was constructed in five months' time by Solétanche Bachy France performing the work as main contractor. It is a structure integrated into a circular diaphragm wall shaft 13 metres in diameter, by the PIBOP process. This type of competitive variant is the result of the optimisation made possible, at both the design and execution levels, by thorough control of the geotechnics part of the project using the main contractor's own resources.

RESUMEN ESPAÑOL

Méré : un depósito amortiguador llaves en mano, en un dos por tres

Cl. Doby y E. Piana

El depósito amortiguador de aguas pluviales de Méré, en el departamento de Yvelines, se ha ejecutado en 5 meses por parte de la empresa Solétanche Bachy France actuando a título de empresa general. Se trata de una obra integrada en un pozo de pantalla continua circular de 13 metros de diámetro, según el procedimiento PIBOP. Este tipo de variante competitiva se deriva de la optimización que permite, tanto a nivel del establecimiento del concepto como a nivel de la ejecución, el perfecto dominio de la parte geotécnica del proyecto con los propios medios de la empresa general.

Neuilly-sur-Seine

Mise en œuvre du Cutter urbain sensible

Dans le cadre de la reconstruction de l'ensemble scolaire de la Folie Saint-James à Neuilly-sur-Seine, l'entreprise Sefi-Intrafor a réalisé l'ensemble des travaux de fondations spéciales. Ceux-ci consistent notamment en la réalisation d'une enceinte en paroi moulée de 250 ml de périmètre, 27 m de profondeur et 800 mm d'épaisseur. L'environnement très sensible du quartier, la présence de 1 200 élèves à proximité immédiate du chantier et l'obligation de respect des délais et des contraintes de verticalité et de débit d'exhaure ont conduit l'entreprise à réaliser ces parois moulées avec une haveuse de type Cutter BC 30.

Le professionnalisme des équipes de Sefi-Intrafor et les performances du Cutter ont permis de répondre à toutes ces exigences.

■ PRÉSENTATION DU PROJET

A Neuilly-sur-Seine (92), dans le quartier de la Folie Saint-James, la refonte complète de la Cité Scolaire s'avérait indispensable de part la vétusté des bâtiments existants, les adaptations impératives des nouveaux systèmes éducatifs et les mesures exigeantes d'accueil, de sécurité et de polyvalence demandées par tous les acteurs de la vie scolaire. L'architecture et la conception de ce nouvel établissement doivent s'harmoniser avec la proximité du poumon vert que constitue le bois de Boulogne et répondre aux attentes des usagers.

Dans cette optique, le Conseil général des Hauts-de-Seine et la Région Ile-de-France ont confié la démolition-reconstruction de l'ensemble scolaire aux entreprises groupées Bouygues Bâtiment Ile-de-France et Sicra. Le projet final se décompose en trois unités fonctionnant de façon indépendante : le lycée (Région), le collège et un gymnase semi-enterré (Conseil régional).

Sefi-Intrafor a été désigné en sous-traitance pour la réalisation du lot Fondations spéciales.

Nous citerons entre autres :

- ◆ l'application stricte de la réglementation sur les nuisances sonores avec une revue de détail de tous les engins utilisés sur le site et vérification interne des niveaux de bruit ;
- ◆ la communication avec les riverains par une information systématique des travaux de nuit (transferts des grues de chantier, par exemple) ;
- ◆ la garantie de la production tout en côtoyant quotidiennement les 1 200 élèves du collège et lycée (transférés dans des locaux provisoires à proximité immédiate de la zone de travaux) ;
- ◆ la gestion des flux de camions de déblais et de béton aux heures d'entrée et de sortie des élèves par la présence permanente d'un homme-traffic ;
- ◆ le maintien impeccable de la voirie aux abords du chantier quelle que soit la tendance météorologique et le nombre de camions en rotation ;
- ◆ le respect des travaux dans la tranche horaire imposée par la ville (de 7 h 30 – 19 h 30 du lundi au vendredi sans dérogation possible), tout en respectant le délai contractuel.

■ CHOIX TECHNIQUES ET INSTALLATIONS

En fonction de ce voisinage complexe et des terrains rencontrés, le choix de matériel d'excavation s'est porté sur une haveuse pour paroi moulée appelée Cutter BC 30.

Ce type de matériel lourd (l'ensemble porteur + cutter pèse 120 t) répond aux impératifs de tolérance de verticalité (0,5 %), et permet de forer des terrains de fortes résistances mécaniques.

Était associée à l'atelier de forage, une unité de dessablage de 120 m³/h complétée d'une grue de 80 t équipée d'une benne à câbles pour le préforage.

Enfin, un atelier de manutention avec une grue treillis de 80 t complétait l'ensemble des matériels sur la plate-forme.

L'envergure et le poids des différentes grues, combinés à la faible largeur de la rue menant au chantier, ont contraint à livrer de nuit par convois exceptionnels ces imposantes machines. Toutes ces opérations, au nombre de huit, se sont déroulées en étroite collaboration avec les services techniques de la ville de Neuilly-sur-Seine et des services de police.

Les contraintes dimensionnelles de l'ouvrage et l'utilisation rationnelle des emprises disponibles pour construire la paroi, ont laissé peu de place

■ FONDATIONS SPÉCIALES ET ENVIRONNEMENT PARTICULIER

Les travaux réalisés par Sefi-Intrafor consistent en :

- ◆ la réalisation d'une paroi moulée de 80 cm de large, de 27 m de profondeur sur un périmètre de 250 ml. Elle permet de s'isoler de la nappe phréatique, d'assurer les assises des superstructures et de construire les parties enterrées : parkings, locaux techniques, gymnase ;

- ◆ la stabilité en phase provisoire par 103 tirants précontraints de 70 à 130 t et 18 butons métalliques. La phase définitive est assurée par poutres et planchers ;

- ◆ le pompage par six puits d'exhaure provisoires, pour effectuer le terrassement jusqu'au fond de fouille, et permettre le coulage du radier et des premiers planchers.

La réalisation de ce chantier de fondations spéciales au cœur d'un quartier calme se présentait comme un challenge quotidien. Aucune place à l'improvisation, pas de laisser-aller contrariant la tranquillité du quartier, de ses habitants et des acteurs institutionnels de ce projet.

Les contraintes multiples liées à l'environnement ont été maîtrisées par une rigueur, une écoute et une diplomatie de tous les instants.



Cutter BC 30
BC 30 cutter

pour un chantier

Christophe Allenoz
CHARGÉ D'AFFAIRES
Sefi-Intrafor



Michel Alfred
RESPONSABLES PAROIS
Sefi-Intrafor



pour l'installation de la centrale à boue bentonitique. Une fois encore, les équipes de Sefi-Intrafor ont dû revoir les plans d'installation initiaux pour satisfaire la production programmée, d'un panneau par jour, sans qu'un atelier de forage puisse ralentir l'atelier de bétonnage, et inversement.

Pour répondre à l'exiguïté du site, l'installation de chantier a été scindée en deux parties :

- ◆ d'une part, cantonnée hors de l'enceinte de paroi moulée, le long de la rue de Longchamp, la centrale de fabrication de boue comprenant un malaxeur haute turbulence, des silos d'une capacité de stockage de 400 m³, des pompes de circulation de boue ;

- ◆ d'autre part, au centre du chantier, la centrale de dessablage et de traitement des boues de forage sur une surface de 400 m².

Cette formule a permis aux différentes grues de manutention et de forage de circuler autour de l'unité de dessablage, et de créer, à la demande, des zones de stockage de coffrages-joint waterstop et des cages d'armatures sans entraver le forage des panneaux et les rotations des 50 à 60 camions (déblais, armatures, bétons) qui desservent quotidiennement le chantier.

■ DES MOYENS ET DES RÉSULTATS

La coupe type des terrains rencontrés se décompose ainsi :

- ◆ de 0,00 à 5,00 m : remblais ;
- ◆ de 5,00 à 13,00 m : calcaire grossier ;
- ◆ de 13,00 à 20,00 m : sable supérieur ;
- ◆ de 20,00 à 27,00 m : fausses glaises.

Des doutes devaient être levés avant le début de forage quant à la dureté du calcaire et la nature des fausses glaises, réputées étanches.

C'est pourquoi, parallèlement au montage du matériel, une campagne de carottages au sein du calcaire induré a été entreprise. Les grandes résistances à la compression obtenues sur les différents échantillons écrasés (15 MPa) ont conforté le choix d'une haveuse à circulation inverse. Le forage à la benne à câbles ou benne hydraulique aurait rapidement montré ses limites car l'emploi de moyens de trépannage était formellement interdit.

Après deux semaines complètes d'installation et d'essais complémentaires, les équipes ont pu commencer le premier forage.

La répartition des différents ateliers et la gestion parfaite des divers cycles ont contribué au coula-



Aperçu de la paroi
General view of the wall



Unité de dessablage
Desilting unit

ge d'un panneau par jour dans une plage horaire confinée entre 7h30 et 19h30.

Le délai de huit semaines de production de paroi moulée planifié contractuellement a donc été tenu à la satisfaction totale des entreprises de gros œuvre.

Les panneaux d'une longueur de 6,50 m environ avaient un volume moyen de 150 m³ de béton.

Les armatures de 20 m de long (fiche mécanique) étaient livrées tous les jours, faute de place sur le site. Les cages se répartissaient en six éléments dans le forage pour un poids de 10 t par panneau. Le Cutter BC 30 dispose également d'une instrumentation embarquée qui permet d'afficher en temps réel la déviation éventuelle du forage, et de corriger immédiatement la trajectoire par la sortie de volets hydrauliques intégrés à l'outil de forage. La tolérance de verticalité sur le chantier était de 0,5 %. La fiche hydraulique descend de 7 m dans les

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Paroi moulée de 800 mm de large, 27 m de profondeur sur un périmètre de 250 m
- 103 tirants précontraints de 70 à 130 t
- 18 butons métalliques
- Pompes par 6 puits d'exhaure provisoires pour effectuer le terrassement jusqu'au fond de fouille
- Date d'intervention : septembre 2004 à mars 2005



Forage
d'un panneau
*Drilling
a panel*

ABSTRACT

Use of the cutter
for a sensitive urban
project in Neuilly-sur-Seine

Ch. Allenoz, A. Michel

As part of the reconstruction of the Folie Saint-James educational complex in Neuilly-sur-Seine, the contractor Sefi-Intrafor carried out all special foundation works. This involved, in particular, the construction of a diaphragm wall enclosure on a perimeter of 250 linear metres, to a depth of 27 m and of thickness 800 mm.

The district's very sensitive environment, the presence of 1 200 school pupils in the immediate vicinity of the site, and the obligation to comply with the deadlines and constraints of verticality and pumping capacity led Sefi-Intrafor to execute these diaphragm walls with a BC 30 cutter type mining machine.

Thanks to the professionalism of the Sefi-Intrafor personnel and the efficiency of the cutter, all these requirements were able to be met.

RESUMEN ESPAÑOL

Puesta en aplicación de la máquina Cutter para una obra urbana sensible en Neuilly-sur-Seine

Ch. Allenoz y A. Michel

Actuando en el marco de la reconstrucción del complejo escolar de la Folie Saint-James en Neuilly-sur-Seine, la empresa Sefi-Intrafor ha llevado a cabo la ejecución del conjunto de los trabajos de cimentaciones especiales. Estos trabajos consisten, principalmente, en la ejecución de un recinto de pantalla continua de 250 ml de perímetro, 27 m de profundidad et 800 mm de espesor. El entorno sumamente sensible del barrio, la presencia de 1 200 alumnos en las cercanías inmediatas de la obra y la obligación de respetar los plazos así como diversos imperativos de verticalidad y de caudal de desagüe condujeron a la empresa Sefi-Intrafor a ejecutar estas pantallas continuas con una máquina rozadora de tipo Cutter BC 30.

El profesionalismo de los equipos de Sefi-Intrafor y los rendimientos de la Cutter permitieron responder a todos estos requerimientos.

► fausses glaises pour parfaire l'étanchéité de l'enceinte, et obtenir un débit résiduel contractuel de 20 m³/heure.

Le résultat du débit d'exhaure qui s'est avéré encore meilleur que prévu (10 m³/heure), a contribué au terrassement immédiat de la fouille et à l'obtention du fond de fouille parfaitement sec pour la réalisation sans retard des fondations superficielles et du radier.

La tenue des délais contractuels, la réussite technique de l'opération avec une paroi à la verticalité exemplaire, les performances du matériel, la satisfaction du client et des riverains de Neuilly-sur-Seine, le respect de l'environnement et la quiétude du quartier sont autant d'atouts majeurs que Sefi-Intrafor et ses équipes souhaitent reconduire dans un cadre urbain, aussi difficile soit-il.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

Département des Hauts-de-Seine

Maître d'œuvre

Bolze et Rodriguez Architectes

Entreprises générales

- Bouygues Bâtiment IDF
- Sicra

Architectes associés

De Gironde et Bomsel Architectes

Bureau de contrôle

Qualiconsult

Grenoble : le projet de

Le projet de la SCI Le Galilée présentait les contraintes suivantes :

- reprise en sous-œuvre de bâtiments existants;
 - soutènement des terres côté rue;
 - terrassements dans la nappe pour la réalisation des sous-sols (pompage de l'ordre de 4000 m³/h à prévoir). La solution de Keller Fondations Spéciales a été de réaliser une "boîte étanche" constituée :
 - d'une paroi mixte (berlinoise + jet grouting) le long des rues;
 - d'une paroi de reprise en sous-œuvre (jet grouting haute énergie) le long des habitations;
 - d'un bouchon hydraulique étanche en fond de fouille.
- Cette solution a permis de répondre aux contraintes technico-économiques du projet (débit résiduel après travaux de l'ordre de 40 m³/h).

Paroi de reprise en sous-œuvre
Underpinning wall



■ CARACTÉRISTIQUES DU PROJET

Localisation

Le site qui se trouve à l'angle des rues Nicolas Chorrier, Galilée et Clément à Grenoble (38) est pratiquement plat et horizontal, sa cote altimétrique moyenne est d'environ 212,50 NGF.

Avoisinants

Les existants et avoisinants situés dans la zone d'influence géotechnique du projet sont les suivants :

- ◆ côté rue Nicolas Chorrier : l'emprise de l'ouvrage projeté est mitoyenne sur son côté d'un immeuble R + 5 avec un sous-sol;
- ◆ côté impasse de Vizille : l'emprise de l'ouvrage projeté est mitoyenne d'un immeuble R + 2 sans sous-sol;
- ◆ le reste de l'emprise de l'ouvrage projeté est délimité par des rues en circulation.

■ SYNTHÈSE GÉOTECHNIQUE

Remblais limoneux de 212,50 à 211,00 NGF.
Sables et graviers compacts de 211,00 à 200,00 NGF.

Niveau de la nappe phréatique :

- ◆ EE conventionnelles : 210,70 NGF;
- ◆ E.H. : 211,20 NGF.

Un essai de pompage a permis de définir les caractéristiques de perméabilité et transmissivité des sables et graviers, à savoir :

- ◆ $T = 5,0 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$;
- ◆ $K = 5,0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$.

■ PROBLÉMATIQUE DU PROJET

La construction du sous-sol et donc le terrassement d'une fouille enterrée de - 4,0 m/TN, implique les contraintes suivantes :

- ◆ reprise en sous-œuvre des ouvrages existants;
 - ◆ soutènement de la fouille;
 - ◆ rabattement de nappe de - 1,80 m sur 2200 m² avec limitation de l'entraînement des fines pouvant engendrer un phénomène de suffosion.
- Les contraintes liées aux avoisinants sont :
- ◆ proscription des techniques de battage;
 - ◆ soutènement de la fouille étanche (pas de berlinoise sous l'eau).

■ SOLUTIONS ENVISAGÉES

Deux solutions étaient envisagées par la maîtrise d'œuvre. La première prévoyait :

- ◆ la réalisation d'un rabattement de nappe important $\approx 4000 \text{ m}^3/\text{h}$;
- ◆ la réalisation de berlinoise en soutènement;
- ◆ la reprise en sous-œuvre en micropieux/béton projeté.

Commentaire :

Cette solution ne permettait pas de s'affranchir du risque important lié aux entraînements de fines pouvant provoquer des désordres sur les existants à proximité.

Débit d'exhaure d'eau pompée très important (= 4000 m³/h) à rejeter dans les réseaux de la ville. La seconde solution prévoyait :

- ◆ la réalisation d'une paroi moulée étanche fichée de - 3 m/niveau à rabattre (206,00 NGF).

Commentaire :

La paroi étant réalisée à 1 m minimum des existants, cette solution occasionnait une perte de sur-

■ DESCRIPTION DE L'OUVRAGE À RÉALISER

Il s'agit de la construction d'un immeuble de logements R + 4 à R + 5 d'emprise au sol de 2200 m² avec un sous-sol enterré d'un niveau et demi à la cote 208,80 NGF soit - 3,7 m/terrain naturel.

la SCI "Le Galilée"

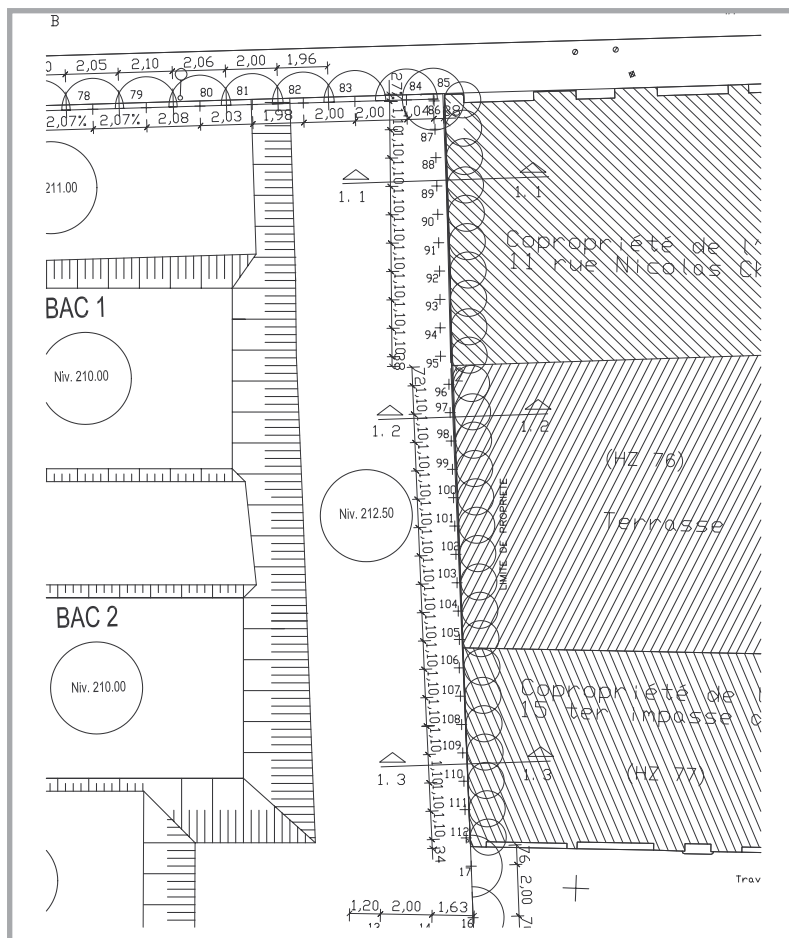


Figure 1
Implantation des colonnes de reprise en sous-œuvre
Location of underpinning columns

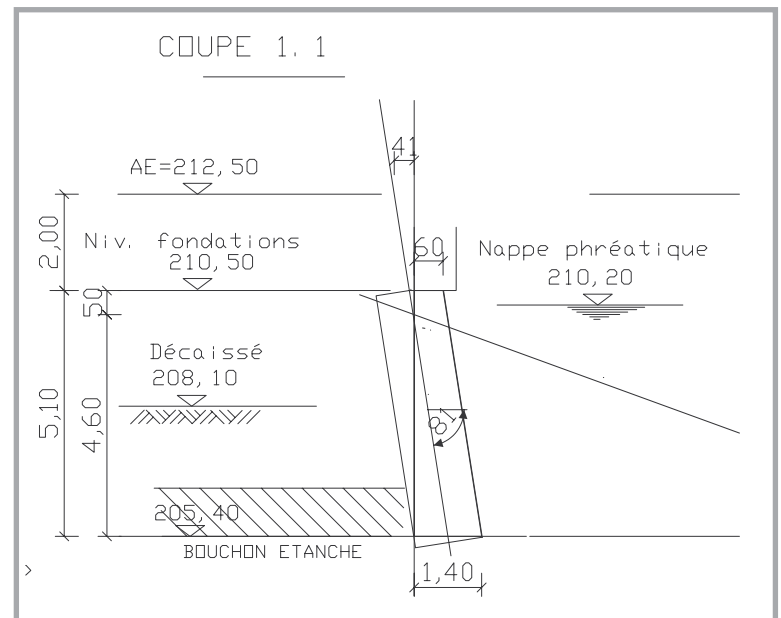


Figure 2

face du projet à réaliser. De plus, la fiche ne permettait que de limiter le pompage à 2 800 m³/h.

■ SOLUTION KELLER

La solution proposée par l'entreprise en collaboration avec la maîtrise d'œuvre géotechnique (Ets Solen), est la suivante :

- ◆ réalisation d'une "boîte étanche" sur l'emprise du projet composée :
 - d'une reprise en sous-œuvre des bâtiments existants par paroi Jet de 1,0 m d'épaisseur étanche ;
 - d'un soutènement mixte : colonnes de Jet + fers HEA étanches ;
 - d'un bouchon hydraulique en équilibre de masse étanche.

Commentaire :

Cette solution permet de :

- ◆ limiter les débits de pompage à 50 m³/h sur 2 200 m² (liés à la tolérance d'étanchéité) ;
- ◆ supprimer le risque d'entraînement de fines le long des existants ;
- ◆ conserver un terrassement en limite de mitoyen (surface en sous-sol conservée).



Réalisation

Sous les existants

La reprise en sous-œuvre a été réalisée par colonnes Ø 1,40 m sécantes permettant d'obtenir une paroi de Jet d'épaisseur équivalente de 1,0 m étanche réalisée directement sous les fondations du bâtiment existant.

Cette paroi a été descendue jusqu'au niveau du bouchon hydraulique (figures 1 et 2).



Paroi de soutènement côté rue Galilée

Supporting wall on Rue Galilée street side

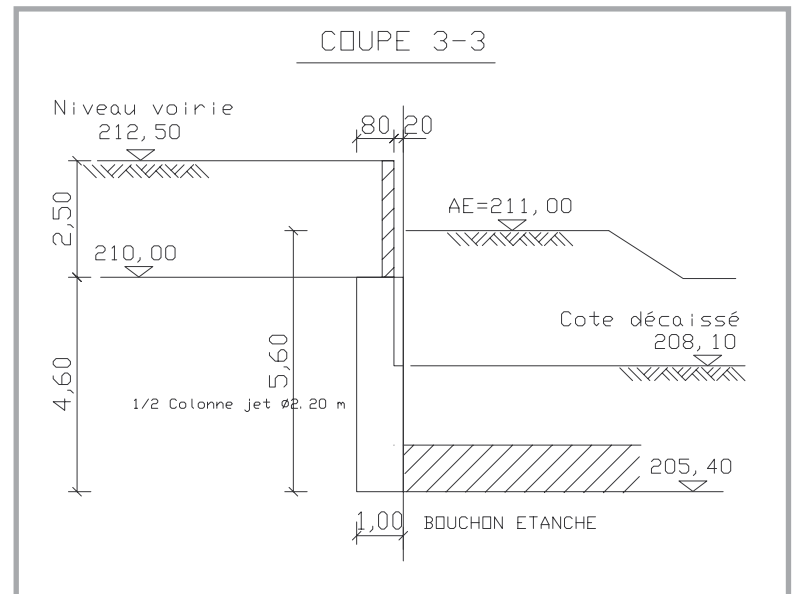
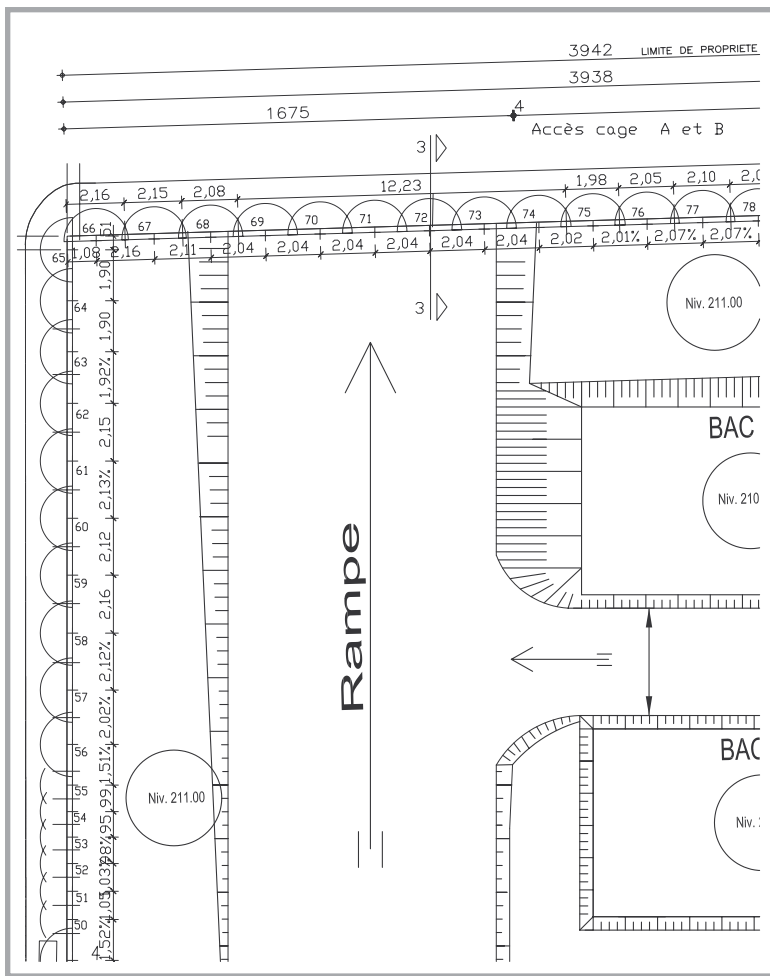


Figure 3
Implantation des colonnes
de la paroi de soutènement des terres
Location of columns for the earth
supporting wall

Figure 4

Vue générale
de la fouille
General view
of the excavation



LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- 1 440 m³ de Jet réalisé
- Acier incorporé : 24 tonnes
- Volume du bouchon : 2 300 m³
- Délais des travaux 2 mois

Paroi de soutènement des terres

Une paroi mixte composée de fers HEA 240 espacée de 2 m et de demi-colonnes de jet haute énergie sécantes de 2,20 m de diamètre descendues jusqu'au bouchon hydraulique, et placées en limite de propriété (figures 3 et 4).

Bouchon hydraulique

Un bouchon d'épaisseur 1 m a été réalisé à la cote 205,4 NGF soit à - 8 m/T.N.

1 300 points d'injection ont été exécutés. Ces injections sont faites grâce à deux tubes à manchettes.

Dans un premier tube, on effectue une injection primaire pour établir une imprégnation du terrain par coulis de ciment-bentonite. Ensuite, l'injection secondaire vient combler les vides restants au sein des sables et graviers.

La perméabilité résiduelle de ce bouchon était de 10⁹ m²/s.

Dimensionnement

Paroi

La stabilité des parois de Jet a été dimensionnée à l'aide du logiciel Rido.

La procédure de calcul comporte les étapes suivantes :



Paroi de soutènement côté rue Clément
Supporting wall on Rue Clément street side

- ◆ réalisation de la paroi Jet avec une épaisseur de 1 m et calcul de l'inertie de la paroi ;
- ◆ mise en place d'une surcharge de service (circulation, dallage des existants) ;
- ◆ rabattement de la nappe à 206,50 NGF ;
- ◆ excavation à 208,10 NGF.

Les résultats de calcul donnent des courbes enveloppes du moment maximal et de l'effort tranchant maximal.

Les efforts maximaux (moment et tranchant) sont alors pris en compte pour vérifier le rapport des efforts admissibles de la paroi sur les efforts maximaux (= coefficient de sécurité $\geq 1,5$ en provisoire).

Bouchon hydraulique

L'équilibre hydrostatique du système est vérifié suivant le principe de la poussée d'Archimède.

Le calcul tient compte des paramètres suivants :

- ◆ poids sous-pressif :
 - sous-pression exercée par la nappe en sous-face du bouchon ;
- ◆ poids résistant à la sous-pression :
 - poids du sable immergé restant dans la "boîte",
 - poids du sable déjàugé dans la "boîte",
 - poids du bouchon.

Le facteur de sécurité déterminé par le rapport du poids résistant sur le poids sous-pressif doit être $\geq 1,1$.

■ SYNTHÈSE D'EXÉCUTION

Après les travaux exécutés conformément au dimensionnement, le débit d'exhaure résiduel consta-



► té sur une fouille de 2 200 m² a été de 40 m³/h. Les travaux ont donc permis de réaliser un gros œuvre au sec, permettant de mieux contrôler l'exécution de l'étanchéité du radier pour la phase définitive.

La synthèse technico-économique s'est avérée compétitive et sécuritaire en comparaison des autres solutions initiales envisagées.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

Faure Promotion et SCI Galilée

Maître d'œuvre

Cabinet Benoît

Bureau d'études sol

Solen

ABSTRACT

The SCI Le Galilée project in Grenoble

Th. Bret

The SCI Le Galilée project involved the following constraints :

- Underpinning of existing buildings ;
- Supporting the ground on the street side ;
- Earthworks in the aquifer for construction of the basements (pumping capacity of approximately 4,000 cu. m/h to be provided for).

The solution adopted by Keller Fondations Spéciales was to produce a "water-tight box" consisting of :

- a composite wall (Berlin-type retaining wall + jet grouting) along the streets ;
- an underpinning wall (high-energy jet grouting) along the houses ;
- a sealed hydraulic plug at the bottom of the excavation.

This solution made it possible to meet the technical and economic constraints of the project (residual flow rate of approximately 40 cu. m/h after the works).

RESUMEN ESPAÑOL

El proyecto de la SCI Le Galilée en Grenoble (38)

Th. Bret

El proyecto de la SCI Le Galilée presentaba los imperativos siguientes :

- trabajos en recalce de edificios ya existentes ;
- contención de tierras por el lado de la calle ;
- movimientos de tierras en la capa para la realización de los sótanos (previsión de un bombeo de unos 4 000 m³/h).

La solución de Keller Fondations Spéciales ha consistido en ejecutar una "caja hermética" formada por :

- una pantalla mixta (pantalla de unión entre pilares + jet grouting) en la longitud de las calles ;
- una pantalla de trabajos en recalce (jet grouting alta energía) en la longitud de las viviendas ;
- un bloqueo hidráulico hermético en el fondo de las zanjas.

Esta solución ha permitido responder a los imperativos técnico-económicos del proyecto (caudal residual después de las obras de aproximadamente 40 m³/h).

Le prérecépage : un procédé novateur pour recéper les pieux

Les techniques de recépage traditionnelles induisent l'existence de mauvais béton en tête de pieux. Or l'élimination de ce mauvais béton engendre des nuisances sonores et des retards sur les chantiers.

C'est pourquoi la société Recepieux a mis en place un système de prédécoupage de têtes de pieux. Des flacons sont placés sous la partie de mauvais béton. Une fois la prise du béton effectuée, un mortier expansif est introduit dans le flacon qui vient alors fissurer le béton. Il ne reste alors plus qu'à enlever la mauvaise partie de béton à l'aide d'un engin de levage.

Pour optimiser ce procédé, la société Geonumeric a mis en œuvre des modèles éléments finis qui ont permis d'optimiser la forme des flacons et d'augmenter de 30 % la puissance de fissuration des flacons tout en s'affranchissant des contraintes propres à la prise du béton (élévation de température et de pression...) tout en obtenant une fissuration quasi horizontale.

Economiquement parlant, ce procédé se révèle globalement plus rentable que les techniques traditionnelles, ce qui lui a permis d'être adopté dans de nombreux chantiers prestigieux tels que le métro de Londres ou encore les autoroutes d'Espagne et de Suisse.

La société Geonumeric basée à Saint-Martin-d'Hères (38) réalise des calculs avancés et des logiciels spécifiques pour la profession du BTP (calculs non linéaires, calcul d'endommagement, du béton, calculs sismiques, explosions...). Depuis 1999, la société Geonumeric travaille en partenariat avec la société Recepieux pour la mise en œuvre de modélisations par éléments finis du fonctionnement du procédé et pour une assistance scientifique et technique à la conception du produit.

Les contributions de Geonumeric ont porté principalement sur :

- ◆ l'optimisation de forme et la conception du nouveau flacon ;
- ◆ les calculs en mécanique de la rupture du béton et des performances des différentes formes de flacon (logiciel ANSYS avec développements propres à Geonumeric et logiciel ATHENA de la société Cerwenka à Prague) ;
- ◆ les calculs et l'optimisation de la résistance au flambement des flacons vides soumis à une pression hydrostatique ainsi qu'à leur validation en plongée sous-marine.

■ LA MÉTHODE TRADITIONNELLE DE RECEPAGE

Trois techniques sont traditionnellement mises en œuvre :

- ◆ la technique dite de "tarière creuse" qui consiste à forer le sol avec une tarière dont l'axe est un

tube par lequel sera injecté le béton simultanément au dévissage de la tarière. Les armatures métalliques sont ensuite introduites dans le béton frais. Dans ce cas le béton est toujours coulé jusqu'au niveau de la plate-forme de travail ;

- ◆ la technique dite du "foré tubé" qui consiste à descendre simultanément au forage, une chemise métallique destinée à tenir les parois du sol. Dans ce cas on introduit la cage d'armature dans le trou avant d'effectuer le bétonnage (par la base) à l'aide d'un tube plongeur. La chemise est soit perdue, soit récupérée ;

- ◆ la technique du forage "à la bentonite" plus couramment utilisée dans les bavettes et les parois moulées qui consiste à remplir le trou d'une boue à base de bentonite simultanément au forage de manière à exercer sur les parois du trou une pression hydrostatique pour éviter les éboulements de terrain. La deuxième étape consiste à positionner les armatures dans la boue de bentonite. La troisième consiste à descendre un tube au fond du trou. Le tube est connecté à une pompe à béton. Le remplissage du béton sera réalisé du bas vers le haut et parallèlement au pompage de la bentonite. Lors du remplissage du béton, des matières indésirables se mélangent avec le béton au fond du trou et remontent en partie supérieure. Ces matières indésirables sont de la bentonite, de la terre, du laitier de béton, etc.

Dans tous les cas, pour chacune des trois techniques, la partie supérieure des pieux est formée d'un béton de mauvaise qualité qu'il faudra éliminer sur une hauteur variable allant de 50 cm au mi-



Photo 2
Tête de pieu prérecépée
avec procédé Recepieux
*Pile head precut-off
with Recepieux process*

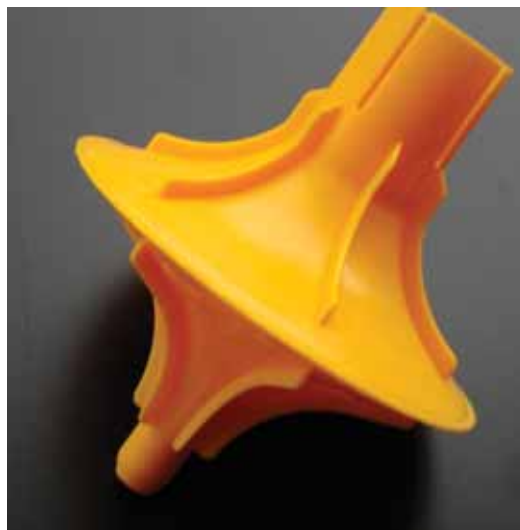


Photo 1
Flacon optimisé
Optimised flask



Photo 3
Ancien flacon
Old flask

► nimum à 1,5 m. Traditionnellement, ce mauvais béton est éliminé au marteau-piqueur, au BRH (brise roche hydraulique) ou avec des systèmes de vérins hydrauliques, ce qui nécessite des interventions humaines au milieu des armatures d'attentes. Cette méthode génère du bruit et engendre des délais qui retardent les chantiers. Elle tord les aciers en attente et génère des micro-fissures sur la tête des pieux.

■ LE PRÉ-RECEPAGE RECEPIEUX

Il s'agit d'un système de prédécoupage de tête de pieux en béton. Ce prédécoupage est réalisé par l'inclusion dans le béton frais de bouteilles en plastiques représentées sur la photo 1.

Le nombre de flacons varie de 1 pour prérecéper un pieu de 60 cm à 50 pour un pieu de 3 m. La partie supérieure de chaque flacon est reliée à la surface du béton par un tube en PVC. Le béton fait sa prise, et au bout de 4 à 5 jours il est suffisamment dur pour être prérecépé. Une fois le béton durci, on introduit par le tube PVC dans le flacon un mor-

tier expansif qui développe une forte pression et crée une fissure de prérecépage.

Au préalable on aura toujours entouré les armatures en attente avec des gaines en mousse du type isolation thermique de tuyauteries. Au moment du terrassement, il n'y a plus qu'à enlever au moyen d'un engin de levage la partie de mauvais béton située au-dessus de la fissure (photo 2).

■ OPTIMISATION DU PROCÉDÉ RECEPIEUX

La société Recepieux a mis sur le marché une première version du système il y a 7 ans avec un flacon de forme conique (photo 3). Le système a, depuis, été fortement optimisé pour améliorer la forme du flacon proprement dit, ce qui a permis d'obtenir un gain de puissance d'environ 30 %. Pour ceci la société Geonumeric, partenaire de Recepieux a mis en œuvre des simulations éléments finis en mécanique de la rupture du béton présentées sur les figures 1 et 2. Les simulations numériques indiquent que la fissure se développe horizontalement avec une très grande précision et qu'il ne se forme aucune micro fissure en tête du pieu.

Nous avons également renforcé la tenue à la pression externe des nouveaux flacons à l'aide de nervures externes et internes comme le montre la figure 6 afin de répondre à des situations de mise en œuvre de grandes hauteurs de béton et/ou d'eau. Le calcul du nombre, de la forme et de la disposition des nervures a été réalisé (par la société Geonumeric) avec des calculs éléments finis 3D de coque en flambement. Ces simulations ont été validées sous l'eau par des plongeurs. Parallèlement, le flacon optimisé a été testé en situation réelle sur le sixième pont sur la seine à Rouen. Pour cet essai, quatre flacons, avec les tubes de remplissage en PVC, ont été noyés dans une chemise métallique de 800 mm de diamètre. Cette chemise a été remplie par 2 m de béton au-dessus du niveau de recépage et plongée sous 15 m d'eau. Après 3 jours d'immersion, le tube a été retiré de l'eau puis découpé et la bonne étanchéité des flacons a été contrôlée. Les flacons ont ensuite été remplis de mortier expansif et la rupture du béton s'est réalisée après une heure. Cet essai a permis de démontrer que le flacon ne subissait pas de déformation due à la pression hydrostatique. Suite à cet essai le groupement d'entreprises Quille et Eiffage TP a décidé de généraliser le procédé à l'ensemble des pieux du chantier. Les flacons ont été installés dans les pieux fin 2004. Ils seront prérecépés dans le courant du mois de mai 2005.

Enfin, nous nous sommes affranchis des problèmes liés à la température des bétons qui provoquait des éruptions du mortier expansif par le tube de remplissage (dès que la température du béton était supérieure à 25 °C) en introduisant à la fabrication

une bille de bois qui, par flottaison au moment du remplissage, fait fonction de clapet anti-retour (photo 4). Parallèlement au travail sur le flacon lui-même, un système de cadre métallique formé de trois composants standardisés permet sans outillage de créer à l'altitude précise de recépage un gabarit permettant de positionner de manière optimale l'ensemble des flacons nécessaires au prérecépage de la fondation et quelle que soit sa dimension (photo 5).

■ EVOLUTION DE L'ACTIVITÉ DE RECEPIEUX

Dans le bâtiment

Jusqu'à présent le marché du prérecépage était adopté sur les gros ouvrages de génie civil car ce marché est beaucoup plus exigeant, sur le plan de la qualité et de la sécurité d'une part, et la clientèle plus ouverte à comparer des solutions globales, tenant compte d'éléments comme le gain de temps qui est l'argument principal du procédé, plutôt qu'une comparaison basée uniquement sur les coûts directs.

En effet, le recépage traditionnel affiche peu de coûts directs, par contre de nombreux coûts indirects sont masqués : temps passé à redresser les aciers, fatigue du personnel, accidents du travail, nuisances..., alors que le prérecépage Recepieux affiche clairement un coût direct (prix du kit + temps de mise en place) mais n'a pratiquement aucun coût indirect ou coût masqué, ce qui fausse les comparaisons.

Depuis 1 an le marché est en train de s'inverser, notamment du fait de pouvoir fixer les flacons dans les cages avec une baisse des prix d'environ 30 % et une fiabilité accrue, le marché du bâtiment est en train de prendre le pas sur celui du génie civil, et on commence à voir des entreprises de forages qui proposent l'option de fournir des pieux prérecépis à leurs clients. D'autre part les prescripteurs commencent à inclure le prérecépage lors des appels d'offre dans le lot fondations ce qui est plus cohérent.

A l'export

La Grande-Bretagne, l'Espagne, le Portugal, la Suisse, commencent déjà à adopter le prérecépage sur des chantiers prestigieux comme le métro de Londres, centrales thermiques et autoroutes en Espagne, le Casino de Lisbonne et pont sur le Tage au Portugal, parking et autoroutes en Suisse... Parmi ces références multiples, nous avons choisi de développer les conditions de mise en œuvre sur trois chantiers particuliers :

◆ en Grande-Bretagne, le procédé a été mis en œuvre par Solétanche Bachy UK qui a réalisé une

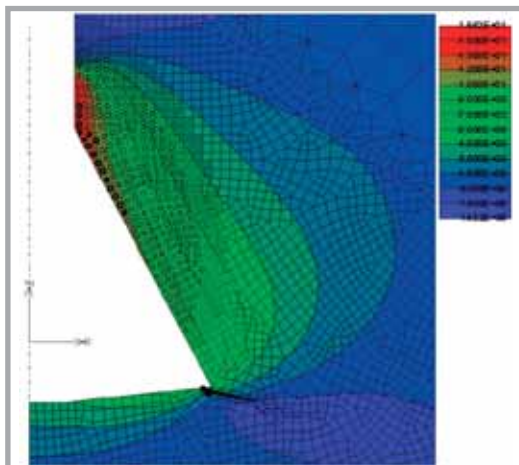


Figure 1
Modélisation de la fissuration du béton avec l'ancien flacon

Modelling of concrete cracking with the old flask

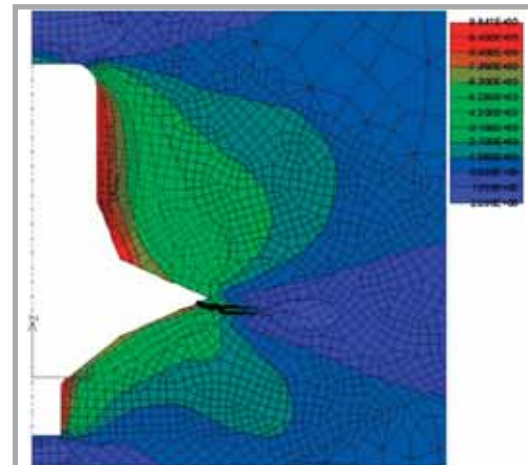


Figure 2
Modélisation de la fissuration du béton avec le nouveau flacon

Modelling of concrete cracking with the new flask



Photo 4
Détail du nouveau flacon
Detail of new flask



Photo 5
Cadre support préfabriqué des flacons
Prefabricated support frame for flasks

► tour de bureaux à Canary Warf (quartier de la city à Londres). Cent cinquante pieux de diamètre 1 500 mm ont été réalisés dans un batardeau avec un espace de travail restreint. La technique de vérins hydrauliques initialement prévue a été remplacée par le procédé Recepieux. La mise en œuvre du procédé a permis, tout en respectant les normes acoustiques et environnementales (sévères) en vigueur en Angleterre, de réduire le délai initial d'environ 3 semaines malgré la contrainte d'exiguïté de l'espace de travail ;

◆ en Espagne pour un viaduc situé à Terruel sur l'autoroute Saragosse-Valence l'entreprise Dragados avait pris 15 jours de retard sur le recépage de 60 pieux (sur 120 au total) de 1 500 mm réalisé au marteau piqueur et au mini BRH. Ce retard avait pour conséquence l'arrêt du chantier. Le procédé Recepieux mis en œuvre sur les 60 pieux restant a permis de regagner les 15 jours perdus ;

◆ au Portugal 400 pieux de 600 mm de diamètre ont été mis en œuvre par la société Motta-Engil pour le casino de Lisbonne. La technique du vérin hydraulique s'est avérée difficile à utiliser pour des raisons de présence d'eau à l'altitude de recépage et a été remplacée avec succès par le procédé Recepieux.

La Grèce et Hong-Kong sont les deux prochaines étapes avec la mise en place de distributeurs qui devraient prochainement engranger leurs premières commandes.

ABSTRACT

Precutting-off : an innovative process for cutting off piles

P. Wyniecki, D. Fonfrede

Traditional cutting-off techniques lead to the existence of poor-quality concrete at the head of piles. Now, the removal of this poor-quality concrete generates noise pollution and delays on projects.

That is why Recepieux company has introduced a system for pre-cutting of pile heads. Flasks are placed under the poor-quality concrete part. Once the concrete has set, a mortar expanding agent is inserted in the flask, which then cracks the concrete. All that remains to be done then is to remove the poor-quality part of the concrete with a hoisting appliance.

To optimise this process, Geonumeric company employed finite element models which made it possible to optimise the shape of the flasks and increase by 30 % the flasks' cracking power while overcoming the specific constraints of concrete setting (temperature and pressure rise, etc.) and obtaining quasi-horizontal cracking.

Economically speaking, this process proves on the whole more profitable than the traditional techniques, which has enabled it to be adopted on many prestigious projects such as the London Underground or again motorways in Spain and Switzerland.

RESUMEN ESPAÑOL

Desmochado preliminar : un procedimiento innovador para desmochar a los pilotes

P. Wyniecki y D. Fonfrede

Las técnicas de desmochado convencionales presuponen la existencia de hormigón de mala calidad en cabeza de pilote. Ahora bien, la eliminación de este hormigón de mala calidad da lugar a diversas contaminaciones acústicas y retrasos en las obras de construcción.

Motivo por el cual la empresa Recepieux ha implantado un sistema preliminar para descabezar a los pilotes. Se colocan diversos frascos por debajo de la parte de hormigón de mala calidad. Una vez efectuado el fraguado del

hormigón, se introduce un mortero expansivo en el frasco que viene entonces a fisurar el hormigón. Basta entonces levantar la parte de hormigón de mala calidad por medio de un equipo elevador.

Con objeto de optimizar este procedimiento, la empresa Geonumeric ha puesto en aplicación diversos modelos de elementos acabados que han permitido mejorar la forma de los frascos y aumentar de un 30 % la potencia de agrietamiento de los frascos que permite liberarse de los imperativos propios al fraguado del hormigón (elevación de temperatura y de presión, etc.) obteniendo siempre un agrietamiento casi horizontal.

Desde el punto de vista económico, este procedimiento demuestra ser globalmente más rentable que las técnicas convencionales, lo cual permitió a este procedimiento ser adoptado en numerosas obras de prestigio como por ejemplo el metro de Londres e incluso las autopistas en España y Suiza.

A51 - Coynelle - Col du Fau

Rencontre avec les argiles du Trièves



Après une rapide présentation générale de ce tronçon d'autoroute, cet article s'attache plus particulièrement à la présence des fameuses argiles litées et varvées dit "du Trièves".

Deux sites de cette opération exceptionnelle mettent en évidence ces argiles. Les auteurs se sont efforcés de les décrire géologiquement et de résumer les solutions techniques mises en œuvre pour les franchir.

La présentation générale de cette opération autoroutière de montagne dévoile sur une courte longueur la présence d'une belle panoplie d'ouvrages remarquables, avec un tunnel, un viaduc et de part et d'autre deux sections pas aussi courantes qu'on les appelle habituellement, avec 46 000 m² (dont environ 15 000 m² en déblai) de murs de soutènement, les argiles du Trièves, qui la qualifie justement de section exceptionnelle (figure 1).

La maîtrise d'ouvrage de cette opération est assurée par AREA, Direction de la Construction, qui a confié la direction du projet à Scetauroute.

■ PRÉSENTATION GÉNÉRALE

La section Coynelle - Col du Fau, construite par AREA, longue de 10,5 km, a son origine à Coynelle (commune de Saint-Martin-de-la-Cluze) au droit de l'extrémité provisoire de la section en service débouchant sur le carrefour giratoire avec la RN 75, à l'altitude d'environ 640 m NGF, et son extrémité au Col du Fau à l'altitude d'environ 900 m NGF où elle se raccordera par un nouveau carrefour giratoire provisoire également sur la RN 75. La sortie provisoire de Coynelle sera supprimée, un demi-

fuseur sera créé sur le plateau d'Avignonet - Sinard, orienté vers Grenoble.

La section peut se décomposer en cinq tronçons différents par natures d'ouvrages et en caractéristiques géométriques :

- ◆ la montée des Marceaux - Coynelle - Avignonet, 3 km ;
- ◆ le plateau d'Avignonet - Sinard, 3 km ;
- ◆ le tunnel de Sinard, 950 m (tube ouest) ;
- ◆ le viaduc de Monestier, 860 m ;
- ◆ la montée au Col du Fau, 2,5 km.

Ces cinq tronçons ainsi que le cadre géologique gé-

Jacques Martin

DIRECTEUR
DU PROJET A51
Scetauroute



Dominique Allagnat

CHEF DE PROJET
GÉOTECHNIQUE
Scetauroute



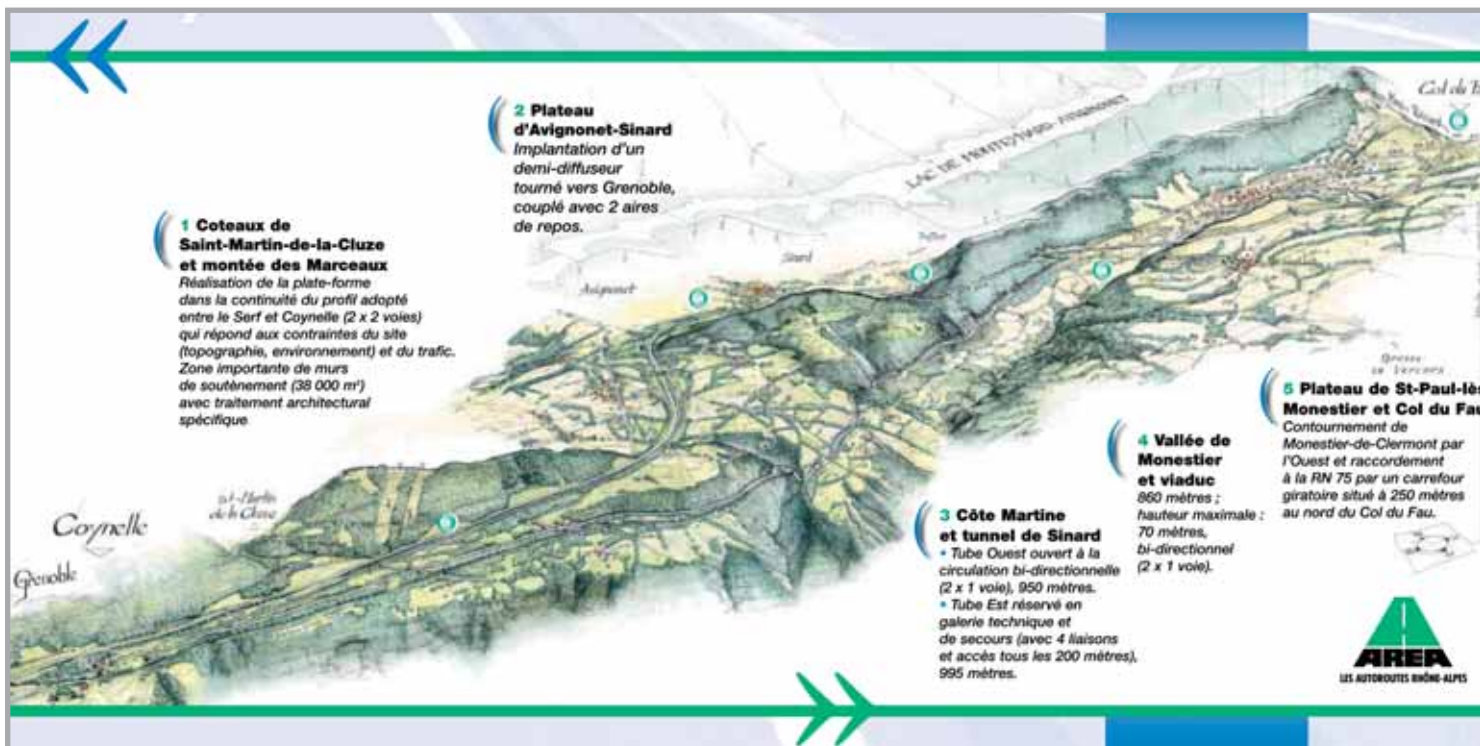
Christian Chapeau

CHEF DU GROUPE GÉOTECHNIQUE
CETE de Lyon

Photos : AREA - Scetauroute - GTM -
Christophe Huret - Pixellium

Figure 1
Présentation de la section
Coynelle - Col du Fau

Description
of the Coynelle -
Col du Fau section



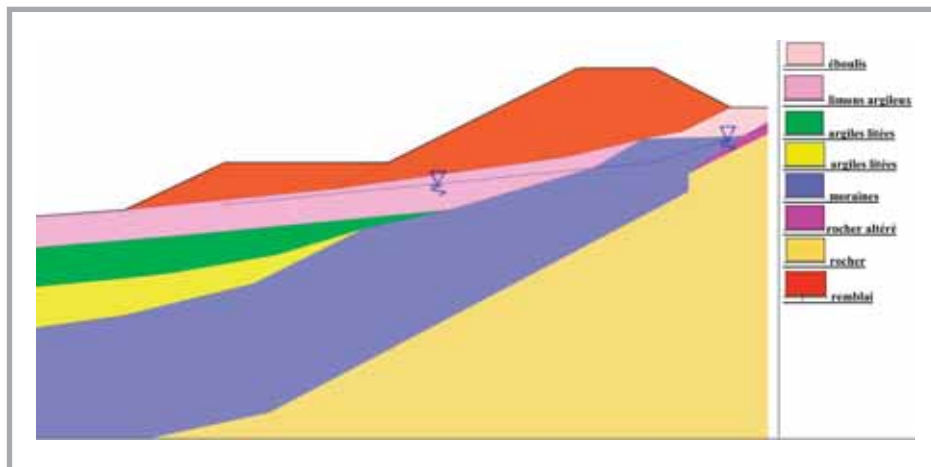


Figure 2
Profil géotechnique
prévisionnel au droit
du remblai R8
*Projected geotechnical
profile at the level
of the R8 embankment*

néral ont été décrits dans l'article paru en juillet-août 2004 dans *Travaux* n° 810 (pages 24 à 27). Deux sites remarquables mettant en évidence les argiles du Trièves sont rencontrés par le tracé de l'autoroute A51. Le premier est situé sur le bassin versant du Drac par le biais du lac de Monteynard-Avignonet dans le thalweg du Merdaret. Le second est situé dans la vallée du Fanjaret affluent rive droite de la Gresse. Ces deux cours d'eau se raccordant à Seyssins sont un affluent rive gauche de l'Isère.

■ LE REMBLAI D'ACCÈS À LA TÊTE NORD DU TUNNEL DE SINARD – REMBLAI R8 (THALWEG DU MERDARET)

Situation de l'ouvrage

Les conditions géométriques de calage du profil en long de l'autoroute dans le tunnel de Sinard et pour le viaduc de Monestier, situé plus au sud, ont conduit à projeter un grand remblai pour l'accès à la tête nord du tunnel. Sa hauteur maximale atteint 17 m et le terrain naturel à cet endroit présente une pente transversale variable puisqu'il se trouve fondé en pied de versant calcaire, côtoyant les dépôts lacustres (formés par les argiles du Trièves) côté aval.

Contexte géotechnique

Le contexte géotechnique des sols de fondation de ce remblai est relativement complexe avec un contraste fort de la qualité des terrains de l'amont vers l'aval (figure 2). En effet, le substratum calcaire affleurant sur les versants est recouvert en épaisseur importante à l'aval par des dépôts meubles du type moraines et argiles litées du Trièves. Les risques géotechniques dans ce contexte sont multiples. D'une part, on peut craindre la rupture par glissement ou par poinçonnement du sol d'assise constitué partiellement d'argiles lacustres dont les caractéristiques sont médiocres, comme en té-

moignent les glissements régionaux d'Avignonet et de Treffort. En outre, l'hétérogénéité des sols de fondation est susceptible d'engendrer des déformations différentielles préjudiciables au corps du remblai autoroutier et aux structures associées. Les reconnaissances géotechniques ont été réalisées en plusieurs campagnes successives en fonction de l'étude de différentes variantes de tracé. Elles ont consisté en la réalisation de sondages pressiométriques, phicométriques, destructifs avec enregistrement des paramètres, carottés et pénétrométriques au démarrage des travaux. Ces investigations in situ ont été complétées par des essais de laboratoire : identifications géotechniques, essais triaxiaux (UU et CU + u), essais œdométriques de compressibilité et de fluage.

Le substratum calcaire du Bajocien est surmonté de dépôts meubles de nature et d'origine diverses :

- ◆ des **colluvions et éboulis de pente indifférenciés**. A dominante limoneuse, ces matériaux contiennent localement des graviers. Ils surmontent directement le substratum calcaire en pied de versant ;

- ◆ des **limons plus ou moins argileux** qui surmontent les dépôts glaciaires et fluvio-glaciaires de la vallée ;

- ◆ des **argiles litées d'origine glacio-lacustres**. Elles présentent dans ce secteur un faciès variable, parfois plus sableux voire graveleux ;

- ◆ un **banc plus ou moins argileux** intercalé dans les argiles litées a été reconnu localement sur une épaisseur de 4 à 5 m dans les sondages ;

- ◆ de même, un **niveau de cailloutis de calcaire noir** de 6 m d'épaisseur a été dissocié des argiles litées qui le contiennent ;

- ◆ des **moraines sablo-graveleuses** à matrice limoneuse ou argileuse surmontant, en fond de vallée, le substratum qui s'éloigne alors de la surface.

Etudes de la stabilité du remblai

A l'issue de l'analyse détaillée des sondages et essais, les caractéristiques moyennes retenues pour les argiles litées sont les suivantes :

- ◆ caractéristiques de cisaillement à court terme :

$\phi_u = 0$ Cu = 65 kPa de 0 à 2,50 m,
Cu = 70 kPa de 2,50 m à 13 m,
Cu = 85 kPa au-delà de 13 m de profondeur ;

- ◆ coefficients de consolidation :

Cv = $1.6 \cdot 10^{-7}$ m²/s,
Cr = $8 \cdot 10^{-7}$ m²/s.

Compte tenu de la lithologie (figure 2), l'estimation des tassements conduit à des valeurs très variables entre l'amont et l'aval du remblai, soit respectivement quelques centimètres à plus de 40 cm.

Les études géotechniques ont montré que la stabilité au poinçonnement est juste satisfaisante. En revanche, la stabilité au glissement circulaire n'est

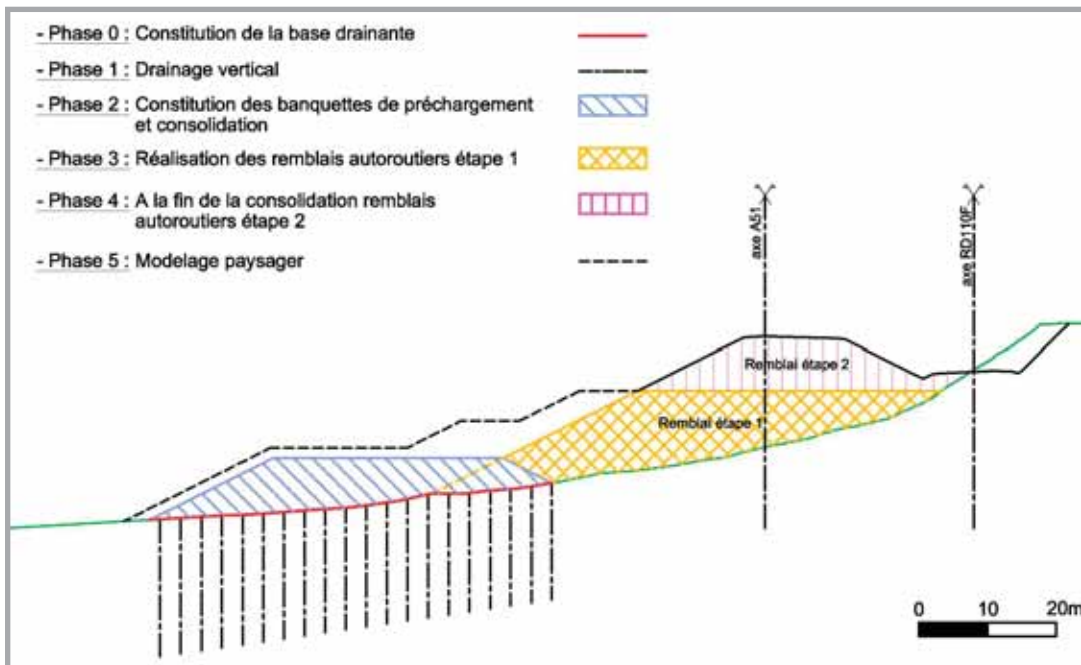


Figure 3
 Profil en travers type
 du remblai R8
 avec phasage des travaux
*Typical cross section
 of the R8 embankment
 with work schedule*

pas assurée : $F_s \leq 1$, selon la méthode de Bishop, pour le profil en travers où le remblai est le plus haut.

Pour garantir cette stabilité, plusieurs solutions de confortement ont été envisagées. C'est la solution la plus économique qui a été retenue. Elle consiste à réaliser à l'aval du remblai une banquette de stabilisation avec une construction par étapes et une consolidation accélérée des argiles par drainage vertical.

Pour atteindre un degré de consolidation $U = 95\%$ avec une durée de l'ordre de 3 mois, le réseau de drainage a été calculé avec une maille carrée 2,25 m x 2,25 m (diamètre équivalent des drains = 70 mm).

Phasage et réalisation des travaux

Le phasage des travaux est présenté en figure 3. Les séquences principales sont les suivantes :

1. Réalisation du drainage vertical (photo 1) ;
2. Construction de la banquette stabilisatrice qui sert de remblai de préchargement. Les remblais principaux sont élevés jusqu'à une hauteur limitée à une dizaine de mètres pour garantir la stabilité dans cette phase (photo 2) ;
3. Consolidation des argiles sous la banquette ;
4. Les remblais principaux sont élevés jusqu'à leur cote définitive.

Les drains utilisés sont constitués d'une âme en PEHD entourée d'une enveloppe filtrante en géotextile. Ils sont de section rectangulaire, de largeur 100 mm et ont été foncés selon une maille de 2,25 m x 2,25 m, jusqu'au refus, soit une profondeur maximale de l'ordre de 16 m.

La profondeur maximale de drainage a été réduite par rapport à celle envisagée initialement, au vu des résultats des drains d'essai et sondages pé-



Photo 1
 R8 base drainante
 et drains verticaux
*R8 draining base
 and vertical drains*



Photo 2
 Réutilisation
 du marinage du tunnel
 pour le préchargement
 des banquettes R8
*Recycling tunnel
 mucking as preliminary
 fill for the R8 berms*



Photo 3
Remblais R8
en cours de réalisation
*Work in progress
on R8 embankment*



nétométriques (statique lourde) réalisés au démarrage des travaux. L'épaisseur moyenne des argiles litées est en effet moins importante que prévue, sauf localement à la faveur de surcreusements dans les moraines de fond.

Le suivi de la construction du remblai et notamment de la banquette a été assuré par quatre profils équipés chacun de trois tassomètres hydrauliques. Le tassement maximum observé sous la charge de la banquette est de 25 cm et reste conforme aux prévisions en tenant compte de la réduction d'épaisseur des argiles litées, comme évoqué ci-avant (photos 3 et 4).

■ LA VALLÉE DU FANJARET - LE VIADUC DE MONESTIER-DE-CLERMONT

Rappel des contraintes du projet

Le franchissement de la vallée du Fanjaret au nord de Monestier-de-Clermont dans l'Isère est une brèche d'environ 1 000 m de largeur, orientée suivant un axe nord (Grenoble) - sud (Col du Fau). C'est une vallée plate, pratiquement horizontale, presque symétrique et bordée par deux massifs rocheux escarpés, avec des pentes de 30 à 40 degrés. La vallée est empruntée par la RN 75, de

Grenoble à Sisteron, et par la voie ferrée, de Grenoble à Veynes. Le ruisseau du Fanjaret traverse le plateau dans sa partie sud et deux routes départementales empruntent les flancs de la Brèche. L'autoroute A51 se prolonge au nord de la vallée de Monestier-de-Clermont par le tunnel de Sinard qui sera constitué, à terme, de deux tubes parallèles séparés d'une vingtaine de mètres. La distance est très faible entre le viaduc et la tête de tunnel et l'ouvrage doit comporter à terme deux tabliers portant chacun une chaussée autoroutière. Un seul tablier est construit en première phase pour porter une chaussée bidirectionnelle ; le choix de la solution technique doit tenir compte du doublement futur en terme d'interaction, et de faisabilité.

La connaissance géologique du site

La vallée de Monestier est une vallée glaciaire profonde, dont le toit du substratum n'est pas complètement reconnu et dont la partie centrale est comblée par des **argiles varvées et molles** d'origine glacio-lacustre, surmontées par des terrasses fluvio-glaciaires. Le contexte hydrogéologique est compliqué avec la présence de nappes artésiennes dans les moraines tapissant le substratum, avec comme toit les argiles varvées. Leur charge varie dans le temps et peut être très élevée, côté sud (localement au moins 30 m/T.N. d'après les mesures effectuées).

Le substratum est, au nord-est, constitué de calcaires quartzo-argileux, du Bajocien, et, au sud-ouest, des calcaires marneux noirs dit "terres noires". Le pendage des lits et bancs est de 60-65° vers l'ouest. Une altération marquée de ces formations règne sur des épaisseurs importantes plurimétriques à décimétriques.

Le versant nord-est, comprenant la tête sud du tunnel de Sinard et la culée nord du viaduc, présente des signes d'instabilité (niches d'arrachement, fauchage des schistes).

Le léger pendage des couches semi-profondes et les nappes artésiennes contenues dans les horizons perméables des moraines de fond et des moraines latérales provoquent le **glissement** lent (de 1 à 5 mm/an d'après mesures effectuées depuis 1996) des couches supérieures sur une épaisseur

Photo 4
Panoramique Merdaret
Merdaret panorama



de 10 à 20 m au droit du viaduc, avec des indices de glissement dans les zones qu'il franchit entre la RN 75 et le Fanjaret, au pied des pentes rocheuses côté sud.

Si la conjonction des charges hydrauliques et du glissement est démontrée, l'origine de la recharge potentielle des nappes captives n'est pas connue. L'ouvrage est situé dans une zone fracturée sur l'axe d'un système de failles actives de direction N40 avec comme conséquences majeures :

- ◆ une activité sismique importante, avec cinq séismes entre 1962 et 1999 dont la magnitude a été comprise entre 3,8 et 5,5 ;

- ◆ une vallée de Monestier-de-Clermont creusée entre deux massifs rocheux qui s'est trouvée progressivement comblée, dans la partie centrale de la vallée, par des argiles molles sur une profondeur très importante (plus de 80 m au centre) et sur une largeur de l'ordre de 300 m.

Le site est donc soumis à des **actions sismiques** récurrentes avec un spectre de réponse spécifique, préalablement établi par le CETE Méditerranée agence de Nice.

Les argiles correspondent au remplissage d'un lac temporaire pendant la dernière glaciation de Würm : les moraines repoussées par le glacier du Grésivaudan ont créé un barrage dans la vallée du Fanjaret, qui avait à cette époque une toute autre importance qu'aujourd'hui. La création progressive du lac a provoqué une sédimentation dont les sondages montrent la stratigraphie détaillée, avec une très épaisse **couche d'argiles varvées**.

Le site est alors classé réglementairement en zone sismique Ib, l'ouvrage étant de catégorie C, l'accélération nominale du séisme à retenir est 2 m/s². L'absence de risque de liquéfaction des argiles est à confirmer pour les argiles varvées à lits sableux très fins.

La conjonction d'un événement sismique avec une forte charge hydraulique dans les nappes captives reste un facteur de reprise de glissement :

- ◆ identifiés dès l'APS, ces risques de glissement avaient conduit à l'époque à repousser le tracé du franchissement vers le sud, au-delà du secteur de La Motte où des glissements actifs affectent les argiles sur des épaisseurs significatives ;

- ◆ mais l'analyse morphogéologique annexée à la pièce B.1.2 du dossier de concours montrait que le tracé retenu en définitive traversait encore, de part et d'autre de la VC 5, des zones argileuses actives. Les mesures effectuées depuis 1996 sur les inclinomètres mis en place avaient mis en évidence un déplacement lent (14 à 16 mm en 5 ans), grossièrement perpendiculaire à l'axe du premier viaduc, qui affectait les argiles superficielles sur une épaisseur de 15 à 18 m. Dans les trois cas, l'argile était très humide ; la présence d'une nappe artésienne dans les matériaux morainiques situés dans et sous les argiles n'était apparemment pas sans lien avec les mouvements observés.



Les contraintes liées à la climatologie

Neige et gel

Situés à 800 m d'altitude, les ouvrages seront exposés à un gel sévère (classe 2b2 de la norme P18-305). Les chaussées et les superstructures du tablier seront soumises à des projections de sels de déverglaçage.

D'après les relevés météorologiques, le nombre moyen de jours où la température n'a pas dépassé 0 °C est de 16,4 jours par an sur les trente dernières années. Le nombre moyen de jours de neige est de 24,8 jours par an sur les douze dernières années (photo 5).

Vent

Les ouvrages doivent être justifiés sous l'effet du vent turbulent. A partir des mesures effectuées sur le site par le CSTB d'octobre 2001 à février 2002, les caractéristiques de la turbulence retenues sont la vitesse moyenne du vent à 40 m au-dessus du fond de la vallée, évaluée à 24 m/s pour une période de retour de 50 ans.

Procédure de consultation

Il s'agit d'un appel d'offres restreint, lancé après appel public à la concurrence, sous la forme d'un concours de conception-réalisation. A l'issue du concours, le contrat est passé avec le lauréat. Chacun des concurrents ne pouvait présenter qu'une seule offre.

Le choix de cette procédure est dicté par les éléments suivants, qui imposent des contraintes techniques particulières tant en phase de conception que de réalisation et conduisent d'associer dès l'origine les réalisateurs aux concepteurs :

- ◆ l'ouvrage d'art à construire franchit à grande hauteur (40 à 70 m) la vallée du Fanjaret dans un site bénéficiant en toile de fond du Vercors. Le traitement architectural du viaduc, les aménagements paysagers, le modelage des remblais d'accès doivent respecter les objectifs de préservation du site, assignés par l'Etat ;

- ◆ la localisation en zone de sismicité Ib ;

- ◆ la présence de zones d'argiles molles en forte épaisseur (plus de 80 m).

Photo 5
Contraintes hivernales!
Constraints of winter!



Décomposition en phases et en lots

Le marché de conception-réalisation serait passé obligatoirement avec un groupement conjoint, dont le mandataire est solidaire de l'ensemble de ses cotraitants :

- ◆ lot principal : pilotage et coordination, études des méthodes, réalisation et assurance de la réalisation, assurance de la qualité de tous les travaux non compris dans les autres lots et mandataire du groupement ;
- ◆ lot accessoire n° 1 (facultatif) : charpente métallique (études des méthodes, réalisation, assurance de la qualité) ;
- ◆ lot accessoire n° 2 : fondations (études des méthodes, réalisation, assurance de la qualité) ;
- ◆ lot accessoire n° 3 : études architecturales et paysagères ;
- ◆ lot accessoire n° 4 : études techniques.

En outre, le cadre de détail estimatif proposé aux concurrents distinguait pour chaque lot une phase de conception, et une phase de réalisation.

Composition des groupements

Suivant les dispositions de l'avis d'appel à la concurrence, les groupements devaient réunir :

- ◆ une entreprise de génie civil, mandataire de l'équipe de conception-réalisation ;
- ◆ une entreprise de charpente métallique, qui pouvait assurer les prestations du lot accessoire n° 1 ;
- ◆ deux bureaux d'études spécialisés l'un en géotechnique, et l'autre dans le domaine des grands ouvrages d'art, chargés des prestations du lot accessoire n° 4. Le second pouvait être intégré ou non à une entreprise de réalisation, mais il devait comprendre au moins un spécialiste environnement ;
- ◆ un architecte et un paysagiste, chargés des prestations du lot accessoire n° 3.

Modalités du jugement des offres

Pour le choix du lauréat, la personne responsable du marché prend l'avis d'un jury, chargé d'analyser les propositions et d'émettre un avis motivé. Le jury est assisté par un comité technique. Il peut procéder à l'audition des concurrents de son choix. La composition du jury et du comité technique n'est pas communiquée aux concurrents. Les séances de travail du jury ne sont pas publiques. Les procès verbaux de ses délibérations et ses avis ne sont pas rendus publics.

Les concurrents non retenus qui ont présenté un dossier complet peuvent recevoir une indemnité variable en fonction du classement de leur offre. Le maître d'ouvrage, après avis du jury, décide du montant de ces indemnités.

Critères de jugement des offres

Les offres ont été jugées d'après les critères suivants, classés par ordre de priorité décroissante à l'article 8 du règlement du concours :

1. Valeur technique du projet :

- ◆ adéquation aux dispositions du programme, du C.C.T.P. et des pièces techniques générales,
- ◆ conception et conditions de réalisation des fondations,
- ◆ optimisation de la structure,
- ◆ simplicité d'entretien et exploitation sous conditions hivernales,
- ◆ respect des objectifs du programme ;

2. Montant de l'offre ;

3. Valeur administrative de l'offre :

- ◆ respect des dispositions du règlement du concours, du C.C.A.P. et du C.C.C.G ;

4. Qualité architecturale et insertion paysagère de l'ouvrage ;

5. Planification et programmation des études et travaux ;

6. Références des sous-traitants désignés ;

7. Sécurité et respect de l'environnement, aussi bien en phase travaux qu'en phase exploitation de l'ouvrage.

Calendrier de la consultation

L'avis d'appel public à la concurrence est paru en octobre 2001. La décision d'agrément des candidats par le maître d'ouvrage est intervenue en mars 2002. Le règlement du concours a été transmis aux cinq concurrents retenus en avril 2002, avec le dossier de concours. La date de remise des offres a été repoussée en juin 2002. Quatre offres (sur les cinq retenues), présentées par des groupements conduits par les entreprises mandataires Campenon Bernard, GTM, Bouygues et Eiffage, ont été finalement reçues. Le groupement conduit par l'entreprise Razel s'est excusé.

L'ouverture des plis a eu lieu à Paris, en juin 2002. Des questions complémentaires destinées à préciser le contenu des offres ont été posées aux concurrents en juillet 2002, pour une réponse en août 2002.

Le rapport du comité technique résumant l'analyse des quatre offres reçues a été adressé aux membres du jury par le maître d'ouvrage en décembre 2002. Au terme de cette analyse, et après avis du jury réuni en décembre 2002, les offres des groupements conduits par Campenon Bernard et par Eiffage ont été écartées.

L'examen des offres a montré que des investigations complémentaires étaient indispensables, afin d'éliminer les incertitudes que la géologie très particulière du site laissait subsister quant au respect des coûts et des délais d'exécution annoncés par les concurrents. C'est pourquoi le maître d'ouvrage, en février 2003, a invité les deux concurrents restants à définir les investigations complémentaires nécessaires pour minimiser les risques liés à l'interaction des ouvrages et du sol, tant pendant leur construction que pendant leur exploitation.

Deux marchés négociés pour la réalisation de ces

investigations complémentaires ont été signés avec les groupements GTM et Bouygues.

En outre, un questionnaire a été adressé à chacun d'eux par le maître d'ouvrage en février 2003, qui fixait également la remise des offres fiabilisées, après résultats des campagnes géotechniques complémentaires, à mi-juillet 2003.

Au vu des conclusions du comité technique, le jury réuni en septembre 2003 a proposé à la personne responsable du marché de retenir l'offre du groupement conduit par GTM. Cette décision a été entérinée par la commission consultative des marchés d'octobre 2003 (figure 4).

Analyses géologiques et géotechniques détaillées

Rappel

Sur les quatre groupements qui ont répondu à cet appel d'offres conception-réalisation deux grands types d'ouvrages ont émergé des propositions :

- ◆ portées longues (190 à 260 m) entre appuis limités en nombre et implantés hors emprise du glissement, avec fondations profondes ;

- ◆ portées limitées à 110-120 m entre appuis plus nombreux et implantés dans l'emprise du glissement, avec fondations profondes protégées par une enceinte.

Les questions principales soulevées par l'analyse critique des données géotechniques fournies et les réponses apportées par les groupements sont :

- ◆ maîtrise et contrôle de l'artésianisme, décharge ou non de cette nappe captive pour réalisation des fondations profondes par puits ? Influence de cette décharge sur le comportement du dépôt (ralentissement de la progression du glissement, tassements engendrés ?) ;

- ◆ degré de surconsolidation du dépôt argileux suivant la profondeur et possibilité de fondations semi-profondes après décharge de la nappe ;

- ◆ évolution et limite de l'emprise potentielle du glissement et impact sur les fondations ;

- ◆ choix de l'implantation des fondations hors de l'emprise du glissement ou dans le glissement avec protection par une jupe ;

- ◆ techniques de réalisation des fondations profondes par battage de profilés métalliques sans décharge de la nappe captive ou tubage à l'avancement laissé en place avec décharge de cette nappe ;

- ◆ profondeur des fondations implantées dans l'axe du remplissage fluviolacustre, soumise à aléa fort du fait d'un approfondissement rapide du rocher vers le centre du projet et l'axe de la vallée.

Les critères de choix du ou des groupements pour l'étude d'APOA ont une forte composante liée à la prise en compte du contexte géotechnique dans son ensemble et à la réduction des aléas par le choix de solutions avancées.

Comme abordé dans le paragraphe précédent, pour concourir jusqu'à l'APOA, deux groupements ont

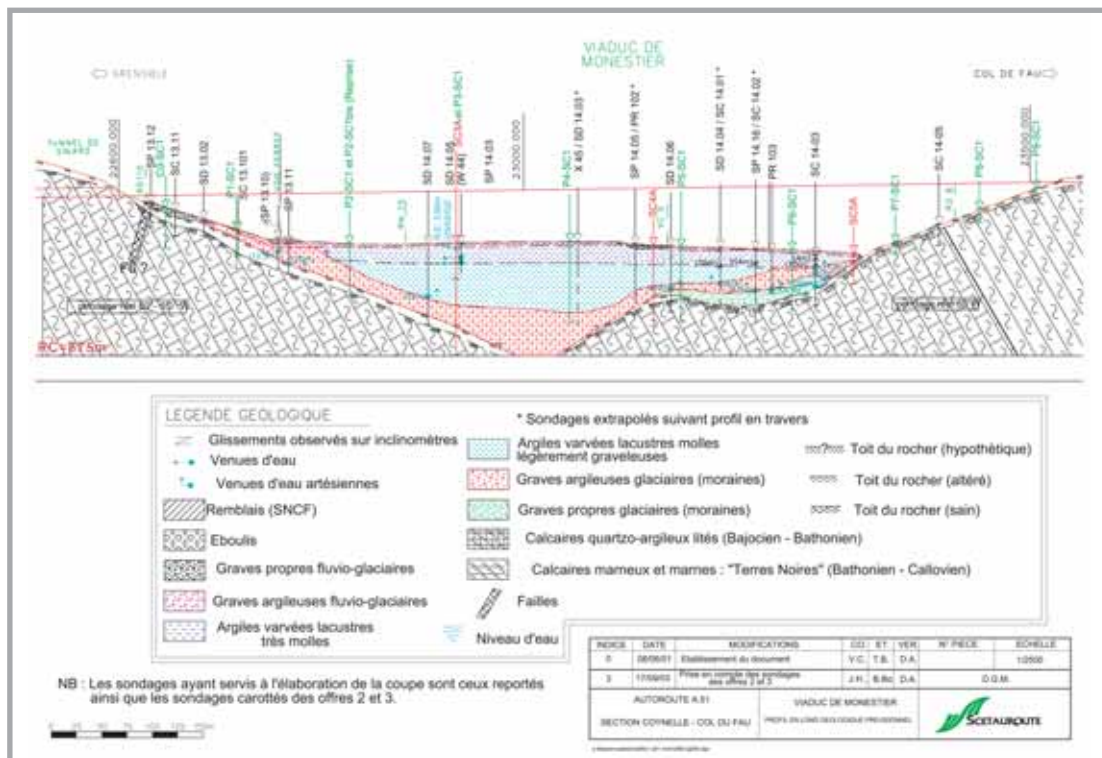


Figure 4
Profil en long géotechnique prévisionnel
Projected geotechnical longitudinal profile

Appui	Carottage	Pressiomètres	CPT + u	Destructif	Essai de pompage	Puits	Cross-Hole
P3	1 80.0 m + 11 EnR	1 71.8 m + 38 essais	1 64.5 m	1 15.2 m + piézo			2 forages de 80 m + SC équipé
P4	1 81.0 m + gamma-ray + 10EnR	1 70.3 m + 36 essais	1 60.0 m	Piézo de 15 m			
P5	1 74.0 m + gamma-ray + 1 EnR + piézo de 40 m	1 60.0 m + 19 essais	1 35.5 m	5 Piézo de 50.8/49.0 m /50.6 m /50.9/45 m	3	1 forage de 50 m	
P6	1 59.0 m + gamma-ray + 1 EnR	1 58.6 m + 36 essais	1 19.7 m	2 Piézo de 45.0 m Inclino de 48.2 m			

EnR = Prélèvement d'échantillon non remanié.
CPT + u = Sondage pénétrométrique au piézocône.
Piézo = Tube piézométrique ouvert.
Inclino = Tube inclinométrique.

Tableau I
Campagne des reconnaissances complémentaires du groupement GTM
Additional reconnaissance campaign of GTM consortium

été retenus pour affiner les deux solutions types et apporter au maître d'ouvrage les éléments tangibles et les réponses finales pour justifier son choix.

Les campagnes de reconnaissances complémentaires proposées ont été réalisées, notamment au droit des appuis de leur projet, par les deux groupements encore en lice : groupement GTM et groupement Bouygues.

La reconnaissance des argiles par le groupement GTM

Le groupement GTM, avec l'appui du BE géotechnique Mécasol a réalisé pour la reconnaissance des appuis dans l'argile les sondages suivants avec indication de leur profondeur (tableau I).

Les résultats principaux au droit des piles P3 et P4

Pour ces deux piles, qui sont implantées en amont du glissement, le groupement a proposé une so-

$$Q = [(q_t - \sigma_{v0}) / P_a] [(P_a / \sigma_{v0}')^n]$$

$$F = [f_s / (q_t - \sigma_{v0})] \times 100\%$$

- 1 Sols sensibles
- 2 Sols organiques
- 3 Argiles : argile limoneuse à argile
- 4 Mélanges limoneux : limon argileux à argile limoneuse
- 5 Mélanges sableux : sable limoneux à limon sableux
- 6 Sables : sable propre à sable limoneux
- 7 Sable graveleux à sable dense
- 8 Sable très rigide à sable argileux
- 9 Matériel très rigide et très fin (très surconsolidé ou cimenté)

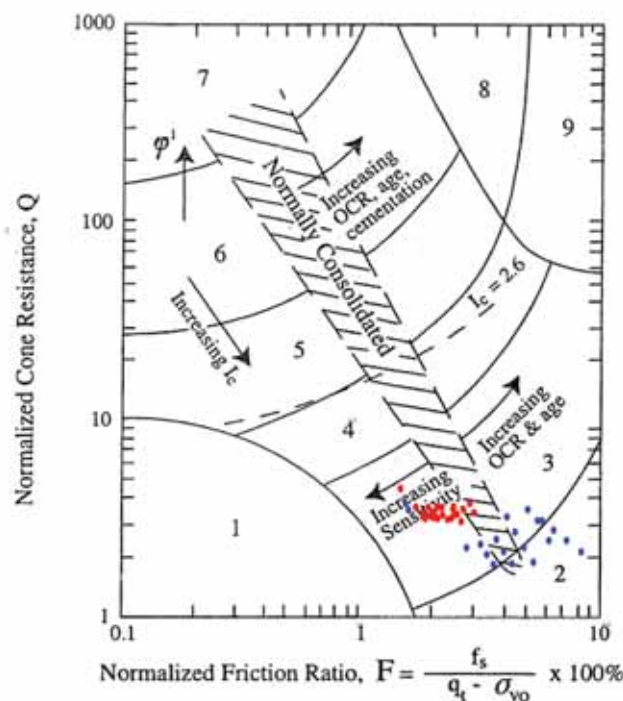


Figure 5
Application
du diagramme (F, Q)
Application
of diagram (F, Q)

-Position des couples (F, Q) pour la pile P3
-z < 20m : figuré bleu
-z > 20m : figuré rouge

Photo 6
Terrassement
P3
Earthworks
P3



lution de fondation semi-profonde qui intéresse les couches "superficielles" d'argiles varvées, sur une épaisseur de 30 à 35 m environ.

La solution retenue pour ces deux piles consiste à enlever un volume important d'argiles varvées dans une enceinte en paroi moulée et à lui substituer un volume vide. Les charges sont alors reportées en fond de l'enceinte et doivent être équivalentes au poids des terres enlevées pour limiter les tassements des argiles molles.

En effet, pour la pile P3, la résistance de pointe totale q_T au piézocône est très faible passant de 0,25 MPa à 2 m de profondeur à 0,8 MPa à 18 m, puis de 1 MPa à 18,5 m à 2 MPa à 40 m et 3 MPa à 58 m.

Au-delà la présence de sable et blocs renforce q_T à des valeurs importantes, supérieures à 10 MPa.

La valeur du rapport de frottement, R_f %, varie de 4 à 2 de 2 m à 18 m, puis est de l'ordre de 2, classant ce sol, dans un diagramme (F, Q) (figure 5) :

- ◆ de 2 à 18 m, comme une argile limoneuse, localement surconsolidée ;

- ◆ de 18 à 58 m, comme une argile limoneuse normalement consolidée.

Le rapport de surconsolidation des argiles pour P3 est borné à des valeurs comprises entre 0,9 et 1,20, après l'analyse des résultats d'essais œdométriques.

Ces résultats sont aussi en partie transposables pour la pile P4.

L'interprétation des données pénétrométriques et œdométriques vis-à-vis du degré de surconsolidation a fait l'objet de débat entre les différents intervenants avec un enjeu important pour le choix des paramètres de calcul des tassements à long terme des piles P3 et P4.

Les argiles sont bien déclarées comme non liquéfiables sous l'action sismique retenue, et ce malgré leur consistance molle ; elles peuvent être, par contre, le siège de déplacements associés à l'action sismique qu'un calcul prend en compte (photos 6, 7, 8, 9 et 10).

Les résultats principaux au droit des piles P5 et P6

Ces piles implantées dans et en bord du glissement sont fondées sur pieux dans les moraines sous-jacentes. Pour annuler leur risque de cisaillement, le groupement réalise une jupe circulaire de 15,30 m de diamètre, en paroi moulée, enveloppant les pieux de fondation entre le T.N. et la profondeur du glissement qui est précisée à l'appui des données inclinométriques et de l'interprétation des résultats pénétrométriques.

Le tubage des pieux, gainés sur toute leur hauteur, sera mis en œuvre par louvoiment.

Une excavation du terrain argileux est effectuée, entre la jupe en paroi moulée et les pieux tubés et la semelle, calée sous le T.N.

Pour permettre et faciliter le forage et le bétonna-

ge des pieux, la décharge de la nappe captive dans les moraines grossières sous-jacentes est nécessaire.

L'essai de pompage réalisé confirme la possibilité de décharge de la nappe captive par puits, sachant que la charge mesurée à l'époque des essais n'était que de 5 m au-dessus du terrain naturel.

Une forte anisotropie de perméabilité conduit à une implantation optimale des puits de décharge pour une bonne efficacité spatiale.

Ces puits permettront de faire chuter la charge d'eau dans les moraines à la cote du T.N., avec comme conséquence l'accroissement de la contrainte effective moyenne et un tassement supplémentaire de consolidation primaire, et secondaire avec frottement négatif sur les pieux, mais une amélioration locale de la résistance au cisaillement. Par ce procédé, le groupement écrête les surpressions interstitielles dans les argiles.

L'eau qui débitera des puits de décharge, sera recueillie et évacuée par gravité au Fanjaret.

En corollaire ces puits de décharge serviront également à réduire fortement l'occurrence de glissement dans la zone de P5/P6, mais pour l'instant sans maîtrise totale du phénomène.

Vis-à-vis du glissement, la réduction voire l'annulation de l'artésianisme au niveau actuel pendant la reconnaissance, est une condition nécessaire pour garantir un déplacement faible lors de l'action sismique (photos 11, 12 et 13).

La reconnaissance des argiles par le groupement Bouygues

Elle a fait l'objet d'un programme complet établi avec le concours du BE géotechnique Sage, par appui, avec instrumentation vis-à-vis de la distribution de pressions interstitielles par cellules de pression interstitielle (CPI) et des déplacements horizontaux par inclinométrie. Toutefois, le MO a passé commande d'une reconnaissance plus réduite pour répondre au mieux aux questions soulevées de faisabilité et d'incidence sur les avoisinants au stade de l'APOA.

Cette reconnaissance s'est concentrée principalement, dans la limite du temps de reconnaissance dont disposait le groupement, sur les conditions de conception-dimensionnement et de réalisation des appuis des piles P3 et P4 par pieux métalliques battus, avec un essai de battage sur chaque site engageant la faisabilité de la solution proposée.

Le choix des techniques de réalisation des piles **P3** et **P4** intègre la présence de nappes artésiennes, qui peuvent être le siège de pressions très fortes, interdisant la réalisation de pieux forés, de barrettes ou de micropieux sans décharge de la nappe captive, décharge à laquelle s'est refusé le groupement. La reconnaissance a fait l'objet respectivement pour P3 et P4 :

◆ d'un forage carotté de 100,80 m et 79,50 m de profondeur ;



Photo 7
Les argiles molles
du Trièves

*The soft clays
of Trièves*



Photo 8
Inclusions
métalliques

*Metallic
inclusions*



Photo 9
Site P3/P4
Site P3/P4



Photo 10
Semelle
de fondation P4
Foundation
slab P4

Photo 11
Fondation P5
Foundation P5



Photo 12
Site
P5/P6
Site
P5/P6



Photo 13
Vue de P5
View of P5



- ◆ d'un forage pressiométrique de 90 m et 70 m ;
- ◆ de quatre pénétrètres statiques de 52 à 65,50 m et de 44 à 48 m de profondeur, avec quelques mesures de dissipation de la pression interstitielle ;
- ◆ d'essai de battage de pieu métallique HP 400 (176 kg/m) jusqu'à 85,25 m en P3 ;
- ◆ d'essai de battage de deux pieux métalliques HP 400 (176 et 213 kg/m) jusqu'à 46,75 et 48,00 m en P4.

Elle est donc très complète et toutes les données sont interprétées en regard des essais pressiométriques, pénétrométriques, montrant la possibilité de réalisation des pieux et d'assurer la reprise des charges verticales pour les profondeurs de refus après surbattage de l'ordre de 5 000 kN. Un essai de chargement statique permettrait de préciser la capacité portante définitive et le frottement latéral au stade du projet d'exécution.

Pour P3, à noter :

- ◆ le toit irrégulier de la moraine ;
- ◆ l'absence de remontée d'eau le long du fût ;
- ◆ la dissipation de la surpression interstitielle en une journée avec une augmentation du frottement latéral

Pour P4, à noter :

- ◆ le toit du rocher rencontré à 48 m de profondeur, permettant une assise correcte de cette fondation profonde ;
- ◆ une absence d'artésianisme, à confirmer toutefois, et de remontée d'eau le long du fût ;
- ◆ la dissipation de 70 à 80 % de la surpression interstitielle en 2 heures avec une augmentation significative du frottement latéral.

Par rapport aux interrogations émises par le MO et le CE, les réponses sont :

- ◆ les pieux battus sont faisables compte tenu de la présence des argiles molles ;
- ◆ il n'y pas d'écoulement le long du fût mais un renforcement à terme du frottement latéral ;
- ◆ les pieux ne seront soumis aux frottements négatifs que si la décharge est hydraulique et significative.

L'aléa d'un glissement d'ensemble

Les conditions sont actuellement réunies pour définir une potentialité de glissement dans la vallée du Fanfaret au droit du projet :

- ◆ présence d'argiles litées de consistance molle ;
- ◆ présence d'une nappe captive avec forte charge locale dans ou sous les argiles ;
- ◆ pente naturelle faible mais significative.

L'observation actuelle par les indices de surface et les résultats inclinométriques est un glissement d'axe sud-est/nord-ouest traversant le tracé de l'ouvrage sur une largeur de 185 m et à une profondeur de 20 m.

La profondeur de cette surface reste en accord avec la géométrie du site et avec l'analyse de stabilité d'un glissement quasi-plan vers l'aval avec la char-

ge mesurée de la nappe captive sous-jacente dans les moraines latérales.

Les mouvements sont un déplacement d'ensemble d'une masse de sol sur une zone de cisaillement d'épaisseur métrique. Ces mouvements sont, sur la période d'observation de ces cinq dernières années, lents (1 à 5 mm/an), sans doute en correspondance avec un facteur de sécurité légèrement supérieur à 1,2, avec temporairement sous l'action déstabilisatrice d'une montée rapide de la charge d'eau, une valeur plus faible de ce facteur, mais qui reste supérieure à 1, réactivant le glissement à faible vitesse.

Du point de vue de la mécanique des sols, l'occurrence d'un glissement plus profond n'apparaît pas probable, avec les mêmes données géotechniques et géométriques.

L'extension des zones en glissement est appréciée en l'absence de données de mesures de déplacement par les désordres visibles en surface et la morphologie du site.

Cette extension probable est, d'après la transcription de ces données dans les rapports, notes et plans fournis, sur plus de 240 m sur le tracé de l'ouvrage et sa limite supérieure amont vient tangenter le tracé sur une longueur de 300 m.

La régression d'un glissement actif jusqu'à venir entrer en interaction avec les fondations de l'ouvrage est-elle envisageable ?

Plusieurs scénarii sont alors possibles pour examiner ce point. Les nappes actuellement identifiées ont des niveaux assez aléatoires non connus dans le temps et ce sont elles qui génèrent la réactivation du glissement d'ensemble.

Le scénario de base, le plus probable, est de considérer, en l'absence d'intervention sur les nappes et de variation significative de leurs niveaux par rapport à ceux de la période de mesure, la poursuite du glissement lent (100 à 500 mm au bout de 100 ans, la durée de vie de l'ouvrage) sans extension significative au-delà de ce qui est reconnu.

En effet, dans cette situation les niches d'arrachement ont des hauteurs inframétriques à métriques déstabilisant que localement la limite actuelle du glissement, sans régression notable.

Les fondations situées à l'intérieur de la zone de glissement actuel doivent être conçues pour satisfaire à ces déplacements horizontal et vertical associés et les autres ne sont pas à protéger dans ce cas.

Un autre scénario à envisager en concomitance avec l'observation de l'évolution récente climatologique voire sismique, est une charge d'eau dans les nappes captives plus importante et au sein des argiles autres que celles "observées" pendant la durée de mesures inclinométriques.

Là, le glissement peut s'accélérer, les déplacements s'amplifier et l'extension régresser et atteindre la zone d'influence des fondations de l'ouvrage.



Photo 14
Vue aérienne depuis le nord vers le sud
de la vallée du Fanjaret

*Aerial view of Fanjaret Valley
from North to South*

Dans cette hypothèse, il faudrait dès maintenant envisager la protection de tous les appuis concernés à une profondeur de l'ordre de 15 à 20 m.

D'autres scénarios de reprise de glissement, plus en aval et activant le glissement dans la zone de l'ouvrage, seraient plutôt à envisager à très long terme, en l'état de nos connaissances du contexte géologique.

Pour s'affranchir au mieux en l'état des connaissances de la réactivation du glissement, il est préconisé de maîtriser d'abord le niveau de cette nappe avec son écrêtage pour conserver un facteur de sécurité d'au moins 1.2, c'est-à-dire qu'il faut impérativement, non seulement conserver la situation initiale, mais l'améliorer et surtout la contrôler.

Pour cela la connaissance des conditions hydrogéologiques et la surveillance sont indispensables au moyen :

- ◆ de piézomètres avec mesures de pression par capteur électrique avec enregistrement en continu dans la moraine latérale ;

- ◆ de cellules de pression interstitielle implantées dans les argiles litées, avec enregistrement en continu.

Le suivi des mouvements du sol de fondation est nécessaire :

- ◆ à l'emplacement de chaque appui concerné, implanté sur ou dans les argiles litées ;

- ◆ en amont et en aval du tracé, avec mesure après chaque montée en charge de l'eau mesurée.

Enfin, il apparaît nécessaire de tester dès que possible la décharge par puits de la nappe en l'écrêtant uniquement au niveau du sol et pouvoir apprécier très vite la possibilité de maîtriser le phénomène d'alimentation (photo 14).

Le projet d'exécution

Le maître d'ouvrage a retenu finalement après jury les propositions techniques du groupement GTM avec les conditions de suivi et surveillance du glissement et de la piézométrie qui viennent d'être énoncées pour établir l'APOA puis le projet d'exécution.

Photo 15
Photomontage
viaduc

Photomontage
of the viaduct



Les études de détails, suite aux reconnaissances complémentaires d'APOA ont permis de caler les éléments géométriques du projet de fondations dans les argiles, les paramètres géomécaniques de dimensionnement, comme par exemple les caractéristiques de cisaillement :

- $\varphi' = 24^\circ$
- $c' = 5$ kPa de 0 à 18 m, argile légèrement surconsolidée,
- $c' = 0$ de 18 à 55 m, argile normalement consolidée,

et les modules de déformation avec des valeurs en fourchette dans un rapport de 1 à 2.5.

A été aussi recalée la cote du glissement au droit des piles P5 et P6 pour préciser la longueur des parois moulées constituant la jupe de protection des fondations sur pieux.

Pendant les travaux préliminaires, le rabattement par puits s'est avéré efficace; la nappe n'est plus artésienne autour de P6 et le niveau d'eau reste en concordance avec le forage de décharge le plus bas, en aval de la plate-forme de travail.

Toutefois des déplacements du sol ont été enregistrés suite à ces travaux de drainage, nécessitant un renforcement des mesures piézométriques et inclinométriques pendant les phases de travaux.

Caractéristiques de l'ouvrage retenu (photo 15)

Géométrie

Longueur : 860 m, largeur utile : 10, 40 m, surface brute : 10215 m², utilisation bidirectionnelle à l'ouverture de la section Coynelle - Col du Fau.

Neuf travées (70 + 5 x 110 + 100 + 80 + 60).

Dix appuis dont huit piles intermédiaires variant de 25 à 55 m de hauteur.

Fondations

P5 - P6 : présence d'argiles très molles (varvées du Trièves), nécessité de protéger les pieux vis-à-vis des déplacements d'argiles par des enceintes périphériques en paroi moulée de 16,90 m de diamètre.

P5 : 12 pieux Ø 1 400 en béton gainé de 50 m de profondeur fondés sur les marnes calcaires.

P6 : 11 pieux Ø 1 400 en béton gainé de 45 m de profondeur fondés sur les marnes calcaires.

P3 - P4 : présence d'argiles grises sous les argiles varvées supérieures, nécessité de renforcer l'assise des semelles de fondation en battant 61 profilés métalliques de type HEA 300 pour limiter le gonflement et le tassement des argiles, réalisation d'enceinte en paroi moulée de 21,60 m de diamètre et de 21,75 m de longueur, création de cellule creuse en béton armé sous les semelles de fondation pour décharger le sol porteur en équivalence de la masse apportée par la structure.

C0 - C9 - P1 : pour chacun des appuis, deux puits marocains de 4,00 m de diamètre, longueur 6,00 m sous les culées et 14,00 m sous P1.

P2 : 6 pieux de 1 500 m de diamètre, de 50 m de profondeur ancrés dans les marnes calcaires.

P7 - P8 : semelles superficielles de 7 x 11,50 x 2,50 fondées sur les marnes calcaires.

Piles

Deux fûts creux à section ovoïde reliés en tête par une traverse de 7 m de hauteur et renforcés à leur

base par un raidisseur oblong pouvant atteindre 10 m de hauteur.

Les fûts de pile sont réalisés par levées de 3,50 m.

Tablier

La structure recherchée est la plus légère possible, pour ne pas surcharger les fondations et la moins opaque possible pour réduire le barrage visuel à sa plus simple expression. Ainsi l'ouvrage retenu est une structure mixte constituée d'une ossature métallique à deux poutres de hauteur constante de 3,00 m à laquelle sont associés des bracons métalliques appuyés en tête de chaque pile et encastrés sous les poutres métalliques.

L'ossature métallique est lancée de chacune des deux extrémités de l'ouvrage. La partie courbe au nord (rayon 1 320 m) d'environ 350 m de long sera assemblée par soudage sur une estacade provisoire entre CO, P1 et lancée en neuf phases.

La partie rectiligne au sud d'environ 510 m de long sera également assemblée par soudage et lancée en cinq phases depuis la plate-forme autoroutière. Après mise en place des poutres à leur emplacement définitif, les bracons viennent descendre les charges en tête de chaque pile et la dalle en béton de roulement est réalisée en assurant la liaison avec les poutres par goujonnage et sa continuité par clavage.

Cadre de l'intervention du CETE de Lyon

L'intervention du CETE de Lyon - LRPC s'est déroulée en trois phases pour apporter son concours extérieur et son expertise géotechnique au maître d'ouvrage :

- ◆ participation à l'analyse des dossiers de justification des offres des quatre groupements concurrents avis sur la prise en compte du contexte géotechnique pour la présentation aux différents comités techniques créés pour élaborer une analyse de synthèse pour les jurys ;
- ◆ avis sur la prise en compte du contexte géotechnique après reconnaissance réalisée par les deux groupements en lice (GTM et Bouygues) ;
- ◆ contrôle extérieur du maître d'ouvrage pour la partie géotechnique des travaux (soutènements, fondations, suivi du glissement) et recommandations à l'intention de l'exploitation future de l'ouvrage.

ABSTRACT

A51. Coynelle - Col du Fau.
Encounter with Trièves
clays

J. Martin, D. Allagnat, Ch. Chapeau

After a brief general description of this motorway section, this article considers more specifically the presence of the famous so-called "Trièves" stratified varve clays.

These clays are found in particular on two sites on this exceptional project. The authors have endeavoured to describe them geologically and to summarise the technical solutions employed to pass through them.

The general layout of this mountain motorway project unveils over a short length the presence of a fine range of remarkable engineering structures, with a tunnel, a viaduct and on either side two continuous sections, with 46,000 sq. m (including about 15,000 sq. m of earth cuts) of retaining walls, the Trièves clays, making this truly an exceptional section.

The contracting authority for this project is AREA, Construction Department, which entrusted project management to Sctauroute.

RESUMEN ESPAÑOL

A51. Coynelle - Puerto de Fau. Presentación de las arcillas del Trièves

J. Martin, D. Allagnat y Ch. Chapeau

Tras una presentación general compendiada de este tramo de autopista, se presenta con mayor detalle en este artículo la presencia de las famosas capas de arcillas compactadas denominadas "del Trièves".

Dos emplazamientos de esta operación excepcional ponen en evidencia estas arcillas. Los autores se han esforzado por describir geológicamente y resumir las soluciones técnicas implementadas para salvar las dificultades. La presentación general de esta operación relativa a una autopista de montaña viene a demostrar sobre una longitud reducida la presencia de un magnífico conjunto de estructuras, con un túnel, un viaducto y por ambas partes dos secciones pero no tan corrientes como se las denominan de forma habitual, con 46 000 m² (de los cuales uno 15 000 m² de desmonte) de paredes de

contención, las arcillas del Trièves, que la califica justamente de sección excepcional.

La empresa AREA actúa a título de entidad contratante en esta operación y su Dirección de la Construcción ha encargado la dirección del proyecto a Sctauroute.

Le confortement des

L'article décrit les travaux de consolidation de carrière dans l'ossuaire municipal (secteur port Mahon) de Paris.

Le chantier consiste à conforter une galerie reliant deux étages d'exploitation d'une ancienne carrière. Cette consolidation comporte six renforts réalisés selon une méthode traditionnelle de piliers de voûtes en maçonnerie.

Ces travaux permettront une extension de la zone des catacombes ouverte au public.



Vue des voûtes maçonneries à partir de l'étage supérieur
View of the masonry vaults from the upper level

grossier, descendrie d'une longueur de 20 m, d'une largeur de 1,50 m et d'une hauteur de 2,50 m à 5,20 m, le Laboratoire d'essais de la Ville de Paris a effectué des mesures in situ (vitesse du son et scléromètre), pour déterminer l'origine de la dégradation. L'expertise a conclu à un sous-dimensionnement des piliers de soutènement du ciel de carrière.

Le renforcement consiste donc à créer de nouveaux piliers sur lesquels viendront s'appuyer des voûtes en moellons. Le bureau d'études Sotraisol Fondations a mis au point une technique de dimensionnement de cet ouvrage.

■ DIMENSIONNEMENT

Le dimensionnement de cet ouvrage comporte quatre calculs distincts :

- ◆ contrainte dans la voûte ;
- ◆ contrainte dans le pilier ;
- ◆ poinçonnement du sol de fondations ;
- ◆ stabilité du pilier.

Contrainte dans la voûte

L'épaisseur de cette voûte cylindrique n'est pas négligeable devant le rayon. Les contraintes ne sont donc pas constantes le long d'un rayon, et on ne peut donc pas appliquer la formule concernant les voûtes minces.

L'étude de l'équilibre et de la déformation d'un petit élément de l'ouvrage ont conduit aux solutions suivantes en désignant par :

- r : rayon intérieur ;
- R : rayon extérieur ;
- P : pression à l'extrados ;
- x : le rayon de l'élément calculé ;
- σ : contrainte normale radiale ;
- τ : contrainte normale tangentielle.

Les contraintes de compression sont affectées du signe +.

$$\sigma = p \frac{R^2}{R^2 - r^2} \left(1 - \frac{r^2}{X^2} \right)$$

$$\tau = p \frac{R^2}{R^2 - r^2} \left(1 - \frac{r^2}{X^2} \right)$$

Remarques

Puisque $r < x < R$, les contraintes sont toujours positives. Les joints sont donc toujours comprimés.

■ GÉNÉRALITÉS

Les catacombes de Paris (qu'il vaudrait mieux appeler ossuaire municipal) font l'objet de travaux de consolidation confiés à la société Sotraisol Fondations par le maître d'œuvre (l'Inspection générale des carrières) dans le cadre de son contrat d'entretien, et sous maîtrise d'ouvrage de la direction des Affaires culturelles de la Ville de Paris.

Un peu d'histoire

Le Conseil d'Etat, par Arrêt du 9 novembre 1785, prononça par mesure d'hygiène, la suppression et l'évacuation du cimetière des Innocents (près de Saint-Eustache dans le quartier des Halles).

Ce sont d'anciennes carrières dites de la "de la Tombe-Issoire" qui furent choisies pour déposer les ossements.

Les catacombes devinrent l'ossuaire de tous les cimetières de Paris, et furent visitées par un public croissant à partir du début du XIX^e siècle. De nos jours on compte chaque année plusieurs dizaines de milliers d'entrées.

L'objet des travaux

En 1996, suite à la chute de blocs dans la galerie qui relie les deux étages d'extraction du calcaire

DIMENSIONS DE L'OUVRAGE

- Hauteur des piliers : 2,33 m
- Hauteur des piliers + voûtes : 3,45 m
- Rayon de la voûte : 0,71 m
- Largeur entre 2 piliers : 1,42 m
- Epaisseur entre plafond et bas de voûte : 0,40 m

catacombes de Paris

Jean-Louis Stouvenel



DIRECTEUR TECHNIQUE
Sotraisol

Bernard Jean Antoine



CHARGÉ D'AFFAIRES
Sotraisol

La contrainte τ maximale est atteinte pour $x = r$ (à l'intrados de la voûte)

et vaut :

$$\tau = 2p \frac{R^2}{R^2 - r^2} \quad \text{en ce point, } \sigma = 0$$

Applications numériques

La pression p correspond à la pression des terres et aux surcharges soit $p = 280$ kPa.

Chaque voûte a une longueur de 1,20 m et soutient 2,40 m de galerie. La pression effectivement appliquée sur la voûte est donc de 560 kPa.

- $R = 1,12$ m

- $r = 0,74$ m

- $\tau = 2$ MPa

La résistance limite de la compression est estimée à 7,5 MPa.

Contrainte dans le pilier

Le pilier travaille en flexion composée sous l'effet de la poussée des remblais et de la pression des terrains de couverture.

Si la pression est nulle (cas le plus défavorable), le pilier subit une contrainte de traction de 0,2 MPa pour une contrainte limite de 0,8 MPa.

Cette contrainte s'annule dès que la charge verticale atteint 100 kN.

Glissement

La composante horizontale de la poussée des remblais tend à faire glisser le pilier sur sa base. Cette force est équilibrée par le frottement sur le calcaire. Avec un angle de frottement de 40° et une charge verticale limitée au poids propre du pilier, le coefficient de sécurité est voisin de 2.

■ RÉALISATION DU CHANTIER

L'accès du personnel s'effectue par un puits équipé d'un escalier d'une profondeur de 20 m ; un deuxième puits, utilisé pour l'approvisionnement des matériaux, a été aménagé rue René Coty. Les moellons et mortier sont acheminés jusqu'au lieu de travail par un réseau souterrain dont les parements sont constitués par des ossements de 6 millions de squelettes déposés dans les 780 m de



Galerie d'accès aux travaux de confortement
Gallery for access to consolidation work

galerie du quadrilatère constitué en surface par l'avenue René Coty, les rues Hallé, Dareau et d'Alembert dans le XIV^e arrondissement.

L'aspect définitif des travaux doit à la fois satisfaire les obligations techniques de soutènement et les exigences architecturales liées au caractère historique du site.

Ces travaux ont été entrepris par des équipes de puisatiers mineurs utilisant les méthodes de consolidation traditionnelle.

Les premières voûtes ont été réalisées dans la partie la plus haute de la descendrière. Les piédroits supportant les voûtes sont posés sur le banc de calcaire de l'étage supérieur. Compte tenu de la pente de la descendrière, les trois premières voûtes ont nécessité un terrassement de 2 m pour atteindre le banc de calcaire. La surface d'appui des piédroits a dû être nettoyée pour éliminer toute trace de bousin, filet tendre marneux, situé originellement entre deux bancs calcaires. Les piliers sont édifiés avec des moellons en provenance des carrières de l'Oise et hourdés au ciment CLK résistant aux eaux séléniteuses.

Après son exploitation, la carrière a été bourrée au moyen de remblais marneux, constitués par les stériles. Dans le temps, ce remblai s'est progressivement compacté sous l'effet de la charge apportée par le toit.

Le terrassement est effectué au marteau piqueur sur une profondeur de 0,8 m et 1,20 m de large. Cette excavation est étayée par la maçonnerie au fur et à mesure de son édification par passe de 1 m de hauteur et ceci jusqu'à la naissance des voûtes.



Détails des ossements
Bones in the Catacombs



Vue des voûtes maçonneries à partir de l'étage supérieur

View of the masonry vaults from the upper level

► Réalisation de la voûte

Compte tenu de l'exiguïté des accès et de la zone de travail, le gabarit faisant office de coffrage a été confectionné sur place. Il est entièrement réalisé en bois, ce qui permet une mise en place manuelle, et il repose sur un échafaudage pour son réglage.

L'épaisseur minimale de la maçonnerie est de 0,4 m. Le ciel n'étant pas horizontal, les voûtes ne peuvent donc pas être alignées, il a donc été nécessaire de décaler imperceptiblement leur implantation tout en respectant l'épaisseur minimale calculée.

Après le réglage contrôlé par l'IGC, maître d'œuvre de l'opération, on procède à la mise en place des moellons, placés radialement sur le gabarit de façon à garantir l'effet de voûte.

Les pierres sont hourdées (au mortier de ciment CLK dosé à 300 kg/m³) jusqu'à atteindre le ciel de carrière.

Le contact entre la maçonnerie et le toit de la galerie est soigneusement maté. En phase définitive un rejointoiement minutieux entre pierres assure la protection de l'ouvrage et améliore ainsi l'aspect esthétique valorisé par l'éclairage du circuit ouvert au public.

Appui des voûtes sur le banc calcaire
Vault support on the limestone bed



ABSTRACT

Consolidation of the Paris Catacombs

J.-L. Stouvenel, B. Jean Antoine

The article describes the quarry consolidation work in the municipal ossuary (Port-Mahon sector) in Paris.

The project involves consolidating a gallery linking two working levels of a former quarry. This consolidation comprises six reinforcements executed by a traditional method of masonry vault pillars.

These works will enable extension of the catacombs area open to the public.

RESUMEN ESPAÑOL

Consolidación de Catacumbas en París

J.-L. Stouvenel y B. Jean Antoine

En el presente artículo se describe las obras de consolidación de cantera en el osario municipal (sector puerto Mahon) en París.

La obra consiste en consolidar una galería que pone en comunicación diversos pisos de explotación de una antigua cantera. Esta consolidación incluye seis refuerzos ejecutados según un método convencional de pilares de apoyo de un arco en mampostería.

Estas obras permitirán una ampliación de la zona de catacumbas abierta al público.

Clermont-Ferrand Le nouveau tramway assure sa maintenance sur colonnes ballastées !

Igor Ponchart



RESPONSABLE
DU DÉPARTEMENT
AMÉLIORATION
DES SOLS
DE FONDATIONS
GTS

Dans le cadre de la construction de la première ligne de tramway de la ville de Clermont-Ferrand, l'entreprise GTS, spécialisée dans les travaux liés à la géotechnique, a réalisé l'amélioration des sols de fondations par colonnes ballastées du futur centre de maintenance du SMTC (Syndicat mixte des transports en commun de l'agglomération clermontoise).

La solution technique proposée a permis de réduire dans une forte proportion les tassements prévisibles dans les couches compressibles du sol en place, en les rendant compatibles avec les structures projetées. L'utilisation des colonnes ballastées a également permis, dans le cas précis, de prendre en compte les risques potentiels de liquéfaction des sols en cas de séisme, cette technique d'amélioration de sols étant particulièrement adaptée à cette problématique.

Peu de temps avant sa mort, en 1662, Blaise pascal, enfant de Clermont-Ferrand, créait à Paris le premier réseau de transports publics : les carrosses à cinq sols, à prix et itinéraires fixes. Il marquait là, sans le savoir, le début d'une longue histoire entre Clermont-Ferrand et les transports publics. Le tramway a doublement marqué cette longue histoire.

Le 7 janvier 1890, Clermont-Ferrand avait été la première ville de France (et la deuxième en Europe!) à mettre en service un tramway doté de la toute nouvelle invention que constituait la traction électrique par câble aérien. Ce tramway alors baptisé "Wattman" était une véritable révolution pour l'époque.

Après la Seconde Guerre mondiale, le tramway est peu à peu supplanté par l'autobus, dont l'emploi, plus souple, lui permet d'emprunter des itinéraires moins accessibles. C'est ainsi que le 17 mars 1956 la ville de Clermont-Ferrand retire du service le dernier tramway électrique encore en circulation et clôt le premier chapitre de l'histoire de ses transports publics.

L'agglomération clermontoise voit s'écrire aujourd'hui une nouvelle page de son histoire en ayant fait à nouveau le choix d'un tramway, cette fois-ci sur pneus, qui traversera la ville du nord au sud. Baptisée "Translohr", cette rame innovante à la pointe de la technologie actuelle, est guidée par un unique rail central.

Les travaux d'infrastructures nécessaires au fonctionnement de cette nouvelle ligne, prévoient la construction d'un centre de maintenance pouvant héberger et entretenir à la fois les nouvelles rames de tramway, mais aussi les autobus déjà en circulation dans l'agglomération clermontoise. Le complexe ainsi créé permettra au SMTC (Syndicat mixte des transports en commun de l'agglomération clermontoise) de centraliser l'ensemble de la maintenance de son réseau de transport sur une plate-forme



Le "Wattman" de Clermont-Fd en 1953

The "Wattman" of Clermont-Fd in 1953

de 6 hectares qui devra recevoir des bâtiments ateliers mécaniques tramways et bus, un bâtiment de remisage des tramways, des stations-service tramways et bus, des aires de lavage, des aires de stationnement bus ainsi qu'un bâtiment administratif et des bassins de rétention d'eaux pluviales. Les ouvrages ainsi projetés amèneront des charges importantes sur les sols en place pouvant atteindre 50 kPa (5 t/m²) en charges surfaciques et 1800 kN (180 t) en charges ponctuelles.

■ UNE SOLUTION TECHNIQUE ADAPTÉE À UN SOL TYPIQUEMENT AUVERGNAT !

Le site se trouve au nord de l'agglomération clermontoise et présente une géologie typiquement locale. Le substratum est constitué d'un complexe sédimentaire de nature argilo-marneuse fortement altéré en tête, recouvert et interpénétré par une série de sables et cendres volcaniques plus ou moins compacts. Cet ensemble est coiffé par une couche de surface constituée de colluvions argilo-limoneuses d'épaisseur variable.

L'analyse géomécanique de ces différents faciès a mis en évidence une forte aptitude de ces diffé-

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Surface d'ouvrages traités par colonnes ballastées : 15 000 m²
- Linéaire de colonnes ballastées : 14 000 ml
- Durée du lot fondations spéciales : 3 mois
- Nombre d'ateliers : 2 ateliers de colonnes ballastées et 1 atelier de préforage

Les ateliers de colonnes ballastées sous la neige

The ballasted column equipment under the snow



lastées. Au-delà de l'intérêt économique évident de la technique par rapport aux solutions plus classiques sur pieux, la mise en œuvre de colonnes ballastées est particulièrement adaptée pour traiter les risques de liquéfaction. En effet, outre son rôle de limitation des tassements par amélioration des caractéristiques mécaniques globales du sol d'assise (objectif de réduction du tassement absolu inférieur au centimètre), le réseau de colonnes ballastées constitue un véritable maillage de drains verticaux de grands diamètres, destiné à briser le développement des pressions interstitielles en phase de séisme.

Le dimensionnement réalisé pour les colonnes ballastées a donc tenu compte, en accord avec le bureau de contrôle Véritas, d'un certain nombre de mesures pratiques de réalisation, à travers l'application spécifique aux zones sismiques des nouvelles "Recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des colonnes ballastées sous bâtiments et ouvrages sensibles au tassement" (Soffons/Coprec version 2004), comme par exemple la réalisation en périphérie des ouvrages traités d'une ligne de colonnes ballastées de débord.

Le "Translohr" : mise en service prévue pour 2006

The "Translohr" : commissioning scheduled for 2006



► rentes couches à se déformer sous l'effet d'une charge, et ce, sur environ 6 m d'épaisseur.

Deux difficultés majeures s'imposaient pour l'amélioration de ces sols de fondations :

- ◆ la présence d'une couche intermédiaire (sables et cendres volcaniques) hétérogène, raide en tête, puis devenant très médiocre à sa base (module pressiométrique : $E_m \approx 2 \text{ MPa}$);

- ◆ un potentiel de liquéfaction très fort de ces mêmes sables, lorsqu'ils sont sous la nappe (reconnue vers 3 m de profondeur) en cas de séisme. La commune de Clermont-Ferrand est classée en zone sismique 1b.

La solution proposée, et retenue par le client, a consisté à construire les bâtiments en fondations superficielles sur un réseau de colonnes bal-

■ DES MOYENS ADAPTÉS À LA PROBLÉMATIQUE GÉOTECHNIQUE ET CLIMATIQUE DU CHANTIER

Outre la particularité sismique régionale, la présence d'une couche raide à mi-hauteur de traitement, a nécessité la mobilisation d'un atelier de préforage spécifique, travaillant à l'avancement pour assurer le rendement optimum des deux ateliers de colonnes ballastées mis en œuvre par GTS pour ce chantier.

Les dures conditions climatiques de l'hiver clermontois ont également mis en évidence l'intérêt de la technique, qui, contrairement à une solution par pieux ne permettant pas le bétonnage par temps très froid, n'est pas sensible aux intempéries et amène donc de meilleures garanties en terme de respect des délais. Les 15 000 m² de bâtiments ont ainsi pu être traités en 3 mois de temps en période hivernale particulièrement rude.

Enfin, la fourniture des matériaux constitutifs des colonnes ballastées a été assurée par une carrière locale du groupe Guintoli, qui a permis de garantir les cadences suffisantes pour l'approvisionnement du concassé 20/40 mm nécessaire à l'amélioration des sols.

■ UN SUIVI PERMANENT

Un programme d'essais de contrôle destiné à valider l'amélioration de sols a permis de suivre à

l'avancement l'obtention des résultats escomptés et le bon respect des objectifs. Des sondages presiométriques et pénétrométriques, ainsi que l'enregistrement électronique des paramètres de réalisation des colonnes ballastées ont été mis en œuvre et ont permis de réceptionner au fur et à mesure les différents ouvrages.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage
SMTC

Maître d'œuvre
Betlam

Entreprise générale
SOCAE Auvergne

Entreprise fondations spéciales
GTS

Bureau de sols
SIC Infra 63 - Alpha BTP

Bureau de contrôle
Véritas

ABSTRACT

Clermont-Ferrand. First tramway line. Maintenance for the new tramway is provided on ballasted columns!

I. Ponchart

As part of the construction of the first tramway line for the city of Clermont-Ferrand, GTS company, specialised in geotechnics-related work, carried out ballasted-column improvement work on the foundation soils for the future maintenance centre of the SMTC (joint public transport union for the Clermont-Ferrand urban area).

The proposed technical solution made it possible to reduce to a large extent the foreseeable subsidence in the compressible layers of in-situ soil, by making them compatible with the planned structures. The use of ballasted columns also made it possible, in this specific case, to allow for the potential risks of soil liquefaction in the event of an earthquake, this soil improvement technique being especially suitable for this problem.

RESUMEN ESPAÑOL

Clermont-Ferrand. Primera línea de tranvía. El nuevo tranvía permite su mantenimiento en columnas balastada...

I. Ponchart

Situándose en el marco de la construcción de la primera línea de tranvía de la ciudad de Clermont-Ferrand, la empresa GTS, especializada en las obras vinculadas con la geotécnica, ha realizado la mejora de los suelos de cimentación mediante columnas balastadas del futuro centro de mantenimiento del SMTC (Sindicato mixto de los transportes públicos de la aglomeración urbana de Clermont-Ferrand).

La solución técnica propuesta ha permitido reducir en una proporción muy significativa los asentamientos previsibles en las capas compresibles del suelo, mediante la obtención de su compatibilidad con las estructuras contempladas. La utilización de las columnas balastadas también ha permitido, en este caso preciso, integrar los riesgos potenciales de licuefacción de los suelos en caso de sismo, esta técnica de

mejora de los suelos es particularmente adaptada para dicha problemática.